

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Выпуск 22

**ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКИХ
И ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2005**

Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 22.
Исследования в области оптических и информационных систем. / Главный редактор д.т.н., проф. В.Н. Васильев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 188 с.

В выпуск включены статьи, освещающие концептуальные вопросы оптоинформатики, а также проблемы построения оптических и интеллектуальных информационных систем.

Издание выпуска поддержали:

- тематический план-задание Федерального агентства по образованию;
- ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы» Федерального агентства по образованию;
- Федеральная целевая научно-техническая программа Федерального агентства по науке и инновациям «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002–2006 гг.;
- гранты Российского фонда фундаментальных исследований;
- гранты Санкт-Петербурга в сфере научной и научно-технической деятельности.

ISSN 1819-222X

© Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики,
2005

РАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НАНОЧАСТИЦ ФТАЛОЦИАНИНА И ИХ СВЯЗЬ СО СТРУКТУРОЙ ПОЛИМОРФНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФОРМ

С.В. Бутянов, Ю.Э. Бурункова, И.Ю. Денисюк

Исследованы размеры наночастиц фталоцианина в зависимости от кристаллической модификации, а также изменения размеров наночастиц в течение 20 дней после синтеза. Обнаружено, что размеры кристаллических наночастиц фиксированы и не изменяются во времени. Размер наночастиц Mg-фталоцианина в β - форме – 2 нм, в χ - форме – 2,5 нм, что коррелирует с размерами элементарных ячеек кристаллической решетки соответствующих полиморфных форм. Высказано предположение, что нанокристалл образован двумя элементарными ячейками кристаллической решетки, и такое образование является стабильным. Наночастицы аморфной модификации, напротив, нестабильны, при хранении их размеры возрастают от 12 до 22 нм, что в результате приводит к выпадению коллоида.

Введение

Одним из наиболее значительных и важных достижений последнего десятилетия является синтез и исследование наноматериалов, наночастиц, квантовых точек и других наноразмерных объектов. Число публикаций по этому вопросу быстро растет. Имеются и первые примеры коммерческого применения наноматериалов.

Поскольку данная область науки начала всесторонне исследоваться относительно недавно, еще нет четкой классификации наночастиц. Можно, однако, выделить три различные группы наночастиц: наночастицы металлов, наночастицы неорганических соединений и органические наночастицы. Две первые группы изучены достаточно подробно: имеется обширная литература по их синтезу, оптическим и полупроводниковым свойствам, методам исследования. Напротив, наночастицы органических веществ исследованы значительно хуже. Имеется лишь несколько статей, касающихся синтеза и исследования наночастиц красителей фталоцианинового класса и некоторых других органических соединений [1–4].

На основе литературного анализа можно отметить, что в данной области знаний недостаточно исследованным остается вопрос о размерах органических наночастиц и методах их измерения, а также влиянии размерного параметра на проявление фотофизических эффектов. Известные методы исследования в электронном микроскопе и измерения малоуглового рентгеновского рассеяния здесь малопригодны: во-первых, органические наночастицы в значительной степени прозрачны для электронов и рентгеновских лучей, во-вторых, сильное воздействие, например, электронного пучка способствует их разрушению. Становится очевидным, что наночастицы лучше исследовать в той матрице, в которой они были синтезированы, а для их изучения использовать неразрушающие методы контроля.

Ранее авторами данной публикации были проведены исследования процессов образования и фазовых превращений наночастиц фталоцианинов при их синтезе в растворе [3, 4]. Были выбраны условия синтеза, обеспечивающие получение необходимой кристаллической модификации фталоцианина, показано, что наночастицы, стабилизированные полимерной матрицей, стабильны и их кристаллическая форма не изменяется в течение длительного времени. В то же время возможное изменение размеров наночастиц при их хранении и полиморфном преобразовании осталось практически неисследованным. Также не был исследован вопрос изменения размеров наночастиц в зависи-

мости от условий их синтеза и при длительном хранении как в коллоидном растворе, так и в виде сухого порошка.

В данной работе продолжено исследование наночастиц фталоцианинов в направлении изучения размерных параметров и их связи со структурой полиморфных кристаллических форм

Экспериментальные условия

В данной работе использовался фталоцианин магния (MgPc) фирмы H.W. Sands Corp.'s. Наночастицы фталоцианина синтезировались по методу, описанному в [4]. Метод основан на пересадении MgPc из раствора в диэтиламине. Выбором соответствующего растворителя обеспечивалось получение коллоидных частиц в одной из кристаллических форм (аморфной, β -форме или X-форме). Синтезированные наночастицы исследовались либо в виде исходного коллоидного раствора, полученного при осаждении, или переводились в инертный растворитель – толуол, для чего наночастицы осаждались из коллоидного раствора, промывались и высушивались на воздухе для удаления остатков реакционных растворов. После этого порошок наночастиц диспергировался в толуоле под действием ультразвука частотой 38 кГц. Полученный коллоидный раствор был прозрачным и стабильным.

Исследовались размеры образующихся наночастиц в коллоидном растворе, а также динамика изменения их размеров в течение суток. Также было исследовано изменение размеров наночастиц как результат их перевода в коллоидный раствор в толуоле. Во всех случаях измерялись спектры поглощения объектов измерений.

Для исследования размеров наночастиц была использована модификация метода динамического лазерного рассеяния, поскольку с его помощью можно не только определить размер частицы, но и узнать дисперсность исследуемых частиц по размерам. Метод не требует выделения исследуемых частиц из коллоидного раствора, и, следовательно, измеренные размеры оказываются наиболее близки к истинным размерам частицы.

Метод динамического лазерного рассеяния (ДЛР) [5] основан на измерении кинетики изменения интенсивности света, рассеянного коллоидным раствором малых частиц, в процессе изменения их концентрации в результате диффузии. Его сущность заключается в определении констант броуновского движения малых частиц по скорости их диффузии в жидкости. Затем, с учетом температуры и вязкости жидкости, по параметрам броуновского движения определяется размер диффундирующих частиц.

Сущность метода заключается в измерении некоторого параметра, пропорционального концентрации наночастиц. Это могут быть величины малоуглового рассеяния света, абсорбции света, если свет поглощается частицами, абсорбции рентгеновского излучения и т.д. Если частицы не окрашены, то обычно используют величину рассеяния света, в этом случае метод более универсален, но реализация его многократно усложняется. В нашем случае полупроводниковые наночастицы имеют интенсивные полосы поглощения в видимой области спектра, где растворители обладают окнами прозрачности. Это позволяет нам использовать абсорбцию света наночастицами для определения кинетики изменения их концентрации. Мы использовали теорию метода ДЛР при некоторой ее модернизации с учетом измеряемой величины – поглощения света. Далее мы будем называть использованный метод *методом определения размеров малых частиц по константам их диффузии в коллоидном растворе*.

Экспериментальная установка, реализующая данный метод, собрана по схеме, приведенной на рис. 1.

Кинетика поглощения света исследуемым образцом регистрируется фотометром. Он состоит из источника света – галогенной лампы накаливания, монохроматора для

выделения спектральной области, в которой экстинкция света исследуемых наночастицами наибольшая, фотоприемника – кремниевого фотодиода с широким спектром фоточувствительности, и запоминающего осциллографа, фиксирующего кинетику изменения поглощения света в кювете. Измерительная кювета изображена на рис. 2.

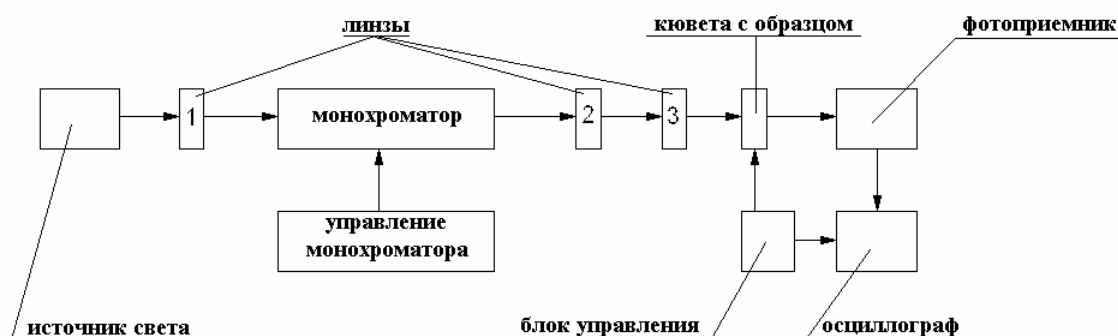


Рис. 1. Принципиальная схема установки

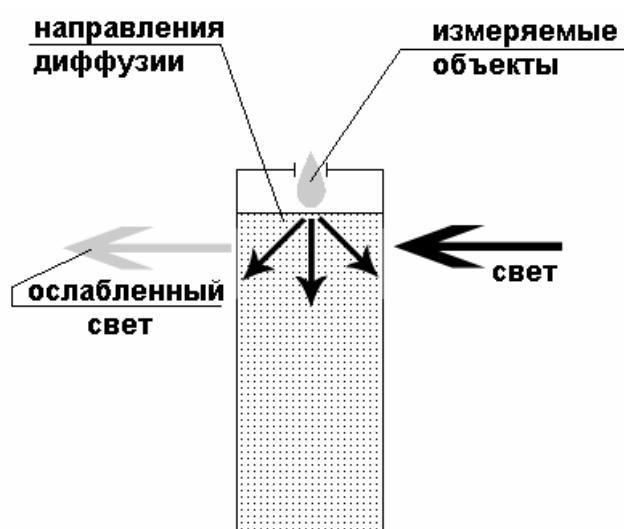


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной кюветы

Перед экспериментом в кювету наливался тот же растворитель, что и растворитель, содержащий наночастицы, поскольку важна одинаковая плотность растворителя с наночастицами и растворителя в кювете. Затем в центр кюветы вносилась капля, содержащая исследуемые частицы. В кювете создавался градиент концентрации наночастиц, что приводило к направленной диффузии наночастиц из точки их внесения (направление диффузии показано стрелкой) в объем. Если объем кюветы много больше объема капли, то можно считать, что в конечном (равновесном) состоянии концентрация наночастиц в кювете бесконечно мала, и приращением концентрации, обусловленным внесенной каплей, содержащей наночастицы, можно пренебречь. Если частицы поглощают свет, проходящий через кювету, то регистрация кинетики изменения оптической плотности в окрестности введенной капли отражает процесс диффузии наночастиц. Заметим, что для каждого типа частиц подбирался растворитель, в котором наночастицы могут находиться во взвешенном состоянии в виде коллоидного раствора достаточное для проведения эксперимента время. Область спектра, в которой осуществляется регистрация кинетических кривых, определялась на основании измерения спектров поглощения раствора. Устройство, дозирующее объем вещества (дозатор установ-

ки), обеспечивало выбрасывание одной капли исследуемой жидкости в заданный момент времени. Регистрация кинетической кривой обеспечивалась цифровым осциллографом.

Результаты и обсуждение

В исследуемом растворе при внесении капли исследуемого вещества формируется неоднородное распределение концентрации исследуемых наночастиц и наблюдается кинетика ее выравнивания за счет процесса диффузии. Диффузия малоразмерных частиц в коллоидном растворе определяется скоростью их броуновского движения – непрерывного хаотического движения малых частиц, взвешенных в жидкости, обусловленного их соударением с молекулами растворителя при тепловом движении. Интенсивность движения броуновских частиц зависит от их размеров, она возрастает с ростом температуры и уменьшением вязкости жидкости. Причиной броуновского движения являются флуктуации давления, оказываемого молекулами жидкости на поверхность малой частицы с разных ее сторон. Результирующая сила, действующая на частицу, постоянно изменяется во времени по величине и направлению, приводя ее к беспорядочному движению. Можно сделать предположение, что к движению малой сферической частицы в жидкости применима формула Стокса. Тогда, комбинируя формулу для подвижности с выражением Эйнштейна для коэффициента диффузии D [6] с учетом поглощения света в веществе, описываемого законом Бугера – Ламберта [7], и соотношения константы диффузии и концентрации растворенного вещества по закону Фика [8] и его трехмерного случая [9], получим:

$$c(x, y, z, t) = \sum A * \exp(-D * \pi^2 * (k^2 + m^2 + n^2) * t) * \sin(k\pi x) * \sin(m\pi y) * \sin(n\pi z),$$

где x, y, z – координаты точки в кювете, k, m, n – индексы суммирования, A – константа интегрирования. Решая полученную систему уравнений, можно найти коэффициент диффузии исследуемого образца. В результате получим конечную формулу для нахождения приблизительного диаметра измеряемых частиц:

$$R \sim \frac{const * \Delta t}{\ln\left(\frac{1}{I_2} - I_1\right)},$$

$$const = \frac{16 * \pi * n^2 * k * T}{3 * \lambda^2 * \eta},$$

где Δt – интервал между измерениями, I_2, I_1 – интенсивности соседних точек, n – коэффициент рассеяния растворителя, k – константа Больцмана, T – температура жидкости, λ – длина волны монохроматического света, η – вязкость растворителя. Для определения точного размера исследуемых частиц используется компьютерная программа.

Кинетические зависимости, полученные в эксперименте, представляют собой экспоненциальные кривые, спадающие от начального значения до значения, близкого к нулю (рис 3).

Кривая на рис. 3 нормирована к начальному значению. Кинетическая кривая представляет собой экспоненту (или сумму экспонент) и имеет три характерных участка. Участок (1) соответствует моменту внесения капли исследуемого вещества. На этом участке происходит быстрое падение интенсивности прошедшего света в результате его поглощения измеряемым веществом. Кроме того, здесь наблюдается неустойчивость, обусловленная падением капли из дозатора и, как следствие, колебаниями поверхности жидкости в кювете. Этот участок не несет никакой информации о диффузии измеряемых частиц и поэтому в расчетах не используется. Участок (2) – диапазон достаточно быстрого экспоненциального возрастания интенсивности прошедшего света до значения, близкого к начальному. На этом участке кинетической кривой происходит

восстановление интенсивности прошедшего света в результате диффузии наночастиц из точки их внесения в объем кюветы. Этот участок наиболее информативен и поэтому используется для всех расчетов. Участок (3) – участок медленного восстановления интенсивности. Фактически интенсивность не восстанавливается точно до прежнего значения в результате конечной величины объема кюветы. Поэтому конечный участок экспоненты малоинформативен и не может быть использован для вычисления коэффициента диффузии наночастиц.

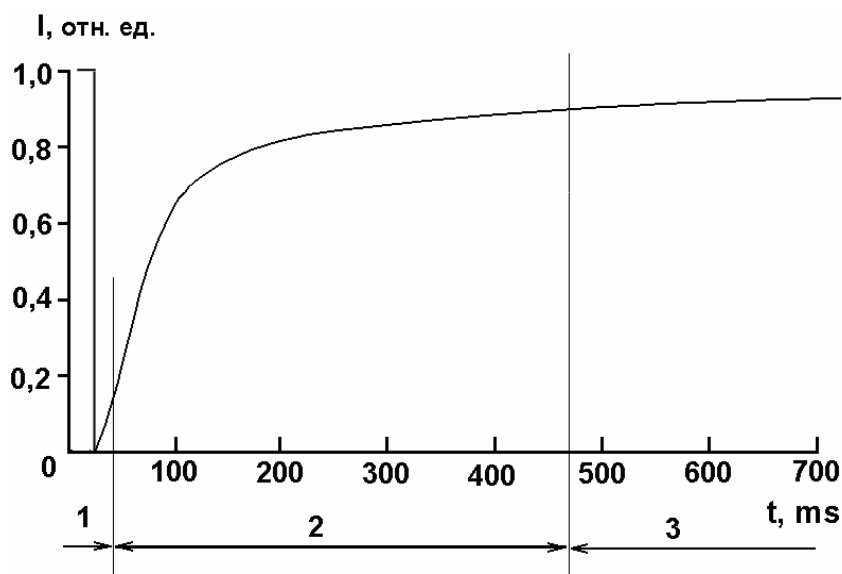


Рис. 3. Кинетика изменения поглощения света при диффузии наночастиц из точки внесения в объем кюветы

Для калибровки установки были выполнены измерения молекул фуллерена C₆₀. Действительно, в то время как молекулы органических веществ имеют сложную форму, истинные размеры молекул зависят от параметров окружающей среды и обычно точно неизвестны, то, напротив, молекулы фуллерена имеют шарообразную форму и фиксированный размер. Так, молекулы фуллерена C₆₀ имеют радиус 0,357 нм (диаметр 0,7 нм). Поэтому мы считали, что фуллерен – идеальная молекула для калибровки метода.

Результаты измерения фуллерена представлены в таблице 1.

Таблица 1.

№	Длина волны λ , нм	Растворитель	Размер, D, нм
1	592	толуол	0,8
2	532	-	0,8
3	470	-	0,7

Следовательно, наблюдается хорошее согласование между известным размером молекулы фуллерена и размером, измеренным предлагаемым методом. Это подтверждает правильность метода и истинность полученных результатов.

Проанализируем полученные результаты.

Как указывалось выше, наночастицы фталоцианина магния могут быть получены в трех формах. Наночастицы фталоцианина магния в аморфной форме получают при осаждении раствора фталоцианина в неполярный растворитель [10]. На рис.4 представлен спектр поглощения наночастиц MgPc, полученных осаждением молекулярного раствора в додекан (кривая 1). Там же, для сравнения, приведен спектр поглощения молекулярного раствора Mg-Pc в диэтиламине (кривая 2).

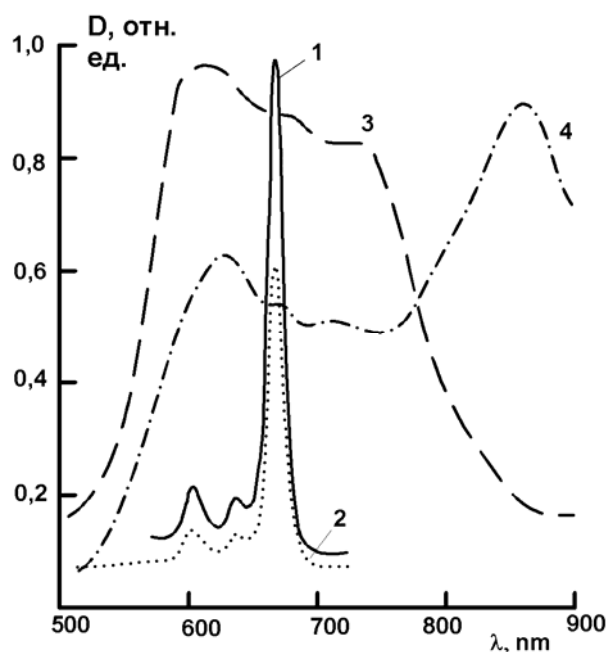


Рис. 4. Спектры наночастиц MgPc в разных агрегатных формах: 1 – аморфная форма, 2 – молекулярная форма MgPc (для сравнения), 3 – β -кристаллическая форма, 4 – χ -кристаллическая форма

Как видно из рисунка, спектры поглощения молекулярного раствора (кривая 1) и наночастиц в аморфной форме (кривая 2) практически идентичны. Это объясняется слабым межмолекулярным взаимодействием в аморфной форме фталоцианина. Поскольку межмолекулярное взаимодействие практически не вносит возмущения в спектр поглощения, то он и не изменяется относительно спектра поглощения отдельных молекул.

Коллоидный раствор наночастиц фталоцианина аморфной формы стабилен в течение длительного времени, его спектр поглощения не изменяется, что свидетельствует о стабильности данной агрегатной формы. В то же время известно, что порошки или сублимированные слои аморфной формы при комнатной температуре нестабильны и в течение несколько минут превращаются в стабильную β -форму [10].

Закономерен вопрос: почему аморфная форма фталоцианина стабильна в коллоидном растворе? Не обусловлено ли это малым размером или иными факторами присутствующими наночастицам?

Были выполнены измерения размеров наночастиц в коллоидном растворе, полученном при синтезе наночастиц. Измерения проводились в течение 8 дней после синтеза, растворитель – додекан. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2

№	Время от момента образования наночастиц	Размер наночастиц (нм)
1	0	12
2	6 дней	20
3	8 дней	22

Кристаллическая β -форма. Наиболее стабильной из кристаллических форм фталоцианина является β -форма [11]. β -форма фталоцианина образуется при осаждении раствора фталоцианина в координирующую среду, например в воду. При этом благодаря большому дипольному моменту молекул воды молекулы фталоцианина при конденсации укладываются в кристаллическую решетку.

Спектр поглощения наночастиц фталоцианина, полученных при осаждении молекулярного раствора фталоцианина в воду, представлен на рис.4, кривая 3.

Коллоидный раствор наночастиц MgPc в β -форме нестабилен и быстро коагулирует. Поэтому были измерены размеры наночастиц в коллоидном растворе сразу после синтеза. Размеры находятся в диапазоне значений: 1.93–2.1 нм. После синтеза весьма быстро начинается коагуляция наночастиц и образуется осадок. Поэтому измерения кинетики изменения размеров в течение некоторого времени после синтеза не могли быть выполнены.

Кристаллическая X-форма. Кристаллическая X- форма фталоцианина фактически является кристаллогидратом фталоцианина [12]. Элементарная ячейка кристаллической решетки фталоцианина в X-форме состоит из молекулы фталоцианина, двух молекул воды и двух молекул спирта [8–13]. По этой причине условием образования X- формы является присутствие обоих компонентов кристаллогидрата – воды и спирта. В то же время вода является координирующим агентом, необходимым для кристаллизации.

Спектр поглощения коллоидного раствора наночастиц в X- форме представлен на рис. 4, кривая 4.

Обратим внимание на существенное изменение спектра поглощения относительно спектра поглощения молекул фталоцианина. Данное изменение спектра по сравнению с аморфной формой объясняется значительным межмолекулярным взаимодействием в X-кристаллической форме [12].

Наночастицы фталоцианина в X-форме синтезировались путем полиморфного преобразования из β - в X-кристаллическую форму в присутствии воды и спирта [4]. Вначале синтезируют наночастицы фталоцианина в β -форме, затем, после осаждения и промывки, осуществляют их преобразование в X-форму и диспергирование в инертном растворителе, например толуоле. Поскольку синтез многостадийен, можно было бы предположить, что может иметь место укрупнение наночастиц в процессе преобразования в X-форму. Следовательно, важным вопросом является не только размер исходных наночастиц в β -форме, но также и результирующий размер наночастиц X-формы после завершения полиморфного преобразования.

Были проведены измерения размеров наночастиц β -формы до и после преобразования наночастиц в X-форму. Была исследована также стабильность наночастиц X-формы в коллоидном растворе в толуоле. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

№	Кристаллическая форма	Растворитель	Размер наночастиц, нм
1	β - форма до преобразования	вода	1.93-2.1
2	X- форма сразу после преобразования	толуол	2.41
3	X- форма через 24 часа после преобразования	толуол	2.51
4	X- форма через 7 дней после преобразования	толуол	2,51

Таким образом, размер наночастиц после преобразования в X- форму только лишь незначительно больше исходных наночастиц в β -форме. Размеры последних стабильны и не изменяются с течением времени.

Сравнение измеренных размеров наночастиц (сфера диаметром 2–25 нм) с известными размерами молекулы фталоцианина (плоскость с линейным размером 1,3–1,4 нм и толщиной около 0,3 нм) показывает, что наночастицы фталоцианина во всех случаях являются достаточно большими образованиями, превышающим как размеры одной молекулы, так и размеры димера.

Вопрос о возможной структуре наночастиц требует, несомненно, дополнительных исследований, однако, исходя из результатов данной работы, можно сделать некоторые предположения и выводы.

Действительно, результаты измерения размеров наночастиц дали парадоксальный результат. Несмотря на то, что коллоидный раствор аморфных наночастиц наиболее стабилен, что могло бы указывать на малые их размеры, реально аморфные наночастицы являются наиболее крупными образованиями. В то же время практическая идентичность спектров поглощения аморфных наночастиц и молекулярного раствора (см. рис. 4) свидетельствует о чрезвычайно слабом взаимодействии между молекулами в наночастице аморфной формы. Следовательно, в этом случае наночастицы не могут располагаться в виде стопки, как это имеет место обычно в кристаллической решетке фталоцианина [10] и в *J*- агрегатах красителей. Малое межмолекулярное взаимодействие, т.е. удаленность молекулярных плоскостей друг от друга, и, с другой стороны, достаточно большие размеры наночастицы, превышающие размеры одной молекулы в десятки раз, может иметь только одно объяснение: наночастица фталоцианина аморфной формы представляет собой плоскость, составленную из четырехугольных молекул фталоцианина, например, подобно структуре, изображенной на рис.5.

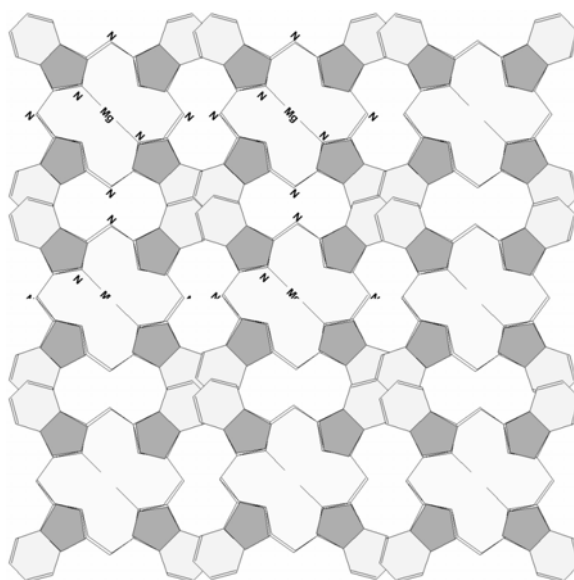


Рис. 5. Возможная форма наночастицы фталоцианина аморфной формы – плоскость, составленная из молекул, соприкасающихся углами

Плоскостная структура наночастицы фталоцианина аморфной формы объясняет все экспериментальные факты:

- *малое межмолекулярное взаимодействие.* Плоскости молекул практически не взаимодействуют друг с другом.

- *стабильность этой формы в коллоидном растворе наночастиц и, напротив, нестабильность в виде крупных частиц.* В коллоидном растворе наночастицы «плавают» в виде плоских «листов», окруженных сольватной оболочкой, и практически не взаимодействуют друг с другом. Как только такие плоскости оказываются вне жидкости, они наслаиваются друг на друга, структурируются, и в результате образуется обычная кристаллическая структура фталоцианина в β - форме.

- *медленное увеличение размеров наночастиц в коллоидном растворе в течение 10 суток.* Плоскости, составленные из молекул, могут постепенно расти путем присоединения молекул фталоцианина на краю.

Наночастицы в кристаллической форме имеют принципиальное отличие от аморфных наночастиц – стабильные, практически, фиксированные размеры. Так, в наших исследованиях наночастицы в β -форме имели размер от 1,9 до 2,1 нм, а наночастицы в X -форме составляли 2,4–2,5 нм, причем их размеры не изменялись в течение нескольких суток. В то же время спектры поглощения наночастиц в β - и X -кристаллических формах практически идентичны спектрам крупных монокристаллов в тех же формах. Это позволяет предположить, что параметры кристаллической решетки наночастиц идентичны кристаллической решетке монокристалла. На рис. 6 представлена элементарная ячейка кристаллической решетки фталоцианина в X -форме [11].

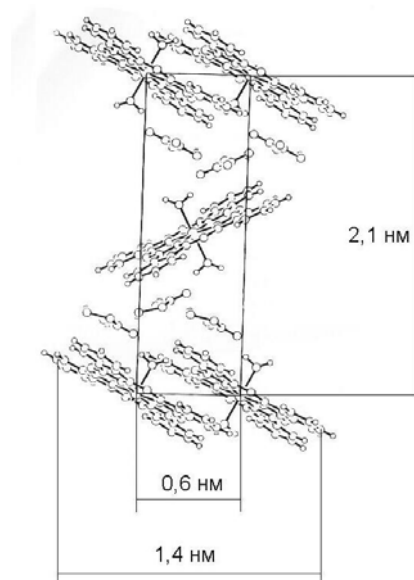


Рис. 6. Структура элементарной ячейки фталоцианина магния в X -кристаллической форме [8]

Сравнение размеров элементарной наночастицы (2,4 нм) с размерами элементарной ячейки кристаллической решетки (1,4×1,4×2,5 нм) позволяет предположить, что наночастица состоит из двух элементарных ячеек, как это изображено на рис.7, что может объяснить фиксированные размеры наночастиц. Размеры наночастиц в β -кристаллической форме несколько меньше, что соответствует меньшему размеру элементарной ячейки этой формы.

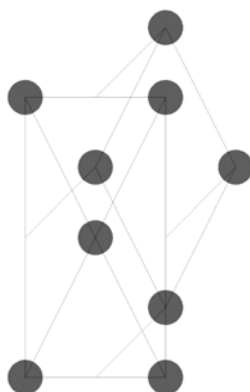


Рис. 7. Возможная структура наночастицы фталоцианина в X -форме, образованная двумя элементарными ячейками, сдвинутыми на половину периода. Диски изображают центры молекул фталоцианина

Полученные результаты свидетельствуют, что наночастицы фталоцианина имеют ряд специфических свойств. Фактически наночастицы фталоцианина, имеющие фиксированную структуру и размеры, имеют свойства структурированных образований с фиксированными, а не произвольными, как у классических неорганических наночастиц, размерами и структурой. В этом они несколько напоминают J-агрегаты красителей, являющиеся, как известно, стопками плоских органических молекул.

Заключение

1. Измерены размеры наночастиц фталоцианина аморфной и двух кристаллических форм. Размеры кристаллических наночастиц фиксированы и не изменяются во времени. Размер наночастиц Mg-фталоцианина в β - форме – 2 нм, в X - форме – 2,5 нм, что коррелирует с соответствующими размерами элементарных ячеек кристаллической решетки.

2. Сравнение размера наночастиц с размером элементарной ячейки кристаллической решетки фталоцианина показывает, что, вероятнее всего, наночастица соответствует двум элементарным ячейкам кристаллической решетки, причем такое образование является стабильным.

3. Наночастицы фталоцианина являются нанообъектами, сочетающими параметры молекулы и кристалла. Их решетка и свойства подобны крупному кристаллу, в то же время фиксированные размеры, не зависящие от условий синтеза, характерны для молекул.

4. Наночастицы фталоцианина, подобно крупным монокристаллам, имеют «чистые» спектры, соответствующие определенной кристаллической форме, что принципиально отличает их от поликристаллического, порошкообразного фталоцианина, спектры которого обычно являются суперпозицией нескольких кристаллических форм. Этот факт, вероятно, объясняется тем, что каждая наночастица является монокристаллом определенной кристаллической формы. Смесь различных форм при синтезе не образуется.

Литература

1. Gulbinas V., Chachisvilis M., Persson A., Svanberg S., Sundstroem V. // J.Phys.Chem. 1994. V.98. No. 33. P. 8118
2. Wang Y., Deng K., Gui L., Tang Y., Zhou J., Cai L., Qiu J., Ren D., Wang Y. // J. Colloid Interface Science. 1999. V.213. No.1. P.270.
3. Акимов И.А., Денисюк И.Ю., Мешков А.М, Горелова А.В. // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 2. С. 3.
4. Денисюк И.Ю., Каманина Н.В. // Оптика и спектроскопия. 2003. №2. С. 269.
5. Dynamic Light Scattering: Applications of photon correlation spectroscopy. // Editor R. Pecora, American Ceramic Society Bulletin, 1985. V.64. P.115
6. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. Л., 1975. 592 с.
7. Дитчберн Р. Физическая оптика. М., 1965. 631 с.
8. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М., 1989. 728 с.
9. Будак Б.М. Сборник задач по математической физике. М., 1986. 685 с.
10. James H. Sharp, Marcel Lardon // J. Phys. Chem. 1968. V. 72. No. 9. P. 3230.
11. Endo A., Matsumoto S., Mizuguchi J. // J. Phys. Chem. 1999. V.103.P.8193.

НАПРАВЛЕННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР

**А.М. Бонч-Бруевич, Т.А. Варганян, Н.Б. Леонов, А.Е. Логунов,
С.Г. Пржибельский, В.В. Хромов**

Двумерные ансамбли металлических частиц размером 10–20 нм получены путем вакуумного осаждения паров металлов на поверхности стекла, кварца и сапфира. Продемонстрирована возможность селективной направленной модификации ансамбля частиц под действием излучения непрерывных полупроводниковых лазеров. Обнаружено, что эффект фотоатомной эмиссии в области плазмонных возбуждений резко усилен и проявляет резонансный характер. По ширине спектрального провала в неоднородно уширенном спектре экстинкции ансамбля частиц определены релаксационные характеристики коллективных электронных возбуждений в наночастицах металлического натрия.

Введение

Уникальные оптические свойства сред, состоящих из большого числа малых металлических частиц, широко используются как в научных, так и в практических целях. Важной особенностью наноразмерных металлических кластеров является их способность многократно усиливать амплитуду падающего на них поля оптического излучения. С точки зрения современных технологий особенно привлекательным является то обстоятельство, что усиление происходит только в непосредственной близости от частицы, обеспечивая высокую селективность и локализацию воздействия и в то же время снижая требования как к источнику излучения, так и к среде, через которую транспортируется луч.

В научных исследованиях широко используется эффект гигантского комбинационного рассеяния, в котором, благодаря усилению поля на поверхности малых металлических частиц, интенсивность рассеянного излучения возрастает в миллионы раз. В последние годы запатентован ряд предложений по использованию эффекта усиления поля на поверхности металлических частиц для повышения чувствительности биологических сенсоров. Другое практическое применение связано с повышением чувствительности быстродействующих фотодиодов, собственное поглощение которых оказывается недостаточным из-за относительно малой толщины полупроводникового материала, необходимой для достижения высокого быстродействия. Эффект усиления поля на поверхности малых металлических частиц позволяет надеяться на создание комбинированных приборов, обладающих как высоким быстродействием, так и высокой чувствительностью.

Несмотря на успехи электронной и рентгеновской литографии, создание регулярных массивов одинаковых металлических частиц с оптимальными формами и размерами в нанометровой области остается весьма дорогостоящим. В связи с этим до сих пор не теряет своей актуальности задача изучения оптических свойств массивов металлических частиц, создаваемых относительно простыми и дешевыми методами физики поверхности, с целью их направленной модификации и оптимизации оптическими методами.

Создание ансамблей металлических наночастиц путем самоорганизации

В настоящей работе представлены результаты исследования металлических наноструктур, выращенных на поверхности прозрачных диэлектрических материалов методом самоорганизации. Путем оптимизации условий вакуумного осаждения металла можно добиться образования металлических частиц размером 10–20 нм, представляющих наибольший интерес с точки зрения получения высокодобротных плазмонных возбуждений. Добротность плазмонных возбуждений в частицах большего размера

снижается из-за потерь на излучение, которые растут пропорционально квадрату объема частиц. В частицах меньшего размера начинают сказываться другие механизмы.

К сожалению, разброс по формам и размерам частиц, полученных путем самоорганизации, оказывается довольно большим. Эта особенность ансамблей металлических наночастиц, образующихся при естественном росте островковых металлических пленок, приводит к значительному неоднородному уширению возбуждаемых в них плазмонных резонансов. В результате не только ухудшаются резонансные свойства ансамбля частиц, но и существенно затрудняется их исследование. Действительно, в условиях неоднородного уширения линейная оптическая спектроскопия имеет очень ограниченное применение, поскольку ширина спектра экстинкции ансамбля частиц определяется не релаксационными свойствами индивидуальных частиц, а разбросом резонансных частот.

Применение нелинейных оптических методов к изучению плазмонных возбуждений началось относительно недавно. Основные трудности здесь связаны с очень коротким временем жизни коллективных электронных возбуждений в металлических наночастицах. В большинстве случаев время жизни оказывается порядка единиц или десятков фемтосекунд. Для экспериментов во временной области это требует все еще трудно достижимого временного разрешения. При постановке экспериментов в спектральной области низкая эффективность нелинейных процессов требует применения мощного оптического излучения. Первая успешная реализация метода прожигания постоянных спектральных провалов в неоднородно уширенных спектрах экстинкции металлических наночастиц была связана с применением мощного импульсного излучения [1]. Тепловое действие лазерного излучения приводило к нагреву, испарению и изменению формы резонансных частиц, которое затем регистрировалось методами линейной спектроскопии как провал в спектре экстинкции всего ансамбля частиц. В настоящей работе мы сообщаем о новой возможности селективной модификации ансамбля металлических наночастиц, связанной не с тепловым действием излучения, а с эффектом фотоатомной эмиссии.

Эффект фотоатомной эмиссии

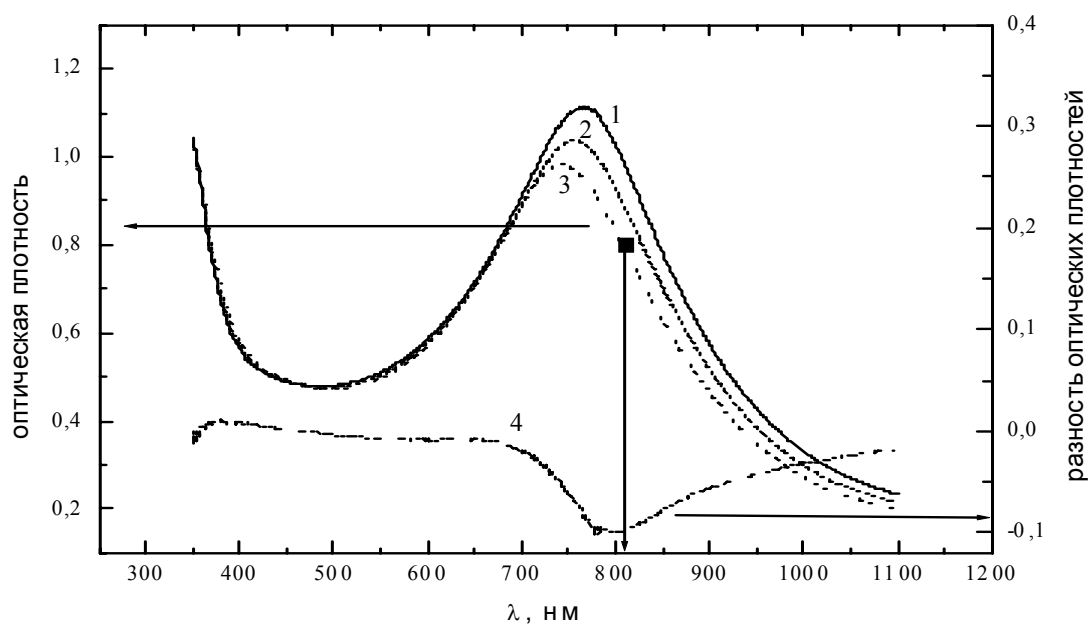
Эффект фотоатомной эмиссии был обнаружен нами при исследовании действия излучения относительно низкой интенсивности на сплошную металлическую поверхность и островковые металлические пленки [2]. Эффект состоит в отрыве нейтральных атомов металла от металлической поверхности под воздействием оптического излучения. Спектр действия охватывает широкую спектральную полосу, коррелирующую как с частотами резонансных переходов в изолированных атомах металла, так и с частотами плазмонных возбуждений. Последнее имеет место в том случае, если эффект наблюдается на островковых металлических пленках. Детальные исследования эффекта фотоатомной эмиссии показали, что он не связан с тепловым действием излучения [3]. Эффективность фотоатомной эмиссии линейно зависит от интенсивности падающего излучения. При достаточной длительности воздействия заметные изменения металлической поверхности могут наблюдаться вплоть до предельно низких интенсивностей падающего излучения, при которых нагрев совершенно незначителен. Хотя механизм фотоатомной эмиссии до сих пор детально не изучен, его связь с наличием на поверхности структурных дефектов надежно установлена. Конкретной моделью поверхностного структурного дефекта, вовлекаемого в процесс фотоатомной эмиссии, может служить низко координированный атом, вблизи которого локализовано относительно долго живущее одноэлектронное возбужденное состояние.

Идея реализованного в настоящей работе метода модификации ансамбля металлических наночастиц состоит в селективном уменьшении объема и изменении формы

резонансных наночастиц за счет эффекта фотоатомной эмиссии. Использование спектрально узкого излучения полупроводникового лазера позволяет селективно возбуждать процесс фотоатомной эмиссии только в тех частицах металла, в которых частота плазмонного возбуждения близка к частоте лазерного излучения. Полоса частот, в которой должен находиться плазмонный резонанс для того, чтобы обладающая им частица подверглась заметной светоиндуцированной модификации, определяется только однородной шириной плазмонного резонанса и не зависит от величины неоднородного уширения. Это обстоятельство открывает путь к использованию эффекта фотоатомной эмиссии для изучения релаксационных характеристик индивидуальных плазмонных возбуждений на образцах с широким неоднородным уширением плазмонных резонансов.

Подготовка и исследование образцов

Для создания островковой пленки из наночастиц металлического натрия использовались кварцевые кюветы с окнами из кварца, сапфира или стекла. После вакуумной откачки в кювету вводилась капля металлического натрия, и она отпаивалась. Островковая металлическая пленка осаждалась на одном из окон кюветы при нагреве капли до температуры 100–150 °С. Время осаждения составляло несколько десятков минут. Пленка легко удалялась при нагревании окна несколько выше комнатной температуры и могла быть осаждена вновь неоднократно, причем спектры экстинкции при контролируемых параметрах осаждения хорошо воспроизводились. Ширины полос поглощения зависят от условий напыления, причем наименьшие ширины плазмонных резонансов получаются при малых скоростях напыления на холодные подложки. Средний абсолютный размер частиц был оценен по методу флукуационной микроскопии [4] и составил 10–20 нм.



Ошибка!

Рис. 1. Прожигание спектральных провалов в ансамблях наночастиц натрия на стекле. Сплошной линией (1) представлен спектр экстинкции пленки до облучения, штриховой линией (2) – после облучения лазерным излучением на длине волны 810 нм мощностью 28 мВт в течение 20 минут, пунктирной линией (3) – после облучения тем же лазером мощностью 65 мВт в течение еще 20 минут. Штрихпунктирная линия (4, правая ось ординат) представляет разность спектров экстинкции (1) и (2). Вертикальная стрелка указывает длину волны лазерного излучения

Спектральное положение полосы плазмонного резонанса зависит от материала подложки. На рис. 1 представлен спектр оптической плотности ансамбля наночастиц натрия на стекле, состоящий из двух полос. Максимум длинноволновой полосы приходится на длину волны 766 нм (энергия фотона 1,62 эВ), а ее полная ширина на половине высоты составляет 0,74 эВ. Коротковолновая полоса в области 350 нм была снята нами не полностью.

На рис. 2 показан спектр оптической плотности ансамбля наночастиц натрия на кварце, также состоящий из двух полос. Обе полосы смещены по сравнению со стеклянной подложкой в длинноволновую сторону. Максимум длинноволновой полосы приходится на длину волны 912 нм (энергия фотона 1,36 эВ). Определить ее ширину трудно, так как длинноволновый край находится вне пределов измерения, а коротковолновый край накладывается на коротковолновую полосу. Грубая оценка дает величину 0,58 эВ. Коротковолновая полоса сместилась в ту же сторону и стала полностью доступной измерению. Ее максимум приходится на длину волны 452 нм (2,74 эВ), а полная ширина на половине высоты равна 0,36 эВ.

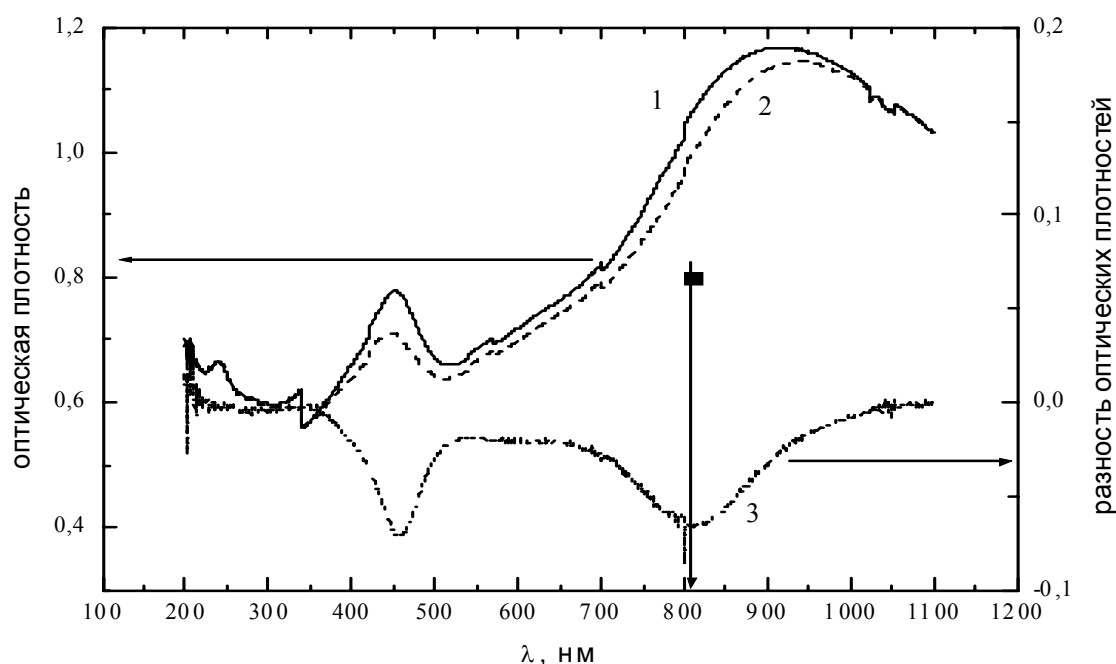


Рис. 2. Прожигание спектральных провалов в ансамблях наночастиц натрия на кварце. Сплошной линией (1) представлен спектр экстинкции пленки до облучения, штриховой линией (2) – после облучения лазерным излучением на длине волны 810 нм. Штрихпунктирная линия (3, правая ось ординат) представляет разность спектров экстинкции (1) и (2). Вертикальная стрелка указывает длину волны лазерного излучения

Прожигание спектральных провалов

Возможность направленной модификации поверхностных металлических наноструктур была обнаружена нами при воздействии на металлические пленки излучения непрерывного полупроводникового лазера, генерирующего на длине волны 810 нм. На рис. 1 и 2 представлены спектры экстинкции ансамблей частиц металлического натрия после облучения, а также разностные спектры, полученные вычитанием спектров экстинкции до и после облучения. Видно, что разностные спектры уже, чем спектры экстинкции необлученных пленок, что доказывает как неоднородный характер уширения, так и возможность его преодоления описанным методом. На рис. 1 показано образование спектральных провалов в ансамблях наночастиц натрия на стекле. Сплошной линией (1) представлен спектр экстинкции пленки до облучения, штриховой линией (2) –

после облучения лазерным излучением на длине волны 810 нм мощностью 28 мВт в течение 20 минут, пунктирной линией (3) – после облучения тем же лазером мощностью 65 мВт в течение еще 20 минут. Штрих-пунктирная линия (4, правая ось ординат) представляет разность спектров экстинкции (1) и (2). Вертикальная стрелка указывает длину волны лазерного излучения. Видно, что наибольшие изменения в спектре поглощения происходят с частицами, в которых резонансная частота плазмона совпадает с частотой действующего излучения. Полная ширина на половине высоты разностного спектра составляет 0,25 эВ. Эта величина в три раза меньше ширины исходного спектра поглощения ансамбля металлических наночастиц, что подтверждает неоднородный характер уширения плазмонных резонансов.

На рис. 2 показано образование спектральных провалов в ансамблях наночастиц натрия на кварце. Сплошной линией (1) представлен спектр экстинкции пленки до облучения, штриховой линией (2) – после облучения лазерным излучением на длине волны 810 нм. Штрих-пунктирная линия (3, правая ось ординат) представляет разность спектров экстинкции (1) и (2). Вертикальная стрелка указывает длину волны лазерного излучения. Подчеркнем, что, несмотря на значительный сдвиг максимума полосы поглощения неоднородного ансамбля частиц, связанный с изменением материала подложки, минимум разностного спектра по-прежнему совпадает с частотой излучения, вызывающего модификацию частиц. Полная ширина на половине высоты разностного спектра составляет 0,29 эВ. Увеличение ширины провала по сравнению со случаем наночастиц на поверхности сапфира можно связать с влиянием материала подложки на время жизни плазмонов, локализованных в металлических наночастицах.

Заключение

Как показано выше, действие оптического излучения умеренной мощности способно существенным и в достаточной степени управляемым образом воздействовать на ансамбли металлических наночастиц. Кроме того, оптические методы исследования позволяют исследовать ансамбли металлических наночастиц, выявляя индивидуальные свойства отдельных частиц, скрытые неоднородным уширением резонансных частот плазмонных колебаний. Все это позволяет рассчитывать на широкое применение оптического излучения для создания, исследования и модификации металлических наноструктур на поверхности прозрачных диэлектрических материалов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 05-02-17575), гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-7952.2006.2), ICTS (грант № 2679) и целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» РНП 2.1.1.2243.

Литература

1. Stietz F., Bosbach J., Wenzel T., Vartanyan T., Goldmann A., Träger F. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 5644.
2. Абрамова И.Н., Александров Е.Б., Бонч-Бруевич А.М., Хромов В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. № 4. С. 172.
3. Бонч-Бруевич А.М., Вартанян Т.А., Максимов Ю.Н., Пржибельский С.Г., Хромов В.В. // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. С. 1761.
4. Бонч-Бруевич А.М., Вартанян Т.А., Леонов Н.Б., Пржибельский С.Г., Хромов В.В. // Опт. и спектр. 2000. Т. 89. С. 438.

УЧЕБНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ОПТОИНФОРМАТИКИ КАФЕДРЫ ФОТОНИКИ И ОПТОИНФОРМАТИКИ

О.В. Андреева, С.В. Артемьев, В.Н. Васильев, С.А. Козлов,
В.В. Орлов, А.В. Павлов, А.А. Парамонов

Сообщается о создании экспериментального практикума по оптоинформатике в учебной лаборатории кафедры фотоники и оптоинформатики, включающего девять лабораторных работ по основным разделам дисциплины «Основы оптоинформатики» образовательного направления 200600 «Фотоника и оптоинформатика». Представлены аннотации лабораторных работ, описания экспериментальных стендов и перспективы развития практикума.

Введение

Оптоинформатика – быстро развивающееся научно-техническое направление в России и в мире, связанное с исследованием, созданием и эксплуатацией новых материалов, устройств и технологий, направленных на передачу, прием, обработку, хранение и отображение информации на основе материальных носителей – фотонов. Подготовка специалистов для работы в этой перспективной области ведется в СПб ГУ ИТМО в рамках открытого в 2004 г. нового образовательного направления 200600 «Фотоника и оптоинформатика». Экспериментальный практикум по оптоинформатике создан на кафедре фотоники и оптоинформатики для поддержки лекционного курса по дисциплине «Основы оптоинформатики» [1], которая входит в число основных дисциплин нового образовательного направления. Практикум сформирован в соответствии с образовательным стандартом и апробирован в учебном процессе при проведении занятий на ряде факультетов СПб ГУ ИТМО [2].

Подготовку и проведение экспериментального практикума осуществляют квалифицированные преподаватели и сотрудники кафедры фотоники и оптоинформатики, усилиями которых разработана концепция практикума, сформирован цикл лабораторных работ, разработаны принципы формирования и комплектации экспериментальных стендов, подготовлены методические материалы.

Лабораторные работы экспериментального практикума по оптоинформатике

Экспериментальный практикум по оптоинформатике в настоящее время содержит девять лабораторных работ по основным разделам оптоинформатики.

Раздел: ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ.

Работа 1. **Исследование характеристик излучения полупроводниковых лазеров для оптоинформатики.** В процессе выполнения работы студентам предлагается изучить принципы работы полупроводникового лазера, исследовать зависимость интенсивности, степени линейной поляризации и расходимости излучения полупроводникового лазерного модуля от величины тока через р-п переход; сравнить параметры излучения в светодиодном и лазерном режимах работы модуля.

Раздел: ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ.

Работа 2. **Волоконно-оптический световод как среда передачи информации.** Целью работы является знакомство с оптическим волокном, его основными характеристиками и использованием в волоконно-оптических линиях связи. Студентам предлагается исследовать влияние радиуса макроизгиба волокна на величину потерь.

Работа 3. **Световой жгут – исследование основных характеристик.** Студенты изучают принципы работы светового жгута, исследуют индикатрисы светопропускания жгута, определяют его частотно-контрастную характеристику, оценивают параметры изображения (апертурного угла и разрешения), передаваемого по жгуту.

Раздел: ХРАНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ.

Работа 4. **Элементы оптической памяти на основе мультиплексных голограмм.** В процессе выполнения работы проводится изучение возможности увеличения информационной емкости элементов оптической голографической памяти за счет использования мультиплексных голограмм, полученных на образцах полимерного материала толщиной 1–3 мм. Студентам предлагается измерить параметры голограмм и произвести расчет информационной емкости элементов памяти.

Раздел: ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ.

Работа 5. **Пространственная фильтрация фурье-спектра изображения.** Целью работы является знакомство с оптическим фурье-преобразованием и его практическим использованием. Студенты изучают влияние фильтрации фурье-спектра на изображения миры при различных условиях эксперимента.

Раздел: ОПТИЧЕСКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ.

Работа 6. **Векторно-матричный множитель – простейший оптический процессор.** В процессе выполнения работы студенты производят моделирование и исследование двух важнейших этапов в жизненном цикле искусственной нейросети: формирование матрицы связей двух векторов по алгоритму векторного произведения и формирование ассоциативного отклика при предъявлении обученной сети входного вектора.

Раздел: ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА.

Работа 7. **Оптический вентиль нечеткой (многозначной) логики.** Целью работы является изучение возможности реализации операторов многозначной логики методами геометрической оптики с использованием физического процесса фоторегистрации. Студенты измеряют пропускание модельных транспарантов и рассчитывают значения истинности для заданной логической операции.

Работа 8. **Распознавание образов методом голографической согласованной фильтрации.** В процессе выполнения работы осуществляется практическое знакомство с архитектурой и работой голографического коррелятора Ван-дер-Люгта: проводится исследование параметров корреляционного отклика в зависимости от свойств изображения и голографического согласованного фильтра; инвариантность к сдвигу по оси, инвариантность к повороту вокруг оптической оси.

Раздел: ДЕТЕКТОРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ.

Работа 9. **Полупроводниковые фотоприемники – детекторы оптического излучения в устройствах оптоинформатики.** Целью работы является изучение конструкции, принципов работы и использования в устройствах оптоинформатики фотоприемников на основе полупроводниковых диодов. Студенты должны исследовать основные характеристики и определить диапазон линейности исследуемых фотодиодов при различных режимах их работы.

Разработанный практикум включает элементы всех основных направлений современной оптоинформатики: передачу, обработку и хранение информации, а также содержит работы по оптическим вычислениям и оптическим технологиям искусственного интеллекта.

Экспериментальные стенды для проведения лабораторных работ по оптоинформатике

Учебная лаборатория для проведения занятий экспериментального практикума занимает в настоящее время помещение, в котором размещены 20 экспериментальных стендов, предназначенных для выполнения лабораторных работ учебной группой с двумя преподавателями (фото 1).



Фото 1. Общий вид учебной лаборатории.

Основная часть стандов для выполнения лабораторных работ размещена на стандартных учебных столах (размер 80×120см) и укомплектована унифицированными оптико-механическими узлами, что позволяет проводить ряд лабораторных работ фронтально на 10 стандах (работы №№1, 4, 7, 9 – фото 2).



Фото 2. Установка для выполнения лабораторной работы «Оптический вентиль нечеткой логики»

Унифицированные станды для выполнения лабораторных работ фронтально содержат два базовых узла, которые являются общими для всех установок. Узел №1 – узел источника излучения – комплектуется полупроводниковым источником излучения (лазерный модуль KLM-650, изготовитель «ФТИ-Оптроник», Санкт-Петербург), подключен к источнику питания 4,5 В и измерительному прибору (мультиметр типа UNI-T). Узел №2 – узел приемника излучения – содержит полупроводниковый фотодиод со схемой переключения в различные режимы работы, подключен к измерительному прибору (мультиметр типа UNI-T). Основным блоком каждого узла (блок источника излучения и блок фотоприемника) установлен в стойке и закреплен на рейтере.

Базовые узлы расположены на оптическом рельсе, который определяет оптическую ось системы. Кроме оптического рельса и двух базовых узлов, полная комплектация каждой установки включает еще один узел – функциональный (узел №3), отличающийся для различных работ:

- поляризатор для выполнения работы №1;
- поворотный столик с устройством ножа и щели для усложненного варианта работы №1;
- поворотный столик с голограммой для выполнения работы №4;
- дисковая система ступенчатых ослабителей для выполнения работы №7;
- нейтральный светофильтр для выполнения работы №9.

Замена одного функционального узла на другой производится в считанные секунды, так как сменные элементы устанавливаются либо в дополнительном рейтере на рельсе, либо конструктивно изготовлены в виде сменной насадки на оправу фотоприемника.

Таким образом, комплект из 10-ти унифицированных стендов, размещенных на стандартных столах учебной лаборатории, имеющих централизованное электропитание 4,5 В, может обслуживать учебную группу (численностью до 30 студентов) в режиме выполнения 4-х лабораторных работ фронтально, практически без затрат времени на изменение комплектации установок.

Для выполнения работы №2 имеются 3 экспериментальных стенда, также размещенных на учебных столах лаборатории.

Для выполнения работы №6 имеются 2 экспериментальных стенда, укомплектованных необходимыми оптико-механическими узлами и деталями (фото 3).

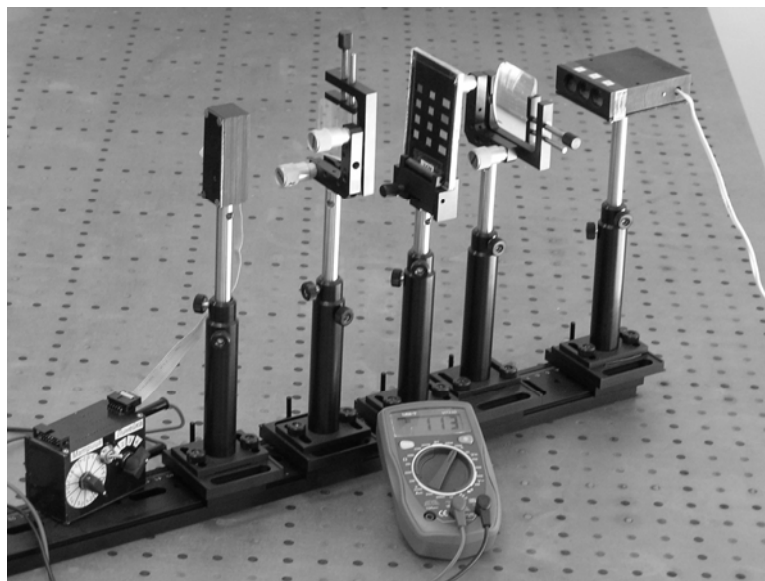


Фото 3. Установка для выполнения лабораторной работы «Векторно-матричный умножитель – простейший оптический процессор»

Экспериментальные стенды для выполнения лабораторных работ №3, №5 и №8 представлены в одном экземпляре и содержат большое количество оптико-механических узлов и элементов (фото 4).

Большое число экспериментальных стендов и возможность фронтального выполнения ряда лабораторных работ позволяют обеспечить удобный режим работы в течение всего учебного года для преподавателей и студентов. Наличие в учебной лаборатории электропитания не выше 4,5 В обеспечивает электробезопасность при проведении занятий экспериментального практикума. Вертикальные перегородки между установ-

ками и комплектация стенов источниками излучения мощностью 3 мВт обеспечивают лучевую безопасность, а имеющиеся возможности общей и локальной светозащиты позволяют проводить измерения с той точностью, которую обеспечивает измерительная техника

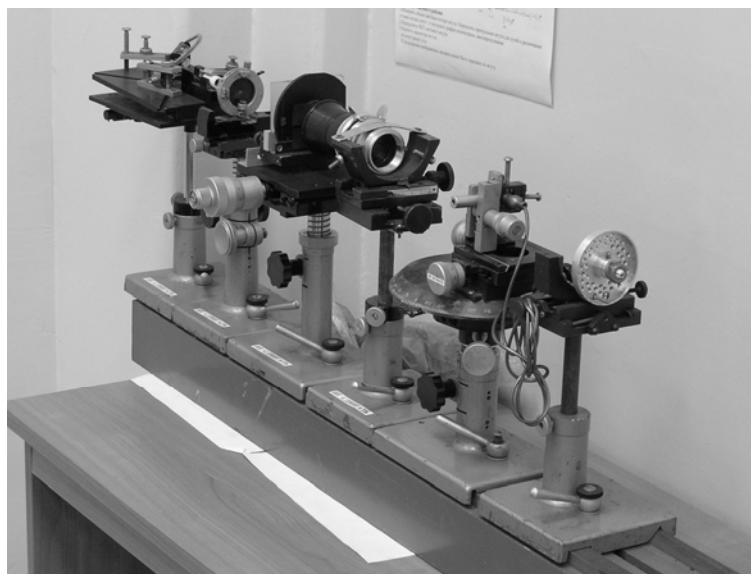


Фото 4. Установка для выполнения лабораторной работы «Световой жгут – исследование основных характеристик»

Перспективы развития экспериментального практикума по оптоинформатике

Дальнейшее развитие экспериментального практикума по одной из основных дисциплин нового образовательного направления авторы связывают с развитием двух направлений деятельности коллектива.

Первое направление деятельности ориентировано на совершенствование обучения по новому образовательному направлению и обеспечивает внутренние потребности кафедры, которые связаны с решением следующих задач:

- постановка новых лабораторных работ;
- совершенствование имеющихся лабораторных работ;
- создание на имеющейся экспериментальной базе многофункциональных стенов для выполнения различных лабораторных работ;
- подготовка методических материалов, рассчитанных на различный образовательный уровень и специфику профессиональной подготовки;
- формирование цикла лабораторных работ по смежным дисциплинам с учетом имеющейся экспериментальной базы.

Второе направление деятельности связано с разработкой коммерческого (тиражируемого) варианта экспериментального практикума по оптоинформатике, который может быть предложен другим вузам, проводящим подготовку студентов по данному образовательному направлению, а также образовательным учреждениям любого уровня, которые заинтересованы в том, чтобы на практике ознакомить учащихся с достижениями одного из самых высокотехнологичных направлений в информатике.

Возможность создания коммерческого варианта практикума обусловлена тем, что в результате многолетней методической и экспериментальной работы в данном направлении предлагаемый экспериментальный практикум, в отличие от известных учебных практикумов по смежным дисциплинам и направлениям, включает элементы всех основных направлений современной оптоинформатики, а для выполнения лабораторных

работ экспериментального практикума имеются разработки многофункциональных стендов с унифицированными оптико-механическими узлами.

Авторы благодарят акционера Петербургской топливной компании В.С. Барсукова за оказание финансовой помощи при создании учебной лаборатории. Разработка коммерческого варианта экспериментального практикума для школ, проводимая по программе «Оптоинформатика в средней школе», в настоящее время поддержана грантом правительства Санкт-Петербурга.

Литература

1. Андреева О.В., Беспалов В.Г., Васильев В.Н., Ефимов Ю.Н., Капорский Л.Н., Козлов С.А., Михайлов В.Н., Сизов В.Н., Стаселько Д.И. Оптоинформатика. Часть 1, 2. Учебно-методическое пособие. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2003.
2. Андреева О.В., Васильев В.Н., Козлов С.А., Павлов А.В. Учебный комплекс «Оптоинформатика». / В кн.: Физика в системе современного образования (ФССО-05): Труды 8-й международной конф. СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2005. С.150–151.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ФОТОНИКА: ИННОВАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ПРОЕКТЫ

И.П. Гуров

Представлены результаты, полученные при проведении инновационных исследовательских проектов в области компьютерной фотоники, направленных на развитие современных технологий цифровой микроскопии, когерентной томографии, цифровой голографии, бесконтактной реконструкции формы трехмерных объектов.

Введение

Повышение инновационного потенциала научных исследований является определяющим ресурсом развития современной науки и технологий. Инновационный процесс основывается на эффективной интеграции результатов фундаментальных, прикладных научных исследований и современных производственных технологий, ориентированных на коммерциализацию результатов в соответствии с потребностями рынка. Важным компонентом инновационного развития является подготовка высококвалифицированных специалистов, наиболее востребованных на рынке труда.

В течение последних десятилетий инновационный процесс определил значительные достижения в области оптики. На современном этапе развития оптической науки и технологий созданы принципиально новые поколения источников излучения, оптических материалов и элементов, приемников излучения, оптических систем передачи и обработки информации. Созданы новые направления в оптике – интегральная, волоконная, градиентная и нелинейная оптика, микро- и нанооптика, волноводная оптоэлектроника и т. д. Термин «оптика» начал постепенно дополняться новым, но также обобщенным названием - «фотоника». Этот термин стал охватывать область науки и технологий, связанную с использованием светового излучения (или потока фотонов) в оптических элементах, устройствах и системах, в которых генерируются, преобразуются, распространяются и детектируются оптические сигналы, а также производится их запись или отображение.

Активное развитие фотоники при интеграции с информационными технологиями определяет высокую востребованность в специалистах проблемно-ориентированного профиля по специализации «Компьютерная фотоника», включающей образовательные задачи обучения компьютерному программированию в процессе проведения инновационных проектов в областях компьютерной обработки изображений и распознавания образов применительно к цифровой микроскопии, оптической томографии, цифровой голографии, количественной характеристике трехмерных объектов и др. Методы компьютерной фотоники обеспечивают инновационное развитие в области биомедицинской диагностики, информационных технологий, мониторинга производственных процессов и др.

В статье представлены примеры инновационных исследовательских проектов, проводимых кафедрой Компьютерной фотоники СПбГУ ИТМО. Рассматриваемые проекты, разумеется, далеко не исчерпывают возможности и перспективы компьютерной фотоники, они наглядно характеризуют полученные результаты и инновационные перспективы.

Цифровая микроскопия и оптическая когерентная томография

Методы микроскопии являются одними из наиболее важных для развития биомедицины и высоких технологий нового поколения. Однако традиционные микроскопы с визуальным каналом наблюдения в настоящее время не удовлетворяют

возрастающим потребностям неразрушающего контроля микрообъектов вследствие высокой трудоемкости наблюдений, субъективности результатов, отсутствия документируемости, невозможности применения современных математических методов анализа, классификации, распознавания и обработки изображений и т.д.

Отказ от визуального канала и переход к полноценному использованию цифровых видеосистем позволяет преодолеть указанные недостатки и обеспечить требуемый уровень оптической микроскопии, соответствующий современным потребностям науки и технологий. Преимущества цифровой микроскопии достигаются в результате нового подхода к принципу построения микроскопов, состоящего в использовании оптико-цифрового канала. Последнее означает, что цифровое преобразование оптического сигнала является неотъемлемой частью оптического канала и необходимо для формирования высококачественного изображения.

Методы цифровой микроскопии обеспечивают возможность создания нового поколения микроскопов с трехмерным отображением микроструктуры объектов в оптической когерентной томографии (ОКТ), которая активно развивается в течение последнего десятилетия [1].

Важно подчеркнуть, что методы цифровой микроскопии возможно реализовать только на основе современных технологий фотоники и электроники. Восстановление трехмерной микроструктуры объектов методами оптической когерентной микроскопии и томографии стало возможным лишь в последние годы на основе последних достижений компьютерных технологий.

Инновационный проект, направленный на создание нового поколения цифровых микроскопов проводится совместно с ОАО "ЛОМО". Результаты исследований и разработок представлены в [2]. Исследования в области ОКТ выполнены в сотрудничестве с зарубежными университетами, научными институтами и исследовательскими лабораториями [3, 4].

Системы ОКТ основываются на использовании принципа когерентного оптического радара [5, 6]. Излучение источника разделяется на измерительную волну и опорную волну, которые распространяются, соответственно, в измерительном и опорном трактах системы ОКТ (см. рис. 1).

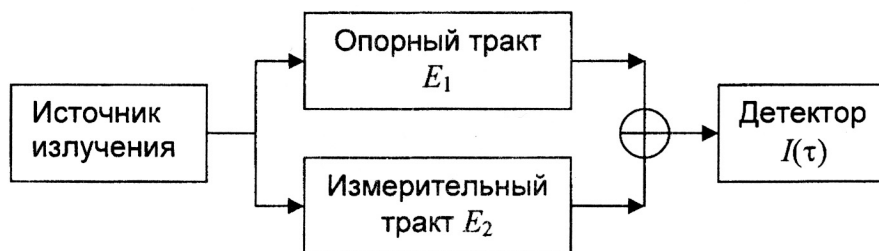


Рис. 1. Структурная схема интерферометрического радара

В результате квадратичного детектирования суммы световых колебаний регистрируется интерферометрический сигнал, пропорциональный значениям интенсивности излучения

$$I(\tau) = [E_1(t) + E_2(t + \tau)][E_1(t) + E_2(t + \tau)]^* = I_0 + 2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Re} V(\tau), \quad (1)$$

где τ - время задержки измерительной волны по отношению к опорной, $I_0 = I_1 + I_2$ - фоновая составляющая, не зависящая от τ , I_1 и I_2 - интенсивности излучения измерительной и опорной волн, $V(\tau)$ - нормированная функция взаимной когерентности интерферирующих волн,

$$V(\tau) = \langle E_1(t)E_2^*(t+\tau) \rangle / (I_1 I_2)^{1/2} \quad (2)$$

угловые скобки обозначают операцию усреднения во времени.

Из (1)-(2) видно, что система ОКТ представляет собой коррелятор, формирующий оценку степени отражения от каждого слоя среды в форме корреляционной функции излучения источника при управляемом изменении времени задержки τ . Основными проблемами, решаемыми при создании систем ОКТ, являются повышение разрешающей способности и быстродействия при определении характеристик внутренней структуры исследуемой среды.

При выполнении совместных работ с Институтом прикладной оптики (Флоренция, Италия) получены экспериментальные томограммы многослойных сред [3]. Совместные исследования проведены по актуальной проблематике диагностики состояния и реставрации ценных предметов живописи, представляющих мировое культурное наследие. Организация работ основывалась на принципе коллективного использования дорогостоящего научного оборудования итальянскими и российскими специалистами.

Экспериментальная установка представляет собой интерферометр Майкельсона (см. рис. 2), освещаемый источником излучения малой когерентности. Излучение частично отражается и рассеивается на неоднородностях с различным показателем преломления внутри исследуемого образца. Время задержки отраженного излучения зависит от глубины слоя. Разрешение ОКТ-системы по глубине определяется длиной когерентности излучения и повышается пропорционально ширине спектрального диапазона излучения.

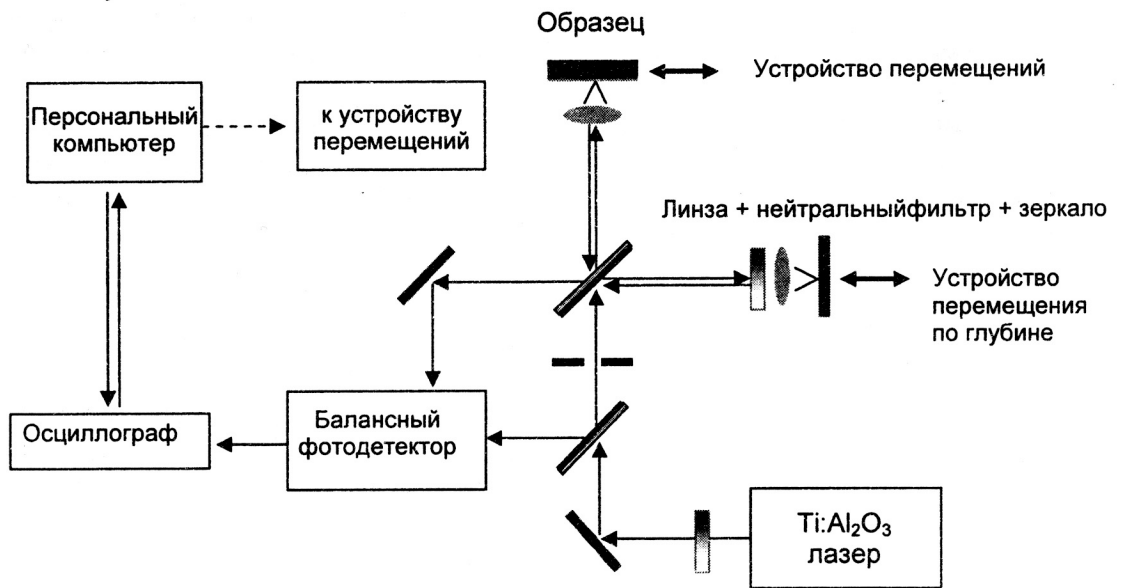


Рис. 2. Схема экспериментальной системы ОКТ

В качестве источника излучения использован твердотельный фемтосекундный титан-сапфировый лазер, излучающий предельно короткие импульсы длительностью около 12 фс (модель фирмы Femtolasers – Femtosource Scientific PRO). Высокая стабильность характеристик излучения обеспечена за счет компенсации внутрирезонаторной дисперсии при использовании многослойных дисперсионных диэлектрических зеркал.

Ширина спектральной полосы лазерного импульса составляет около 100 нм при центральной длине волны 790 нм. При этом обеспечивается разрешающая способность 3,6 мкм.

Лазерные импульсы освещают интерферометр Майкельсона, собранный по схеме микроинтерферометра Линника (рис. 2). Мощность импульсов устанавливалась в пределах 10-15 мВт и регулировалась в опорном плече интерферометра при помощи нейтрального фильтра для получения высокой видности полос малой когерентности. Размер пятна фокусировки и конфокальный параметр регулировались ирисовой диафрагмой на входе интерферометра. Для фокусировки измерительного пучка использовалась короткофокусная линза ($f=25$ мм). Для компенсации влияния дисперсии в опорном плече интерферометра установлена идентичная линза. Сканирование образца по глубине осуществлялось перемещением опорного зеркала при помощи прецизионного микропривода, управляемого от компьютера. Сканирование в боковом направлении обеспечивалось другим приводом, подключенным к компьютеру.

Сигналы на выходе системы регистрируются балансным фотодетектором. Разностный сигнал отображается на осциллографе и запоминается в 8-разрядном формате данных для ввода в компьютер и последующей обработки. Томограммы формируются из данных всех сканов по глубине (при поперечном сдвиге от скана к скану) в форме сечений многослойного материала.

Компьютерная обработка сигналов системы ОКТ выполнена при использовании рекуррентного алгоритма стохастической фильтрации [7]. Пример восстановленной томограммы представлен на рис. 3. Для лучшего визуального восприятия томограмма показана в логарифмической инверсной шкале полутоновых уровней. Томограмма характеризует толщину и состояние защитного лакового слоя, наносимого на поверхность старинных предметов живописи для обеспечения их сохранности.

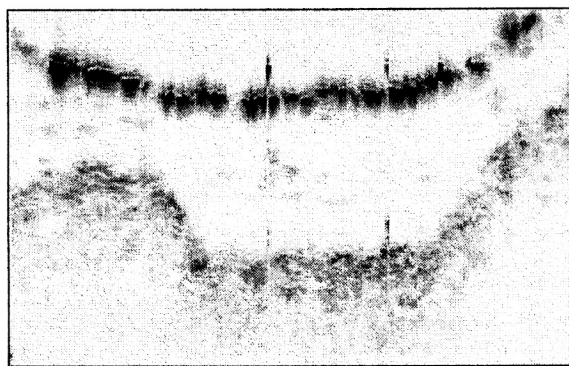


Рис. 3. Томограмма многослойной среды, восстановленная методом нелинейной фильтрации Калмана [3]

Проведенные исследования показали, что разработанные алгоритмы обработки сигналов ОКТ в динамическом режиме обеспечивают более высокую разрешающую способность, помехоустойчивость и быстродействие по сравнению с традиционными методами обработки.

Томограмма рис. 3 представляет сечение многослойной среды в вертикальной плоскости. Совокупность параллельных сечений позволяет сформировать трехмерную томограмму, которая является трехмерным микроизображением в отличие от двумерных изображений, наблюдаемых в традиционной микроскопии.

Формирование и анализ трехмерных изображений микрообъектов методами компьютерной фотоники с получением количественных оценок характеристик

неоднородных сред принципиально расширяет возможности цифровой микроскопии, что определяет высокий инновационный потенциал проводимых исследований.

Цифровая голография

При записи голограммы, как известно, используется когерентное излучение, которое разделяется на два пучка. Один из них отражается от исследуемого объекта и носит название объектного пучка, второй пучок является опорным. Объектная и опорная волны интерферируют в плоскости записи голограммы. Развитие компьютерных технологий и твердотельных приемников излучения позволило записывать голограммы с помощью светочувствительных матриц в цифровой форме. При этом процесс записи и обработки голограмм является полностью цифровым и получил название *цифровой голографии*.

В цифровой голографии восстановление объектной волны выполняется с помощью компьютерных технологий при использовании записанной цифровой голограммы (см., например, [8–11]). Компьютерная реконструкция изображений при обработке цифровых голограмм позволяет провести полноценную цифровую обработку и предоставляет широкие возможности по сравнению с традиционным оптическим процессом. В частности, оказывается возможной компьютерная фокусировка в различных плоскостях объекта и компенсация аберраций при компьютерной реконструкции изображения без использования оптико-механических элементов. В настоящее время получили широкое распространение методы цифровой голографической микроскопии (см., например, [13, 14]) ввиду указанных выше преимуществ цифровой голографии.

При выполнении совместных работ с Институтом кибернетики Национального исследовательского центра (Неаполь, Италия) получены экспериментальные цифровые голограммы и выполнена компьютерная реконструкция изображений микрообъектов [8, 12, 15] с использованием цифрового голографического микроскопа схема которого представлена на рис. 4.

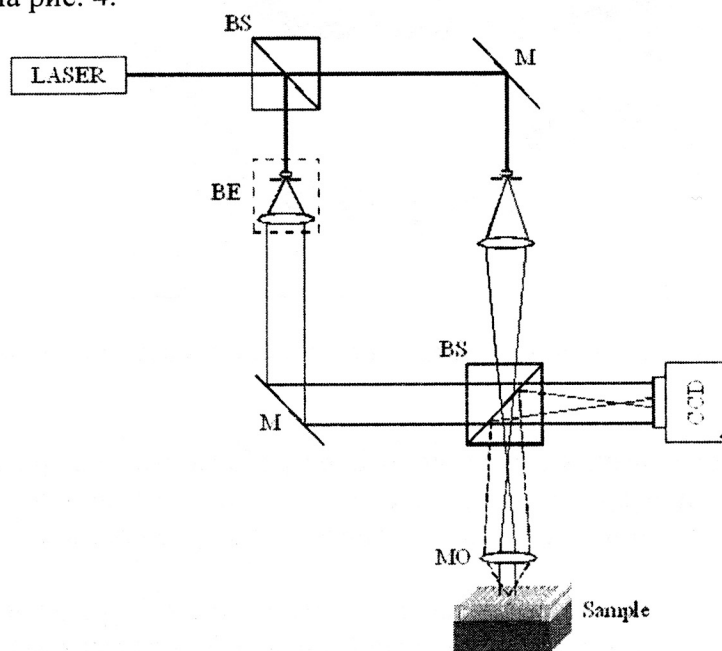


Рис. 4. Схема цифрового голографического микроскопа (BS - светоделитель, BE - расширитель пучка, M - зеркало, MO - микрообъектив, CCD - регистрирующая светочувствительная матрица) [15]

На рис. 5 представлен пример восстановления рельефа поверхности микроэлектромеханического элемента методом цифровой голографической микроскопии [15].

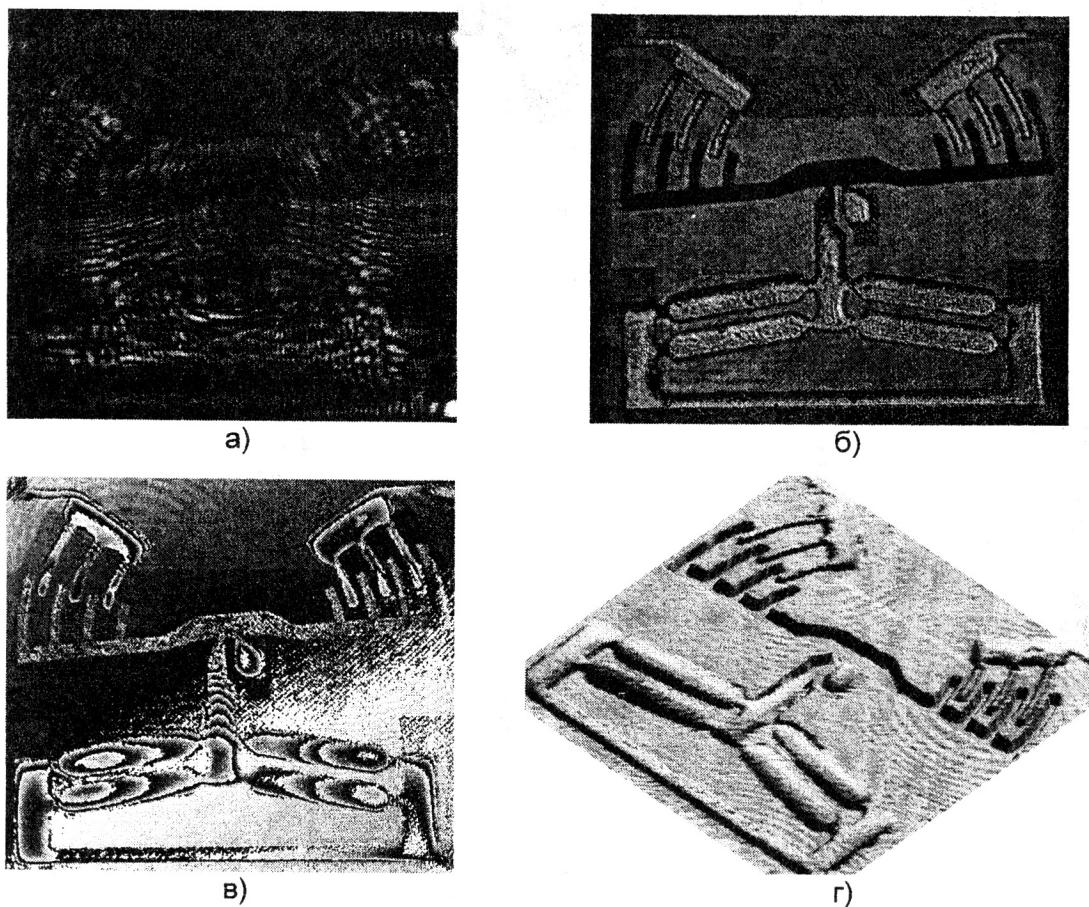


Рис. 5. Восстановление рельефа поверхности микроэлектромеханического элемента: зарегистрированная цифровая голограмма (а), восстановленное распределение амплитуд (б), фаз (в) и трехмерный рельеф поверхности (г)

Как отмечалось в [8], одним из перспективных направлений является цифровая голография с источниками частично когерентного излучения. При этом оказывается возможной послойная реконструкция амплитуд и фаз изображений в пределах длины когерентности излучения. В ряде случаев, например, при анализе рельефа поверхности объектов, достаточно получить распределение амплитуд в изображении отдельного слоя при последующей компьютерной реконструкции рельефа по набору записанных цифровых голограмм отдельных слоев.

На кафедре Компьютерной фотоники выполнены исследования возможностей восстановления рельефа объектов методом цифровой голографии с частично когерентным источником излучения [16].

На рис. 6 представлены примеры цифровых голограмм для различных положений выделяемого слоя рельефа по высоте (рис. 6, а-в) при восстановлении рельефа (поверхности плитки Иогансона на участке начальной части надписи "С.Е. Johansson") методом цифровой голографии с источником излучения малой когерентности. Для лучшего визуального представления рельеф показан инверсно по высоте.

Полный рельеф получен при совместной компьютерной обработке набора цифровых голограмм для отдельных слоев по глубине рельефа. Оценки точности

восстановления рельефа показали, что среднее квадратичное отклонение не превышает 3% от полного диапазона отклонений рельефа поверхности.

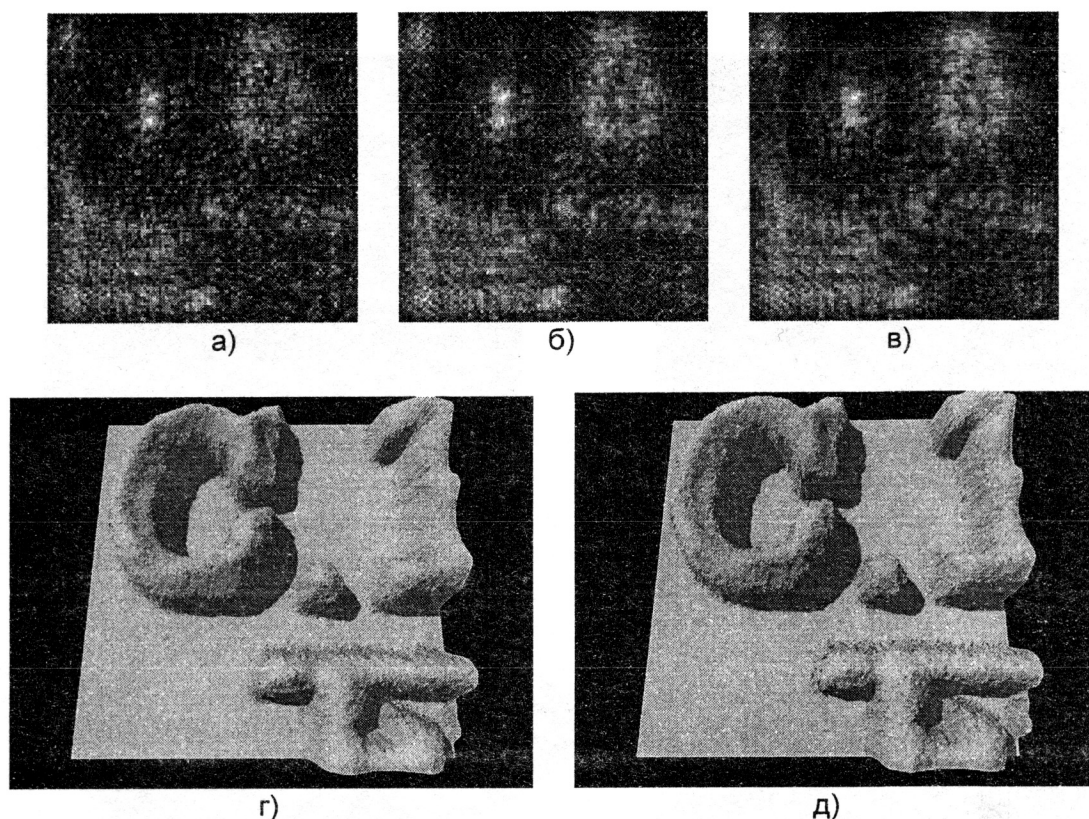


Рис. 6. Цифровые голограммы для слоя вблизи «подложки» (а), для слоя в среднем сечении по высоте рельефа (б) и для слоя в области наибольших отклонений (в) исходного рельефа поверхности (г) и восстановленный рельеф поверхности (д)

Преимуществом метода цифровой голографической микроскопии с источниками излучения малой когерентности является расширенный диапазон однозначности при контроле отклонений рельефа поверхности. Метод может быть использован для получения трехмерных микротомограмм неоднородных сред.

Восстановление формы трехмерных объектов методом структурированного освещения

Метод структурированного освещения считают одним из самых надежных и быстродействующих методов восстановления формы поверхности трехмерных объектов [17]. Метод основан на проецировании системы бинарных полос (паттернов) с различным шагом или цветного паттерна и съемке освещенной сцены с одного или нескольких ракурсов. При известных геометрических соотношениях в системе освещения-наблюдения оказывается возможной калибровка определенной области пространства, каждой точке которой соответствует известный бинарный код. При этом регистрация последовательности изображений, полученных на заданном наборе паттернов, позволяет определить абсолютное расстояние до каждой точки поверхности методом декодирования бинарных кодов, которые соответствуют межкадровой «эволюции» изображений, и в результате восстановить форму трехмерного объекта.

Один из примеров возможного набора бинарных паттернов представлен на рис. 7.

На рис. 8 показан результат проецирования паттернов на поверхность объекта сложной формы. Восстановленная часть поверхности, наблюдаемой с данного ракурса,

представлена на рис. 9. При наблюдении с нескольких ракурсов возможно полное восстановление формы объекта.

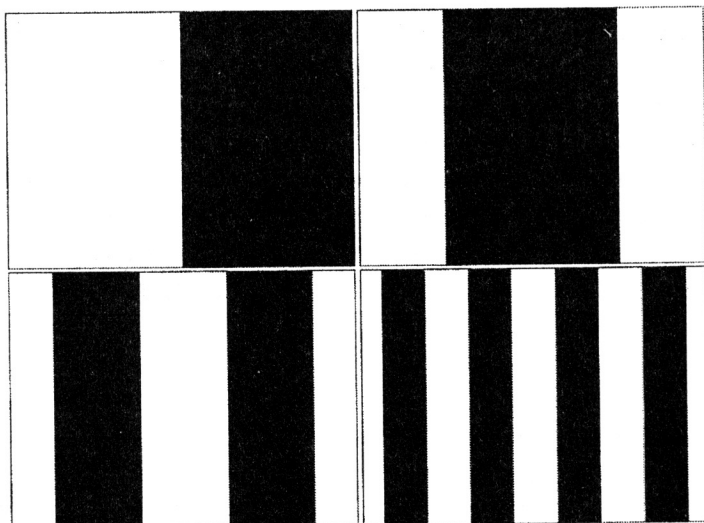


Рис. 7. Паттерны, соответствующие кодам Грея

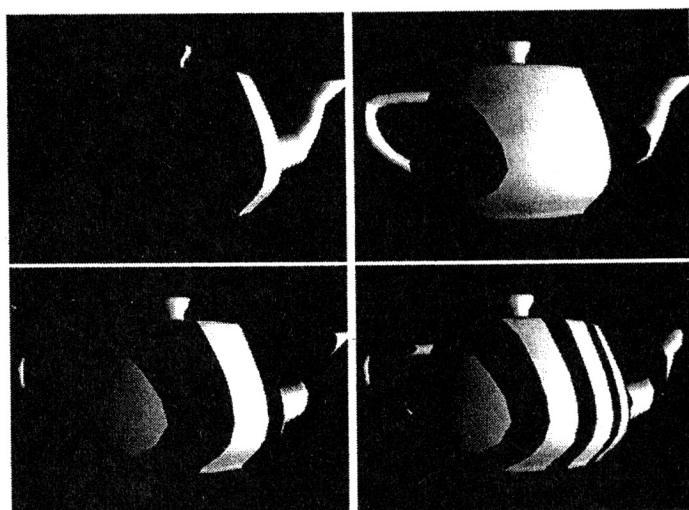


Рис. 8. Набор зарегистрированных изображений

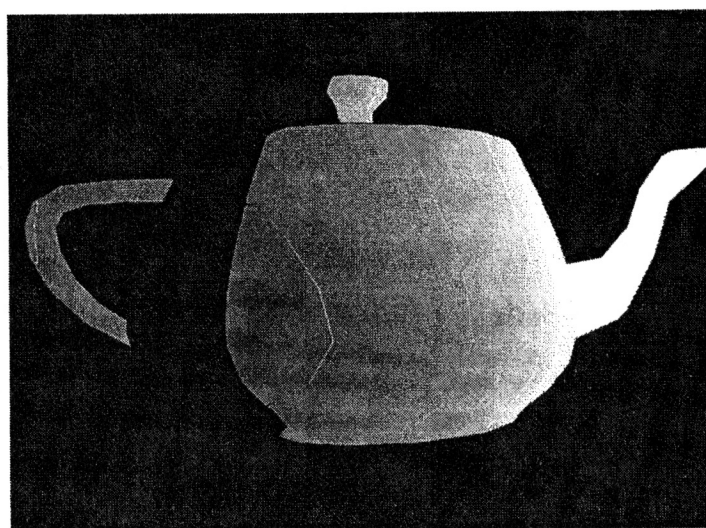


Рис. 9. Компьютерная реконструкция формы объекта

Набор черно-белых паттернов можно представить в виде суперпозиции бинарных паттернов различного цвета и сформировать цветной паттерн при последующем цветовом разделении изображений, что позволяет существенно повысить быстродействие системы. Результаты использования метода оптимального синтеза и проецирования цветного паттерна для восстановления формы сложных трехмерных объектов опубликованы в работе [18].

Метод структурированного освещения позволяет получать и визуализировать информацию о трехмерных объектах, что является исключительно важным для многих прикладных задач. Возможность документирования и передачи информации отвечает потребностям современного информационного общества и определяет высокий инновационный потенциал исследований и разработок в данной области.

Заключение

Методы компьютерной фотоники основываются на результатах фундаментальных научных исследований в области взаимодействия оптического излучения различного спектрального состава и степени когерентности с веществом, прикладных научных исследований и разработок современных цифровых микроскопов, томографов, цифровых голографических анализаторов, систем структурированного освещения и др., а также разработок вычислительных методов и компьютерных алгоритмов, учитывающих физические особенности формирования изображений различных видов.

Результаты инновационных проектов в области компьютерной фотоники широко востребованы в различных областях, таких как биомедицинские исследования и диагностика, материаловедение, различные инженерные приложения. Развитие компьютерной фотоники способствует формированию рынка современных прорывных технологий, обеспечению инновационного процесса высококвалифицированными кадрами, востребованными на рынке труда.

Благодарности

Автор выражает благодарность студентам, принявшим участие в исследованиях по тематике настоящей работы. Восстановление томограммы (рис. 3) проведено с использованием усовершенствованного компьютерного алгоритма, разработанного А. Карпецом, реконструкция трехмерного рельефа поверхности (рис. 6) выполнена А. Лопатухиной, результаты применения метода структурированного освещения (рис. 8 и рис. 9) получены С. Щекиным.

Литература

1. Гуров И.П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы. /В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики /Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 6-30.
2. Белашенков Н.Р., Гуров И.П., Лопатин А.И., Никифоров В.О. Инновационный проект создания нового поколения микроскопов с оптико-цифровым каналом (см. настоящий сборник).
3. Bellini M., Fontana R., Gurov I., Karpets A., Materazzi M., Taratin M., Zakharov A. Dynamic signal processing and analysis in the OCT system for evaluating multilayer tissues //Proc. SPIE. 2005. V.5857. P. 270-277.
4. Alarousu E., Gurov I., Hast J., Myllylä R., Prykäri T., Zakharov A. Optical coherence tomography evaluation of internal random structure of wood fiber tissue. In Sixth International Conference on Quality Control by Artificial Vision /K.W. Tobin, Jr., and

- M. Meriaudeau, eds. //Proc. SPIE. 2003. V.5132. P. 149-160.
5. Dresel T., Häusler G., and Ventzke H. Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar //Appl. Opt. 1992. V.31. P. 919-925.
 6. Васильев В.Н., Гуров И.П. Технология бесконтактного контроля объектов на основе когерентного и спектрального радаров в биомедицинских исследованиях и промышленности. В кн.: Оптические и лазерные технологии. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. С. 160-175.
 7. Gurov I., Ermolaeva E., Zakharov A. Analysis of low-coherence interference fringes by the Kalman filtering method //J. Opt. Soc. Am. A. 2004. V.21. P. 242-251.
 8. Балтийский С.А., Гуров И.П., Де Никола С., Коппола Д., Ферраро П. Современные методы цифровой голографии. /В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики /Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 91-117.
 9. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. М.: Радио и связь, 1987. С. 243-286.
 10. Schanrs U, Jüptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction //Appl. Opt. 1994. V.33. P. 179-181.
 11. Schnars U., Jüptner W. Digital recording and numerical reconstruction of holograms //Meas. Sci. Technol. 2002. V.13. P. R85-R101.
 12. Baltiysky S., Gurov I., De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., Coppola G. Digital holography applied to characterization of microelectromechanical systems //Proc. OSAV'2004, Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision (St. Petersburg, Russia, 19-21 October 2004). P. 202-209.
 13. Massatsch P., Charriere F., Cuhe E., Marquet P., Depeursinge C.D. Time-domain optical coherence tomography with digital holographic microscopy //Appl. Opt. 2005. V. 44. P. 1806-1812.
 14. Coppola G., Ferraro P., Iodice M., De Nicola S., Finizio A., Grilli S. A digital holographic microscope for complete characterization of microelectromechanical systems //Meas. Sci. Technol. 2004. V. 15. P. 529-539.
 15. Baltiysky S., Gurov I., De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., Coppola G. Characterization of microelectromechanical systems by digital holography method //The Imag. Sci. J. 2006. V. 54. N2.
 16. Гуров И.П., Захаров А.С., Лопатухина А.Д. Компьютерное восстановление изображений методом цифровой голографии с источником освещения малой когерентности /Доклад на 35-й научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО (31 января-3 февраля 2006 г.).
 17. Posdamer J.L., Altschuler M.D. Surface measurement by space-encoded projected beam systems //Comp. Graph. Image Process. 1982. V. 18. P. 1-17.
 18. Shtuchkin A. , Gurov I. Structured light range sensing using color patterns and two-stage dynamic programming //Proc. OSAV'2004, Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision (St. Petersburg, Russia, 19-21 October 2004). P. 40-47.

ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ СОЗДАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ МИКРОСКОПОВ С ОПТИКО-ЦИФРОВЫМ КАНАЛОМ

Н.Р. Белашенков, И.П. Гуров, А.И. Лопатин, В.О. Никифоров

Представлены результаты проекта по созданию нового поколения цифровых микроскопов с расширенными функциональными возможностями, в том числе цифрового микроскопа с улучшенной цветопередачей, обеспечиваемой методом цифрового синтеза цветных изображений, и технологического цифрового микроскопа широкого применения.

Введение

Методы микроскопии являются одними из наиболее важных для развития биомедицины и высоких технологий нового поколения [1]. Однако традиционные микроскопы с визуальным каналом наблюдения в настоящее время не удовлетворяют возрастающим потребностям неразрушающего контроля микрообъектов вследствие высокой трудоемкости наблюдений, субъективности результатов, отсутствия документируемости, невозможности применения современных математических методов анализа, классификации, распознавания и обработки изображений и т.д. Использование цифровых видеосистем в микроскопии обеспечивает высокую гибкость при создании модельного ряда серийных образцов с широким диапазоном функциональных возможностей.

Преимущества цифровой микроскопии достигаются в результате нового подхода к принципу построения микроскопов, состоящего в использовании *оптико-цифрового канала*. Последнее означает, что цифровое преобразование оптического сигнала является неотъемлемой частью оптического канала и необходимо для формирования высококачественного изображения.

Создание цифровых микроскопов требует решения ряда актуальных научно-технических задач [2], таких как разработка элементов и узлов оптико-цифрового канала, развитие эффективных методов формирования, преобразования и визуализации микроизображений для обеспечения гибкости характеристик цифровых микроскопов и получения документированных объективных результатов, что соответствует современным потребностям рынка.

При проведении работ в рамках совместного инновационного проекта СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО» выполнены исследования, проведена эскизная конструкторская разработка, созданы и апробированы макетные образцы цифровых микроскопов с новыми функциональными возможностями: цифрового микроскопа с улучшенной цветопередачей изображения объектов за счет использования спектрально селективных осветителей и монохромной видеокамеры и технологического цифрового микроскопа широкого применения.

Цифровой микроскоп с улучшенной цветопередачей

Адекватность цветопередачи является основной проблемой при работе с изображениями, выводимыми на видеомонитор. При использовании цветных видеосистем в оптической микроскопии пользователи постоянно сталкиваются с проблемой точной цветопередачи. Существующие технологии создания спектральных микрофильтров, напыляемых на светочувствительные элементы видеоматрицы, не позволяют обеспечить спектральную фильтрацию излучения с необходимой точностью. Поэтому для решения проблемы в профессиональных видеокамерах применяют трехматричную схему, т.е. используют три одинаковые черно-белые светочувствительные матрицы, каждая из которых регистрирует изображение в одном

из трех основных цветов (красный, зеленый, синий), после чего цветное изображение синтезируется из трех «монохроматических». Недостатками такого решения являются массо-габаритные показатели, сложность конструкции, высокая цена.

Альтернативный подход к решению проблемы цветопередачи заключается в использовании одной черно-белой матрицы и трехцветного (красный, зеленый, синий) источника освещения.

Объект наблюдения освещается последовательно импульсами основных цветов (синхронно с регистрацией видеокадров) с получением последовательности «монохроматических» изображений, из которых затем синтезируется цветное изображение с использованием цифровых преобразований. Такой способ освещения приводит к уменьшению частоты формирования цветных видеокадров примерно в три раза, однако количество точек в изображении (что для микроскопа более важно) будет вдвое больше, поскольку, как известно, количество элементов в цветной матрице того же размера в 3-4 раза меньше, чем в монохромной. Предложенный подход позволяет создать видеосистему для микроскопов с повышенным разрешением, корректной цветопередачей, простой конструкцией и низкой ценой.

Дополнительным преимуществом микроскопа с оптико-цифровым каналом является значительно более широкая область спектральной чувствительности видеоматриц по сравнению со спектральным диапазоном чувствительности глаза. Расширение спектрального диапазона работы микроскопа требует новых подходов к созданию оптических систем освещения и отображения.

Для построения трехцветного осветителя целесообразно использовать три «белых» светодиода, выделяя оптическими методами необходимые участки спектра. Сделать это можно, например, с использованием дихроичных зеркал.

Разработанная оптическая схема трехцветного осветителя представлена на рис. 1.

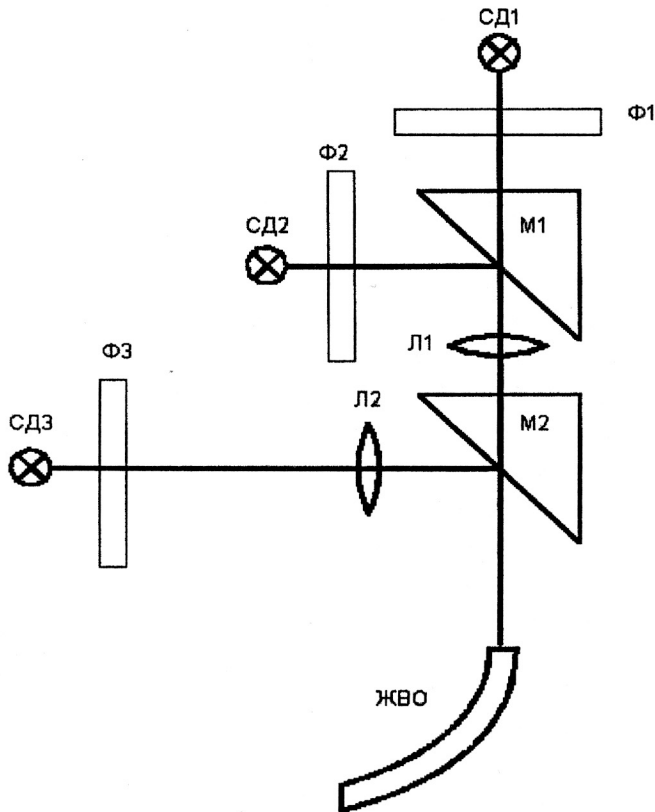


Рис 1. Схема осветителя видеомикроскопа с улучшенной цветопередачей (СД1 – СД3 – белые светодиоды; М1 и М2 – дихроичные зеркала в оправках; Л1 и Л2 – линзы; Ф1 – Ф3 – фильтры; ЖВО – жгут волоконнооптический)

Для экспериментов был использован микроскоп МИКМЕД-4 производства ОАО «ЛОМО», имеющий тринокулярную насадку со встроенным адаптером. Основные элементы оптической схемы микроскопа представлены на рис. 2.

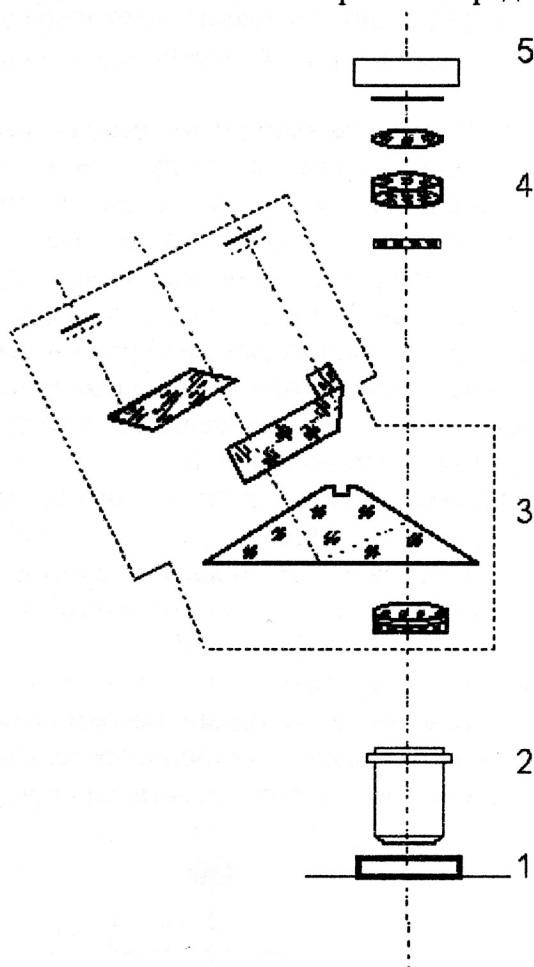


Рис. 2. Основные элементы оптической схемы микроскопа (1 – наблюдаемый объект, 2 – микрообъектив, 3 – тринокуляр, 4 – адаптер, 5 – видеоматрица)

Для регистрации изображений использованы бескорпусные видеокамеры производства фирмы ЭВС. В использованных видеокамерах активными элементами являются идентичные КМОП-видеоматрицы фирмы OmniVision с напыленными фильтрами (в цветной матрице) и без фильтров (в черно-белой).

Макет цифрового микроскопа с улучшенной цветопередачей был собран на штативе микроскопа проходящего света с ЖК дисплеем с диагональю экрана 6,4" (163 мм) и с матрицей фотоприемника с размерами пиксела 5,0 мкм × 5,0 мкм. В макете использовались штатные микрообъективы, в плоскости изображения которых была установлена матрица фотоприемника.

В цифровом микроскопе использовано разработанное специализированное программное обеспечение. Основная программа позволяет принимать изображения от видеокамеры по каналу USB, отображать его на дисплее, масштабировать, изменять основные характеристики изображения (яркость, контраст, насыщенность и т.п.), записывать и считывать данные. Кроме этого, программа обеспечивает управление параметрами работы видеокамеры, установку значений времени экспозиции, коэффициента усиления, соотношения цветов, а также включение, либо выключение режима автоматического выбора оптимальных значений параметров (эти значения выбирает микропроцессор, управляющий видеоматрицей).

При работе с черно-белой матрицей и трехцветным осветителем дополнительный программный модуль позволяет в ручном режиме управления осветителем последовательно регистрировать черно-белые изображения в трех основных цветах и затем синтезировать из них цветное изображение.

Для работы с трехцветным осветителем в динамическом режиме была проведена модернизация черно-белой видеокамеры и драйвера для синхронизации работы осветителя и камеры и идентификации кадров по цвету при их записи. В разработанном варианте информация о цвете записывается в первую строку данных видеокадра.

Управление цветовой температурой излучения, формируемого на выходе осветителя, осуществляется таким образом, что его интегральная мощность при изменении оттенка белого света остается постоянной.

При экспериментальных исследованиях осветителя получены кривые спектральных характеристик для различных участков спектра [3]. Продемонстрирована возможность управления цветовой температурой белого света в диапазоне 2000-8000 °К.

На рис. 3 показаны примеры изображения биоткани. Из рисунков видно существенное различие в качестве изображений при различных способах освещения-наблюдения.

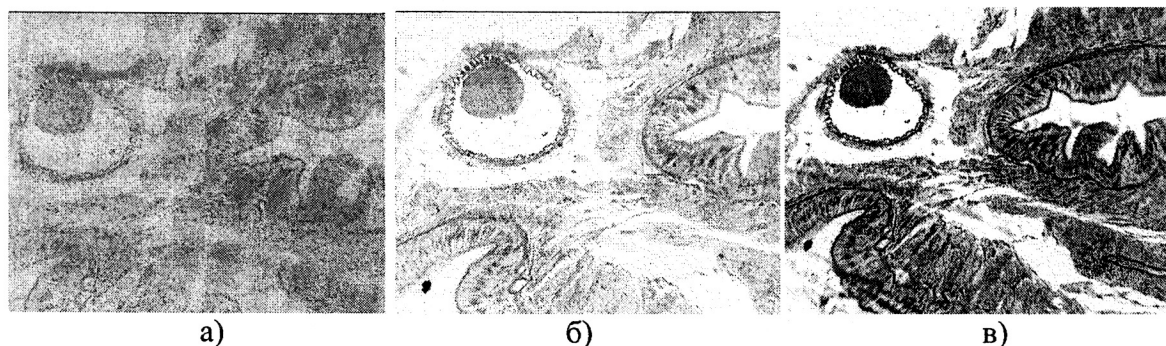


Рис. 3. Изображения, полученные цветной видеокамерой через объектив 10^{\times} с обычным освещением (а), при освещении белым светодиодом (б) и методом улучшенной цветопередачи (в)

Качество цветопередачи оценивалось на основе экспертных оценок, для получения которых приглашались опытные врачи и специалисты Военно-медицинской академии, научно-исследовательской лаборатории «Оптические технологии» Санкт-Петербургского медицинского университета им. акад. И.П. Павлова и других организаций. Специалисты подтвердили, что изображения, формируемые с использованием разработанного метода (см. рис. 3, в), более соответствуют визуальному восприятию образцов биотканей по сравнению с двумя другими методами освещения-наблюдения.

Таким образом, экспериментально подтверждена перспективность создания цифровых микроскопов с улучшенной цветопередачей на основе предложенного метода и разработанных технических решений.

Разработанная модель цифрового микроскопа с улучшенной цветопередачей является перспективной для многих отраслей, в которых при анализе микрообъектов основной характеристикой диагностики является цвет объектов, например, в области медицины, биологии, криминалистики и т.д.

Разработка модельного ряда цифровых технологических микроскопов

Работы по созданию модельного ряда цифровых технологических микроскопов проведены с целью разработки принципов построения микроскопов без визуального канала (далее – микровизоров) и создания макетных образцов микровизоров для последующего серийного выпуска.

Система наблюдения и регистрации изображения исследуемого объекта цифрового микроскопа включает в себя объектив, видеоадаптер, матрицу фотоприемника и жидкокристаллический дисплей (10... 15 оптических и оптико-электронных компонентов).

Объективными недостатками традиционного конструкторского решения модуля визуального канала микроскопа являются:

- высокая утомляемость наблюдателя при длительной работе на микроскопе;
- сложность конструкции, объединяющей в одном модуле системы наблюдения и регистрации изображения исследуемого объекта;
- необходимость компромисса при решении вопросов аберрационной коррекции узлов, являющихся общими для систем наблюдения и регистрации изображения.

Построение системы наблюдения и регистрации изображения в цифровом микроскопе с матричным фотоприемником и жидкокристаллическим дисплеем устраняет указанные недостатки.

В технологическом микроскопе в качестве системы смены увеличения целесообразно использовать набор серийных микрообъективов с оптической длиной тубуса “бесконечность”. В качестве фотоприемника для макетных образцов микровизоров были выбраны модели аналоговых и цифровых цветных светочувствительных матриц. Для отображения микроизображений использованы жидкокристаллические дисплеи, совместимые по формату с выбранными светочувствительными матрицами. Исходя из габаритных характеристик дисплеев и матриц фотоприемников, можно определить значения электронного увеличения микровизора, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Значение увеличения при различных вариантах выбора видеокамеры и дисплея

Тип матрицы фотоприемника	Увеличение микровизора с ЖК дисплеем	
	PA050XS1 с диагональю 127 мм (5")	PD064VT4 с диагональю 163 мм (6,4")
ICX259AK (1/3") с диагональю 6,0 мм	21	-
ICX259AK (1/4") с диагональю 4,5 мм	28	-
Матрица (1/2") с диагональю 8,0 мм в двух режимах электронного увеличения	-	20,4
	-	40,8

Заметим, что микрообъектив проецирует изображение объекта в бесконечность, поэтому необходима еще одна оптическая система, называемая проективом, которая проецирует изображение объекта после микрообъектива на матрицу фотоприемника. При проведении проекта выполнены расчеты характеристик проективов с учетом параметров используемых микрообъективов с различной степенью увеличения. При

использовании микрообъективов увеличением от 2,5 до 100 крат увеличение оптической системы «микрообъектив / проектив» составляет от 1 до 40. Разрешающая способность оптической системы «микрообъектив / проектив» по сравнению с разрешающей способностью микрообъектива несколько ухудшается, однако при этом увеличивается глубина резкости.

В результате проведенных расчетов установлено, что для получения наиболее высокой разрешающей способности цифровых микроскопов абберационная коррекция оптической системы должна быть планахроматической, требуется использовать камеры с минимально возможными размерами пикселей и обеспечить максимально возможное оптическое и электронное увеличение.

На основании проведенных расчетов выполнена конструкторская разработка и созданы макетные образцы микровизоров.

Общий вид макета микровизора показан на рис. 4.

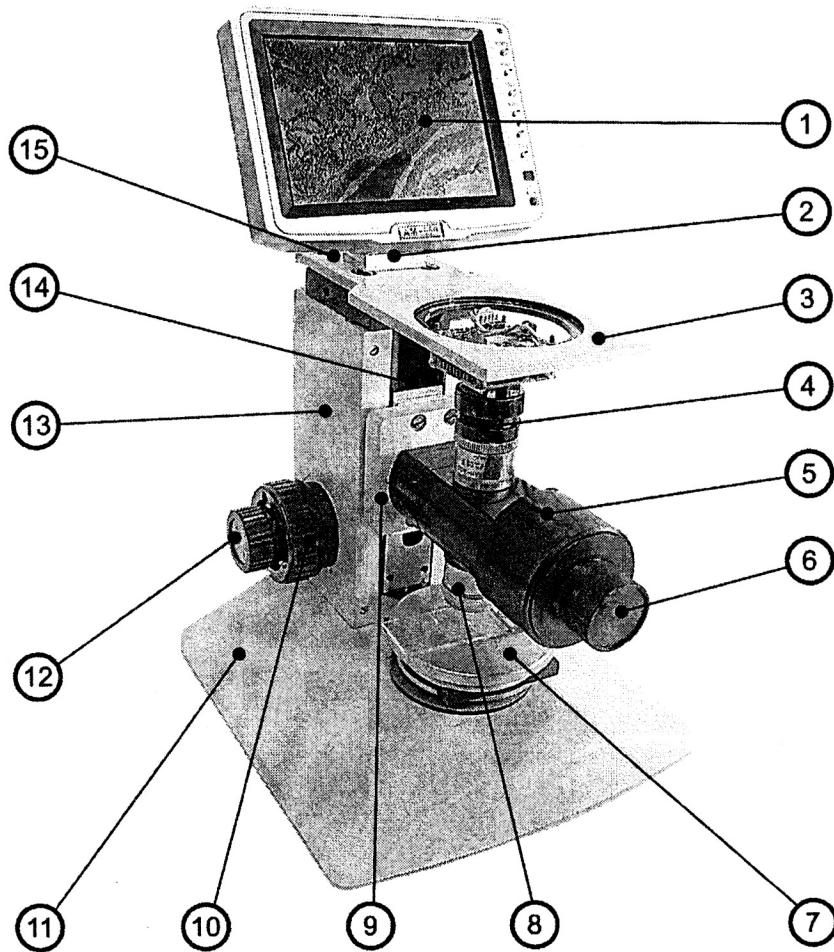


Рис. 4. Общий вид макета микровизора (1 – ЖКД; 2 – механизм поворота ЖКД; 3 – верхний предметный столик; 4 – камера с проекционным объективом; 5 – светодиодный осветитель отраженного света; 6 – рукоятка поворота осветителя; 7 – нижний предметный столик; 8 – сменный объектив; 9 – механизм поворота осветителя; 10 – рукоятка грубой фокусировки; 11 – штатив; 12 – рукоятка тонкой фокусировки; 13 – корпус; 14 – направляющая фокусирующего перемещения; 15 – рукоятка механизма поворота)

Светодиодный осветитель отраженного света 5 установлен на оси поворотного механизма 9, жестко закрепленного на направляющей 14 фокусирующего механизма. Механизм поворота осветителя обеспечивает возможность его установки в двух фиксированных положениях для работы в прямом и инвертированном режиме. Поворот осветителя до фиксированного положения осуществляется с помощью рукоятки 6.

В корпусе осветителя размещены светодиод с эллиптическим коллектором и светоделительная пластинка. По оси светоделительной пластинки сверху и снизу в корпусе осветителя имеются два отверстия с объективной резьбой ОБ 3/4"×1/36". В одно из отверстий устанавливается сменный объектив 8, в другое отверстие - проекционный объектив, на корпусе которого жестко закреплена цветная телевизионная камера 4 без корпуса.

При прямом освещении сменный объектив устанавливается в нижнее положение, а проекционный объектив с камерой - в верхнее. В инвертированном варианте освещения сменный объектив устанавливается в верхнее положение, а проекционный объектив с камерой - в нижнее.

Фокусирующий механизм, расположенный в корпусе 13 (см. рис. 4) штатива 11, обеспечивает вертикальное перемещение осветителя. Грубое перемещение осуществляется рукоятками 10 большего диаметра, точное перемещение - рукоятками 12 меньшего диаметра. Рукоятки расположены на одной оси и выведены с обеих сторон корпуса. Общий диапазон грубой фокусировки составляет не менее 60 мм, при этом за один оборот рукоятки 10 направляющая фокусирующего механизма перемещается на 6,3 мм.

На одном штативе микроскопа отраженного света последовательно были собраны два макета микровизора:

модель 1 - с ЖК дисплеем с диагональю экрана 5" (127 мм) и с матрицей (аналоговая видеосистема) с размерами пиксела 6,5×6,25 мкм;

модель 2 - с ЖК дисплеем с диагональю экрана 5" (127 мм) и с матрицей (аналоговая видеосистема) с размерами пиксела 4,9×4,7 мкм.

На макетах были произведены измерения линейного увеличения и разрешающей способности микровизора в плоскости объекта. В результате проведенных исследований установлено, что технические характеристики микровизоров как видеосистем, регистрирующих изображение объектов исследования, не уступают аналогичным системам микроскопов, а по некоторым характеристикам превосходят их.

Модельный ряд микровизоров целесообразно использовать в следующих областях:

- модель 1 - для анализа рельефных "грубых" объектов, например, для задач фрактографии, порошковой металлургии, для объектов в области деятельности МЧС и т.д., а также для оборудования учебных классов на кафедрах университетов, например, по дисциплинам материаловедения, для наблюдения и изучения учебных препаратов одновременно широкой аудиторией студентов с возможностью записи изображения для дальнейшей индивидуальной компьютерной обработки, визуализации и документирования отображаемой информации;

- модель 2 - с повышенными требованиями, связанными с выбором цифровых матриц и дисплеев с высоким разрешением, предназначены для анализа более тонких объектов, например, для объектов микроэлектронной или металлургической промышленности.

В результате проекта отработаны методики расчета и оптимизации оптических параметров микровизоров для решения широкого круга задач потребителей и выполнены разработки модельного ряда микровизоров.

Заключение

Анализ требований потребителей показал, что микровизоры успешно решают задачи классической микроскопии, а в ряде случаев имеют заметные преимущества. Потребители отметили целый ряд достоинств микровизоров: комфортность наблюдения объектов, простоту в работе, компактность, эргономичность, малый вес, универсальность и многое другое. Отмечено удобство работы со светодиодными осветителями – их надежность, компактность, безопасность и комфортность.

Особенно следует отметить наличие прямого изображения в микровизорах, что очень удобно потребителям. В классической микроскопии в визуальном канале изображение объекта перевернуто, требуется наличие специальных оптических насадок или систем для получения прямого изображения – это сложные, трудоемкие, дорогостоящие системы.

Ввиду необходимости расширения модельного ряда микровизоров требуется комплектация моделей при различных методах освещения и контрастирования [4, 5] в связи с многообразием объектов исследования. Требуется создание моделей с отраженным, проходящим и смешанным освещением. Расширение функциональных возможностей микровизоров обеспечивается введением дополнительных методов контрастирования объектов: косового освещения, поляризованного света, дифференциально-интерференционного и фазового контрастов, темного поля и люминесценции.

Микровизор может служить эффективным средством для оборудования учебных классов, для наблюдения учебных препаратов одновременно широкой аудиторией с возможностью документирования отображаемой информации. Потребители подтвердили, что универсальность микровизоров определяет их перспективность с точки зрения рынка изделий в области микроскопии, включающего все основные отрасли народного хозяйства и медицину.

Литература

1. Slayter E.M, Slayter H.S. Light and electron microscopy. Cambridge Univ. Press, 1992.
2. Проектирование оптических систем /Под ред. Р. Шеннона. М.: Мир, 1983.
3. Белашенков Н.Р., Гуров И.П., Лопатин А.И., Мельников А.В., Никифоров В.О. Осветительная система для микроскопа с регулируемой цветовой температурой излучения //Известия вузов. Приборостроение (представлена к опубликованию).
4. Васильев Б.И. Оптика поляризационных приборов. М.: Машиностроение, 1969.
5. Франсон М. Фазово-контрастный и интерференционный микроскопы. М.: Физматлит, 1960.

ГРАДИЕНТНЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Л.А. Губанова, Э.С. Путилин

В работе рассмотрена возможность изготовления оптических покрытий с заданным распределением коэффициента отражения или пропускания по поверхности оптического элемента, определяемым распределением толщин слоев, формирующих покрытие. Приведен анализ влияния положения оптического элемента, испарителя и диафрагм, расположенных между испарителем и оптическим элементом, на характер распределения толщин слоев по поверхности элемента.

Введение

Развитие лазерной техники и систем наблюдения за объектами как в наземных, так и в космических условиях требует создания малогабаритных оптических элементов, обладающих заданным распределением спектральных зависимостей коэффициента отражения или пропускания по их поверхности. Так, для создания лазерных источников высокой яркости необходимы зеркала, обладающие гауссовым или псевдогауссовым распределением энергетического или амплитудного коэффициента отражения по поверхности элемента. В этом случае нас интересует величина коэффициента отражения в достаточно узком спектральном интервале. При исследовании спектральных зависимостей наземных или космических объектов значительный интерес представляют малогабаритные устройства, у которых максимальное пропускание в достаточно узкой спектральной области зависит от координаты на поверхности элемента. Сканируя изображение относительно элемента, можно получить спектральную зависимость, определяемую характеристиками наблюдаемого объекта. В качестве таких элементов используются так называемые клиновые фильтры, которые могут быть построены по схеме интерферометра Фабри-Перо. Аналогичная задача, решаемая без сканирования, представляет интерес при использовании фотоэлектрических регистрирующих устройств, работающих при больших перепадах интенсивности, попадающих на них светового излучения. В этом случае пропускание или отражение должно очень слабо зависеть от длины волны излучения. Эта задача решается с помощью так называемых оттенителей. Оттенители – это системы, образованные металлическими слоями или многослойными диэлектрическими системами, у которых толщина слоя меняется по радиальной координате. Еще одной возможностью использования тонких слоев, у которых толщина меняется по координате поверхности, является вакуумная асферизация. Для задач вакуумной асферизации могут быть использованы металлические и диэлектрические слои, если асферизирующая система предназначена для работы с отраженным излучением. Если же она предназначена для работы с прошедшим излучением, то необходимо использование слоев с близким к подложке показателем преломления. Отсутствие пленкообразующих материалов с показателями преломления, близкими к показателю преломления асферизируемого элемента, сдерживают развитие этого направления.

Основные результаты

Как известно, величины энергетических коэффициентов отражения R и пропускания T определяются структурой покрытия, т.е. числом, порядком расположения, показателями преломления и оптическими толщинами слоев [1]:

$$R = |r|^2,$$

$$r = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})},$$

где m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} – элементы матрицы преобразования электромагнитного излучения, которая иногда в литературе называется матрицей интерференции. Матрица интерференции системы слоев определяется как результат произведения матриц интерференции отдельных слоев:

$$M = \prod_{j=1}^k M_j, \quad M_j = \begin{vmatrix} \cos \varphi_j & i(n_j)^{-1} \sin \varphi_j \\ in_j \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \end{vmatrix}.$$

Здесь $\varphi_j = 2\pi \frac{n_j d_j(\rho)}{\lambda}$ – фазовая толщина слоя, n_j – показатель преломления, $d_j(\rho)$

– геометрическая толщина j -го слоя, которая может быть функцией координаты подложки, λ – длина волны падающего излучения, на которой производится расчет коэффициентов пропускания и отражения.

Как видно из этих выражений, величины энергетических коэффициентов отражения и пропускания могут быть функциями координат подложки, если толщина слоев по подложке непостоянна.

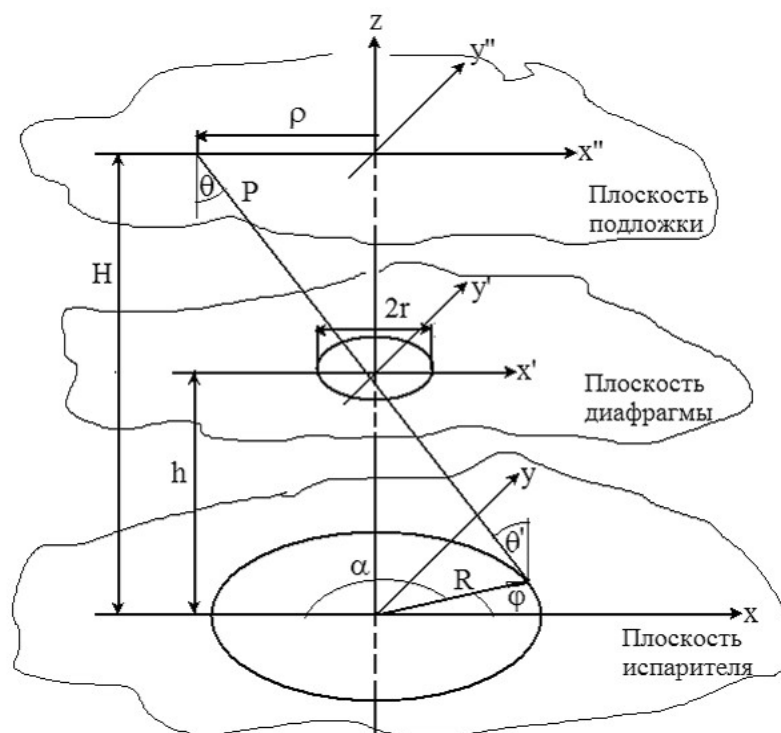


Рис. 1. Схема формирования градиентных слоев

В ранних работах [2, 3] нами было исследовано распределение толщины слоев, формируемых на оптических элементах, имеющих плоскую или сферическую форму поверхности, при электронно-лучевом испарении пленкообразующих материалов в вакууме. Были рассмотрены случаи, когда осаждение слоя производится на неподвижную, вращающуюся вокруг оси или совершающую планетарное вращение подложку.

Для этих случаев были определены условия, при которых толщина слоя по поверхности оптического элемента постоянна или является функцией одной или двух (радиальной и угловой) координат. Получаемые при этом пленки обладают малым градиентом толщины по поверхности оптического элемента. Для увеличения градиента толщины по поверхности оптического элемента можно использовать способ электронно-лучевого испарения диэлектриков в вакууме. Чтобы увеличить градиент толщины, необходимо поместить между испарителем и вращающейся подложкой подвижную или неподвижную диафрагму или экран простейшей формы.

На рис. 1 представлена схема формирования слоев с переменной по радиусу элемента толщиной и управляемым градиентом толщины. При изготовлении градиентных зеркал толщина слоя определяется следующим выражением [3]:

$$d_j(\rho) = \frac{\beta v}{\pi g} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\cos \theta \cos \theta' d\varphi}{P^2(\rho, \varphi)},$$

$$\cos \theta = \cos \theta' = \frac{h}{P},$$

$$P = (R^2 + H^2 + \rho^2 + 2R\rho \cos \varphi)^{0.5},$$

$$\alpha = \arccos \frac{\rho^2(1-k)^2 + k^2 R^2 - r^2}{2\rho R k(1-k)}, k = \frac{H-h}{H},$$

где β – коэффициент конденсации, определяющий отношение числа осажденных молекул к общему числу молекул; v – скорость испарения вещества; g – плотность образовавшегося слоя; H – расстояние между плоскостью, в которой расположен испаритель, и плоскостью, в которой расположена подложка; r – радиус диафрагмы; h – расстояние от плоскости, в которой расположена диафрагма, до плоскости испарителя; P – расстояние от точки на поверхности испарителя до точки на поверхности подложки; α – угловая координата тонкого поверхностного кольцевого испарителя радиусом R .

Возможные распределения толщины слоя по поверхности оптического элемента представлены на рис. 2. Как видно из этого рисунка, возможно, по существу, два разных типа распределения толщины слоя по радиальной координате – распределение первого типа, когда в центре подложки имеется слой постоянной толщины, и второго типа, когда в центре подложки слой отсутствует. Величина зон, в которых толщина слоя постоянна или слой отсутствует, меняется от минимального размера, близкого к нулю, до максимального, определяемого параметрами испарительной установки.

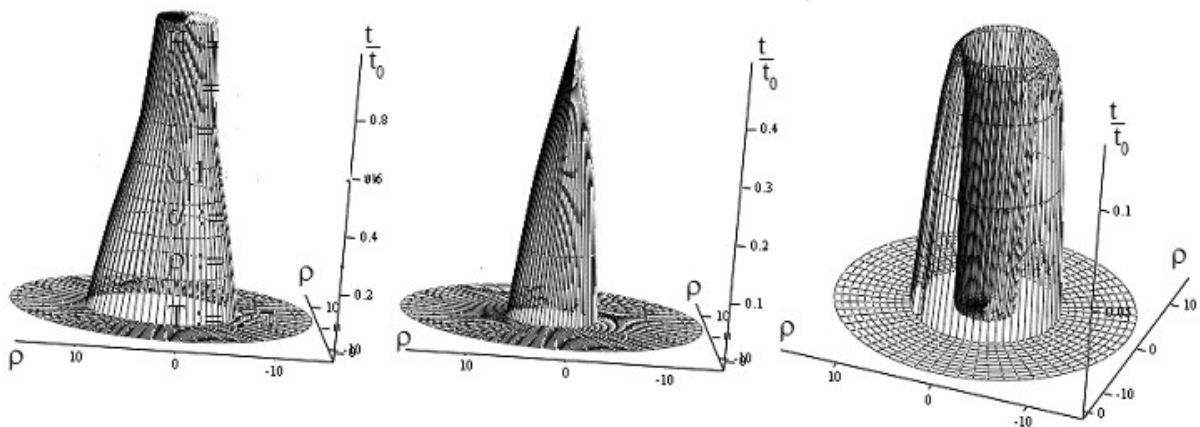


Рис. 2. Возможные распределения толщины слоя

На рис. 3 представлены распределения коэффициента отражения по поверхности оптического элемента, которые соответствуют распределениям толщины слоя, пред-

ставленным на рис. 2. Как видно из рис. 3, распределение коэффициента отражения обладает осевой симметрией, а отклонений от симметрии не наблюдается.

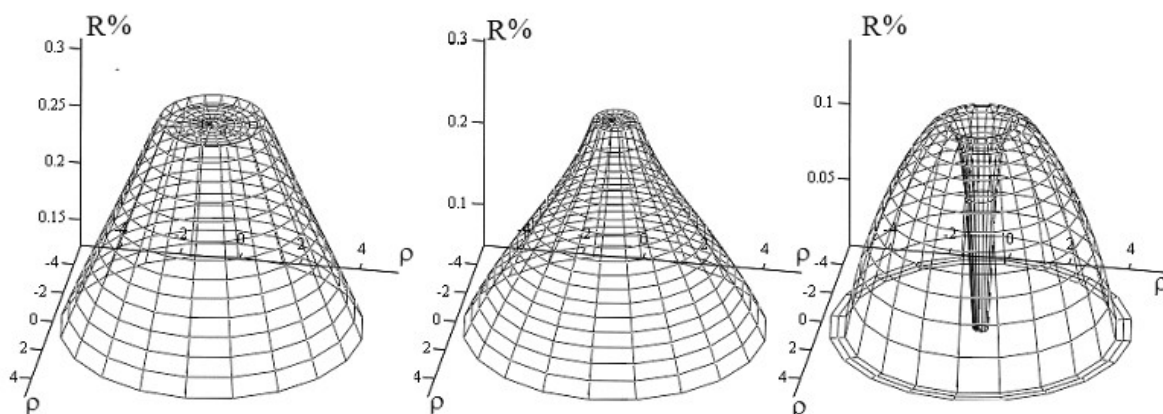


Рис. 3. Распределение коэффициента отражения градиентных зеркал

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости энергетического коэффициента отражения градиентных зеркал, изготовленных на основе диэлектрических ленок из оксидов циркония и кремния. Оптические толщины слоев в центре подложки кратны $\lambda_0/4$, где λ_0 – длина волны лазерного излучения. На рисунке представлены несколько зависимостей, которые соответствуют градиентным зеркалам, изготовленным в разное время. Анализируя рисунок, можно сделать вывод о вполне удовлетворительной воспроизводимости распределения коэффициента отражения вдоль радиальной координаты.

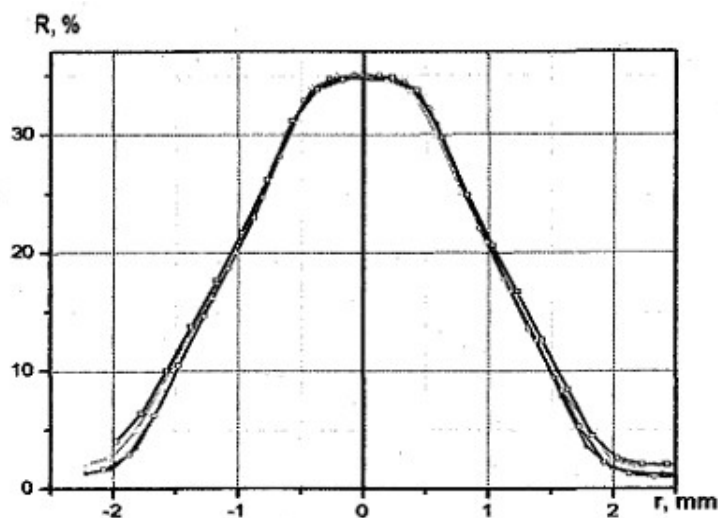


Рис. 4. Энергетическая характеристика экспериментально изготовленного градиентного зеркала

Для получения клиновых фильтров необходимо иметь диэлектрические системы, у которых толщина слоя меняется приблизительно по линейному закону вдоль одной из координат, но при этом остается постоянной вдоль другой координаты. Наиболее просто реализовать подобную ситуацию в полярной системе координат. Однако практический интерес представляет использование декартовой системы координат на поверхности подложки.

Нами показано, что получение систем, представляющих практический интерес, возможно при использовании простейших экранов. На рис. 5 представлено распределе-

ние толщины слоя по поверхности оптического элемента при использовании плоского экрана. Как видно из этого рисунка, используя указанное расположение экрана относительно поверхности оптического элемента, можно получить клиновидный интерференционный фильтр, обладающий заданными характеристиками.

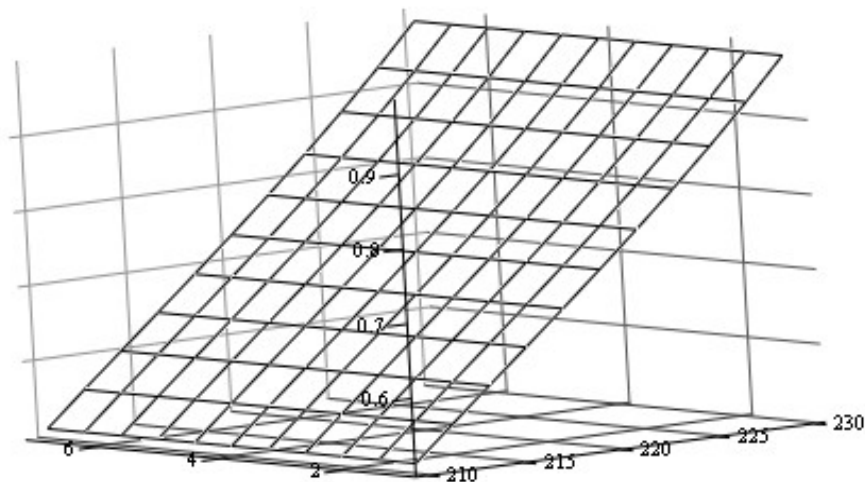


Рис. 5. Распределение толщины слоя для плоского экрана

Заключение

Разработана модель осаждения слоя через диафрагму или экран, расположенные между тонким кольцевым поверхностным испарителем и деталью.

Математическая модель осаждения слоя экспериментально подтверждена для большинства пленкообразующих материалов.

Распределение коэффициента отражения по поверхности подложки описывается гауссоидой с показателем, большим или равным четырем.

Показано, что на элементах размерами менее 30 мм можно получить толщину слоя, линейно меняющуюся по одной координате и сохраняющую постоянные значения по другой координате.

Работа выполнена в рамках проекта «Исследование свойств и синтез оптических покрытий с управляемой топологией».

Литература

1. Бернинг П.Х., Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок / Физика тонких пленок. Под ред. Г. Хасса. М.: Мир, 1997. Т.1. С 91–151.
2. Путилин Э.С., Дмитренко В.А., Губанова Л.А. Многослойные диэлектрические зеркала с переменным профилем коэффициента отражения для лазерных систем // Оптический журнал. 2000. Т.67. № 3. С. 91–97.
3. Василевский О.Н., Губанова Л. А., Путилин Э.С. Получение пленок с большим градиентом толщины методом вакуумного испарения. // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1989. Вып. 1. С. 102.
4. Василевский О.Н., Губанова Л.А., Белов В.А., Путилин Э.С. Получение пленок с большим градиентом толщины методом вакуумного испарения. // Техника средств связи. 1989. №1. С. 102–107.

АХРОМАТИЧЕСКИЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ

($\lambda_1:\lambda_2\approx 1:3$, $\rho\leq 1\%$)

Л.А. Губанова, Э.С. Путилин

В статье представлены основные особенности этапов разработки просветляющих покрытия для УФ-области спектра, а также конструкции и спектральные характеристики антиотражающих покрытий для материалов, прозрачных в рассматриваемой области спектра.

Введение

Расширение рабочей области спектра, используемой в современных оптических приборах, приводит к необходимости создания просветляющих покрытий, работающих в широком спектральном диапазоне. Работа оптических систем в ультрафиолетовой области спектра вызывает сложности при разработке просветляющих (антиотражающих) покрытий на оптических элементах. Эти сложности связаны с тем, что оптические материалы, прозрачные в УФ области спектра, обладают малым показателем преломления (1,41–1,46). Это обстоятельство, с одной стороны, позволяет использовать оптические элементы без просветляющих покрытий, поскольку остаточный (френелевский) коэффициент отражения в этом случае не превосходит 3,5%, но с другой – усложняет конструкции просветляющих систем. Разработка просветляющих систем для УФ-области спектра осложняется также тем, что для создания интерференционных покрытий, работающих в рассматриваемой области спектра, существует ограниченный набор пленкообразующих материалов, поскольку большая часть их непрозрачна в этом диапазоне. Существенным ограничением на использование пленкообразующих материалов является то, что для улучшения эксплуатационных характеристик некоторых из них необходим нагрев оптической детали в процессе изготовления покрытия. Используемые в ряде оптических систем детали, изготовленные из фторида кальция, не допускают нагрева, поскольку при нагревании они приобретает фиолетовую окраску, что свидетельствует о снижении пропускания оптических элементов в УФ-области спектра. Такое изменение свойств фторида кальция приводит к ограничению используемых для просветляющих покрытий пленкообразующих материалов, т.е. исключает в конструкции такой распространенный материал, как фторид магния.

При создании просветляющих систем для УФ-области спектра необходимо также учитывать тот фактор, что как у пленкообразующих материалов, так и у материалов, из которых изготавливаются оптические элементы, наблюдается увеличение дисперсии показателя преломления в коротковолновой области спектра. Это обстоятельство накладывает дополнительные условия на разработку просветляющих покрытий в рассматриваемом спектральном диапазоне, поскольку показатели преломления тонких слоев существенно зависят от условий осаждения и обрамления этого слоя. Последние обстоятельства требуют особенно тщательного соответствия расчетных и экспериментально полученных значений оптических толщин и показателей преломления слоев покрытия.

Пленкообразующие материалы, применяемые для просветления оптических деталей, характеризуются, как известно, показателем преломления, дисперсией показателя преломления, положением коротковолновых и длинноволновых границ поглощения, химической стабильностью и механической прочностью, а также совместимостью слоев друг с другом, т.е. на границах раздела между слоями и между подложкой и слоями должны отсутствовать химические реакции. Поэтому при расчете конструкции покрытия необходимо точно знать все параметры пленкообразующих материалов. Для материалов, работающих в УФ области спектра, диапазон прозрачности пленкообразующих материалов лежит в пределах от 0,15 мкм до 2 мкм. В этом диапазоне материалы должны обладать высокой пропускной способностью, т.е. минимальным коэффициентом

поглощения. Материал считается прозрачным, если величина его коэффициента поглощения меньше 10 см^{-1} , это означает, что коэффициент экстанции в исследуемой области спектра не может превышать 10^{-3} .

Все эти параметры определяются природой пленкообразующего материала и условиями формирования слоев, из которых состоит покрытие.

Основные результаты

Нами был проведен анализ для таких пленкообразующих материалов, как диоксид кремния (SiO_2), диоксид гафния (HfO_2) и фторид магния (MgF_2). Наблюдается значительное увеличение показателя преломления у пленкообразующих материалов в УФ области спектра, поэтому при расчете конструкций покрытий, работающих в УФ области спектра, необходимо учитывать дисперсию показателя преломления. На дисперсию показателя преломления оказывает влияние не только состав пленкообразующего материала, но и условия формирования покрытия. Поэтому полученные нами результаты позволили скорректировать конструкцию просветляющего покрытия, работающего в ультрафиолетовой и видимой области спектра.

С целью получения достоверных значений показателя преломления пленкообразующих материалов на нашей кафедре давно проводятся исследования по изучению факторов, влияющих на стабильность показателей преломления таких материалов. В интересующем нас спектральном диапазоне прозрачны лишь несколько материалов, а именно MgF_2 , SiO_2 , HfO_2 . Ниже представлены результаты анализа показателей преломления и дисперсии показателя преломления этих материалов.

Для аттестации пленкообразующих материалов на промышленной вакуумной установке были изготовлены пленки из MgF_2 , SiO_2 и HfO_2 , толщиной, кратной $\lambda/4$, для некоторых длин волн. Пленки формировались на подложках из кварцевого стекла марки КУ-1. Значения показателей преломления пленок для длин волн, на которых толщина их кратна $\lambda/4$, вычислялись по величине коэффициента пропускания в экстремуме. Измерение спектральных коэффициентов энергетического пропускания проводилось на спектрофотометре СФ-26. Дисперсионные зависимости показателя преломления были получены путем интерполяции имеющихся значений показателя преломления для разных длин волн.

Пленки оксида кремния (SiO_2). На рис. 1 представлены дисперсионные зависимости показателя преломления оксида кремния, полученные авторами и приведенные в работах [2, 3]. Поскольку оксид кремния обладает тем же показателем, что и плавный кварц, измерения показателя преломления проводились по аттестации двухслойной системы, образованной четвертьволновыми слоями HfO_2 и SiO_2 . Осаждение пленок SiO_2 проводилось методом электронно-лучевого испарения при остаточном давлении в камере 10^{-3} Па и скорости осаждения 1 нм/с на прогретую до 300°C подложку. Четвертьволновая пленка оксида гафния на подложке из кварцевого стекла формировалась при той же температуре поверхности подложки, давлении остаточных газов в вакуумной камере и при скорости осаждения 0,2 нм/с. В литературных данных указания об условиях осаждения пленок оксида кремния отсутствуют. Как видно из рис. 1, пленки SiO_2 в ультрафиолетовой части спектра имеют меньшие значения показателя преломления, чем массивный материал. В видимой области спектра значения показателей преломления пленок совпадают со значением показателя преломления массивного материала. Отличие в показателе преломления в ультрафиолетовой части спектра связано, по-видимому, с пористостью пленки.

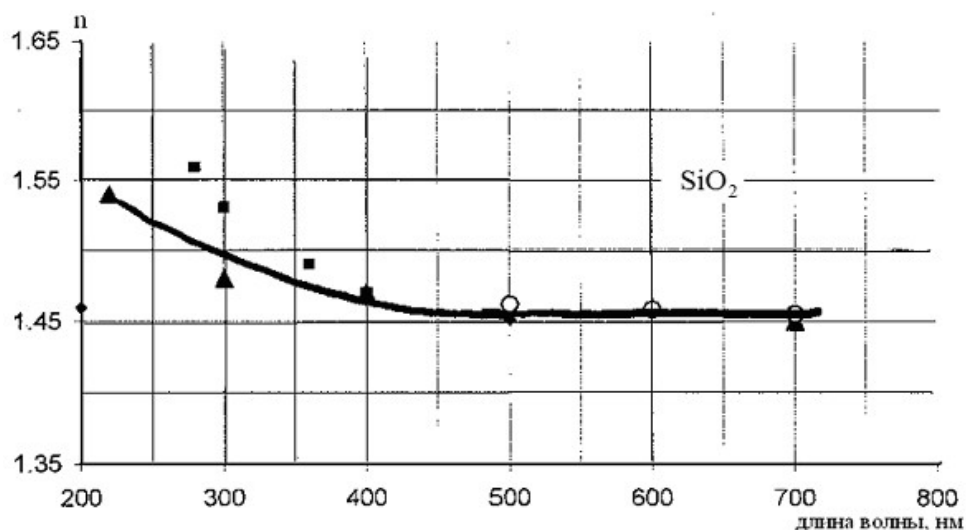


Рис. 1. Спектральная зависимость показателя преломления пленок оксида кремния: ▲ - экспериментальные результаты, полученные авторами, ○ - результаты, приведенные в работе [2], ■ - значения показателя преломления массивного материала из [3]

Пленки фторида магния (MgF_2). На рис. 2 приведена спектральная зависимость показателей преломления пленок и массивного материала фторида магния. Пленки фторида магния были получены методом электронно-лучевого испарения при давлении остаточных газов в камере, равном 10^{-3} Па. Осаждение пленок производилось на нагретую до $300^\circ C$ подложку из плавленого кварца со скоростью $0,5$ нм/с. Как видно из рисунка, значения показателей преломления пленок фторида магния, полученные при приведенных выше условиях, с достаточной степенью точности совпадают со значениями показателя преломления массивного материала в широком спектральном диапазоне. Указанное обстоятельство позволяет сделать предположения о том, что пленки MgF_2 обладают незначительной пористостью и ориентация кристаллитов носит произвольный характер.

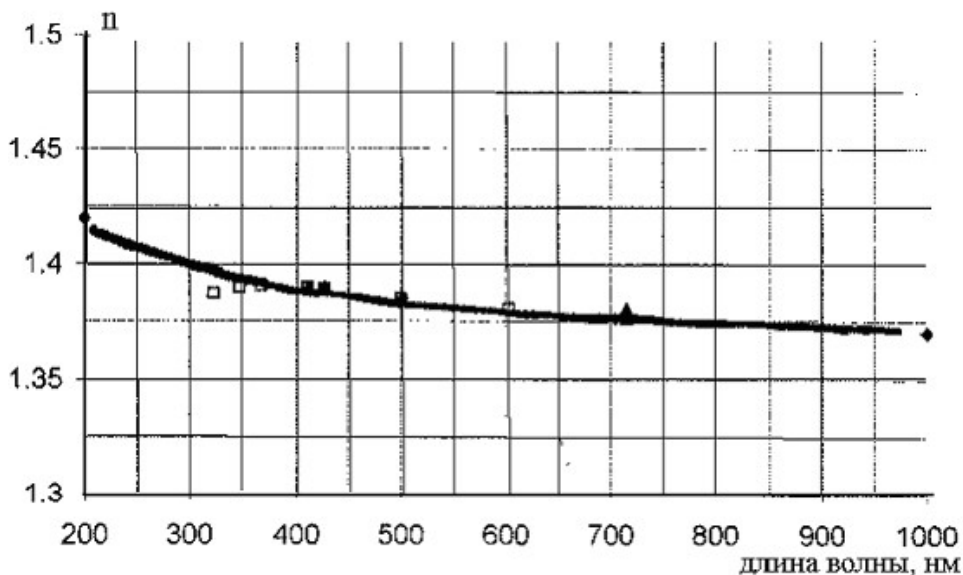


Рис. 2. Спектральная зависимость показателя преломления фторида магния: ▲ - экспериментальные результаты, полученные авторами, ■ - результат, приведенный в работе [1]

Пленка оксида гафния (HfO_2). На рис. 3 представлены спектральные зависимости показателя преломления оксида гафния. Пленка оксида гафния была получена методом электронно-лучевого испарения при остаточном давлении газов в вакуумной камере 10^{-3} Па. Осаждение проводилось на прогретую до 300°C подложку из плавленого кварца марки КУ-1 со скоростью осаждения $0,2$ нм/с. На этом же рисунке представлены значения показателя преломления оксида гафния, приведенные в литературе [2, 3]. Вертикальная линия на длине волны 550 нм изображает различие в величине показателей преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей кристалла HfO_2 .

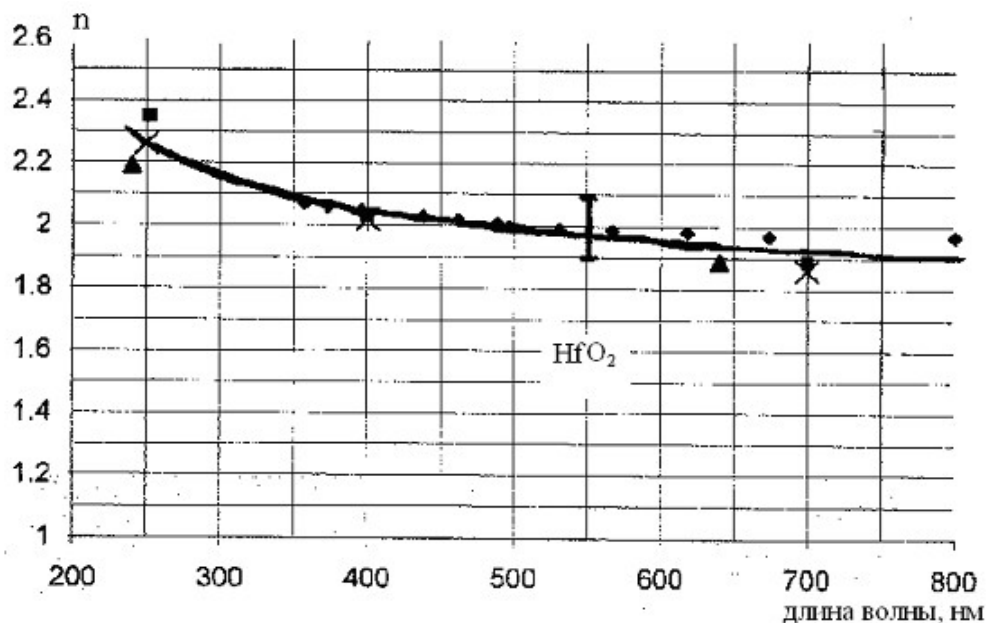
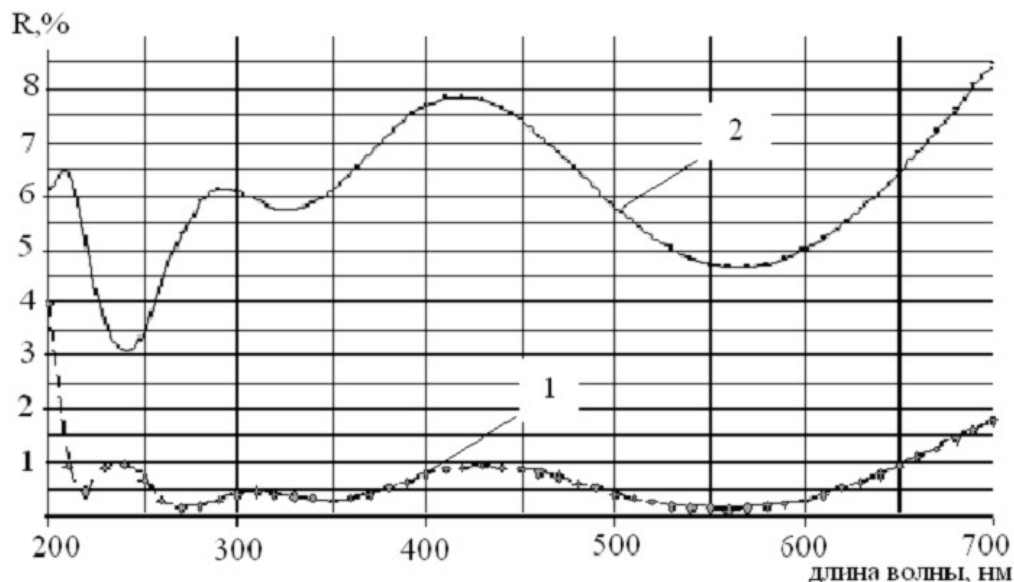


Рис. 3. Спектральная зависимость показателя преломления пленок оксида гафния: x - экспериментальные данные, ♦ и ▲ - значения показателей преломления пленок и массивного материала, приведенные в [2, 3]



Ошибка!

Рис. 4. Влияния дисперсии пленкообразующих материалов на спектральную характеристику просветляющего покрытия: 1 – без учета дисперсии пленкообразующих материалов, 2 – с учетом дисперсии пленкообразующих материалов

Как видно из рис. 3, дисперсионная зависимость показателя преломления, полученная авторами, достаточно хорошо совпадает с литературными данными. Это говорит о том, что при расчетах можно пользоваться значениями показателя преломления оксида гафния, приведенными в литературе. Проведенные нами измерения отражения и пропускания пленки гафния толщиной 250 нм показали, что эта пленка начинает интенсивно поглощать излучение с длиной волны короче 230 нм. На длине волны 200 нм поглощение составляет более 40%.

С целью определения этого влияния на спектральные характеристики просветляющих покрытий, содержащих слои фторида магния, оксидов гафния и кремния, нами были проведены расчеты спектральной характеристики разработанного ранее просветляющего покрытия с учетом полученных результатов. На рис. 4 представлены спектральные характеристики антиотражающего покрытия без учета (кривая 1) и с учетом дисперсии показателей преломления (кривая 2) пленкообразующих материалов.

Как видно из приведенных зависимостей, по всему спектральному диапазону наблюдается значительное различие в коэффициентах отражения интерференционного покрытия, содержащего слои из исследованных нами материалов. Необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что во всем спектральном диапазоне происходит значительный рост коэффициента отражения просветляющего покрытия. Это связано с тем, что существенно изменяются фазовые толщины слоев, образующих это покрытие.

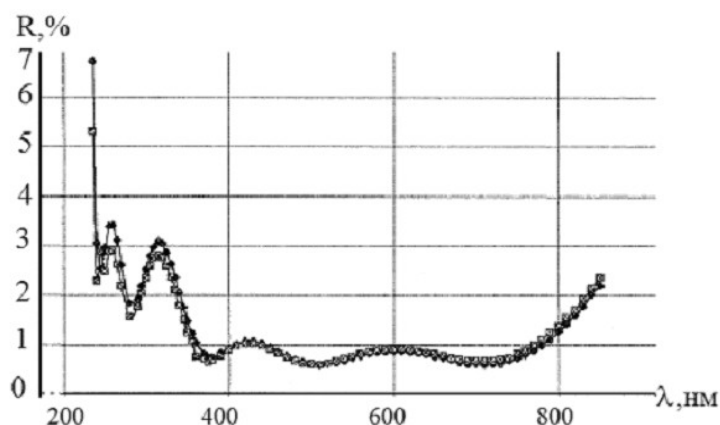


Рис. 5. Спектральные характеристики 12-ти слойного покрытия: \square – сразу после изготовления, \blacksquare – после хранения во влажной атмосфере

Различия в спектральных характеристиках, полученных расчетным путем с учетом и без учета дисперсии показателей преломления пленкообразующих материалов, позволяют объяснить результаты плохого воспроизведения спектральных характеристик просветляющих покрытий при изготовлении этих покрытий в УФ области спектра. Следует также помнить, что на вид спектральной характеристики оказывает влияние не только состав пленкообразующего материала, но и условия формирования покрытия. Эти условия оказывают влияние на величину пористости покрытия. Пористость покрытия, в свою очередь, при эксплуатации этого покрытия в атмосфере определяет изменение показателя преломления слоя.

Для проверки высказанных предположений нами было изготовлено 12-слойное просветляющее покрытие, обладающее близкими характеристиками, и исследовано поведение спектральной характеристики этого покрытия при хранении во влажной атмосфере. Давление паров воды соответствовало насыщенному при данной температуре. Температура составляла 20°C. Особенностью этого покрытия является наличие близкого к нулю минимума отражения в районе 220–230 нм. Как видно из рис. 5, при хранении во влажной атмосфере происходит резкое увеличение максимумов отражения просветляющего покрытия, связанного с проникновением паров воды в поры слоев пленкообра-

зующих материалов. Проникновение паров воды в поры пленкообразующих материалов приводит к увеличению показателей преломления и фазовых толщин слоев. Результатом этого является сдвиг спектральной характеристики в красную область спектра и увеличение максимумов отражения.

Заключение

В УФобласти спектра наблюдается значительное увеличение показателей преломления пленкообразующих материалов по сравнению с видимой областью спектра.

Дисперсия пленкообразующих материалов оказывает значительное влияние на спектральные характеристики просветляющих покрытий, работающих в диапазоне спектра от 200 нм до 1000 нм.

Если просветляющая диэлектрическая система предназначена для работы в диапазоне спектра от 200 нм до 1000 нм, то ее конструкцию (число, порядок расположения и оптические толщины слоев) необходимо рассчитывать с учетом дисперсии показателей преломления пленкообразующих материалов, входящих в ее состав.

Если диэлектрические системы предназначены для работы в широком спектральном диапазоне, то измерение величины показателей преломления слоев пленкообразующих материалов следует проводить на пленках, полученных в тех же условиях (остаточное давление, температура, скорость испарения), в которых будут изготавливаться интерференционные системы.

При реализации широкополосных просветляющих покрытий необходимо учитывать не только дисперсию показателей преломления пленкообразующих материалов, но и условия их эксплуатации.

Работа выполнена в рамках проекта «Компьютерное моделирование, разработка и исследование оптико-информационных систем и технологий»

Литература

1. Оптические кристаллические материалы. Каталог. / Под редакцией Г.Т. Петровского. Л., 1991. 52 с.
2. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Хайбуллин И.Б. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения. Казань: изд. «Фэн», 2002. 591 с.
3. Воронкова Е.М. и др. Оптические материалы для ИК техники. М.: Наука, 1965. 243 с..

СЛОЖНОСТЬ И ДИАПАЗОН ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ ОПТОТЕХНИКИ, РЕШАЕМЫХ УЧЕНЫМИ СПБГУ ИТМО

В.А. Зверев

На протяжении прошлого столетия трудами ученых СПбГУ ИТМО создавалась русская оптическая школа композиции оптических систем, которая позволяет решать задачи создания оптических систем с повышенными характеристиками (относительное отверстие, угловое или линейное поле, качество изображения и т.д.) самого различного гражданского и военного назначения. Примером решаемых задач может служить анализ параметров основных узлов оптической системы микроскопа и, прежде всего, осветительного устройства микроскопа, разработка и расчет оптики нового комплекта микрообъективов, оптических систем осветительного устройства на основе применения оптических систем переменного увеличения.

Другим примером решаемых задач может служить разработка и расчет зеркальных объективов плананастигматов для видового наблюдения как наземного, так и космического базирования. Конструктивно такие объективы состоят не менее чем из трех отражающих поверхностей. Это могут быть объективы с изломом оптической оси, как показано на рис. 1, или с внеосевым ходом световых пучков лучей, образующих внеосевое изображение предмета (объективы без центрального экранирования световых пучков лучей), как показано на рис. 2.

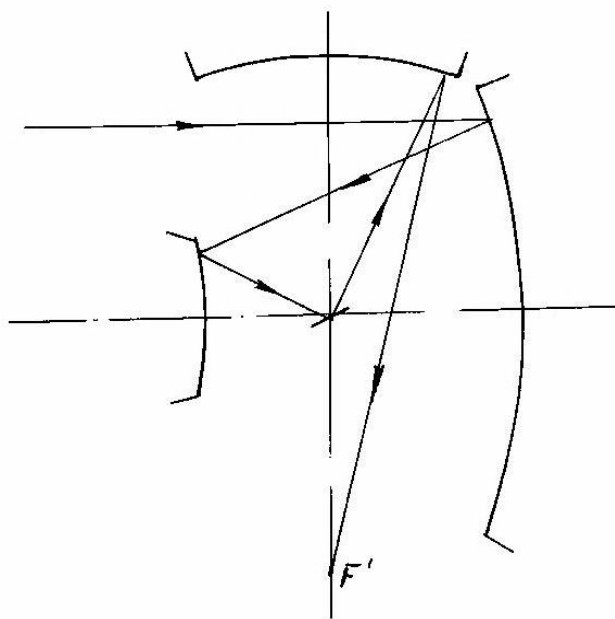


Рис. 1. Трехзеркальный объектив с изломом оптической оси

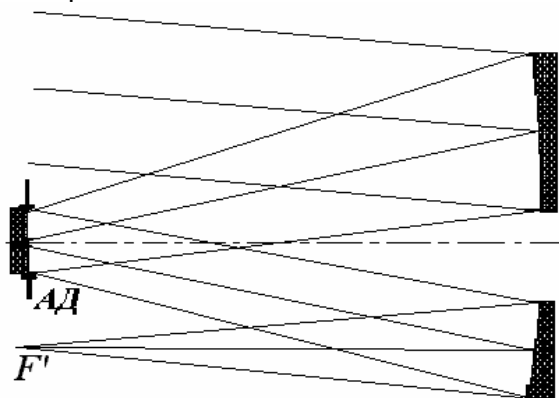


Рис. 2. Трехзеркальный объектив с внеосевым ходом лучей

Ниже приведена таблица остаточных aberrаций одного из вариантов объектива

S0	Z0	Z'0(0)	S'0(0)	F'(0)	VЗР(0)	S'A	S'0(1-0)	S'0(2-0)	S'0(2-1)	Z'0
	1675.	-1842.	-742.4	-1000.	-1.100	-742.4	0	0	0	-18
MU=0	H	ДС'(0)	TGC'	Y'(0)	W(0)	ЭТА %	Y'(1-0)	Y'(2-0)	Y'(2-1)	ДС'(1)
	100.	.00154	-0.101	-.15-3	-.88-7	-.0017	0	0	0	.00154
	86.6	-.287-3	-.0869	-.25-4	.00199	-.0012	0	0	0	.287-3
	70.7	-.39-3	-.0709	.273-4	.00176	-.84-3	0	0	0	-.39-3
	50.0	-.48-3	-.0501	.241-4	.660-3	-.42-3	0	0	0	-.48-3
MU	Z	Z'	TGC'	Y'(0)	ДИС	Z'M	Z'S	Z'M-Z'S	Y'(1-0)	Y'(2-0)
0.0636	1684.	-1830.	-.0587	63.8	0.0444	0.0238	0.0146	0.00917	0	0
0.0900	1694.	-1817.	-.0843	90.5	0.135	0.0403	0.0403	-.907-8	0	0
MU	H	TGC'	ДТGC'	ДY'	W(0)		Y'(1-0)	Y'(2-0)	Y'(2-1)	ДY'(1)
0.0900	100.	-.0.185	-0.101	.236-3	-0.169		0	0	0	.236-3
	86.6	-.0.172	-.0873	-.69-3	-0.163		0	0	0	-.69-3
	70.7	-.0.155	-.0711	-.0013	-0.133		0	0	0	-.0013
	50.0	-.0.134	-.0501	-.0015	-.0788		0	0	0	-.0015
	-50.0	-.0348	0.0494	.00139	-.0757		0	0	0	.00139
	-70.7	-.0144	0.0698	.00120	-0.126		0	0	0	.00120
	-86.6	-.00118	0.0854	.603-3	-0.153		0	0	0	-.603-3
	-100.	0.0144	0.0986	-.24-3	-0.158		0	0	0	-.24-3
MU	M	TGC'	TGD'	ДX'	W(0)	ДY'	X'(1-0)	X'(2-0)	X'(2-1)	Y'(1-0)
0.0900	100.	-.0847	-.0999	-.0036	-0.342	.134-4	0	0	0	0
	86.6	-.0846	-.0864	-.0032	-0.259	.212-5	0	0	0	0
	70.7	-.0845	-.0705	-.0026	-0.175	-.39-5	0	0	0	0
	50.0	-.0844	-.0498	-.0019	-.0894	-.46-5	0	0	0	0
MU	H	TGC'	ДТGC'	ДY'	W(0)		Y'(1-0)	Y'(2-0)	Y'(2-1)	ДY'(1)
MU	H	TGC'	ДТGC'	ДY'	W(0)		Y'(1-0)	Y'(2-0)	Y'(2-1)	ДY'(1)
0.0636	100.	-.0.160	-0.101	-.0019	-0.215		0	0	0	-.0019
	86.6	-.0.146	-.0873	-.0019	-0.169		0	0	0	-.0019
	70.7	-.0.130	-.0711	-.0017	-0.117		0	0	0	-.0017
	50.0	-.0.109	-.0501	-.0013	-.0599		0	0	0	-.0013
	-50.0	-.0090	0.0497	.468-3	-.0341		0	0	0	.468-3
	-70.7	0.0115	0.0702	.527-4	-.0453		0	0	0	.527-4
	-86.6	0.0273	0.0860	-.55-3	-.0386		0	0	0	-.55-3
	-100.	0.0406	0.0993	-.0012	-.0170		0	0	0	-.0012
MU	M	TGC'	TGD'	ДX'	W(0)	ДY'	X'(1-0)	X'(2-0)	X'(2-1)	Y'(1-0)
0.0636	100.	-.0590	-0.100	-.0013	-0.121	-.53-3	0	0	0	0
	86.6	-.0589	-.0867	-.0011	-.0912	-.41-3	0	0	0	0
	70.7	-.0589	-.0707	-.91-3	-.0619	-.27-3	0	0	0	0
	50.0	-.0588	-.0499	-.67-3	-.0319	-.14-3	0	0	0	0

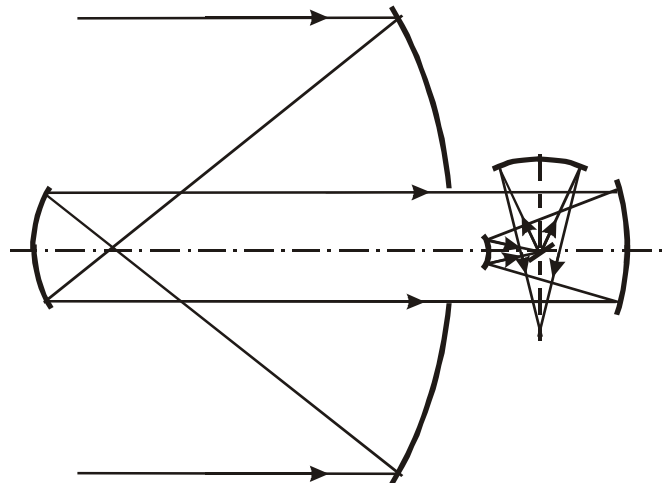


Рис.3. Оптическая схема зеркального объектива с диаметром главного зеркала 25 м

В 1975 г. в Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН были начаты наблюдения с помощью в то время крупнейшего в мире телескопа с главным зеркалом диаметром 6 м, построенного впервые в мировой практике на альт-азимутальной мон-

тировке. Успех русских создателей телескопа определил применение альт-азимутальной монтировки при создании всех крупных телескопов в мире Поиск возможных вариантов построения и расчета оптических систем телескопов с диаметром главного зеркала 10—100 метров продолжается. Возможный вариант схемы оптической системы такого телескопа показан на рис.3.

Таблица остаточных aberrаций одного из вариантов объектива приведена ниже.

S0	Z0	Z'0(0)	S'0(0)	F'(0)	VЗР(0)	S'A	S'0(1-0)	S'0(2-0)	S'0(2-1)	Z'0
		-0.23+6	-1681.	-6000.	-0.10+6	.04319	-6000.	0	0	-16
MU=0	H	DS'(0)	TGC'	Y'(0)	W(0)	ЭТА %	Y'(1-0)	Y'(2-0)	Y'(2-1)	DS'(1)
		12500.	0.0320	-0.126	-0.0040	.264-4	-0.0164	0	0	0.0320
		10825.	-0.0084	-0.109	.913-3	.615-4	-0.0143	0	0	-0.0084
		8839.	.00454	-0.0887	-0.40-3	-0.15-3	-0.0119	0	0	.00454
		6250.	-0.0038	-0.0626	.235-3	.276-3	-0.0058	0	0	-0.0038
MU	Z	Z'	TGC'	Y'(0)	ДИС	Z'M	Z'S	Z'M-Z'S	Y'(1-0)	Y'(2-0)
.530-3	-0.22+6	-1680.	0.0123	53.0	.733-4	0.0586	0.0459	0.0127	0	0
.750-3	-0.22+6	-1679.	0.0174	75.0	.303-3	0.0838	0.0840	-0.176-3	0	0
MU	H	TGC'	ДТGC'	ДУ'	W(0)		Y'(1-0)	Y'(2-0)	Y'(2-1)	ДУ'(1)
.750-3	12500.	-0.108	-0.126	.985-4	-0.213		0	0	0	.985-4
	10825.	-0.0912	-0.109	-.65-3	-0.0686		0	0	0	-.65-3
	8839.	-0.0712	-0.0885	.00182	-0.148		0	0	0	.00182
	6250.	-0.0452	-0.0625	-.0026	-.0986		0	0	0	-0.0026
	-6250.	0.0801	0.0627	.00264	-0.485		0	0	0	.00264
	-8839.	0.106	0.0890	-.0021	-0.445		0	0	0	-0.0021
	-10825	0.127	0.109	.883-3	-0.436		0	0	0	.883-3
	-12500	0.144	0.126	-0.16-3	-0.419		0	0	0	-0.16-3
MU	M	TGC'	TGD'	ДХ'	W(0)	ДУ'	X'(1-0)	X'(2-0)	X'(2-1)	Y'(1-0)
.750-3	12500.	0.0175	-0.126	0.0312	1.48	-0.0015	0	0	0	0
	10825.	0.0175	-0.109	0.0229	0.613	-0.0015	0	0	0	0
	8839.	0.0174	-0.0887	.00934	0.0453	-0.0019	0	0	0	0
	6250.	0.0174	-0.0626	.428-3	-0.157	-0.49-3	0	0	0	0

Разработанная и рассчитанная оптическая система имеет практический смысл, если разработана приемлемая по сложности изготовления оптическая система для контроля формы несферических поверхностей, составляющих оптическую систему телескопа. Подобные задачи представляет собой достаточно сложную проблему, решение которой также входит в круг наших исследований.

Приведенные примеры вполне характеризуют сложность и диапазон задач, решаемых нами, и вполне определяют область возможных совместных исследований.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСЛОВИЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Иванов

В статье описаны универсальные математические модели, предназначенные для достижения прохождения действительных лучей в процессе параметрического синтеза оптических систем, в том числе при пересчете аналогов на повышенные характеристики поля зрения и апертуры. Предложенные модели нацелены на сохранение абберационной коррекции, достигнутой на предыдущих этапах проектирования оптики, и отличаются непрерывностью функциональных ограничений.

При использовании в процессе параметрического синтеза оптической системы теории тонких компонентов, а также при пересчете аналога на повышенные значения поля и апертуры нередко возникает проблема нарушения условий прохождения действительных лучей через элементы конструкции. Другими словами, полученная система оказывается неработоспособной при заданных передаточных и присоединительных характеристиках.

Установить нарушение условий работоспособности можно с помощью специализированных характеристик действительных лучей по поверхностям c_{ik}^2 и $c_{ik}'^2$, где i – индекс поверхности, k – индекс луча [1]. Положительные значения c_{ik}^2 и $c_{ik}'^2$ соответствуют квадратам косинусов углов падения и преломления, а отрицательные значения определяют непересечение луча с поверхностью или наличие полного внутреннего отражения.

Свойства c_{ik}^2 и $c_{ik}'^2$ позволяют описать область работоспособности оптической системы в виде

$$\begin{cases} c_{ik}^2(\mathbf{X}) > 0 & i = 1, 2, \dots, p \\ c_{ik}'^2(\mathbf{X}) > 0 & k = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{X} – вектор варьируемых параметров. В качестве \mathbf{X} могут быть использованы конструктивные элементы оптики или связанные с ними абберационные параметры P , W , C тонких компонентов.

Полученная модель адекватно отражает условия прохождения действительных лучей и принципиально может быть использована для обеспечения работоспособности системы. Однако на практике применение ее в этих целях оказывается нецелесообразным.

Во-первых, задача отыскания \mathbf{X} , удовлетворяющих (1), некорректна и, следовательно, может иметь бесчисленное множество решений [2]. Поскольку какой-либо критерий отбора решений отсутствует, нет никакой гарантии в том, что для результирующего вектора \mathbf{X} абберационная коррекция будет соблюдаться. Это делает бессмысленными все этапы параметрического синтеза, предшествующие задаче (1).

Во-вторых, функции $c_{ik}^2(\mathbf{X})$ и $c_{ik}'^2(\mathbf{X})$ являются разрывными. Действительно, если, скажем, $c_{mk}^2(\mathbf{X}) < 0$, то характеристику $c_{rk}^2(\mathbf{X})$, $r > m$ вычислить уже не удастся.

В-третьих, зависимости $c_{ik}^2(\mathbf{X})$ и $c_{ik}'^2(\mathbf{X})$ оказываются сильно нелинейными, что затрудняет использование методов нелинейного программирования для решения задачи (1).

Наконец, в-четвертых, неравенства (1) не учитывают требования нахождения вектора \mathbf{X} в пределах реальных ограничений по точности и времени расчета на компьютере, так как допуск на их выполнение фактически равен нулю.

С целью частичного устранения отмеченных недостатков модели (1) в работе [3] было предложено использовать вместо характеристик $c_{ik}^2(\mathbf{X})$, $c_{ik}'^2(\mathbf{X})$ сложные функции вида

$$\begin{aligned} b_{ik} &= k_1 - \sqrt{1 - c_{ik}^2} \\ b_{ik}' &= k_2 - \sqrt{1 - c_{ik}'^2} \end{aligned} \quad (2)$$

где k_1, k_2 – чуть меньшие единицы постоянные ($k_1 = k_2 = 0.9$). Величины b_{ik} , b_{ik}' имеют область отрицательных значений при небольших косинусах углов падения и преломления, что гарантирует соблюдение условий работоспособности при $b_{ik} > 0$ и $b_{ik}' > 0$. Сложный вид функций b_{ik} , b_{ik}' обусловлен попыткой достижения их квазилинейности относительно параметров \mathbf{X} .

Однако, по сути, введение (2) позволяет только расширить допуск на соблюдение граничных условий. Действительно, линейность предложенных функций представляется весьма спорной (например, зависимость b_{ik} от кривизны поверхности имеет характер квадратного корня из квадратного трехчлена, т.е. является принципиально нелинейной функцией [4]). Далее, замена характеристик (1) на характеристики (2) по-прежнему не решает проблему некорректной постановки задачи синтеза и разрыва функциональных ограничений.

В этой связи автором предлагается несколько иная модель обеспечения работоспособности оптической системы, суть которой состоит в следующем.

Введем в модель работоспособности целевую функцию

$$\varphi(\mathbf{X}) = \mathbf{F}^T(\mathbf{X})\mathbf{F}(\mathbf{X}),$$

где $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ – вектор коэффициентов аберраций третьего и высших порядков, используемых в качестве корригируемых функций. Очевидно, что $\varphi(\mathbf{X})$ всюду существует, а значение $\varphi(\mathbf{X}) = 0$ отвечает относительно лучшему качеству коррекции системы. Поэтому условие минимизации $\varphi(\mathbf{X})$ в известной степени решает проблему отбора решений в модели работоспособности.

В состав $\mathbf{F}(\mathbf{X})$, вообще говоря, можно включить только коэффициенты аберраций третьего порядка, которые не требуют больших вычислительных затрат. Однако наличие среди корригируемых функций коэффициентов высших порядков позволяет повысить адекватность модели и способствует уменьшению числа итераций при решении задачи нелинейного программирования.

Добавление целевой функции $\varphi(\mathbf{X})$ к модели работоспособности, таким образом, создает условия для того, чтобы сохранить результаты коррекции оптической системы, полученные на предыдущих этапах синтеза, а иногда даже и превзойти их.

Для достижения прохождения действительных лучей через поверхность в случае старта из недопустимой области параметров можно воспользоваться ограничениями

$$\begin{aligned} g_{i,k} &= k_0 + c_{i,k}^2 > 0 \\ g_{i,k}' &= k_0 + c_{i,k}'^2 > 0 \end{aligned}$$

где величину «запаса по прохождению лучей» k_0 рационально взять в диапазоне от -0.05 до -0.1.

Для предупреждения разрыва модельных функций предлагается применить специальный прием, состоящий в замене неактивных ограничений $g_{ik} > 0$ и $g_{ik}' > 0$ на ограничения барьерного типа:

$$\begin{aligned}\tilde{g}_{ik} &= \tilde{k}_0(k_0 + c_{ik}^2)/c_{ik}^2 > 0 \quad (\text{рабочая область } c_{ik}^2 > 0) \\ \tilde{g}'_{ik} &= \tilde{k}'_0(k_0 + c_{ik}'^2)/c_{ik}'^2 > 0 \quad (\text{рабочая область } c_{ik}'^2 > 0)\end{aligned}\quad (3)$$

где $\tilde{k}_0, \tilde{k}'_0$ – постоянные, значения которых выбираются из тех соображений, чтобы в момент перехода к новым функциям соблюдались соотношения $\tilde{g}_{ik} = g_{ik}$ и $\tilde{g}'_{ik} = g'_{ik}$. Указанный прием позволяет разбить общую задачу обеспечения работоспособности оптической системы на два этапа: входа в область работоспособности (посредством характеристик g_{ik} и g'_{ik}) и удержания в этой области (посредством характеристик \tilde{g}_{ik} и \tilde{g}'_{ik}). Во избежание разрыва первых производных функций модели замена g_{ik}, g'_{ik} на $\tilde{g}_{ik}, \tilde{g}'_{ik}$ должна производиться только между шагами итерационного процесса решения задачи минимизации $\varphi(\mathbf{X})$.

Если в оптической системе условия $c_{ik}^2(\mathbf{X}) > 0$ и $c_{ik}'^2(\mathbf{X}) > 0$ соблюдаются для всех поверхностей i , множество функций \tilde{g}_{ik} и $\tilde{g}'_{ik}, i = 1, 2, \dots, p$ может быть заменено на одну абберацию k -го действительного луча, включенную в целевую функцию проектирования (или в ограничения). В этом случае сама абберация играет роль барьера, не допускающего выхода варьируемых параметров из области работоспособности объекта проектирования.

Рассмотрим пример использования описанной выше математической модели для обеспечения прохождения действительных лучей через двухкомпонентный объектив. Исходная конструкция системы получена из условий

$$P_1 = W_1 = C_1 = P_2 = W_2 = C_2 = 0$$

и приведена в табл. 1.

R	d	n_D	Марка стекла
40.68	0	1.7440	СТК19
-22.91	0	1	
-21.72	0	1.6475	ТФ1
151.30	10.0	1	СТК19
5.68	0	1.7440	
10.64	0	1	ТФ1
7.00	0	1.6475	
4.85		1	
$f' = 30.0; D : f' = 1 : 1$			

Таблица 1. Объектив с нарушенными условиями работоспособности

При заданных фокусном расстоянии ($f' = 30$ мм) и относительном отверстии (1 : 1) апертурный луч осевого пучка испытывает полное внутреннее отражение уже на второй поверхности объектива. Вызывают также опасение и малые радиусы кривизны поверхностей второго компонента.

Для обеспечения работоспособности оптической системы осуществим минимизацию суммы квадратов продольного хроматизма положения, продольной сферической

абберации и неизопланатизма третьего порядка при ограничениях на прохождение апертурного луча осевого пучка. В качестве варьируемых переменных будем использовать параметры P , W , C обоих компонентов.

Решение поставленной задачи с помощью методов нелинейного программирования [5] приводит в итоге к работоспособной оптической системе, конструктивные элементы которой приведены в табл. 2

R	d	n_D	Марка стекла
34.83	0	1.7440	СТК19
-46.03	0	1	
-41.75	0	1.6475	ТФ1
121.07	10.0	1	
20.07	0	1.7440	СТК19
32.79	0	1	
17.06	0	1.6475	ТФ1
20.02	0	1	
$f' = 30.0; D : f' = 1 : 1$			

Таблица 2. Объектив с восстановленными условиями работоспособности

Продольная сферическая абберация третьего порядка равна -0.03 мм, неизопланатизм третьего порядка -0.015%, хроматизм положения – 0.39 мм.

Литература

1. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем. Л.: Машиностроение, 1982. 270 с.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.
3. Буцевицкий А.В. Разработка методов автоматизированного синтеза оптических систем из модулей с известными свойствами: Дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Ленингр. ин-т точн. механики и оптики. Л., 1986. 258 с.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. 544 с.
5. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. Киев: Вища школа, 1983. 512 с.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСЛОВИЙ КОНСТРУКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Иванов

Предложены универсальные математические модели оптических систем для применения на этапах параметрического синтеза и оптимизации с целью достижения конструктивности системы. Модели обеспечивают разовое или постепенное введение толщин в тонкие компоненты с одновременной коррекцией зейделевых aberrаций, а также контроль прохождения лучей за «острым краем» линз.

Теория тонких компонентов [1] имеет широкое применение в практике aberrационного расчета центрированных оптических систем. Однако для того, чтобы полученные на ее основе конструкции могли быть физически реализованы, толщины линз и воздушные промежутки (d_i) должны получить такие значения, которые были бы приемлемы с позиций производства и эксплуатации. В первом приближении, для этого необходимо решить систему неравенств:

$$d_i \text{sign}(n_{i+1}) - d_i^{\min} \geq 0, \quad i = 0, \dots, p, \quad (1)$$

где i – номер поверхности, p – число поверхностей, $\text{sign}(n_{i+1})$ – функция знака показателя преломления среды, следующей за поверхностью с номером i , $d_i^{\min} \geq 0$ – минимально допустимые абсолютные величины осевых расстояний, которые устанавливаются на основании требований нормативных документов [2] по результатам параксиального синтеза и расчета радиусов поверхностей бесконечно тонких компонентов. При этом через d_0 и d_p обозначены осевые промежутки от первой поверхности до предмета и от последней поверхности до изображения.

Погрешность приближения определяется тем обстоятельством, что величины d_i^{\min} не обеспечивают строгий контроль конструктивности с учетом реальных габаритов пучков, а также в условиях непрерывно изменяющихся параметров оптической системы – как в процессе решения самих неравенств, так и в процессе реализации других этапов параметрического синтеза. Поэтому значения d_i^{\min} нередко назначают с некоторым запасом, что не всегда оправдано.

Понятно, что задачу решения (1) нельзя рассматривать саму по себе, в отрыве от общего контекста габаритного и aberrационного расчета оптики. Из этого тезиса вытекает, что модели для обеспечения конструктивности должны включать требования к гауссовым и зейделевым характеристикам оптической системы или ее отдельных частей. В частности, Г.Г. Слюсаревым было предложено при введении толщин сохранять фокусные расстояния компонентов, а также все «внутренние» углы с осью первого параксиального луча [1]. Описанные условия позволяют оставлять неизменными многие гауссовы характеристики системы (и ее элементов), а также, в известной степени, поддерживать коррекцию aberrаций третьего порядка и хроматизма.

Вместе с тем ясно, что способ Слюсарева не дает гарантии сохранения зейделевых aberrаций в необходимых пределах и поэтому требует определенной модификации.

С этой целью предлагается при обеспечении конструктивности оптической системы осуществлять минимизацию aberrаций зейделевой области, т.е. решать задачу:

$$\begin{aligned} &\text{минимизировать } \varphi(\mathbf{X}) = \mathbf{F}^T(\mathbf{X})\mathbf{F}(\mathbf{X}) \\ &\text{при ограничениях: } d_i \text{sign}(n_{i+1}) - d_i^{\min} \geq 0, \quad i = 0, \dots, p, \quad (2) \end{aligned}$$

где $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ – вектор взвешенных aberrаций третьего порядка и хроматизма, \mathbf{X} – вектор параметров P, W, C компонентов (связанных только с углами первого нулевого луча по известным формулам [1], независимо от толщин линз и воздушных промежутков).

Решение (2) может быть найдено на основе двух различных подходов. Суть первого заключается в установлении внутренних толщин компонентов на границе допустимого множества (2) и последующей минимизации $\varphi(\mathbf{X})$. Осевые расстояния между компонентами при этом могут перевычисляться с целью сохранения параксиальных характеристик системы либо, при нарушении ограничений, могут быть также зафиксированы.

Описанный подход крайне прост, не требует больших компьютерных ресурсов и позволяет осуществлять активный контроль за состоянием конструктивности системы. Недостатком его является резкое изменение d_i , которое может необратимо разрушить достигнутую ранее коррекцию aberrаций, а также отсутствие использования переменных внутри допустимой области.

Второй путь к решению (2) заключается в том, что внутренние толщины тонких компонентов, наряду с P , W , C , рассматриваются в качестве варьируемых параметров задачи нелинейного программирования. Это позволяет осуществлять постепенный ввод d_i в допустимую область при использовании методов внешней точки [3]. При таком подходе изменения d_i не будут сильно ухудшать достигнутое качество коррекции оптической системы, поскольку их влияние будет компенсироваться вариацией других параметров. Более того, ввиду возможности изменения переменных и внутри допустимой области, значения отдельных aberrаций нередко могут даже улучшаться.

Рассмотренный путь решения (2) довольно трудоемок, однако обладает большими потенциальными возможностями.

Удовлетворение ограничений (2) часто не противоречит задаче сохранения оптических сил (Φ_j) компонентов и углов нулевых лучей (α_j) между ними, сформулированной Г.Г. Слюсаревым [1]. Поэтому условная минимизация $\varphi(\mathbf{X})$ может быть нередко осуществлена при наличии дополнительных ограничений-равенств вида:

$$\begin{aligned} \Phi_j &= \Phi_j^0 \\ \alpha_j &= \alpha_j^0 \end{aligned} \quad (3)$$

где через Φ_j^0 , α_j^0 обозначены величины Φ_j , α_j в оптической системе, содержащей бесконечно тонкие компоненты. Для реализации (3) Слюсарев предложил универсальную модель, которая основана на вычислении положения главных плоскостей оптических элементов и последующей корректировке осевых расстояний между смежными поверхностями соседних компонентов. Анализ модели Слюсарева показывает, что она может обладать значительной вычислительной погрешностью при больших фокусных расстояниях компонентов и, кроме того, сводит процесс пересчета осевых расстояний к методу простой итерации, обладающему медленной и негарантированной сходимостью [4]. В условиях итерационного процесса решения задачи (2) эти недостатки сказываются весьма ощутимо. Поэтому и модель Слюсарева, как нам представляется, требует определенной переработки.

Обозначим через α_j , α'_j углы первого вспомогательного нулевого луча с осью до и после прохождения им j -го компонента, имеющего реальные толщины линз и воздушных промежутков; n_j , n'_j – показатели преломления оптических материалов, окружающих j -й компонент. Тогда, исходя из известного соотношения гауссовой оптики, имеем:

$$h_j^{III} \Phi_j = \alpha'_j n'_j - \alpha_j n_j, \quad (4)$$

где Φ_j – оптическая сила компонента, а h_j^{III} – высота первого нулевого луча на его главных плоскостях (будем считать, что $h_j^{III} \neq 0$). Применим (4) для другого нулевого луча, имеющего на входе угол с осью $\bar{\alpha}_j = 0$, высоту $\bar{h}_j^{III} = 1$, а на выходе – угол с осью $\bar{\alpha}'_j$, равный

$$\Phi_j = \bar{\alpha}'_j n'_j \quad (5)$$

Можно показать, что при фиксированных (вычисленных по P, W, C) углах первого нулевого луча и расстояниях между поверхностями компонента величина $\bar{\alpha}'_j$ является функцией высоты (обозначим ее через x) первого нулевого луча на первой поверхности: $\bar{\alpha}'_j = \bar{\alpha}'_j(x)$. Подставляя (5) в (4) и принимая $h_j^{III} = h_j^0$ (h_j^0 – высота пересечения первого нулевого луча бесконечно тонким компонентом), получаем:

$$\bar{\alpha}'_j(x) h_j^0 - \alpha'_j + \alpha_j (n_j / n'_j) = 0 \quad (6)$$

Выражение (6) может быть рассмотрено как уравнение относительно параметра x . Отыскав его решение, несложно определить требуемое положение компонента в оптической системе.

Поскольку уравнение (6) позволяет вычислить x с высокой степенью точности и различными численными методами, описанная модель представляется значительно более гибкой, нежели аналог у Слюсарева.

Проиллюстрируем использование предложенных в настоящем разделе моделей на конкретном примере. Пусть требуется ввести конечные толщины в компоненты телеобъектива, конструктивные элементы которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Оптическая система из бесконечно тонких компонентов

R	d	n_D	Марка стекла
59.80	0	1.5181	КФ4
-42.72	0	1.6475	ТФ1
-148.33	50.0	1	
74.54	0	1.5163	К8
30.50		1	
$f' = 200,0 ; s'_{F'} = 100,0$			

Первоначально воспользуемся первым подходом к обеспечению конструктивности. Вводя толщины в линзы в соответствии с нормативными документами [2], имеем (относительное отверстие 1:10, угол поля зрения 2°): $d_1 = 3.81$; $d_2 = 2.18$; $d_4 = 1.32$. Если сохранить углы с осью первого нулевого луча и оптические силы компонентов, то исходный пересчет d_3 с помощью уравнения (6) дает значение $d_3 = 45.61$. Будем далее корректировать aberrации третьего порядка: сферическую ($\Delta s'_{III}$), неизопланатизм (η_{III}), астигматизм ($z'_{mIII} - z'_{sIII}$) и хроматизм положения ($\Delta s'_{xp}$). В качестве варьируемых параметров целесообразно использовать P_1, W_1, W_2 . Всего один шаг итерационного процесса решения задачи нелинейного программирования приводит к результату:

$\Delta s'_{III} = -0.05$ мм, $\eta_{III} = -0.014\%$, $z'_{mIII} - z'_{sIII} = 0.019$ мм, $\Delta s'_{xp} = -0.12$ мм. Параметры объектива описаны в таблице 2.

Таблица 2

Оптическая система с компонентами конечной толщины (вариант 1)

R	d	n_D	Марка стекла
57.71	3.81	1	КФ4
-43.61	2.18	1.5181	
-160.04	45.51	1.6475	ТФ1
68.84	1.32	1	К8
29.31		1.5163	
		1	
$f' = 200.0; s'_{F'} = 100.6$			

Воспользуемся теперь вторым подходом к обеспечению конструктивности. Установим нижние допустимые границы толщин линз равными 4.2 и 1.3 мм. Параметры задачи нелинейного программирования сохраним такими же, как при реализации первой модели, а к минимизируемым функциям добавим кривизну изображения третьего порядка. Осевое расстояние d_3 будем постоянно пересчитывать с целью удержания оптических сил компонентов и углов первого нулевого луча.

Решение задачи НЛП выполняется за три итерации и дает: $\Delta s'_{III} = 0.04$ мм, $\eta_{III} = 0.01\%$, $z'_{mIII} - z'_{sIII} = 0.015$ мм, $0,5(z'_{mIII} + z'_{sIII}) = 0.01$ мм, $\Delta s'_{xp} = -0.01$ мм. Конструктивные элементы объектива приведены в таблице 3.

Таблица 3

Оптическая система с компонентами конечной толщины (вариант 2)

R	d	n_D	Марка стекла
56.63	24.98	1	КФ4
-36.72	2.00	1.5181	
-141.83	32.76	1.6475	ТФ1
77.04	1.30	1	К8
30.74		1.5163	
		1	
$f' = 200.0; s'_{F'} = 100.6$			

Сравнительный анализ результатов показывает, что изменение d_1 внутри допустимой области позволяет достигнуть лучшей коррекции aberrаций во второй модели, нежели в первой.

Как указывалось ранее, неравенства (1) обеспечивают конструктивность системы только в первом приближении, поэтому они обычно используются самостоятельно лишь на начальных этапах синтеза. В процессе выполнения последующих этапов необходимо обеспечить контроль за толщинами линз как вдоль оптической оси, так и по

краю. В противном случае заданные габариты пучков, характеристики поля и апертуры системы могут быть соблюдены далеко не всегда (ввиду срезания лучей оправками линз).

С целью обеспечения полного контроля за конструктивностью оптической системы следует использовать неравенства вида:

$$\begin{cases} d_i \operatorname{sign}(n_{i+1}) - d_i^{\min} \geq 0, & i = 0, \dots, p \\ d_i^{kp} \operatorname{sign}(n_{i+1}) - d_i^{kp, \min} \geq 0, & i = 0, \dots, p \end{cases} \quad (7)$$

где d_i^{kp} – толщины линз или воздушных промежутков по краю (на световых диаметрах), а $d_i^{kp, \min} \geq 0$ – их минимально допустимые абсолютные значения. Величины d_i^{kp} можно получить расчетным путем:

$$d_i^{kp} = d_i + c_{i+1} - c_i,$$

где c_i, c_{i+1} – стрелки прогиба поверхностей с номерами i и $(i+1)$ на световых диаметрах (знаки стрелок прогиба и радиусов кривизны совпадают), а за c_0 и c_{p+1} принимаются стрелки прогиба поверхностей предмета и изображения. При параметрическом синтезе для определения световых диаметров возможно ограничиться прогонкой крайних лучей всех пучков, так как точный учет поперечных габаритов необходим лишь на этапе тонкой доводки системы, т.е. на этапе оптимизации. При возникновении опасности прохождения лучей «за краем» линз в этой ситуации просто следует увеличить значения d_i^{\min} и $d_i^{kp, \min}$.

Отметим, что модель (7) включает в себя неявные нелинейные функции от многих переменных. Поэтому для решения системы неравенств могут быть использованы только специализированные методы нелинейного программирования.

Литература

1. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
2. Вычислительная оптика: Справочник / Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д. и др.; Под общ. ред. Русинова М.М. Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
3. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.
4. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 600 с.

АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТИВОВ СОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ КАМЕР

А.В. Баландин, И.Г. Бронштейн, О.Н. Власов, И.Л. Лившиц

В статье обсуждаются вопросы оценки качества изображения, получаемого современными фото/видео системами, и распознавания объектов цифровыми камерами. Приводятся примеры объективов для современных цифровых камер

Введение

Под системой будет пониматься комплекс, состоящий из объектива, светочувствительного устройства и устройства воспроизведения информации. Примером такого комплекса является обыкновенный пленочный фотоаппарат. В этом случае изображение, получаемое с помощью объектива, формируется на фотоприемнике (фотопленке), затем оно увеличивается с использованием объектива фотоувеличителя для получения отпечатка на фотобумаге. Обычно основное внимание уделяется только качеству фотообъектива, однако необходимо уделять внимание характеристикам всего комплекса в целом, так как в конечном итоге будет рассматриваться только фотоотпечаток. Для исследования подобных систем, как правило, вводится понятие передаточной функции [1]. Традиционно при анализе оптической системы используется частотно-контрастная характеристика (ЧКХ).

Современные цифровые фото/видео камеры работают аналогично традиционным пленочным аппаратам, но используют в качестве приемника изображения ПЗС-матрицу. В работе показывается, что для оценки качества изображения таких систем также используется ЧКХ как его критерий.

Исследование качества изображения цифровых камер

При определении качества фотографии несколько десятков лет назад внимание прежде всего уделялось разрешающей способности объективов и пленок, которая измерялась в парах линий на миллиметр, но единого стандарта выработано не было. Обычно фотографировался тест-объект для определения разрешения (мира), затем визуально определялось, какие линии различимы. Поскольку каждому наблюдателю эти цифры могли казаться разными, то сравнение оптических систем было затруднено. Проблема объективного определения разрешения, контраста и четкости была решена за счет изобретения ЧКХ [1], которая описывает структуру изображения в виде функции пространственных частот, что является преобразованием Фурье пространственного распределения изображения. На рис. 1 [2] показано влияние формы ЧКХ на качество изображения при одинаковом предельном разрешении систем. При сравнении систем А, В и С при контрасте 0,1 все три системы имеют одинаковое разрешение, а при контрасте 0,5 их ЧКХ существенно различаются. Очевидно, что система С имеет наилучшее качество изображения.

ЧКХ может служить удобным критерием для оценки качества изображающих оптических систем по таким критическим параметрам, как пространственная частота (лн/мм) для объектива, линия на пиксель (лн/мм) или пространственное расположение пикселей – пиксель на миллиметр (пикс/мм) для приемника изображения.

Очевидно, видеосистему целесообразно проектировать с учетом соответствия разрешающей способности объектива и приемника изображения. Например, матрица с расстоянием между пикселями 6 мкм будет соответствовать граничной частоте (частота Найквиста [4]) 83 лн/мм или 166 пикс/мм. Для такой матрицы использование объекти-

вов с более высоким предельным разрешением, чем указанная граничная частота приемника изображения, не имеет смысла.

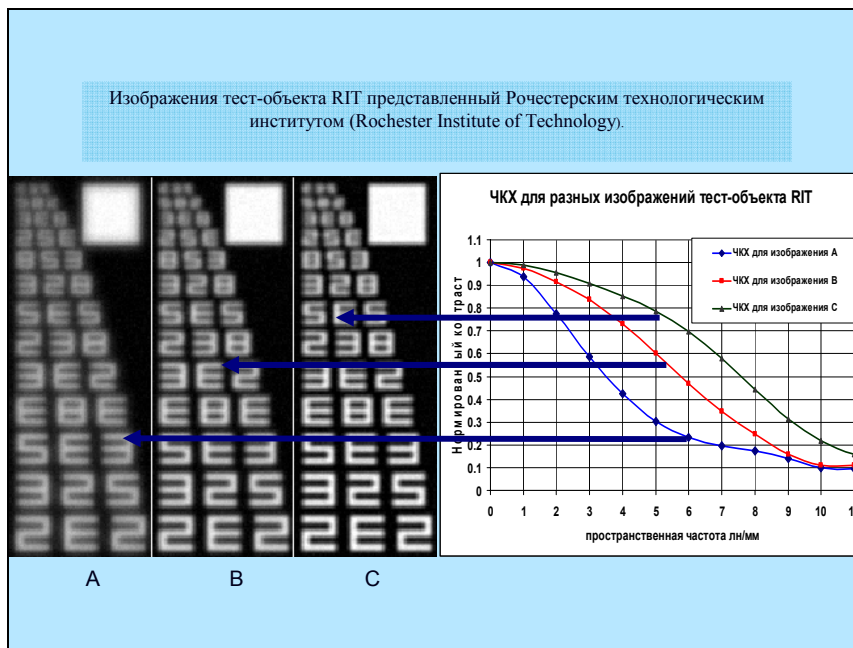


Рис. 1. Пример, объясняющий связь качества изображения и формы ЧКХ

Для определения требований, предъявляемых к объективам цифровых камер необходимо ответить на следующие вопросы:

- как соотнести разрешающую способность объектива с размерами пикселя?
- какое цифровое увеличение с целью распознавания объекта требуется получить?
- какое количество пикселей нужно для распознавания объекта (лица человека, текста)?

В последнее время наблюдается тенденция к уменьшению размеров пикселя. Это удобно проследить, например, по развитию цифровых фотоаппаратов Canon PowerShot серии G [3], так как фотоаппараты этой серии от модели к модели сохраняли один и тот же размер матрицы – 1/1,8 дюйма. При этом растет количество пикселей и соответственно растет такой важный параметр матрицы, как количество пикселей, приходящихся на миллиметр матрицы (например, по вертикали). Поскольку частота Найквиста определяется как половина величины пикселей на миллиметр [4, 5], то разрешение матрицы размером 1/1,8 дюйма в фотоаппарате Canon PowerShot растет. Для последней модели G6 частота Найквиста равна 216 лн/мм.

Рассмотрим тест-объект с резким краем в виде прямоугольника. На его изображении край будет размазан в виде каймы с переменным наклоном профиля сечения, поскольку объектив имеет остаточные аберрации. Для исследования надо получить черно-белое изображение. Такое изображение в цифровой камере будет представлять собой числовую матрицу в формате bitmap. Для обработки данных импортируем полученный .bmp файл в программное обеспечение Mathcad [11]. Полученную матрицу можно продифференцировать по колонкам и получить функции рассеяния линии (ФРЛ). Эти функции могут быть приведены с помощью преобразования Фурье к одномерным ЧКХ. Для компенсации влияния оцифровки необходимо, чтобы тест-объект был наклонен по отношению к колонкам матрицы на небольшой угол, например, 5°. Используя несколько ФРЛ для различных колонок матрицы, получим усредненный результат, т.е. ЧКХ изображающей системы для интересующей части поля зрения (например, для осевой точки предмета).

Описанная процедура автоматически выполняется в программном обеспечении Imatest [6]. Однако ее можно производить с помощью любых вычислительных программ или даже калькулятора. На рис. 2 представлен пример математической обработки для исследования ЧКХ. Изображение тест-объекта получено с помощью фотоаппарата Canon EOS300D (135.6 пикс/мм) и объектива Canon EF-S (f=18, F8) (рис. 2). Вычисления выполнены с помощью программного обеспечения Mathcad.

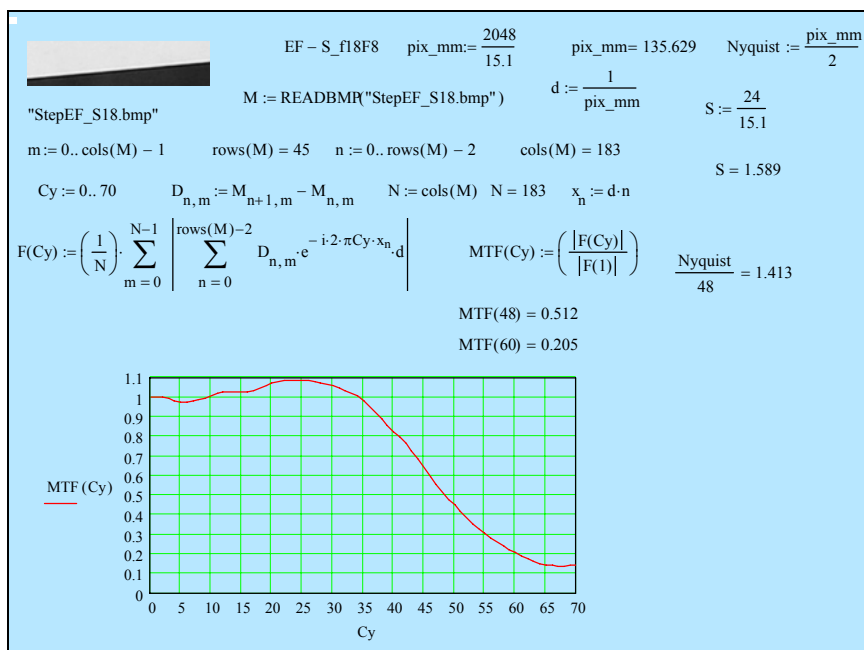


Рис. 2. Пример математической обработки для исследования ЧКХ

Произведя аналогичные вычисления по тест-фотографиям, представленным fr-view [3], проследим тенденции улучшения качества изображения объективов для фотоаппаратов этой фирмы (рис. 3), которые, безусловно, определяются увеличением разрешающей способности сенсорных матриц.

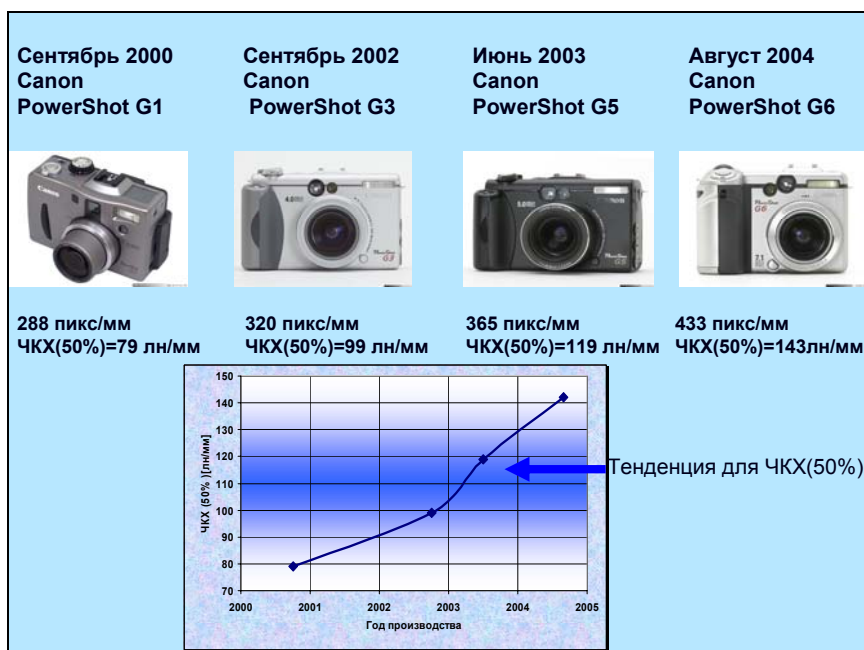


Рис. 3. Пример развития фотоаппаратов Canon, использующих матрицу 1/1,8 (5,32 мм по вертикали)

Распознавание объектов цифровыми камерами

Современные цифровые камеры находят широкое применение в системах видеонаблюдения. Обычно для таких систем достаточным считается разрешение 640×480 пикселей в формате VGA.

Чтобы уверенно распознавать людей в записанном видео, разрешение должно достигать 40 точек изображения на 1 фут (0.30 м) [7]. Например, определим максимальное поле зрения для такой системы по горизонтали. Для этого, поделив 640 точек на 40 точек изображения и умножив на линейный размер, получим максимальное поле зрения 4,8 м. Обычно на практике требуется большее поле наблюдения (50–100 м), т.е. при использовании одиночной камеры с указанными параметрами возможна потеря информации. Для решения этой проблемы возможны варианты:

1. увеличение количества камер для достижения требуемого поля наблюдения,
2. использование сканирующей системы,
3. увеличение разрешающей способности цифровой камеры.

Именно третий вариант и представляется наиболее перспективным. Это означает, что на сегодняшний момент существует потребность в создании многопиксельных цифровых камер с большей разрешающей способностью для преодоления существующих ограничений.

В результате проведенного поиска были найдены примеры таких камер:

- VSi4-6600 – 6-мегапиксельная камера компании C-Cam Technologies [8].
- FSi4-14000 – 14-мегапиксельная камера компании C-Cam Technologies [8].
- VED-11DP-C – 3-мегапиксельная камера компании VISTA [9].

Сегодняшние телевизионные камеры производят 30 кадров в секунду, что может просматриваться на мониторе для проведения наблюдения в реальном времени. Современные аналоговые и цифровые видеокамеры для видеонаблюдения вынужденно работают с уменьшенной скоростью записи (1–4 кадр/сек) для увеличения времени записываемого материала. Из-за высокого числа регистрируемых точек имеются три ключевых рабочих элемента, которые ограничивают скорость кадров:

- производительность и скорость ввода-вывода процессора изображения в камере;
- передача данных от камеры на записывающее устройство;
- производительность и скорость ввода-вывода записывающего устройства.

Необходимо специально спроектированное цифровое управление, чтобы обеспечить требуемую высокую информативность, а также быстрое соединение через Ethernet между камерой и персональным компьютером для передачи данных с высокой скоростью, достаточной, чтобы передавать сжатый поток данных сверхвысокого разрешения. Чтобы обеспечить запись в течение одного дня, персональный компьютер должен работать на частоте более 2 ГГц с емкостью памяти до 500 Гбайт.

Примеры объективов для современных цифровых камер

Цифровые многопиксельные камеры уже разрабатываются многими компаниями в мире [8, 9]. В этом случае возможно наблюдение за большими площадями с последующим цифровым увеличением при воспроизведении. Для таких камер, безусловно, требуется создание оптики с высокой разрешающей способностью. Разработкой указанных систем занимаются специализированные конструкторские бюро, например, [10, 13, 14].

На рис. 4 показан кадр сделанный цифровой видеоголовкой, оборудованной объективом LJ-10 ($f=19.56\text{mm}$, F6.5) с оптическим размером 1/2 и 3,1 миллионами точек изображения.

Для этой матрицы частота Найквиста составляет 160 лн/мм, а ЧКХ объектива значительно превосходит эту величину. Поэтому в дальнейших разработках предполагается использовать матрицу того же размера, но с большим количеством пикселей (возможно, 6 мегапикселей). Интересно сравнить изображение, полученное видеокамерой с объективом LJ-10, которое по качеству не уступает изображению, сделанному фотоаппаратом Olympus3040. Разработана серия объективов специальной конструкции с вынесенным вперед входным зрачком (пинхол) [10] с высоким разрешением, таких как LJ-44 ($f^*=11.2$ мм, F5.6) – рис. 5. ЧКХ на уровне контраста 50% для этого объектива составляет около 125 лн/мм. Другой интересный объектив типа пинхол – это LJ-717 ($f^*=3.6$ мм; F4; $2\omega=116^\circ$); его оптическая схема представлена на рис. 6.

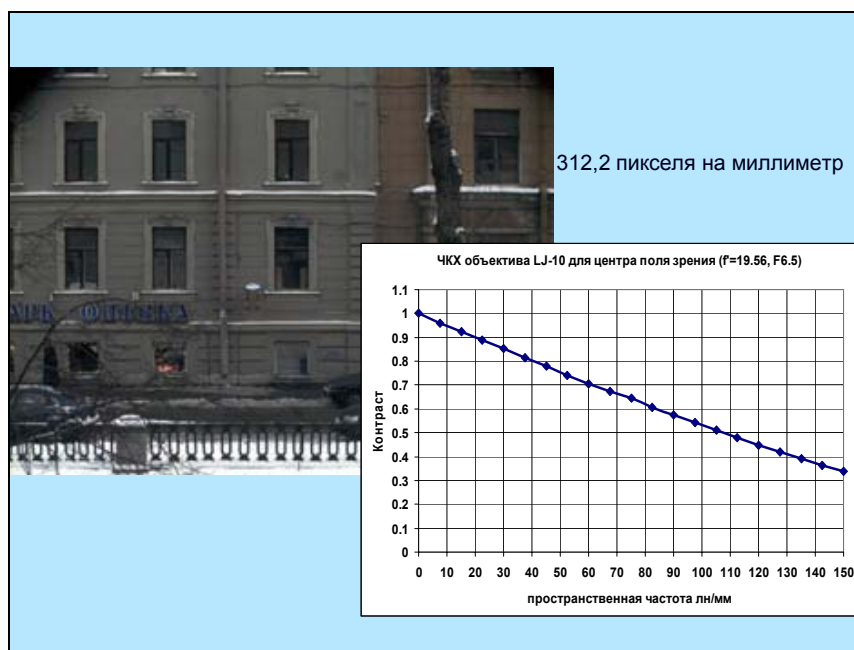


Рис. 4. Кадр, полученный компьютерной камерой с матрицей 1/2 (4,92 мм по высоте) и объективом LJ-10 ($f^*=19.56$ мм, F6,5)

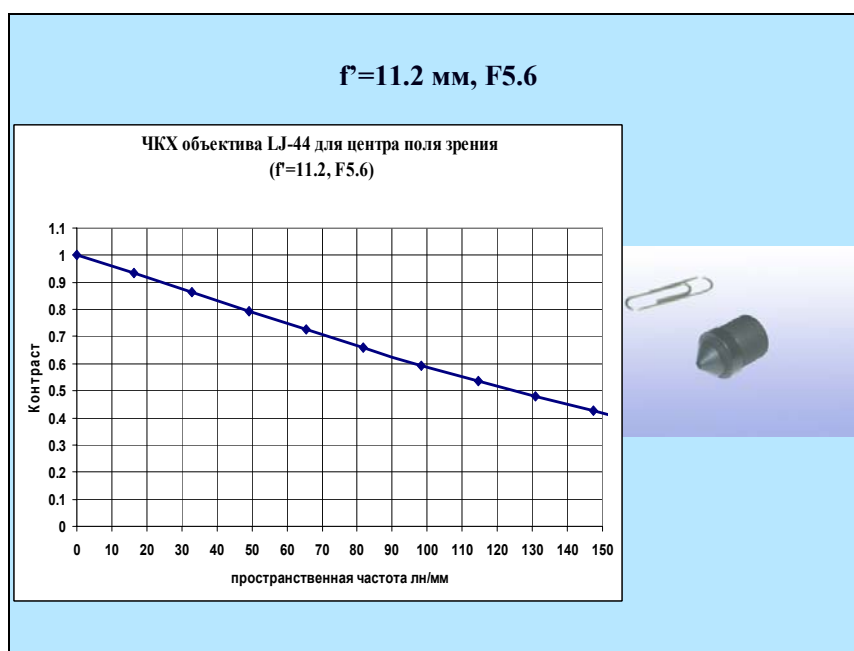


Рис. 5. ЧКХ объектива LJ-44, рассчитанная при помощи программного обеспечения Synopsys [12]

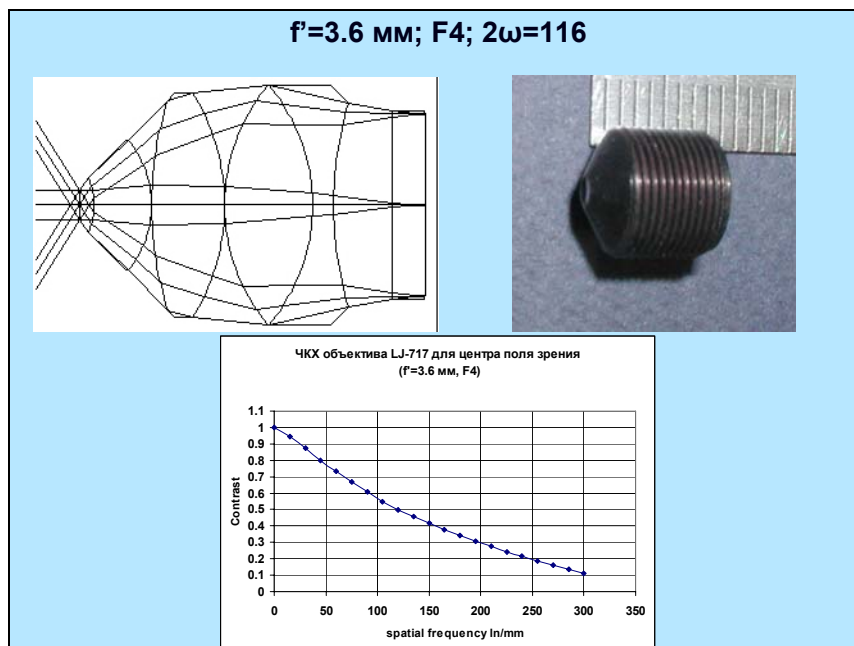


Рис. 6. Оптическая схема и ЧКХ, рассчитанные для объектива “LJ-717”

Недавно был разработан новый объектив LJ-501 ($f'=6$ мм; F6; $2\omega=90^\circ$) [10]. Этот объектив обладает увеличенным выносом зрачка – 1.8 мм.

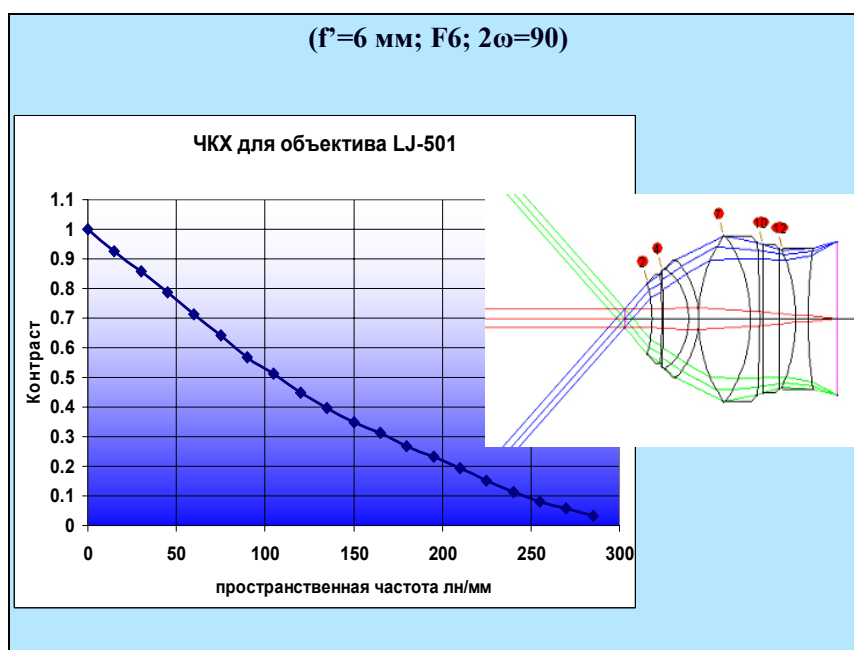


Рис. 7. Оптическая схема и ЧКХ для объектива LJ-501, рассчитанные с помощью программного обеспечения Synopsys

Интернет-обзор цифровых фотокамер dpreview [3] для сравнения фокусных расстояний предложил ввести так называемый «35-мм эквивалент» фокусного расстояния, так как при использовании матриц различного размера трудно оценить реальное фокусное расстояние объектива и сопоставить с его полем зрения. Например, 30 лн/мм для обыкновенного фотоаппарата, использующего 35-мм фотопленку (диагональ фотоприемника равна 43.26 мм), соответствует приблизительно 45 лн/мм для фотоаппарата

Canon EOS300 (диагональ фотоприемника 27.22 мм), а также 130 лн/мм для цифрового фотоаппарата Olympus3040 (диагональ фотоприемника 8.93 мм).

В результате можно прийти к выводу, что для сравнения различных оптических систем нужно приводить разрешающую способность системы, т.е. (ЧКХ(50%) и ЧКХ(10%)) к стандарту 35-мм фотокамеры. Приведенная на рис. 8 диаграмма построена только на основе геометрических соотношений, в целом она показывает современные тенденции развития оптических систем, предъявляющих требования к разработке современных объективов с более высокой разрешающей способностью и улучшенной формой ЧКХ. Таким образом, в настоящее время в ответ на требования миниатюризации фото/видео техники используются матрицы отображения меньшего размера.

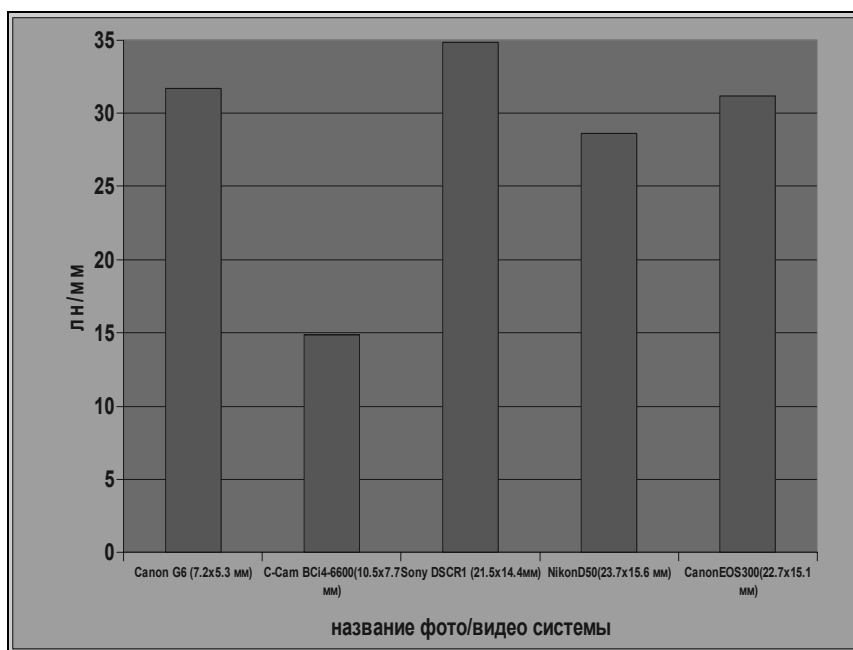


Рис. 8. Разрешающая способность цифровых фото/видео камер по ЧКХ(50%), приведенная к формату 35 мм фотоаппарата

Заключение

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- для современных цифровых фото/видео камер применимы классические критерии оценки качества изображения;
- оценка качества изображения цифровых камер подтверждает, что существует ограниченное количество объективов, удовлетворяющее высоким требованиям, предъявляемым к таким камерам;
- объективы для современных цифровых камер по качеству изображения должны приближаться к дифракционному пределу разрешения.

Литература

1. Проектирование оптических систем / Под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. М.: Мир, 1983.
2. RIT Alphanumeric Resolution Test Object is available from the Rochester Institute of Technology (716-475-2739).
3. www.dpreview.com

4. Н. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory" // Trans. AIEE. 1928. V.47. P. 617–644.
5. Котельников В.А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи. Всесоюзный энергетический комитет.// Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933.
6. www.imatest.com
7. www.sentryscope.com
8. www.vista-cctv.com
9. www.vector-international.be
10. www.jupiter.spb.ru/
11. www.mathsoft.com
12. www.synopsys.com
13. www.canon.com
14. www.olympus-global.com

ЛАЗЕРНЫЕ СКАНИРУЮЩИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

В.А. Гримм, С.А. Смирнов

В статье представлены телескопы сканирующего типа [1] со следующими усредненными характеристиками: диаметр главного зеркала 430–530 мм; угловое увеличение 4–5^x; угол обзора в пространстве предметов не более ±5 мрад; угловое разрешение (2") не хуже 1"; спектральная область 0.43–5.0 мкм; коэффициент центрального экранирования (по площади) не более 12%; потери по краю угла обзора не более 18%. Телескопы с похожими характеристиками находят применение в различных областях – в аэрокосмических исследованиях, на летательных аппаратах в космосе и атмосфере, в астроклиматических исследованиях на суше и воде. Естественно, что конструкции подобного типа находят применение и в военных областях в составе лазерных систем.

Основными элементами этой достаточно простой конструкции (рис. 1) остаются все те же три зеркала: главное и вторичное с поверхностями второго порядка и наклонное плоское зеркало (Nasmith mirror), расположенное либо внутри, либо снаружи телескопа. При сканировании обеспечиваются особые условия наблюдения предмета. Во-первых, появляется возможность рассматривать периферийные области с максимально допустимым разрешением, во-вторых, обеспечивается больший обзор предмета и, значит, имеется дополнительная информация об интересующем вас объекте. Поэлементный анализ объекта предоставляет исследователям информацию, которая удобна для математической обработки, что позволяет идентифицировать и локализовать отдельные особенности объекта. При сканировании важное значение имеет вопрос о соотношении угла сканирования (Θ) и угла поля зрения (ω), сумма которых определяет угол поля обзора (φ). Под углом поля зрения здесь понимается поле относительно оси сканирования. Часто его называют мгновенным полем зрения.

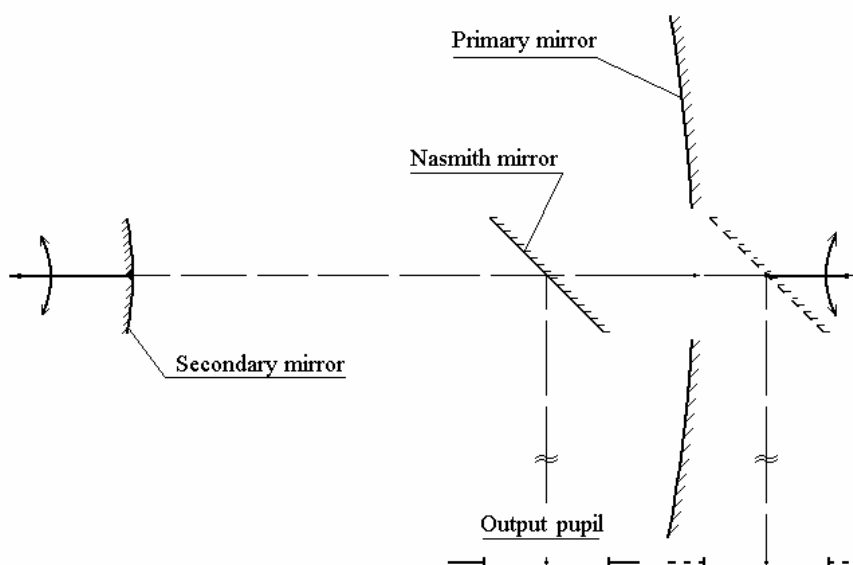


Рис. 1 Основные элементы телескопов сканирующего типа

Возможные решения для зеркальных сканирующих телескопов можно разбить на три группы (рис. 2).

Решение на параболоидах соответствует выбору оси прокатки вторичного зеркала в точке совмещенных фокусов. На эллипсоидах или гиперболоидах получается решение при выборе оси прокатки слева или справа от точки совмещенных фокусов.

Любой телескоп из указанных областей, в котором реализована идея сканирования объекта с соотношением $b=(\Theta/\omega)>1$, в плане обеспечения качества изображения в

пределах угла обзора φ оказывается лучше конструкции с фиксированными элементами с тем же углом обзора $\varphi=\omega$.

Исследования выполнены на основе численных расчетов ряда оптических схем телескопов при наличии заданного диапазона фокусировок. Результаты сопоставлялись по конечному значению оценочной функции, составленной из оценок искажения волновых фронтов в диапазоне фокусировок на 1–5 км. Абберационное качество после коррекции оценивалось для телескопов с идентичными характеристиками. Лучшее решение получено для положения оси прокачки в точке совмещенных фокусов, что соответствует решению на параболоидах. Удовлетворительные результаты получаются для гипербоидов при удалениях от общего фокуса не более чем на 15% и эллипсоидах – на 30% от величины фокусного расстояния вторичного зеркала.

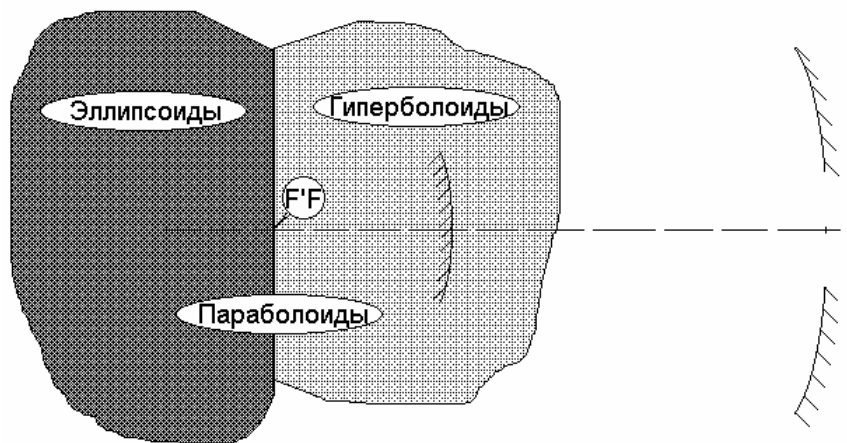


Рис. 2 Области решения для зеркальных сканирующих телескопов

Сканирование диагональным зеркалом позволяет увеличить угол обзора по отношению к результату сканирования вторичным зеркалом приблизительно на 30–40%. Это объясняется лучшим положением плоского зеркала для условия исправления комы. На рис.3 отображены результаты расчета сканирующего телескопа с вынесенным диагональным зеркалом. Представленная схема имеет увеличенный угол поля обзора за счет компенсации кривизны изображения путем функционального смещения вторичного зеркала при развороте сканирующего диагонального. На вторичное зеркало, кроме того, возлагается, как и в последующих схемах, обеспечение перефокусировки на конечные дистанции в диапазоне от 1 км до 4 км. Здесь $\varphi=\pm 2.6$ мрад и $b\approx 4$.

Если разработчик ограничен в возможности свободного выбора положения оси прокачки, соотношения Θ/ω , величин Θ или ω , то возникает необходимость введения в конструкцию дополнительных линзовых афокальных компенсаторов для уменьшения комы, снижения влияния астигматизма и кривизны поля. Один из приемов – использование линзовых компенсаторов со стороны вторичного зеркала. На рис. 4, 5 показаны примеры подобных телескопов с использованием трехлинзовых компенсаторов.

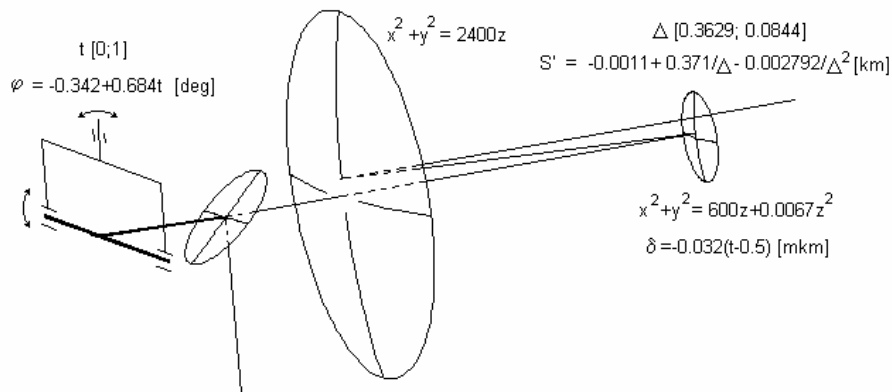
В первой конструкции на гипербоидах поле обзора было увеличено до ± 3.1 мрад при соотношении $b\approx 4$, во второй, на эллипсоидах, поле обзора увеличено до ± 5.7 мрад при $b\approx 7$. В обеих конструкциях в качестве сканирующего элемента используется вторичное зеркало, которое устанавливается с возможностью его перемещения вдоль оси для обеспечения фокусировки на дистанции от 0.6 км до 10 км.

Афокальный компенсатор существенно расширяет коррекционные возможности конструкции, а также предоставляет новые возможности в реализации перефокусировок телескопов на конечные дистанции.

Несомненный интерес представляет набор коррекционных параметров при оптимизации рассмотренных телескопов:

- коэффициенты разложения в степенной ряд воздушного промежутка между главным и вторичным зеркалами для компенсации расфокусировок относительно заданного набора дистанций фокусировок или обратных к ней величин;
- положение точки прокачки;
- коэффициенты асферизации зеркал, радиусы и толщины компенсаторов;
- коэффициенты в разложении воздушного промежутка по углу поворота сканирующего элемента.

$2m=90\text{mm}$, $2w=4.8\text{mrad}$, $Q=2\text{mrad}$, $\Gamma=4$, $S'=1-4\text{km}$



Evaluation of quality TC-400M for scanning

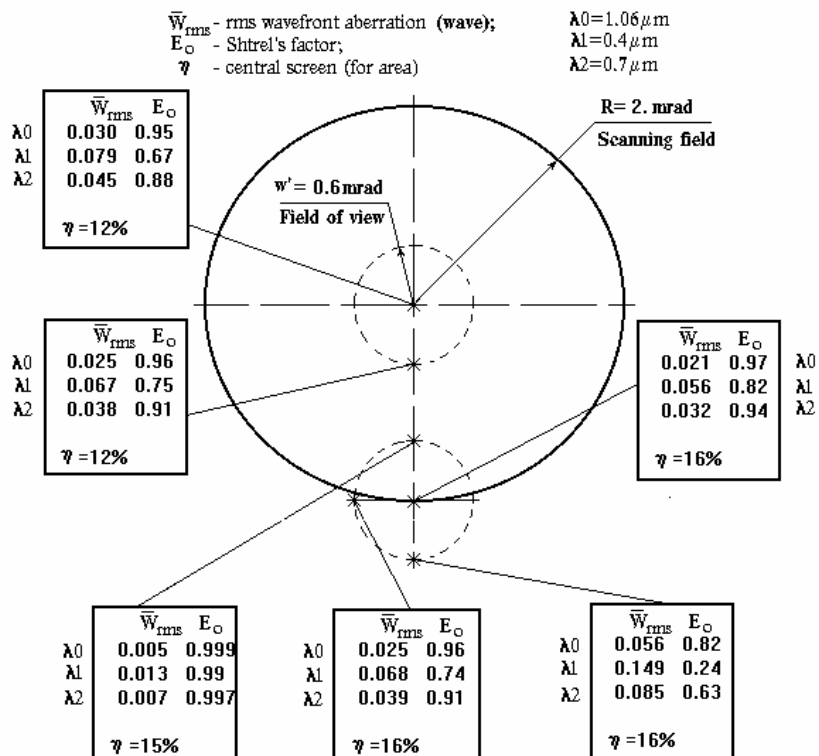


Рис. 3. Сканирование диагональным зеркалом

$2m=100\text{mm}$, $w'=0.75\text{mrad}$, $Q=2.5\text{mrad}$, $\Gamma=4$, $S'=0.485 \dots 10\text{km}$

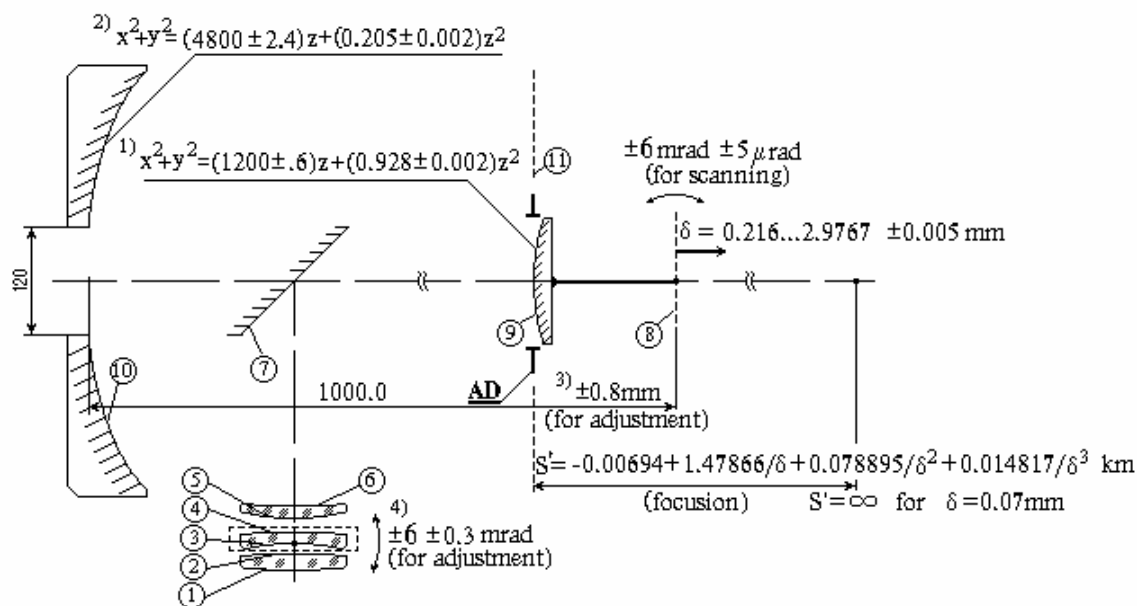


Рис. 4. Сканирующий телескоп на гиперboloидах с угловой прокачкой вторичного зеркала

$2m=400\text{mm}$, $2w=1\text{mrad}$, $Q=5\text{mrad}$, $\Gamma=4.0$, $S=0.5 \dots 10\text{km}$ wave=0.4 ... 4μkm

$$x^2 + y^2 = -1211.1z - 2.185z^2$$

$$x^2 + y^2 = -4800z - 0.404z^2$$

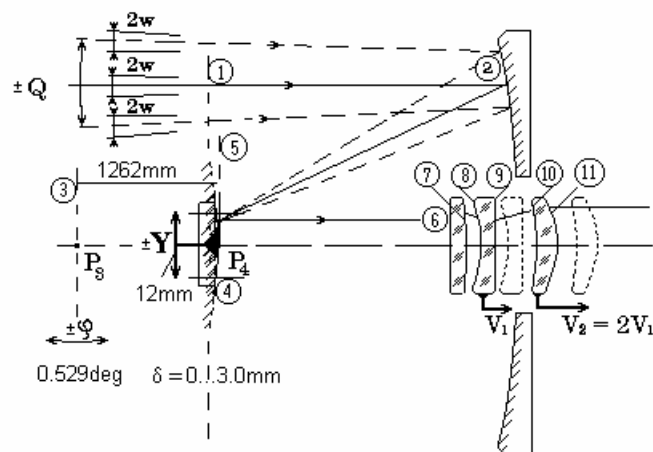


Рис. 5. Сканирующий телескоп на эллипсоидах со смещением вторичного зеркала

Функциональное пространство представляло собой двумерное поле состояний системы по дистанции фокусировки и углу поворота сканирующего элемента. Каждое состояние характеризовалось однотипным набором оценок искажений волновых фронтов, неизопланатизмом и астигматизмом с учетом заданного спектрального диапазона. Вместе с отклонением от заданного угла сканирования это давало некоторую усредненную оценку качества оптической системы в целом – величину оценочной функции.

На рис. 6 показан разработанный лазерный сканирующий телескоп ТС-400, предназначенный для исследования турбулентных свойств атмосферы. Основные техниче-

ские характеристики системы, которые необходимо было обеспечить в процессе проектирования, следующие:

Угловое увеличение, крат	4
Диаметр входного зрачка, мм	100
Мгновенное поле зрения, мрад.	± 0.75
Сканируемое поле зрения, мрад.	± 2.5
Центральное экранирование, %	13
Дистанция фокусировки, км	0.5...10
Спектральный диапазон, мкм	0.4...4.0
Рабочий температурный диапазон, °С	-5...+40
Масса, кг	не более 70

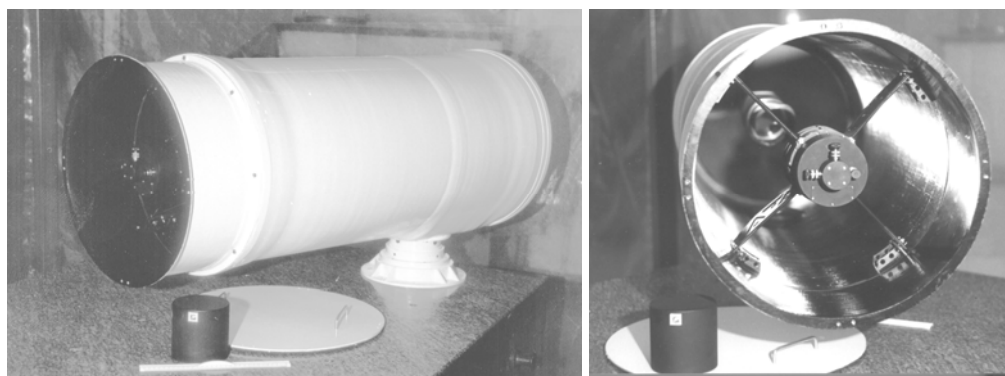


Рис. 6 Лазерный сканирующий телескоп ТС-400

Оптическая схема телескопа представлена на рис. 4. Полихроматический пучок световых лучей диаметром 100мм (спектральный интервал 0.4–4.0 мкм, основная длина волны 1.06 мкм) проходит через линзовый корректор aberrаций (пов.1–6) и отражается от наклонного зеркала (поз. 7), установленного под углом 45° к оси телескопа. Распространяясь далее, он испытывает последовательные отражения от малого сканирующего зеркала (поз. 9) и главного зеркала (поз. 10) и попадает в пространство изображений, имея диаметр сечения 400 мм и расчетную величину сходимости в интервале дистанций 0.5–10 км.

Линзовый корректор представляет собой афокальный триплет, который обеспечивает необходимую степень коррекции внеосевых aberrаций при сканировании поля зрения на выходе телескопа вторичным зеркалом в заданных пределах угловых смещений оси телескопа ($q = \pm 2.5$ мрад). Для обеспечения компенсации остаточных ошибок изготовления, сборки и юстировки его средняя линза установлена с возможностью угловых разворотов вокруг вершины (поз. 3) в пределах ± 6 мрад, что позволяет устранить при юстировке суммарную кому на оси телескопа при неблагоприятной ситуации с установкой прочих деталей (случай установки оптических деталей с суммированием комы в пределах заданных полей допусков). Корректор выполнен из моноблочных кристаллов фтористого кальция и обеспечивает коэффициент пропускания на основной длине волны 0.99 и 0.95 в области 0.4–4.0 мкм за счет пятислойного просветляющего диэлектрического покрытия поверхностей линз.

Диагональное зеркало выполнено из ситалла с близким к нулю коэффициентом линейного расширения и консольно закреплено в центральном отверстии главного зеркала, что обеспечивает угловое смещение оси не более $15''$ и поперечный сдвиг оси на корректоре не более 0.5 мм. Сканирование поля изображения обеспечивается угловым разворотом по двум координатным осям вторичного зеркала ($\varphi = \pm 6$ мрад.), которое установлено в карданном подвесе на расстоянии 100 мм от точки качания.

Весь узел вторичного зеркала имеет возможность перемещаться вдоль оси телескопа в пределах $d = 0-3$ мм для обеспечения фокусировки излучения на заданных дистанциях от бесконечности до 485 м. Форма поверхности вторичного зеркала представляет собой гиперboloид вращения с эксцентриситетом, равным 1.298. Дистанция до объекта S' , на которой фокусируется излучение, и осевое смещение вторичного зеркала связаны соотношением $S' = -770 + 145500/d + 4720/d$ мм.

Главное зеркало, также как и вторичное, выполнено из ситалла с практически нулевым температурным коэффициентом линейного расширения. Форма его поверхности – гиперboloид вращения. Зеркальные поверхности имеют металлодиэлектрическое покрытие, обеспечивающее коэффициент отражения на основной длине волны 0.995, а в диапазоне 0.4–4.0 мкм не хуже 0.95.

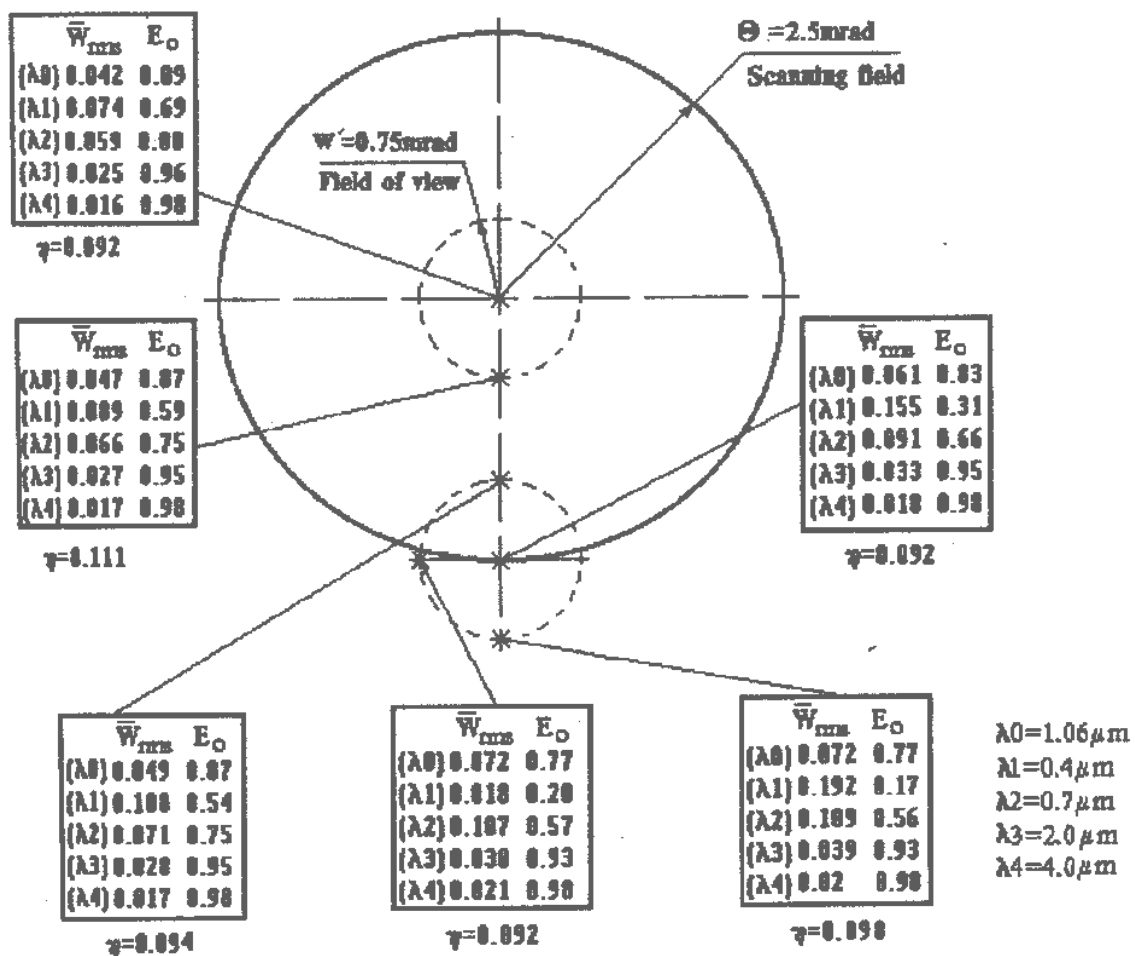


Рис. 7 Эволюция качества ТС-400 на дистанции бесконечность \bar{W}_{rms} – среднеквадратичная деформация волнового фронта, E_0 – число Штреля, k – разрешение при контрасте 0.5, лин/мм, η – центральное экранирование (по площади).

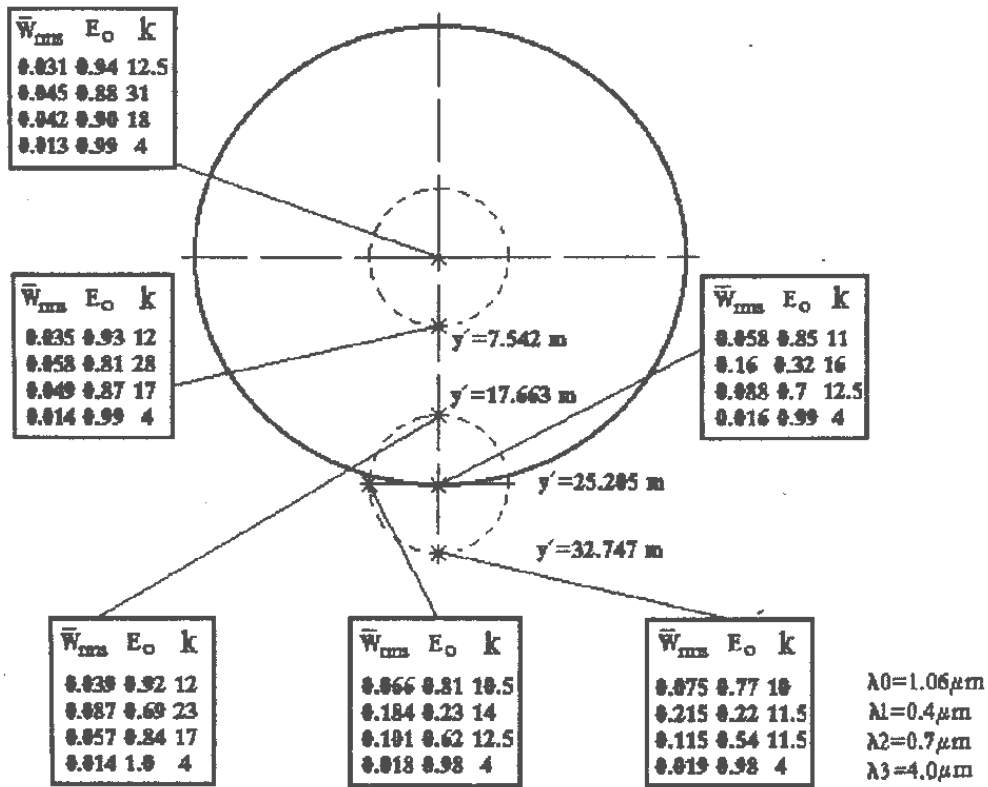


Рис. 8 Эволюция качества ТС-400 на дистанции 10 км

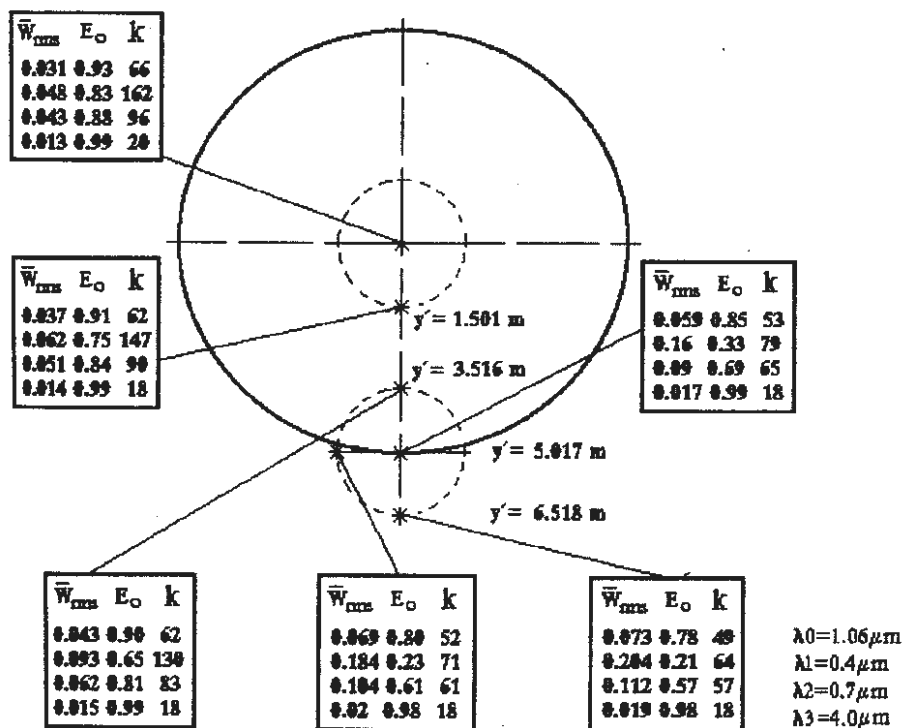


Рис. 9. Эволюция качества ТС-400 на дистанции 2 км

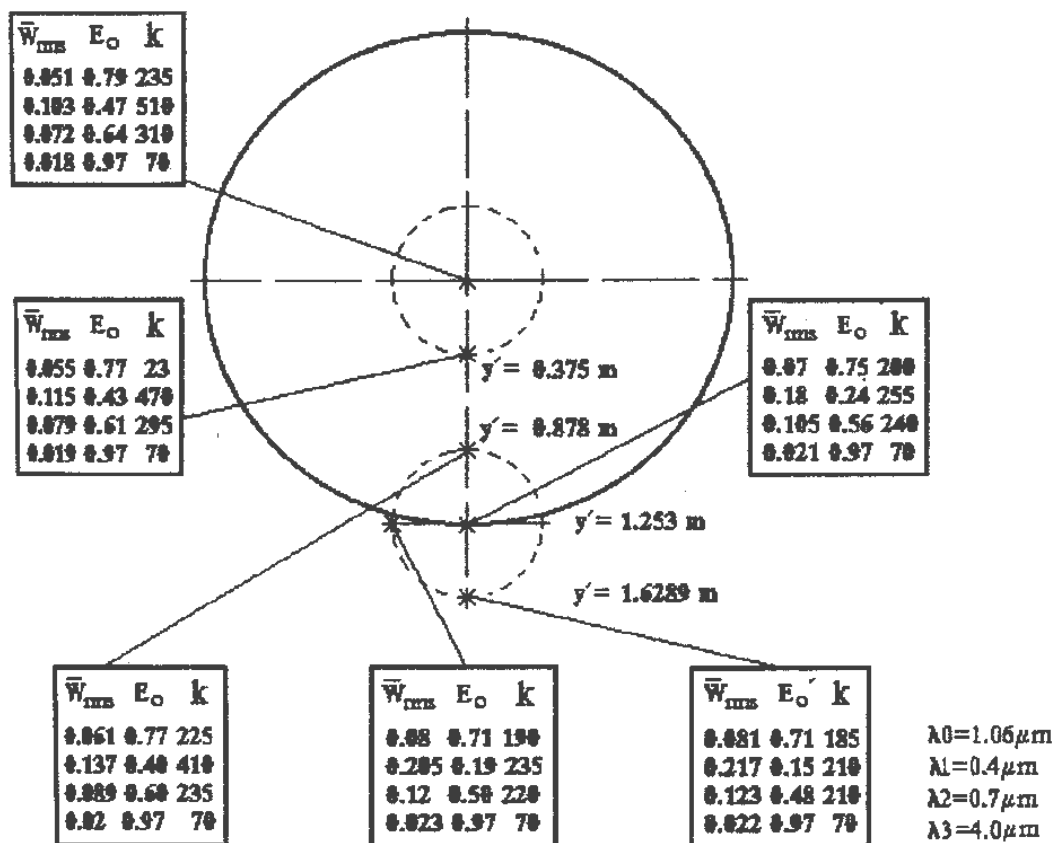


Рис. 10. Эволюция качества ТС-400 на дистанции 500 м

На рис. 7–10 представлены сводные таблицы оценки абберационного качества телескопа ТС-400 для критических углов мгновенного поля зрения и углов сканирования при его перефокусировках с бесконечности до 500 м. Расчеты освещенностей светового поля в плоскостях фокусировки (числа Штреля) выполнены в соответствии с предположением о суперпозиции интерферирующих плоских волн с затухающими по экспоненциальному закону амплитудами в пределах области с характерным размером, равным утроенному диаметру Эри. Некоторое несоответствие чисел Штреля для центральных лучей пучков среднеквадратичным деформациям волновых фронтов обусловлено либо поперечным, либо осевым смещением максимумов освещенностей, значения которых в таблицах отсутствуют. Оценки ЧКХ (MTF) сделаны в предположении отсутствия пространственной когерентности для одномерной синусоидальной миры по уровню снижения контраста до значения 0.5 и выражены в количестве линий на метр. Приведенные оценки являются усредненными для саггитально и меридионально ориентированных мир, разброс истинных значений не превышает 10% от приведенных.

При проектировании ТС-400 в соответствии с требованиями технического задания и ограничениями, налагаемыми параметрами оптической схемы, был рассмотрен ряд возможных вариантов компоновки системы. На этом этапе исследовалось влияние податливости корпуса на вертикальные перемещения вторичного зеркала (как максимальные из перемещений оптических узлов). Были рассмотрены варианты как различных конструкций корпуса, так и используемых материалов. Первоначально предполагалось использование таких конструкционных материалов, как титан, сплав 32НҚД и алюминиевые сплавы. В качестве примера на рис. 11 приведена одна из анализируемых схем конструкции, разработанных на основе метода конечных элементов. Система обладает симметрией относительно плоскости ХОУ, содержит 84 конечных элемента и имеет 318 степеней свободы. В данном случае корпус конструкции представляет собой

систему продольных стержней, скрепленных бандажными кольцами. В таблице 1 приведены результаты расчетов для 4 вариантов используемых комбинаций конструктивных материалов.

Таблица 1

№	Используемые материалы	m_{Σ} , кг	u_3^y , мкм	ν_1 , Гц
1	Титан и инвар	122.6	-88.68	52.9
2	ГЭКМ, инвар	122.1	-80.69	55.5
3	Стержни из ГЭКМ	95.1	-55.93	66.7
4	ГЭКМ	73.7	-41.49	77.4

где m_{Σ} – масса конструкции, u_3^y – смещение центра вторичного зеркала под действием силы тяжести, ν_1 – низшая резонансная частота конструкции, ГЭКМ – графито-эпоксидный композиционный материал.

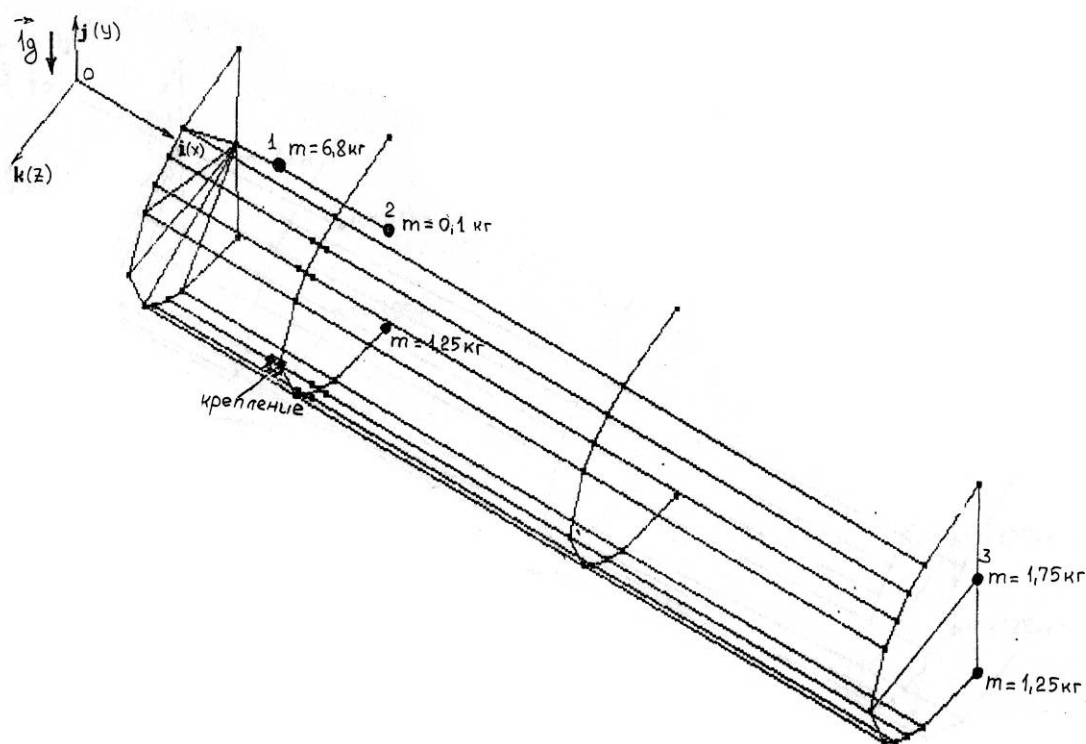


Рис. 11 Расчетная модель конструкции корпуса ТС-400

Результаты численного моделирования жесткости конструкции позволили сделать вывод, что ни одна из рассмотренных компоновок корпуса в виде скрепленных по окружности продольных стержней не отвечает требованиям по массо-жесткостным характеристикам. В итоге была принята конструкция, содержащая несущий элемент в виде тонкостенной цельномотанной подкрепленной оболочки (трубы) из углепластикового композиционного материала. Такой корпус обеспечивает необходимую жесткость крепления оптических элементов, стабильность их положения при температурных колебаниях окружающей среды и минимальные весовые характеристики.

В соответствии с техническими требованиями было необходимо обеспечить минимально возможную температурную деформацию основного линейного размера оболочки в интервале температур (-5°C)–(+40°C) на базовой длине 1012 мм. Такое требо-

вание можно удовлетворить, используя либо специальные конструктивные решения (всевозможные компенсаторы «обратного хода», термокомпенсаторы и т.п.), либо прямые конструктивные решения с использованием конструкционных материалов с температурным коэффициентом линейного расширения, близким к нулю. Ясно, что первое направление создания термостабильных конструкций связано с большими затратами материальных и трудовых ресурсов, вытекающих из необходимости обеспечения высокой точности изготовления элементов деталей, сложности конструкции компенсаторов, введения в технологический процесс большого числа сборочных операций и т.п. Второе направление, связанное с использованием новых конструкционных материалов с минимальным температурным коэффициентом линейного расширения, более перспективно, тем более что класс таких материалов (композиты на основе углеродных нитей) достаточно хорошо изучен.

При проектировании размерно-стабильных несущих конструкций необходим учет вклада всех конструктивных и технологических элементов в общую стабильность размеров изделия. Наряду с оценкой деформаций основных несущих элементов конструкции, необходим учет влияния на размерную стабильность таких деталей, как соединительные муфты, кольца, узлы крепления и фланцы и даже толщины клеевых соединений. Компенсация термоупругих деформаций, вызванных присоединением к размерно-стабильной конструкции элементов с высоким коэффициентом температурного расширения, выполняется по кинематическим схемам, предотвращающим передачу избыточных температурных деформаций. Условия компенсации деформации металлических крепежных узлов в рассматриваемой конструкции оболочки ТС-400 выполнены по принципу «обратного хода» как для заднего фланца, так и для пилонов переднего фланца. Поэтому задача обеспечения стабильности оболочки свелась к обеспечению минимума продольной деформации только композитной составляющей. При этом зона заднего фланца, включая зону бокового отверстия, и зона переднего фланца с крепежными элементами пилонов была выполнена продольно-поперечной укладкой графитовых волокон, а промежуточная – только по продольной схеме. Это объясняется тем, что графитоэпоксидные материалы вдоль волокон при однонаправленной структуре армирования имеют отрицательный температурный коэффициент линейного расширения, т.е. сжимаются при нагревании, в то время как при продольно-поперечном армировании в соотношении 1:1 по осям анизотропии они обладают положительным коэффициентом. Таким образом, промежуточная зона продольной укладки компенсирует положительную деформацию зон продольно-поперечной укладки волокон.

Из условия полной компенсации термодформаций для выбранного композиционного материала, при заданных технологических условиях формования оболочки и режимах термообработки, было рассчитано отношение длин зон с продольной и продольно-поперечной укладкой волокон

$$l_1 : l_2 : l_3 = 1 : 4.17 : 2.86,$$

абсолютные значения которых составили, соответственно:

$$l_1 = 126 \text{ мм}, l_2 = 526 \text{ мм}, l_3 = 360 \text{ мм}.$$

Решение задачи обеспечения механических характеристик оболочки, достаточных для выполнения условий функционирования при эксплуатационных воздействиях, определенных техническим заданием, свелось к выбору рациональной толщины пакета композита, т.е. количества монослоев, с уже выбранной ориентацией волокон в нем, а также к выбору оптимальной схемы подкрепляющих элементов. Из решения статической задачи теории упругости с использованием алгоритма метода штрафных функций при минимизации массы оболочки телескопа были получены минимально допустимые значения толщин зон:

$$h_1 = 10 \text{ мм}, h_2 = 6 \text{ мм}, h_3 = 15 \text{ мм}.$$

После формования оболочки, необходимой механической обработки и длительного термоциклирования все поверхности корпуса были защищены специальным влагостойким покрытием, уменьшающим вероятность образования микротрещин, способствующих проникновению внутрь влаги, которая, в свою очередь, приводит к изменению геометрических размеров конструкции, снижает несущую способность, усталостную прочность и заданный срок службы изделия. На рис. 12 и 13 представлен общий вид изготовленной корпусной конструкции.

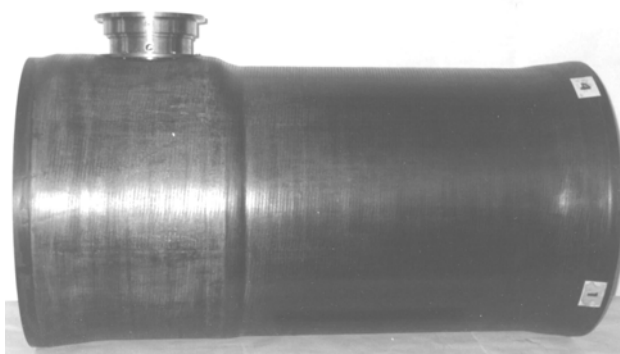


Рис. 12 Вид корпуса сбоку

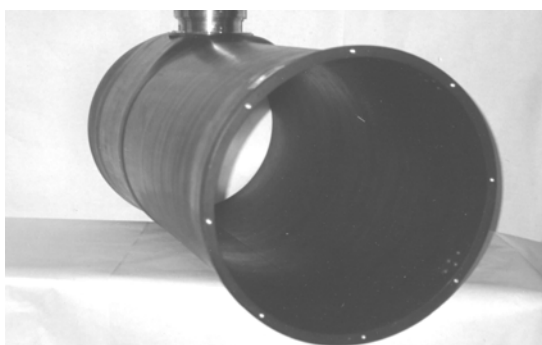


Рис. 13 Вид корпуса спереди

Разработанная конечноэлементная модель конструкции ТС-400 включает 179 элементов и 510 динамических степеней свободы. Главное и диагональное зеркала, узел крепления вторичного зеркала и блок линзового компенсатора представлены в модели в виде сосредоточенных масс с соответствующими моментами инерции. На ее основе был проведен расчет резонансных частот и форм колебаний конструкции в целом. Низшая собственная частота равна 75.73 Гц и соответствует изгибным колебаниям углепластикового корпуса. Вторая собственная частота равна 105.7 Гц и соответствует крутильным колебаниям корпуса, вызванным изгибными деформациями в зоне его крепления к основанию (см. рис. 14).

Функционально и технологически конструкция ТС-400 состоит из следующих узлов:

- узел сканирующего (вторичного) зеркала,
- узел крепления главного зеркала,
- узел крепления диагонального зеркала,
- узел пилонов,
- узел компенсатора,
- узел бленды,
- узел проставки для установки телескопа на турель.

Современные методы проектирования позволяют провести надежное техническое обоснование конструкции оптической системы и ее основных узлов с точки зрения оптимизации технических параметров, трудоемкости изготовления, стоимости и долговечности.

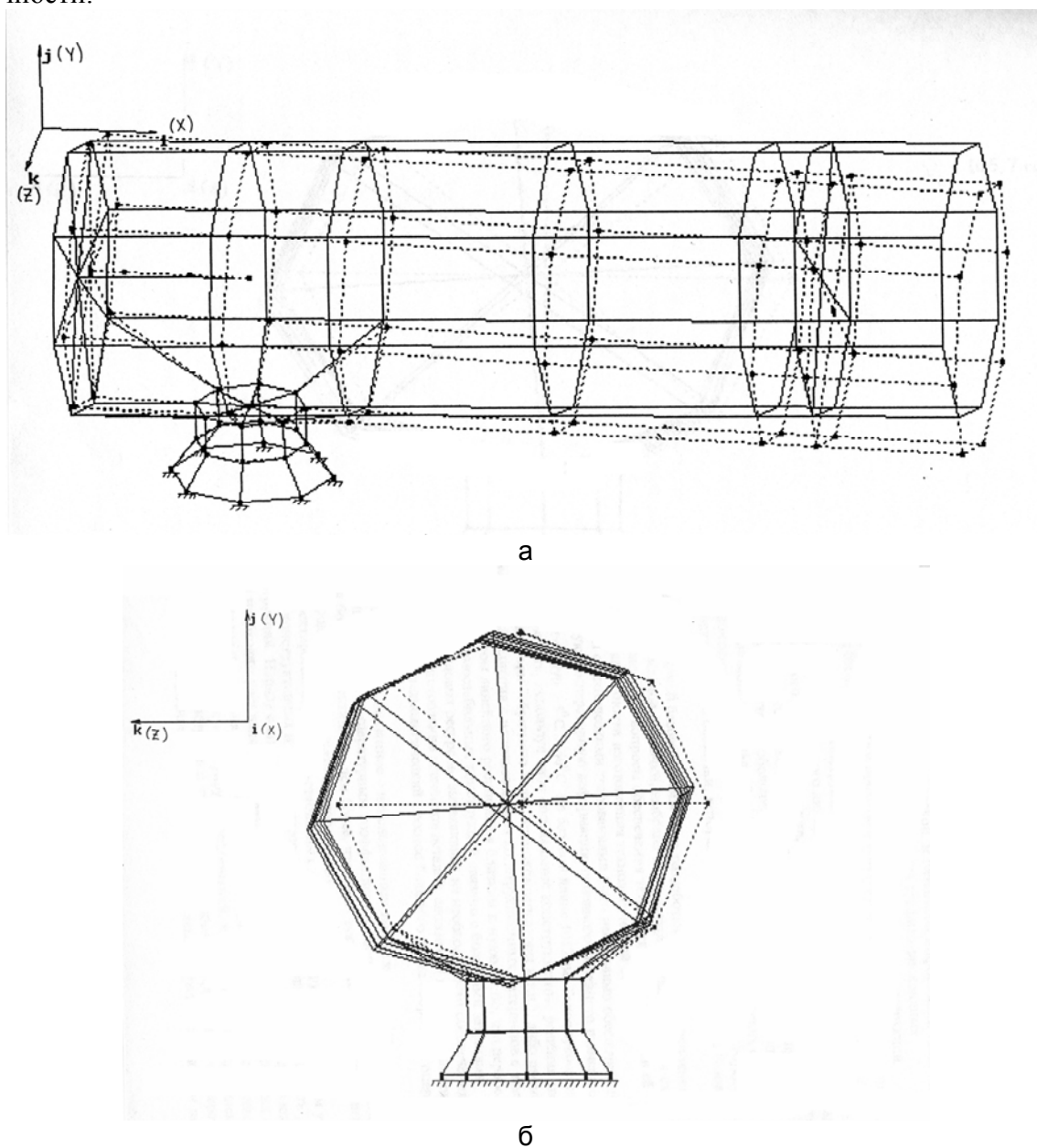


Рис. 14. Низшие моды колебаний конструкции ТС-400:
а – резонансная частота $n = 75.73$ Гц, б – резонансная частота $n = 105.7$ Гц.

Узел сканирующего зеркала предназначен для осуществления наклонов вторичного зеркала по двум координатным осям на угол ± 20.71 относительно точки качания, удаленной вдоль оптической оси на 100 мм от вершины вторичного зеркала, и перемещения точки качания в диапазоне 0–3 мм вдоль оси телескопа. При проектировании этого узла учитывались следующие факторы:

- обеспечение необходимой точности всех подвижек в рабочем диапазоне перемещений,
- создание достаточно жесткой конструкции, имеющей собственные резонансные частоты выше 50 Гц,

- обеспечение стабильности работы прибора в заданном температурном интервале,
- возможность последующей автоматизации угловых перемещений зеркала.

Узел вторичного зеркала собран в корпусе, который устанавливается в пилонную оправу главного корпуса телескопа на посадочный фланец В и закрепляется четырьмя винтами. В корпусе вторичного зеркала закреплены четыре призматические направляющие, по которым на 12 шариках перемещается каретка. Направляющие выставлены таким образом, чтобы обеспечить перемещение каретки перпендикулярно посадочному фланцу В с заданной точностью. Перемещение каретки с точностью 0.1 мкм осуществляется дифференциальным винтом, упирающимся в подпятник каретки, и закрепленном на кронштейне. Силовое замыкание каретки на винт обеспечивается двумя пружинами с усилием 1.5 Кг каждая. Вторичное зеркало, установленное на инваровой оправе, закрепляется на штанге с помощью гаек. Штанга закреплена в карданном подвесе, обеспечивающем качение зеркала в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Качение осуществляется двумя дифференциальными винтами, установленными на специальных кронштейнах каретки. Силовое замыкание на винты осуществляется пружинами. Для балансировки зеркала на штанге установлены балансировочные детали. Способ крепления зеркала на оправу и штангу выбран в соответствии с расчетом термодформаций всех деталей, входящих в этот узел, в заданном температурном диапазоне (-5°C)–(+40°C), а также гравитационных искажений формы и положения этих деталей. Серией расчетов определялся уровень перемещений точек рабочей поверхности зеркала при стационарном нагреве (охлаждении). Температура сборки была принята +20°C.

Осесимметричная задача теории упругости решалась методом конечных элементов. При конечномерной дискретизации объекта использовались осесимметричные КЭ с треугольным поперечным сечением. Было проанализировано влияние на уровень перемещений характерных точек рабочей поверхности как материала зеркала (К8, кварц, ситалл) так и условий его крепления. На рис. 15 показаны в качестве примера два расчетных варианта конструкции, отличающиеся характером крепления вторичного зеркала на оправе. В табл. 2 приведены расчетные данные смещения точек рабочей поверхности при температуре -5°C для вторичного зеркала, изготовленного из ситалла с коэффициентом линейного расширения $\alpha = + 1.5$.

Таблица 2

Вариант (а)				Вариант (б)		
№	R, см	U, мкм	V, мкм	R, см	U, мкм	V, мкм
1	5.3	-0.229	-0.066	5.3	-0.198	0.205
2	4.8	-0.213	-0.044	4.8	-0.179	0.200
3	4.3	-0.197	-0.020	4.3	-0.160	0.194
4	3.8	-0.181	0.003	3.8	-0.141	0.188
5	3.3	-0.165	0.028	3.3	-0.122	0.182
6	2.8	-0.150	0.053	2.8	-0.103	0.174
7	2.3	-0.138	0.080	2.3	-0.084	0.167
8	1.8	-0.131	0.110	1.8	-0.066	0.158
$\Delta v = 0.176$ мкм				$\Delta v = 0.047$ мкм		

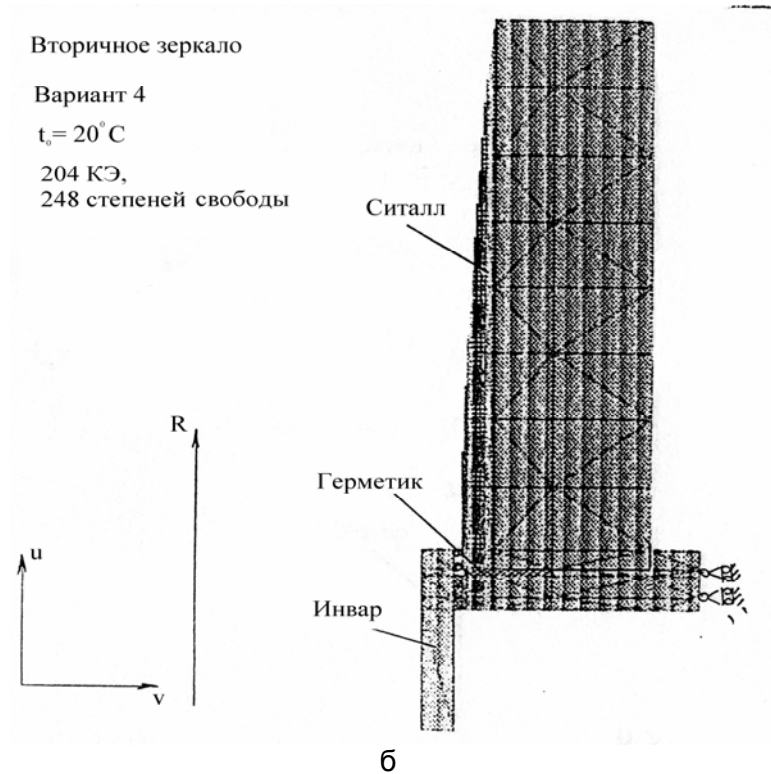
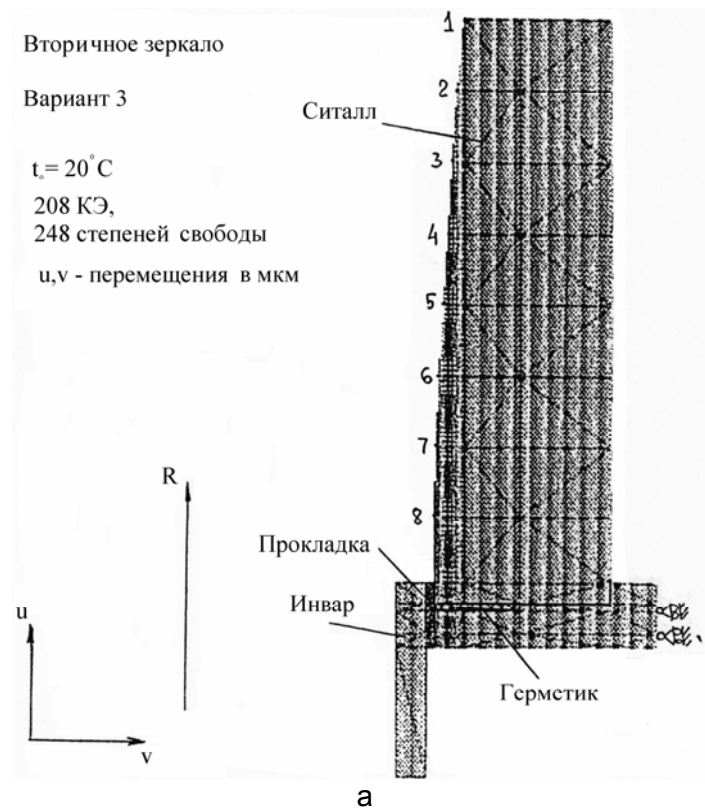


Рис. 15 Расчетные модели конструкции вторичного зеркала ТС-400

В конструкции узла сканирующего зеркала предусмотрены ограничители угловых перемещений, линейного перемещения, а также защитные кожухи с резиновыми прокладками. Узел сканирующего зеркала крепится в пилонном кольце через промежуточное кольцо, что позволяет устранить нежелательные угловые заклоны узла сканирования и обеспечить заданный воздушный промежуток между вершинами главного и вто-

ричного зеркала. Кроме того, использование кольца позволяет обеспечить воспроизводимость установки блока при повторном монтаже. Конечноэлементная модель узла фиксации малого зеркала показана на рис. 16. Модель содержит 104 двенадцатистепенных пространственных конечных элемента и имеет 372 степени свободы. На ее основе был выполнен расчет собственных частот и форм колебаний узла вторичного зеркала. Первые пять собственных (резонансных) частот конструкции равны: 182.4 Гц, 239.4 Гц, 438.2 Гц, 525.8 Гц и 754.9 Гц.

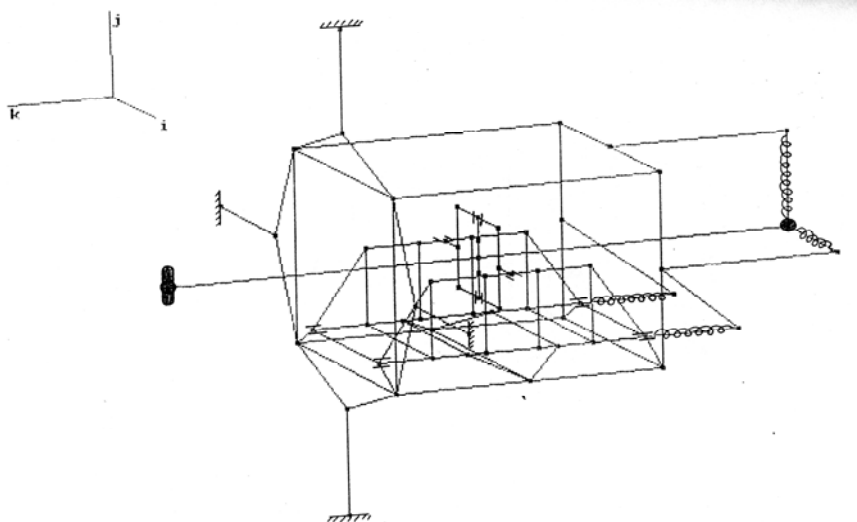


Рис. 16 Расчетная модель узла крепления вторичного зеркала ТС-400

Форма колебаний на низшей резонансной частоте показана на рис. 17. Результаты модельных расчетов позволили сделать два важных вывода:

- низшая собственная частота узла фиксации вторичного зеркала превышает 180 Гц,
- при использовании титана в качестве материала каретки узла фиксации смещение центра вторичного зеркала (за счет податливости узла крепления) под действием силы тяжести не превосходит 1 мкм.

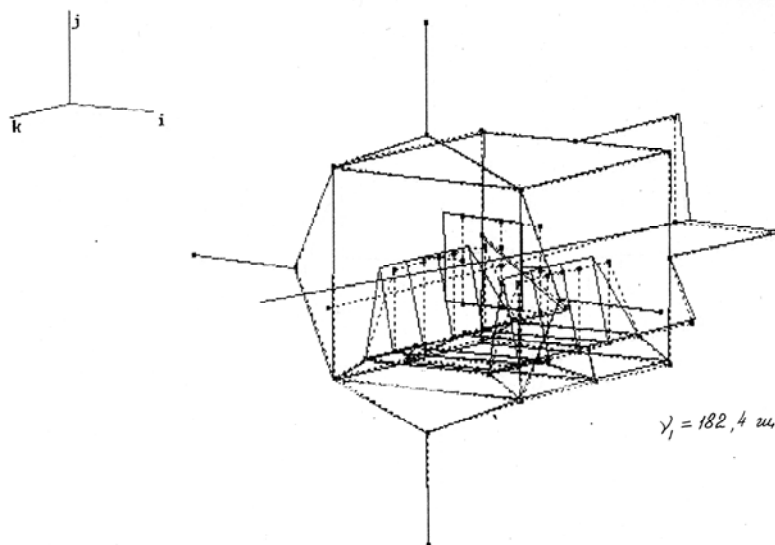


Рис. 17. Низшие моды колебаний узла вторичного зеркала

Последующая модернизация телескопа, связанная с автоматизацией режима управления угловыми перемещениями вторичного зеркала по двум осям, подразумевала установку в узел сканирующего зеркала следующих дополнительных элементов:

- узел датчиков для измерения углов наклона зеркала (четыре датчика типа KD-5100, работающие в дифференциальной схеме подключения);
- узлы двигателей, предназначенных для наклона зеркала по двум осям (моментные двигатели типа 20 МС 01 01);
- модернизированный узел ручного управления наклонами зеркала;
- дополнительные балансировочные элементы;
- детали электрического монтажа.

При проектировании были учтены все эксплуатационные требования, ранее предъявляемые к узлу сканирующего зеркала, а также дополнительные требования по обеспечению динамики выхода в рабочее положение механизма наведения сканирующего зеркала. В автоматическом режиме вывод вторичного зеркала в рабочее положение (относительно осей X и Y) осуществляется безредукторным электродвигателем с крутящим моментом $M = 75$ Н·см. При поочередном приложении к соответствующим осям крутящего момента, постоянного в течение некоторого времени, определялся отклик системы и время, за которое ось визирования телескопа повернется на заданный угол.

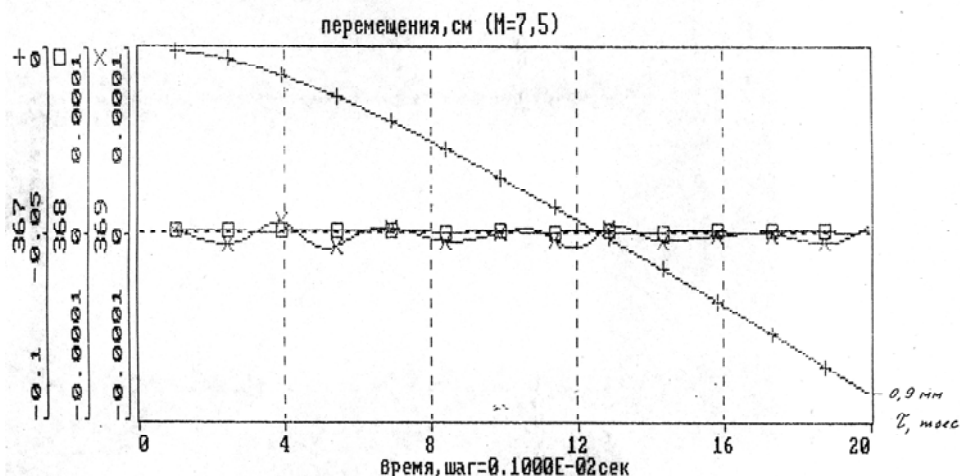


Рис. 18 Смещение центра масс вторичного зеркала по осям X , Y , Z . Момент $M = 75$ Н·см приложен относительно оси Y .

Проведенные расчеты подтвердили возможность разворота визирной оси телескопа на угол 0.08 мрад за время, равное 1.2 мсек.

Помимо исследования динамики стабилизации вторичного зеркала, было проведено численное исследование влияния точности балансировки механизма вывода вторичного зеркала на динамические характеристики. На рис. 19 показана динамика отклонения центра тяжести зеркала при различном смещении балансиров от номинального значения (+1, +5, -5, 0). Анализ результатов свидетельствует о малом влиянии точности установки балансиров на динамику процесса при включенном двигателе ($M = 75$ Н·см) разворота относительно горизонтальной оси. Точность балансировки вторичного зеркала в пределах ± 1 мм практически не влияет на динамику выхода системы на расчетный режим.

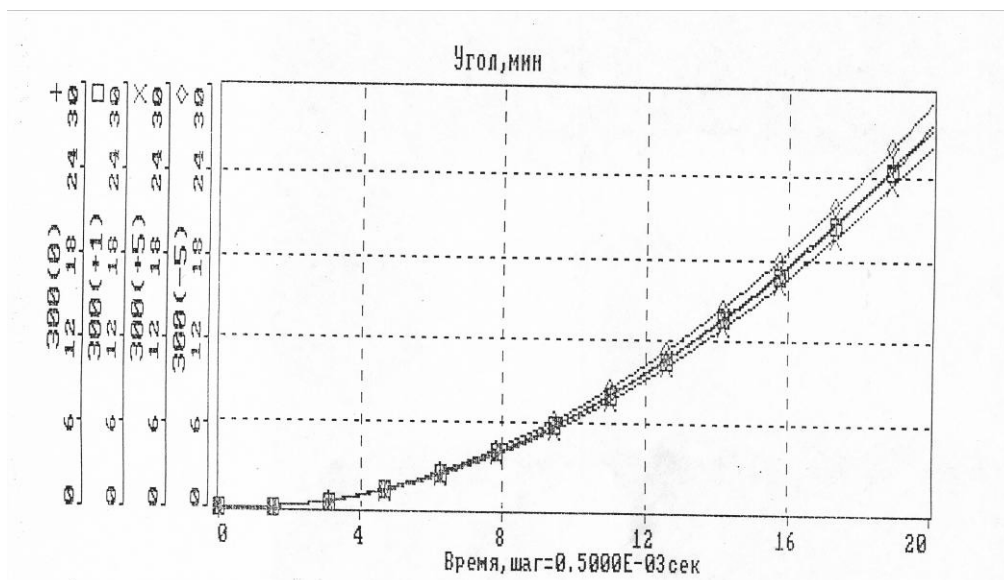


Рис. 19 . Динамика отклонения центра тяжести вторичного зеркала

Общий вид узла вторичного зеркала показан на рис. 20.

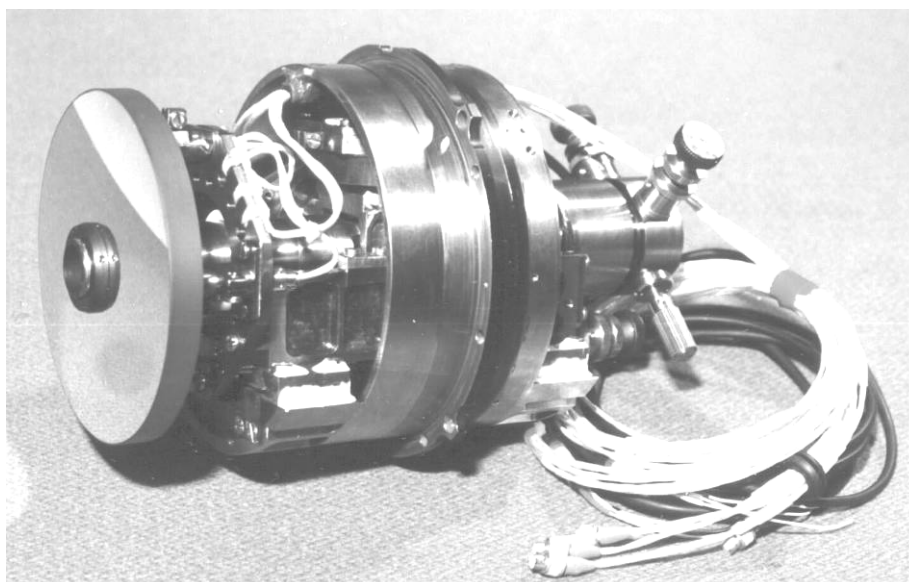


Рис. 20. Узел вторичного зеркала в сборе

Аналогичные модельные расчеты были выполнены и для других ответственных узлов телескопа ТС-400 – узла крепления главного и диагонального зеркал. С целью снижения массы главного зеркала была произведена оптимизация формы его задней поверхности при допустимых температурных и гравитационных искажениях заданной формы рабочей поверхности. В качестве материала главного зеркала был использован оптический ситалл с коэффициентом линейного расширения $\alpha = + 1.5 \cdot 10^{-7}$. Результаты численных расчетов позволили сделать ряд выводов:

- максимальная разница осевых перемещений точек рабочей поверхности главного зеркала при равномерном температурном нагреве - 5°C (как наиболее опасном), возникающая за счет формы, составляет не более 0.03 мкм ;
- принятая форма задней поверхности главного зеркала, с учетом весовых ограничений всей конструкции, близка к оптимальной;

- крепление рабочих зеркал в конструкции необходимо осуществлять, максимально снижая силы трения между поверхностями зеркал и фиксаторами (установка нулевого зазора).

Полученные результаты были учтены при разработке конструкции узла и определении ряда характерных особенностей. Крепление зеркала осуществляется с минимальным расчетным температурным зазором на инваровую оправу. Осевое температурное рассогласование реализуется компенсатором, изготовленным из алюминиевого сплава. Крепление оправы к фланцу (материал – титановый сплав) выполнено по схеме радиально-лучевого центрирования, что позволяет сохранить центрировку оптических элементов при любых тепловых деформациях системы оправы – фланец. В качестве центрирующих элементов применены шпонки из сплава 34НКД. От поворота главное зеркало на оправе предохраняют пробки из клея УТ34. Расчетом также определялся уровень перемещений точек рабочей поверхности главного зеркала под действием силы тяжести. Исходные условия при выборе математической модели были аналогичны вышеизложенным. Использовалась конечномерная модель, приведенная на рис. 21. Максимальная разница осевых перемещений точек рабочей поверхности под действием силы тяжести составила менее 0.042 мкм.

Для узла диагонального зеркала был выполнен аналогичный расчет полей термодеформаций и определено изменение его формы под действием собственного веса. Результаты моделирования показали, что максимальная разница осевых перемещений точек рабочей поверхности (в глобальной системе координат, связанной с корпусом телескопа) при равномерном температурном поле – 5°C, составляет не более 0.133 мкм. При этом рабочая поверхность зеркала перемещается параллельно самой себе. Максимальная разница осевых перемещений точек рабочей поверхности под действием силы тяжести составила порядка 0.001 мкм.

Для определения собственных частот и форм колебаний узла фиксации главного и диагонального зеркал была разработана математическая модель.

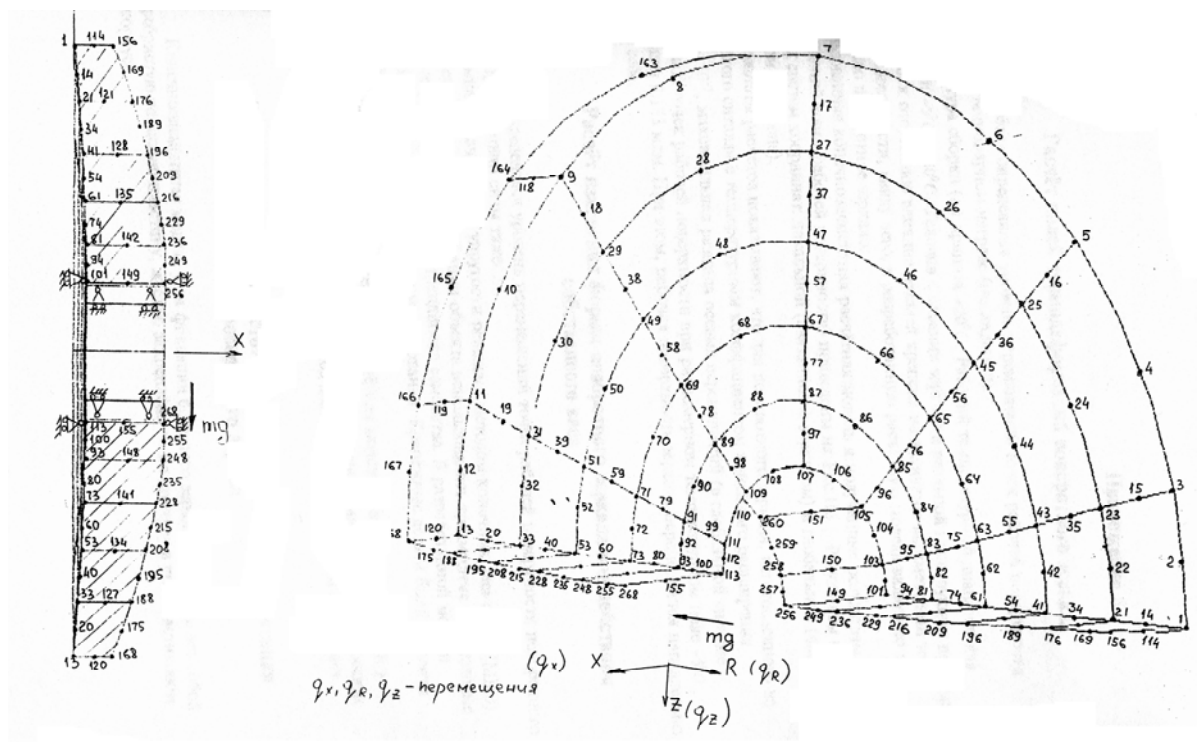


Рис. 21 Расчетная модель главного зеркала ТС-400

Конечноэлементная модель узла фиксации главного зеркала представляет собой ребристую торцевую пластину, жестко закрепленную по контуру в углепластиковом корпусе. Само зеркало представлено в виде сосредоточенной массы 13.7 Кг с моментами инерции массы $I_x = 3564.74 \text{ Кгсм}^2$ и $I_y = 1805.5 \text{ Кгсм}^2$. Модель содержит 147 конечных элементов и имеет 366 степеней свободы. Крепление диагонального зеркала осуществляется через трубу, оканчивающуюся фланцем. Были рассмотрены два варианта: первый – без ребер жесткости, второй – с дополнительными восемью ребрами жесткости на торце, прижатом винтами к несущей пластине. Первые пять собственных (резонансных) частот конструкции в первом случае равны (в Гц): 61.65, 73.63, 181.8, 213.8, 234.4. Введение ребер жесткости позволило поднять первые две резонансные частоты, соответствующие колебаниям диагонального зеркала в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, до 100 Гц и 120 Гц соответственно. Формы колебаний для указанных частот показаны на рис. 22. Согласно техническому заданию, опасными для конструкции являются низкие частоты вибраций, сосредоточенные в области 50 Гц. Поэтому было принято решение использовать второй вариант крепления диагонального зеркала с дополнительными ребрами жесткости.

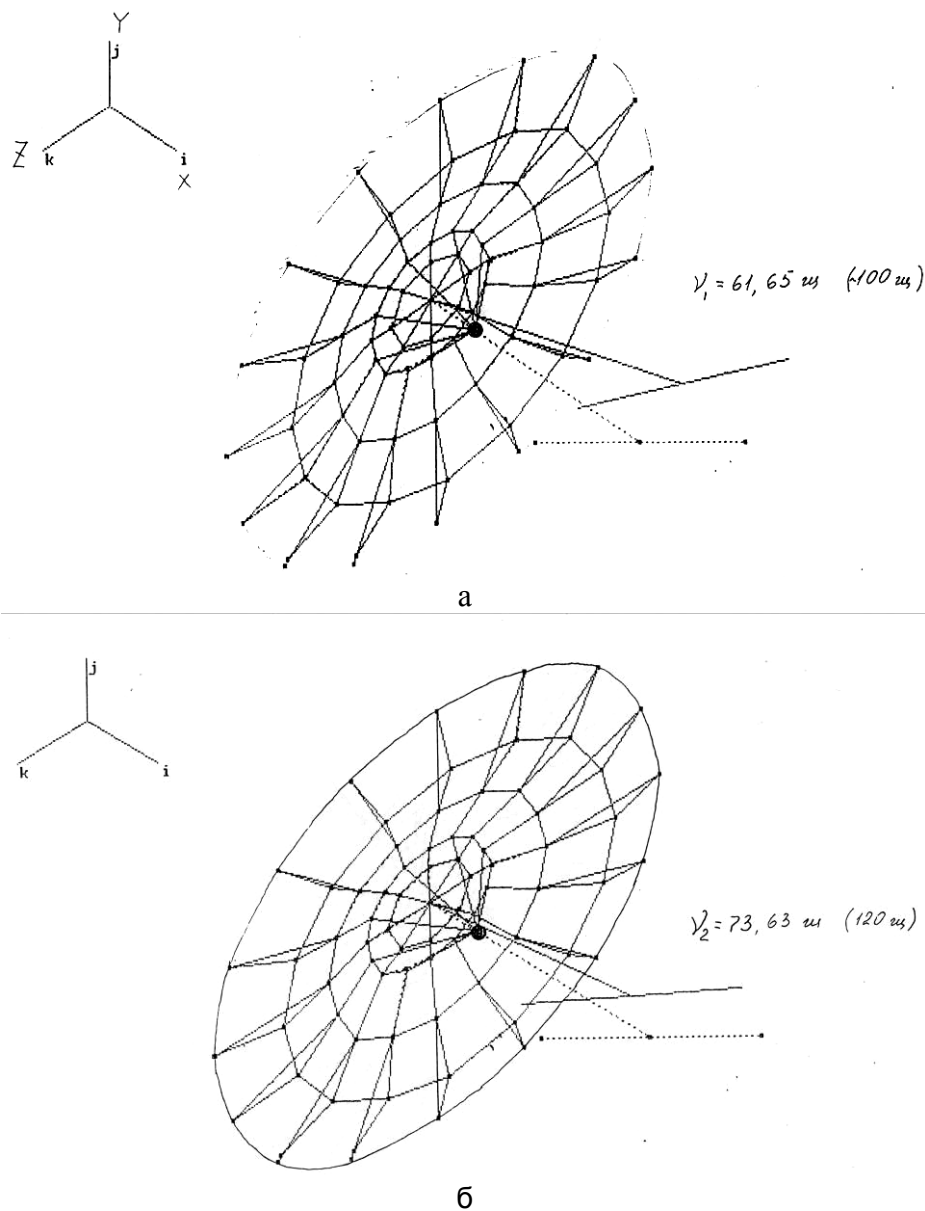


Рис. 22 Низшие моды колебаний узла главного зеркала ТС-400

Узел пилонов предназначен для крепления узла сканирующего зеркала в корпусе телескопа. В качестве основного конструкционного материала был использован титановый сплав. Форма пилонов оптимизирована с целью снижения массы и сохранения жесткости, а также с целью сохранения размеров между оптическими элементами. Крепление к корпусу осуществляется через кронштейн с установленными промежуточными шайбами и эксцентриком, позволяющим обеспечить предварительную установку пилонов в корпус телескопа.

Конструкция линзового компенсатора позволяет осуществить наклон и перемещение средней линзы в оправе посредством юстировочных винтов через коническое кольцо. Кроме того, корпус, в котором смонтированы линзы компенсатора, может быть сцентрирован относительно оптической оси посредством вспомогательных винтов и пришабриванием промежуточного кольца. В качестве основного конструкционного материала оправ линз корпуса, промежуточных колец, установочных фланцев использовался титановый сплав.

В заключение необходимо отметить, что большой объем проведенных модельных расчетов на этапе разработки конструкции отнюдь не увеличил общего срока создания прибора, но, наоборот, повысил достоверность принимаемых решений и позволил изготовить телескоп и провести его тестовые испытания в течение 10 месяцев после начала расчета оптической схемы.

Литература

1. Гримм В.А., Дубковский С.А., Лосев К.Д., Смирнов С.А.. Телескопы сканирующего типа. // «Прикладная оптика-96». Тезисы докладов конференции. СПб, 1996.

**ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ПО МОНИТОРИНГУ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ
РАЗВИТИЯ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННО-
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ****А.Г. Абрамов, В.Н. Васильев, А.О. Сергеев, А.В. Сигалов, А.К. Скуратов**

В статье приведены результаты первых двух этапов НИР «Научно-методическое обеспечение создания национального информационно-аналитического центра по мониторингу приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в области информационно-телекоммуникационных систем», выполняемой в рамках Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002–2006 годы. Рассматриваются задачи Центра, направления работы, информационная поддержка деятельности на сайте Центра, первые результаты работ по подготовке аналитических материалов и информационному наполнению баз данных.

Введение

В рамках реализации Федеральной целевой научно-технической программы (ФЦНТП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002–2006 годы (www.fcntp.ru) по направлению «Развитие инновационной инфраструктуры» с середины 2005 года выполняется десять проектов по созданию и организации деятельности Национальных информационно-аналитических центров (НИАЦ) по мониторингу приоритетных направлений развития науки, технологий и техники. Заказчик – Федеральное агентство по науке и инновациям (Роснаука, www.fasi.gov.ru).

Тематика работы шести центров соответствует шести приоритетным направлениям, определенным в ФЦНТП: безопасность жизнедеятельности; живые системы; индустрия наносистем и материалов; информационно-телекоммуникационные системы; экология и рациональное природопользование; энергетика и энергосбережение. Деятельность трех центров связана с поддержкой развития инновационной инфраструктуры научно-технической деятельности (подготовка кадров для научно-инновационной деятельности и обеспечение их мобильности; поддержка объектов инфраструктуры по вопросам передачи результатов интеллектуальной деятельности; развитие приборной базы для научных исследований, включая центры коллективного пользования и уникальные стенды и установки). Национальный информационно-аналитический центр по мониторингу инновационной инфраструктуры научно-технической деятельности и региональных инновационных систем (НИАЦ МИИРИС, www.miiiris.ru) является системообразующим элементом инфраструктуры национальной инновационной системы, тесно взаимодействующим с другими национальными информационно-аналитическими центрами, создаваемыми в рамках ФЦНТП.

Исполнителем проекта «Научно-методическое обеспечение создания национального информационно-аналитического центра по мониторингу приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в области информационно-телекоммуникационных систем» (шифр 2005-РИ-37.0/002) является Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО, www.ifmo.ru), соисполнителем – Федеральное государственное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт информаци-

ных технологий и телекоммуникаций» (ФГУ ГНИИ ИТТ «Информика», www.informika.ru).

Ниже рассматриваются результаты работ по разработке концепции деятельности Национального информационно-аналитического центра по мониторингу приоритетных направлений развития в области информационно-телекоммуникационных систем (НИАЦ ИТС), формированию его инфраструктуры, созданию сайта НИАЦ (<http://its.runnet.ru>), информационному наполнению баз данных, организации деятельности по сбору информации и подготовке аналитических материалов.

Задачи и направления деятельности НИАЦ

Национальный информационно-аналитический центр в области информационно-телекоммуникационных систем (ИТС) создается для организации и выполнения работ по мониторингу приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в области ИТС, решению задач повышения эффективности работы всех субъектов сферы информационно-коммуникационных технологий, проведению мониторинга мирового и российского потенциала в области ИТС, анализа и подготовки прогнозных оценок развития ИТС, а также для оказания информационных, консультативных и аналитических услуг по профилю центра.

Деятельность НИАЦ ведется по следующим тематическим направлениям.

1. Математическое и алгоритмическое обеспечение информационно-телекоммуникационных систем.
2. Программное обеспечение информационно-телекоммуникационных систем: технологии разработки программного обеспечения, операционные системы, системное программное обеспечение, прикладные программные продукты, языки и инструментальные средства программирования, аутсорсинг.
3. Аппаратное обеспечение информационно-телекоммуникационных систем: архитектура, элементная база, микропроцессорные устройства, персональные компьютеры, рабочие станции, серверы, телекоммуникационное оборудование, периферийное оборудование, распределенные вычислительные устройства и многопроцессорные комплексы.
4. Технологии и методы передачи и обработки информации в информационно-телекоммуникационных системах: спутниковая связь, цифровая связь на волоконно-оптических линиях, Wi-Fi, Wi-MAX, сотовая связь, связь с подвижными объектами и т.д.
5. Информационные системы хранения и обработки информации на базе информационно-телекоммуникационных систем: дата-центры, хранилища данных, банки и базы данных, распределенные базы данных, экспертные системы, технологии и инструментальные средства их создания.
6. Технологии функционирования информационно-телекоммуникационных систем: высокопроизводительные вычисления и специализированные комплексы, распределенные вычисления, GRID-технологии, технологии функционирования комплексных и специальных систем и т.п.
7. Стандартизация и сертификация информационно-телекоммуникационных систем, нормативно-правовое регулирование в области информационно-телекоммуникационных систем.
8. Безопасность и защита информационно-телекоммуникационных систем: программные и аппаратные средства защиты, устойчивость функционирования информационно-телекоммуникационных систем при внешних дестабилизирующих факторах.

9. Подготовка и повышение квалификации кадров в области информационно-телекоммуникационных систем, образовательные стандарты, учебно-методические комплексы, обучающие системы и дистанционное обучение на базе информационно-телекоммуникационных систем.
10. Промышленные информационно-телекоммуникационные системы: ИПИ (CALS)-технологии, CAD/CAM/CAE/ERP-системы, компьютерные системы менеджмента качества, автоматизированные рабочие места.
11. Информационно-телекоммуникационные системы для обеспечения государственно-административной деятельности.
12. Проектирование и сопровождение информационно-телекоммуникационных систем: проектная деятельность, установка, обслуживание, взаимодействие с потребителем, электронные публикации, рекламная деятельность и маркетинг.
13. Общие и межотраслевые проблемы информационно-телекоммуникационных систем.

Информационно-аналитическая работа центра организуется на основе как традиционных, так и Интернет-технологий и включает следующие виды деятельности:

- обработка, систематизация, хранение и распространение информационно-аналитических материалов, получаемых в профильных подразделениях Федерального агентства по науке и инновациям;
- обработка, систематизация и реферирование материалов ФЦНТП в области информационно-коммуникационных технологий;
- анализ направлений деятельности российских организаций научного, научно-образовательного и научно-производственного профиля, работающих в области приоритетных информационных технологий, и ведение соответствующей справочной базы данных с открытым доступом через сайт центра;
- анкетирование, рассылка запросов и распространение информации в научно-образовательной среде традиционным и электронным способом;
- анализ научно-образовательных отечественных и зарубежных публикаций; подготовка обзоров публикаций и их размещение на сайте центра;
- исследование Интернет-пространства в соответствии с функционалом центра; ведение аннотированного каталога Интернет-ресурсов по тематике деятельности центра;
- мониторинг мероприятий (конференции, научные семинары, выставки и пр.) по тематике деятельности центра и ведение на сайте базы данных «Календарь событий».

НИАЦ функционирует как распределенная система и формируется на следующих принципах. Центральная часть отвечает за организацию и проведение информационно-аналитических исследований и мониторинг. Формируется на базе исполнителя и соисполнителя проекта: в Санкт-Петербурге на базе ГОУ ВПО «СПбГУ ИТМО», в Москве на базе ФГУ ГНИИ ИТТ «Информика». Корреспондентская часть отвечает за сбор и распространение результатов деятельности центра. Формируется на базе региональных структур Минобрнауки России и Роснауки, расположенных в регионах России. Телекоммуникационная часть центра отвечает за оперативную организацию обмена информацией между центральной и корреспондентскими частями, обеспечение доступа к информационным ресурсам. Формируется на базе российской научно-образовательной сети RUNNet

Этапы и содержание работ

Проект реализуется в 2005–2006 гг. и включает четыре этапа. Основным содержанием первого этапа (июль–сентябрь 2005 г.) была разработка концепции деятельности центра, подготовка нормативных, организационных и методических документов, необходимых для формирования и обеспечения функционирования НИАЦ. На данном

этапе проведен анализ организации и функционирования национальных информационно-аналитических центров в России и за рубежом, а также анализ российских и зарубежных Интернет-ресурсов, специализированных печатных и электронных изданий и других информационных источников, которые могут быть использованы в деятельности НИАЦ. Сформулированы основные положения политики информационной деятельности НИАЦ, отработаны нормативные документы, регламентирующие деятельность НИАЦ, включая Положение о центре и его структуру. Разработаны предложения по регламенту мониторинга элементов инновационной инфраструктуры и региональных инновационных систем.

Второй этап (октябрь–декабрь 2005 г.) включал создание и запуск в опытную эксплуатацию сайта, обеспечивающего комплексную информационную поддержку функционирования НИАЦ, отработку механизмов информационного наполнения сайта и обслуживания запросов. Разработаны структура Интернет-сайта НИАЦ, требования к функциональности отдельных модулей и спецификации на различные типы данных. Создано прикладное программное обеспечение, реализующее работу всех подсистем (модулей) сайта: Новости, Календарь событий, Электронная библиотека, Интернет-навигатор, Организации, Персоналии, Управление правами пользователей. Сайт НИАЦ, доступный по адресу <http://its.runnet.ru>, размещен в дата-центре ГНИИ ИТТ «Информика» и запущен в эксплуатацию. Начаты работы по информационному наполнению сайта и доступных на нем баз данных. Проведен сбор и анализ информации о российских научно-исследовательских, научно-производственных и научно-образовательных организациях, ведущих исследования и разработки в области ИТС.

Дальнейшее развитие проекта в 2006 г. (третий и четвертый этапы) предусматривает выполнение следующих видов работ:

- разработку концепции мониторинга состояния исследований и разработок в России и за рубежом для аналитических и прогнозных оценок;
- обеспечение деятельности Роснауки по мониторингу приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в области ИТС, подготовку информационно-аналитических материалов;
- ведение доступных через сайт справочных баз данных по научным организациям, персоналиям, научно-исследовательским работам и инновационным проектам;
- ведение на сайте новостного раздела и раздела с информацией о конференциях, семинарах, выставках (календарь конференций);
- ведение на сайте электронной библиотеки, включающей полнотекстовые публикации по тематике НИАЦ (обзоры, аналитические материалы, проблемные статьи, сборники докладов конференций, сборники научных трудов и другие научные материалы по приоритетным направлениям), рефераты НИР, аннотации электронных публикаций, доступных на других сайтах;
- реализацию интерактивного обмена информацией между разработчиками, производителями и потребителями продуктов и услуг в области ИТС;
- оказание консультативных и информационных услуг по профилю центра.

Структура и функциональность сайта НИАЦ

Основная задача сайта НИАЦ (<http://its.runnet.ru>) – обеспечение комплексной информационной поддержки деятельности центра. Сайт предназначен для организации оперативного доступа к информационным ресурсам научного, научно-технического, аналитического, методического, справочного и информационного назначения, размещаемых как на нем самом, так и на других порталах и сайтах с помощью создания веб-интерфейсов, системы поиска и навигации, ведения ряда баз данных.

Разработанная информационно-функциональная структура сайта включает следующие разделы:

- Новости (официальные новости Минобрнауки, Роснауки, Мининформсвязи, анонсы конференций, семинаров и выставок, объявления о конкурсах, информация о новых технологиях, разработках, инновационных проектах и др.);
- Электронная библиотека (полнотекстовые материалы с открытым доступом, с метаописаниями и средствами поиска и навигации);
- Интернет-ресурсы (метаописания и ссылки на ресурсы по тематике проекта, размещенные в сети Интернет);
- Организации (база данных с информацией о научно-производственных и инновационно-технологических организациях по профилю НИАЦ);
- Персоналии (сведения о ведущих российских ученых и специалистах, работающих по тематике НИАЦ);
- Проекты (информация о ведущихся и выполненных НИР, ОКР, поисковых исследованиях, инновационных проектах по профилю НИАЦ);
- Календарь событий (сведения о конференциях, семинарах и других мероприятиях в области ИТС).

Раздел «Новости» предназначен для публикации новостной информации по тематике проекта. Информация собирается редакцией сайта из различных открытых источников, а также поступает от участников и партнеров проекта. Наряду с представлением текущей информации в новостных лентах, предусмотрена возможность работы с архивом всех ранее опубликованных новостей, включая контекстный поиск.

В задачи электронной библиотеки входит организация хранения и предоставление доступа посетителям к централизованно расположенным полнотекстовым материалам. Разрабатываемая библиотека сайта Центра включает электронный каталог (базу данных «электронных карточек») и полнотекстовые электронные версии публикаций, которые могут быть представлены в виде html-, pdf-, rtf-, doc-, txt-версий. Все включаемые в библиотеку материалы рубрицируются в соответствии с разработанным в рамках проекта тематическим рубрикатором по областям информационно-коммуникационных технологий. При занесении в базу данных электронные документы снабжаются оригинальной или написанной редакторами сайта аннотацией, отражающей содержание публикации. Средства поддержки электронной библиотеки предоставляют пользователям возможности доступа к материалам как с использованием тематического рубрикатора, так и с помощью поиска в электронном каталоге (по тематике, типу материалов, дате поступления, по контексту в атрибутах описания публикации).

Каталог Интернет-ресурсов предназначен для организации эффективного поиска и быстрого доступа к информационным ресурсам Интернет, относящимся к тематике проекта. Рубрицирование Интернет-ресурсов основано на том же тематическом рубрикаторе, который используется для публикаций в электронной библиотеке.

В разделе «Организации» размещаются сведения об организациях и их отдельных подразделениях, ведущих перспективные разработки в области информационно-коммуникационных технологий. При работе с базой данных «Организации» осуществляется контекстный поиск по названиям, аннотациям и описаниям в сочетании с атрибутивным поиском по типам организаций и городам.

Раздел «Персоналии» содержит сведения о ведущих ученых и специалистах, деятельность которых связана с тематикой НИАЦ. На начальном этапе наполнение данного раздела осуществляется путем внесения сведений об экспертах НИАЦ (более 300 специалистов). Базы данных «Персоналии» и «Организации» имеют перекрестные связи, т.е. возможен быстрый переход к просмотру описания организации, в которой работает специалист, или же получение списка всех сотрудников организации, включенных в базу персоналий.

Задача базы данных «Проекты» – аккумуляция информации о ведущихся и выполненных работах, связанных с перспективными информационно-коммуникационными технологиями. Описание проекта включает наименование, исполнителя, заказчика, аннотацию, адрес веб-сайта проекта, регион, статус проекта (завершен, реализуется, находится в стадии подготовки).

В разделе «Календарь событий» собирается информация о проводимых в нашей стране и за рубежом значимых конференциях, семинарах, выставках и других мероприятиях в области информационно-коммуникационных технологий. Набор атрибутов, описывающих конкретное мероприятие, включает название, краткий анонс, подробное описание, даты начала и окончания, страну/город. Реализована возможность поиска в базе данных, включающей как предстоящие мероприятия, так и архив прошедших мероприятий.

К работе по информационному наполнению сайта НИАЦ привлечен достаточно большой коллектив, члены которого выполняют различные задачи по внесению и обработке информации, имеют различные права и несут разную ответственность. В связи с этим работа по внесению контента, его редактированию и управлению публикацией на сайте организована через административные веб-интерфейсы, в которых разные пользователи и группы пользователей, участвующие в работе над проектом, имеют различные права, зависящие от их роли в коллективе исполнителей. Регистрация пользователей, назначение им различных ролей и прав доступа осуществляется в подсистеме «Пользователи сайта».

Разработка и функционирование сайта НИАЦ основаны на использовании следующего свободно распространяемого программного обеспечения: традиционный для ОС UNIX Web-сервер Apache, СУБД PostgreSQL, язык препроцессинга гипертекста PHP. Все функциональные модули реализованы в едином стиле и работают в контексте окружения, которое создает специальный модуль Framework («движок»). Каждый модуль может предоставлять другим модулям сервис портлетов через специальные библиотечные функции, возвращающие html-текст с данными контекста сайта, за поддержание которых отвечает модуль. Таким образом, модуль является законченной программной единицей, слабо связанной с другими модулями и выполняющий задачу по предоставлению пользователю необходимого сервиса. Такой подход позволяет команде программистов разрабатывать модули независимо друг от друга и легко «сшивать» их вместе, развивая функциональность сайта путем создания новых модулей.

Организация работ и результаты

В декабре 2005 г. Национальный информационно-аналитический центр в области информационно-телекоммуникационных систем получил статус структурного подразделения в составе СПбГУ ИТМО. Приказом ректора утверждено Положение о НИАЦ, назначен директор центра.

С целью организации подготовки информационно-аналитических материалов, а также оказания консультативных и информационных услуг по профилю центра была проведена работа по формированию групп экспертов по всем тематическим направлениям деятельности НИАЦ. На основе полученных из открытых источников сведений об адресах электронной почты ведущих российских специалистов в области ИТС была организована почтовая рассылка (более 1000 адресатов) с информацией о планируемой деятельности НИАЦ и предложением принять участие в работе центра в качестве эксперта. Согласие дали более 300 специалистов, включая ведущих ученых академических и отраслевых научно-исследовательских институтов, деканов факультетов, заведующих кафедрами, профессоров и доцентов кафедр вузов, известных своими достижениями в

области ИТС. Сведения об экспертах (контактная информация, краткий CV, направления научной деятельности, основные публикации) внесены в базу «Персоналии».

С конца 2005 года налажена регулярная информационная поддержка разделов «Новости» и «Календарь событий» сайта НИАЦ. Для формирования содержания новостного раздела и календаря событий ведется мониторинг нескольких сотен информационных источников, в числе которых сайты информационных агентств, редакций ИТ-изданий, информационные порталы по тематике ИТС, сайты ведущих зарубежных и российских ИТ-компаний, сайты научно-исследовательских организаций, вузов, федеральных органов управления, сайты крупных проектов в области ИКТ.

Ведется работа по формированию базы данных с информацией о научно-производственных и инновационно-технологических организациях по профилю НИАЦ. При сборе информации рассматриваются следующие категории организаций и их структурных подразделений:

- научно-исследовательские организации (институты и центры Минобразования, институты РАН и РАО) по профилю НИАЦ;
- научно-производственные и научно-технические организации и центры;
- высшие учебные заведения и их научные и учебные подразделения (в первую очередь рассматриваются классические и технические вузы, в которых осуществляется научная деятельность и подготовка по направлениям и специальностям, связанным с ИКТ);
- некоммерческие организации, занимающиеся поддержкой развития информационных технологий и телекоммуникаций;
- коммерческие ИТ-компании, ведущие научно-технологические разработки и занимающиеся реализацией инновационных проектов;
- издательства и редакции изданий, специализирующиеся в области ИКТ.

На момент подготовки статьи база данных «Организации» включала более 400 записей с адресной информацией и аннотациями деятельности организаций и их подразделений.

С целью организации работы по подготовке обзорно-аналитических материалов, а также формирования электронной библиотеки и базы данных «Проекты» на сайте НИАЦ, с использованием адресной информации баз данных «Организации» и «Персоналии» проведена электронная почтовая рассылка с просьбой дать предложения по возможным формам участия организаций и отдельных специалистов в информационно-аналитической работе центра (подготовка обзоров, передача материалов для электронной библиотеки, предоставление сведений о научно-технических разработках и инновационных проектах).

Важной компонентой текущей деятельности НИАЦ является информационное обслуживание Заказчика в части обработки запросов, подготовки справочных и информационно-аналитических материалов, составления экспертных заключений по заданиям профильных подразделений Роснауки.

По итогам 2006 года будет выполнен анализ опыта работы НИАЦ и разработаны рекомендации по его дальнейшей деятельности, включая реализацию принципов самофинансирования.

УЧИМСЯ СТРОИТЬ МОДЕЛЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАЗОВАНИЯ

Л.С. Лисицына

В статье изложена методология определения идентификаторов результатов образования на основе детализации компетенций и расслоения их сопоставимых состояний по уровням и профилям образования. Изложены результаты разработки и исследования гиперграфовой модели результатов образования – *план-графа*. Предложен метод автоматизации построения и модификации план-графа. Показана связь результатов и содержания образования.

Введение

Компетентностный подход к образованию связан, в первую очередь, со сменой ориентации образовательного процесса с преподавателя на обучаемого [1]. Это означает, что теперь надо ориентироваться на достижения обучаемых, а не намерения их преподавателей; на результаты образования, а не на проектирование и разработку содержания образования. Результат образования, являющийся основным понятием Болонских реформ, определяется ожиданием того, что будет знать, уметь делать и кем научится быть студент после обучения. Это обстоятельство принципиальным образом меняет наше представление об образовательном пространстве, формируемом системой образования для подготовки специалистов. Нам необходимо отойти от стереотипов описания модели специалиста дисциплинами на языке ЗУНов (ЗУН – сокращение от «знания-умения-навыки») и научиться описывать ее на языке результатов образования. Замечу, что результаты образования является отображением образовательных возможностей преподавателей и должны стать понятными всем участникам общеевропейской переводной и накопительной кредитной системы ECTS.

Как определять компетенции образовательного пространства?

В рамках «студентоцентрированной парадигмы» Болонских реформ по созданию «систем сравнительных и сопоставимых квалификаций высшего образования, в которых квалификации описывались бы в терминах учебной нагрузки, уровня, результатов обучения, компетенций и профиля» [1], образовательное пространство как совокупность теоретических знаний и практических умений должно быть структурировано с точки зрения результатов образования, необходимых и достаточных для успешной профессиональной деятельности выпускников. При этом знания и умения группируются в пространстве принципиально по-новому – в соответствии с компетенциями специалистов. Определим вначале два созвучных, но семантически различных понятия – компетенция и компетентность.

Компетенция – характеристика, идентифицирующая некоторый результат образования с опорой на определенную часть (фрагмент) образовательного пространства, в которой некоторое компетентное лицо (эксперт, преподаватель, экзаменатор и т.п.) имеет теоретические знания и практический опыт их применения. Целью компетентного подхода в образовании является освоение студентами в рамках целостного образовательного процесса только тех компетенций, которые необходимы и достаточны для получения ожидаемого результата образования.

Пример №1. Компетенции, после освоения которых обучаемый должен:

1. знать основы информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) и владеть приемами их использования в педагогической деятельности;
2. моделировать и эффективно решать практические задачи на основе теории графов;
3. переводить числа из одной системы счисления в другую.

Компетенции имеют иерархию: одна компетенция может складываться из нескольких компетенций следующего уровня, детализирующих ожидаемый результат образования.

Пример № 2. Детализация 1-ой компетенции примера № 1:

- 1.1. владеть приемами работы на персональном компьютере (ПК);
- 1.2. владеть приемами работы с периферийным оборудованием ПК;
- 1.3. владеть приемами редактирования и создания графических изображений;
- 1.4. владеть приемами электронного документооборота;
- 1.5. владеть приемами работы с базами данных;
- 1.6. знать основы компьютерных сетей и их подключения к Интернету;
- 1.7. владеть приемами сетевого документооборота;
- 1.8. владеть приемами сетевого общения;
- 1.9. знать основы построения образовательных информационных систем;
- 1.10. знать основы построения образовательных интернет-порталов.

Приведенные в примере № 2 компетенции конкретизируют освоение знаний и приемов использования ИКТ по 10-ти различным направлениям (направления взяты из методического Интернет-центра [2] для компетентностного повышения квалификации работников образования в области ИКТ). В свою очередь, и эти компетенции могут также детализоваться компетенциями следующего уровня.

Пример № 3. Детализация компетенции 1.4 примера № 2:

- 1.4.1. приемы подготовки электронного документа средствами текстового редактора;
- 1.4.2. приемы подготовки электронного документа средствами табличного процессора;
- 1.4.3. приемы подготовки электронных презентаций.

Компетенции в примере № 3 соответствуют детализации освоения приемов электронного документооборота (компетенция 1.4) в зависимости от формы электронного документа (текстовый документ, электронная таблица, презентация).

Процесс детализации компетенций продолжается до тех пор, пока не будут получены элементарные компетенции. Компетенция, при дальнейшей детализации которой теряется смысл получаемого результата образования, называется *элементарной*. К элементарным можно отнести компетенции 1.1-1.3, 1.5, 1.6, 1.9, 1.10 (см. пример № 2), компетенции 1.4.1, 1.4.2, 1.4.3 (см. пример № 3), а также 3-тью компетенцию (см. пример № 1).

У каждой элементарной компетенции может существовать одно или несколько сопоставимых *состояний компетентности*, отличающихся перечнем того, что при этом «должен знать...», «должен уметь делать...» или «кем должен научиться быть...» компетентный человек. Дозирование знаний и умений внутри одной элементарной компетенции позволяет достичь при синтезе такого результата образования, в котором нет ничего «лишнего» (принцип минимальности затрат на подготовку компетентного специалиста). Для каждого уровня и профиля образования в образовательном пространстве могут существовать свои элементарные компетенции и (или) свои варианты состояний компетентности. Фактически при этом в образовательном пространстве происходит дальнейшее расслоение результатов образования по уровням и профилям образования вплоть до получения *элементарных результатов образования*. Поэтому идентификаторами результатов образования являются компетенции и их сопоставимые состояния компетентности, уровни и профили образования.

Компетентность – характеристика обучаемого, совпадающая с идентификаторами освоенных им состояний компетентности для данного уровня и профиля образования. Компетентность устанавливается на основе проверок соответствующих теоретических знаний и практических умений – компетентностных аттестаций. Требования к

знаниям и умениям трех сопоставимых состояний компетентности в методическом интернет-центра [2] приведены на рис. 1.

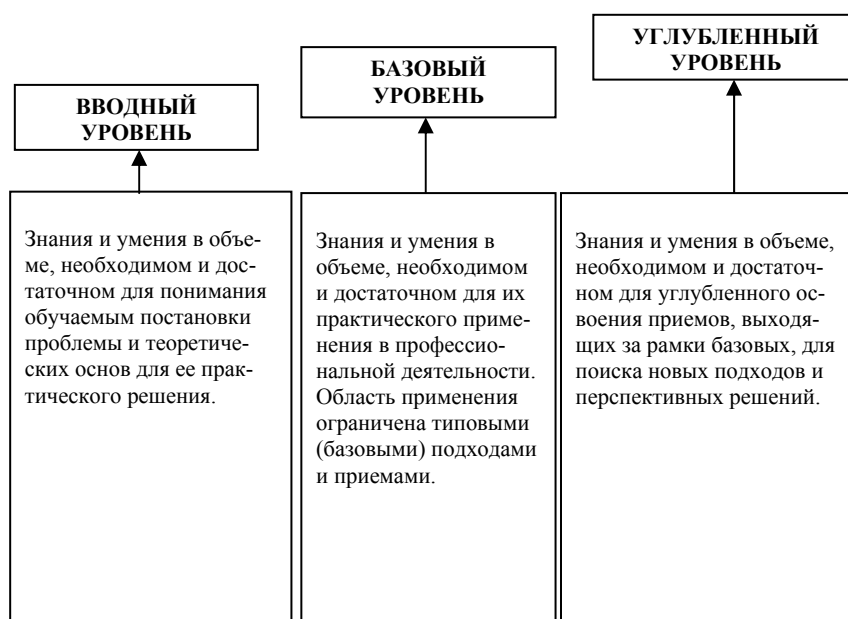


Рис. 1. Требования к знаниям и умениям состояний компетентности в [2]

Пример № 4. Расслоение компетенции 1.5 примера № 2 по двум профилям в методическом интернет-центре:

- преподаватель-предметник - 1.5-1,
- преподаватель-информатик - 1.5-2.

Требования к знаниям и умениям преподавателя-предметника [2, с. 47] для трех состояний компетенции 1.5 приведены на рис. 2: 1.5-1.1 – вводный, 1.5-1.2 – базовый, 1.5-1.3 – углубленный уровень.

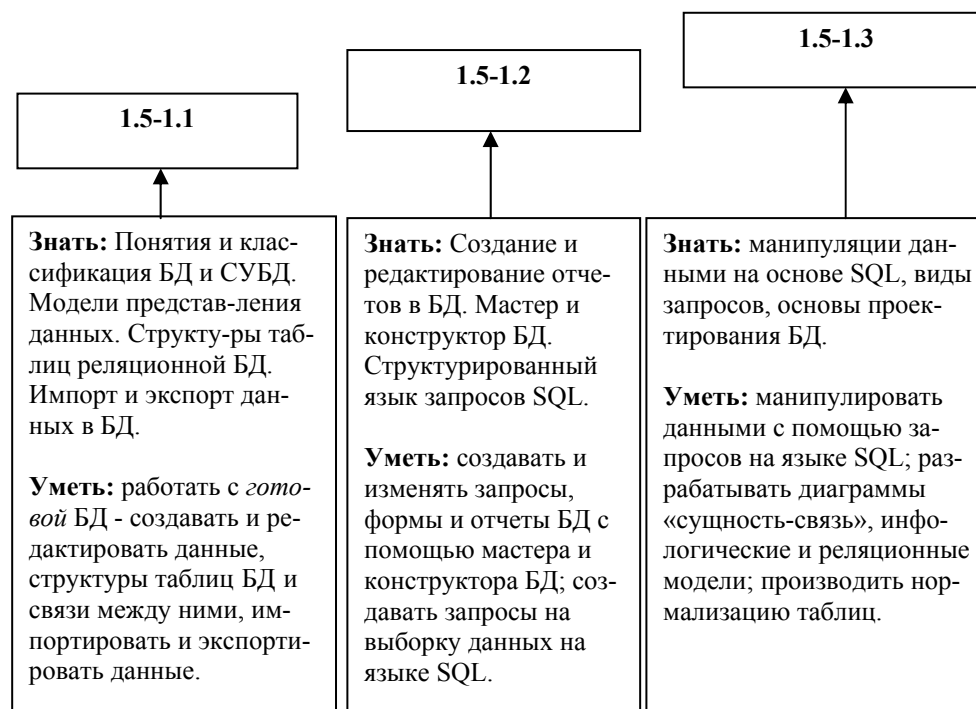


Рис. 2. Требования к знаниям и умениям профиля преподавателя-предметника

Иерархия результатов образования

Детализация компетенций до уровня элементарных с последующим расслоением их сопоставимых состояний компетентности («должен знать...», «должен уметь...», «должен научиться быть...») по уровням и профилям образования отражает иерархию элементарных результатов образования в образовательном пространстве. Детализацию компетенций необходимо производить в следующем порядке:

- *результат* образования,
- *направление* разработки результата образования (например, направления приемов в примере № 2),
- *подходы* в направлении разработки результата образования (например, приемы разработки различных форм документов в примере № 3) и т.д.

Глубина детализации определяется особенностями разрабатываемого результата образования. Дозирование знаний и умений по сопоставимым состояниям элементарных компетенций (рис. 1), а затем их расслоение по уровням и профилям образования (рис. 2) устанавливает связь между требованиями к состояниям компетентности обучаемого и элементарными результатами образования пространства.

Отношение *непосредственной вложенности* результатов образования (рис. 3) в соответствии с k_s -группами их идентификаторов дает нам модель иерархии результатов образования в виде корневого дерева $T(Y,R)$ высотой $h(T) = k_s$. Здесь множество вершин $Y = \{y_0\} \cup Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{h(T)}$, где y_0 – корень дерева, моделирующий совокупный результат образования всего образовательного пространства; $Y_1, Y_2, \dots, Y_{h(T)}$ – подмножества вершин, моделирующие результаты образования 1, 2, ..., k_s групп идентификаторов, соответственно. Примерами групп идентификаторов может быть следующий ряд: компетенции направлений разработки, компетенции подходов к разработке, уровни требований к состояниям компетентности, профили образования.

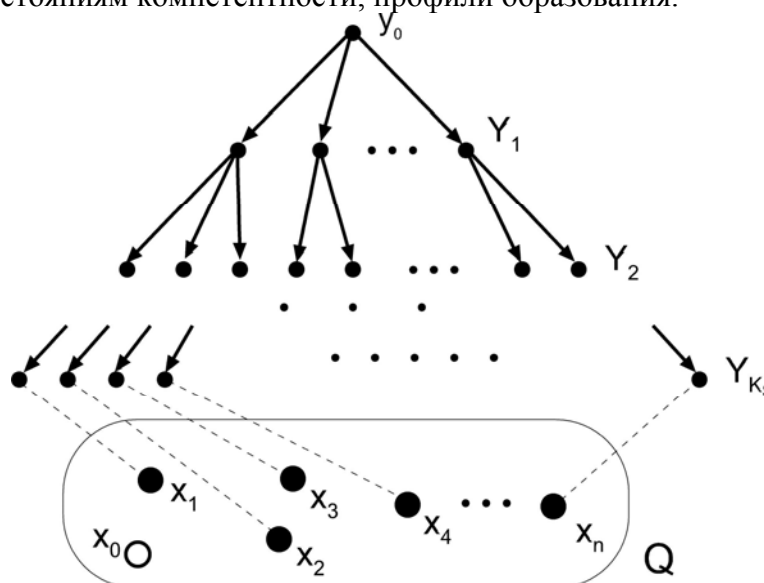


Рис. 3. Модель иерархии результатов образования

Утверждение: Путь $\mu_i = (y_0, \dots, y_i)$, идущий из корня y_0 дерева $T(Y,R)$ к его листу y_i , моделирует соответствие элементарных результатов образования y_i и их идентификаторов: компетенций, уровней требований к состояниям компетентности, уровней и профилей образования.

Пусть дерево $T(Y,R)$ содержит множество путей - $M = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$. Тогда n - количество различных элементарных результатов образования в образовательном пространстве. Отобразим множество путей M в дискретное пространство состояний ком-

петентности Q (рис. 3). Установленное таким образом отображение $\varphi: \mu_i \rightarrow x_i$ является биективным, так как каждый путь $\mu_i \in M$ идентифицирует вполне определенный результат образования и вполне определенное состояние компетентности $x_i \in X_{\text{баз}}: X_{\text{баз}} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, а каждый элементарный результат образования (состояние компетентности обучаемого) соответствует вполне определенному набору идентификаторов – последовательности вершин в пути $\mu_i \in M$. Это обстоятельство позволит легко переходить от состояний компетентности пространства Q к идентификаторам результатов образования в дереве $T(Y,R)$ и наоборот.

Модель результатов образования и его свойства

Пусть x_0 – состояние компетентности, суммирующее все знания и умения, необходимые разработки результата образования в данном образовательном пространстве (рис. 3). Установим следующее N -арное отношение порядка на множестве $X = X_{\text{баз}} \cup \{x_0\}$ в пространстве Q : «в процессе обучения знаниям и умениям состояния компетентности x_r непосредственно предшествует непустой ряд знаний и умений состояний компетентности x_s, x_v, \dots ». В результате будет построена модель результатов образования образовательного пространства или **план-граф, устанавливающий причинно-следственные связи между состояниями компетентности образовательного пространства.**

План-граф представляет собой гиперграф $H(X, P)$, состоящий из множества вершин X и множества ориентированных гиперребер P , причем, $P \neq \emptyset$. Рассмотрим наиболее важные свойства план-графа.

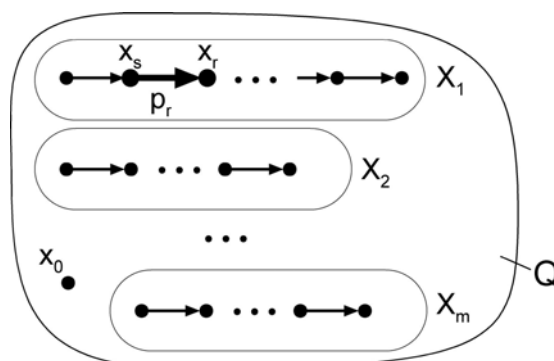


Рис. 4. Упорядоченность вершин в $X_{\text{баз}}$

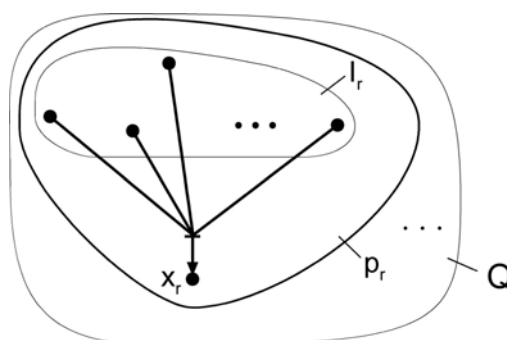


Рис. 5. Сток и истоки гиперребра p_r

1. **Упорядоченность вершин** (рис. 4). Множество вершин $X_{\text{баз}} = X_1 \cup \dots \cup X_i \cup \dots \cup X_m$ состоит из упорядоченных подмножеств вершин $X_i \neq \emptyset$, моделирую-

щих состояния сопоставимых и увеличивающихся компетентностей, m – количество элементарных компетенций в образовательном пространстве.

2. **Единственность стока гиперребра** (рис. 5). Это свойство является следствием уникальности знаний и умений элементарных фрагментов образовательного пространства. Ориентированное гиперребро $p_r = (I_r; x_r) \in P$ имеют:

- единственную вершину стока – x_r ,
- подмножество вершин истока – $I_r \neq \emptyset, I_r \subset X \setminus \{x_r\}$.

3. **Свойства отношений порядка.** Отношение порядка в план-графе $H(X,P)$ определяет наличие в множестве гиперребер P :

- дуг (рис. 4), у которых исток $I_r = \{x_s\}$ и сток x_r принадлежат одному и тому же упорядоченному подмножеству вершин $X_i = \{\dots, x_s, x_r, \dots\}$, (бинарное отношение линейного порядка);
- мультидуг (рис. 6), у которых исток $I_r = \{x_s\}$, $x_s \in X_i$ и сток $x_r \in X_j$ лежат в разных подмножествах вершин $X_i, X_j \subset X_{\text{баз}}$, причем исток x_s указывает на состояние минимальной компетентности в X_i (не ниже, чем...) и распространяет это отношение на вершины x_{s+1}, x_{s+2}, \dots данного подмножества X_i (бинарное отношение нелинейного порядка);
- ориентированных мультигиперребер (рис. 7), у которых исток $I_r = \{x_s, x_v, \dots\}$ имеет две и более вершин, причем каждая вершина истока указывает на состояние минимальной компетентности (не ниже, чем...) соответствующего упорядоченного подмножества и распространяет это отношение на вершины x_{s+1}, x_{s+2}, \dots (от вершины x_s), x_{v+1}, x_{v+2}, \dots (от вершины x_v), ... (n-арное отношение нелинейного порядка).

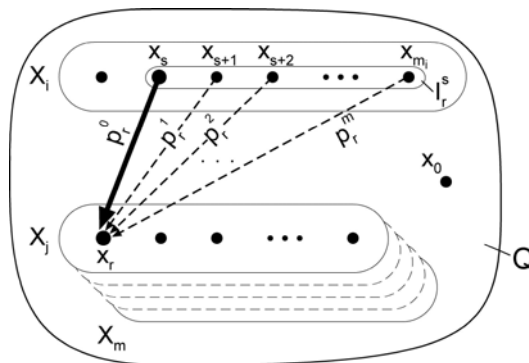


Рис. 6. Пример мультидуги

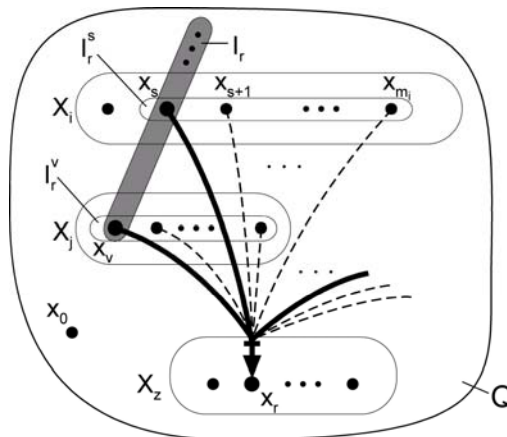


Рис. 7. Пример мультигиперребра

4. **Полустепени вершин.** Отношение порядка план-графа определяет следующие особенности множества X (рис. 8):
 - вершина $x_0 \in X$ - единственная вершина в план-графе, у которой полустепень захода $\rho^+(x_0) = 0$, у любой другой вершины $x_i \in X$ - $\rho^+(x_i) = 1$;
 - существует одна или несколько вершин $x_i \in X$, у которых полустепень исхода $\rho^-(x_i) = 0$: эти вершины соответствуют конечным состояниям компетентностей (в пределах данного образовательного пространства);
 - любая вершина $x_i \in X$, не являющаяся вершиной конечного состояния компетентности, имеет $\rho^-(x_i) \geq 1$.

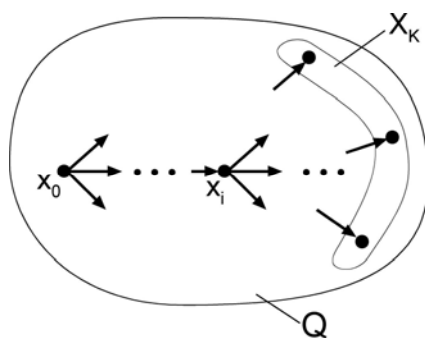


Рис. 8. Полустепени вершин план-графа

5. **Связность гиперграфа.** План-граф является связным гиперграфом, причем связность гиперграфа $H(X, P)$ – слабая, что отражает направленность процесса разработки результатов образования в образовательном пространстве.
6. **Единственность пути.** В план-графе существует один и только один путь η_i , соединяющий вершину x_0 с вершиной x_i (следствие из свойств 2 - 4):

$$\forall x_i \in X \exists ! \eta_i = (x_0, \dots, x_i)$$
7. **Порядок гиперграфа.** План-граф состоит из $(n+1)$ -вершин и n - гиперребер, где n – количество состояний компетентности образовательного пространства.
8. **Правило перехода по гиперребру.** Переход к вершине стока ориентированного гиперребра возможен только при условии достижения всех вершин его истока.

Метод для автоматизации синтеза план-графа

Синтез план-графа $H(X, P)$ для установленных $(n+1)$ -состояний компетентности образовательного пространства сводится к *построению множества истоков I_r для каждого гиперребра $r_r \in P$* следующим образом.

1. Положим вначале, что $I_r = \emptyset$ (рис. 9).
2. Тогда в множество истоков I_r гиперребра $r_r \in P$ следует включить такую вершину $x_s \in X \setminus \{x_r\}$, для которой выполняется бинарное отношение «состояние x_s предшествует состоянию x_r » и в план-графе отсутствует путь $\lambda_{sr} = (x_s, \dots, x_r)$ (рис.10).
3. После включения вершины $I_r = I_r \cup \{x_s\}$ следует распространить отношение инцидентности гиперребру r_r (свойство №1 план-графа) на все вершины подмножества $X_i = \{\dots, x_s, \dots\}$. В результате в гиперребро r_r войдет мультидуга, порожденная вершиной x_s (рис. 11).
4. Затем из истока гиперребра $r_r \in P$ следует удалить такие вершины $x_v \in I_r$, для которых путь $\lambda_{vr} = (x_v, \dots, x_s, \dots, x_r)$ проходит через x_s (свойство № 7 о единственности пути): $I_r = I_r \setminus \{x_v\}$ (рис. 12-14).

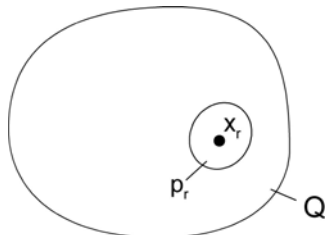


Рис. 9. Начало построения p_r

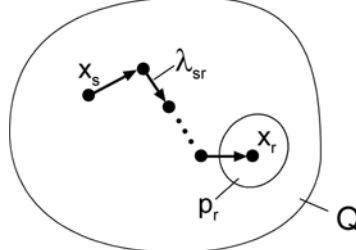


Рис. 10. Поиск пути λ_{sr}

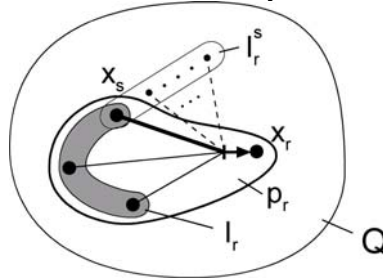


Рис. 11. Включение в p_r мультидуги от x_s

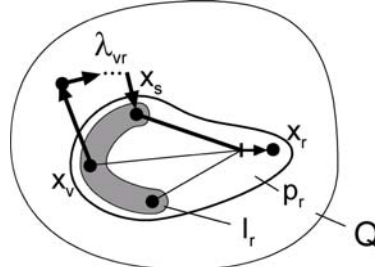


Рис. 12. Поиск пути λ_{vr}

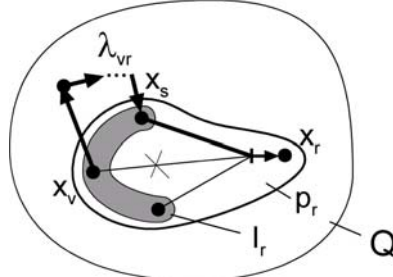


Рис. 13. Исключение из p_r мультидуги от x_v

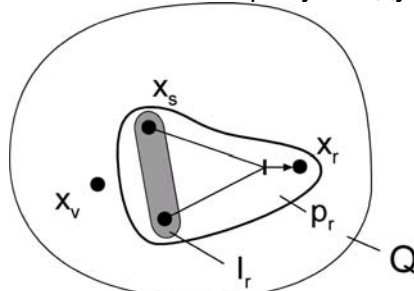


Рис. 14. Исключение из I_r вершины x_v

Модификация план-графа

Систематические модификации план-графа объясняются изменчивостью и подвижностью компетенций [1]. Кроме того, изменения могут коснуться и состояний компетентности из-за новых требований к знаниям и умениям, а также из-за изменения уровней и профилей образования. Любые изменения меняют не только порядок гиперграфа $H(X,P)$, но и причинно-следственные связи между состояниями компетентности в пространстве Q . Образовательное пространство можно расширять и (или) сужать за счет:

- добавления или удаления элементарных результатов образования с расслоением по уровням и профилям образования (это приведет к появлению или исчезновению в пространстве Q соответствующих состояний компетентности);
- дальнейшей декомпозиции результатов образования (это приведет к расщеплению в пространстве Q соответствующих состояний компетентности на два или несколько новых состояний);
- стягивание нескольких элементарных результатов образования в один (это приведет к замене в пространстве Q нескольких состояний одним новым состоянием).

План-граф – основа для разработки содержания образования

План-граф $H(X,P)$ полностью определяет перечень учебных программ для подготовки компетентных специалистов в образовательном пространстве: каждое гиперребро $p_j \in P$ соответствует отдельной программе и описывает входную (требования к минимальным знаниям и умениям состояний компетентности вершин истока) и выходную (требование к минимальным знаниям и умениям состояний компетентности вершины стока) спецификации для разработки ее содержания.

Учебные программы, разработанные на основе план-графа, образуют *модульную коллекцию* со следующими свойствами:

1. Коллекция состоит из n учебных программ.
2. Перечень учебных программ коллекции не зависит от содержания образования и является *необходимым и достаточным* для планирования подготовки компетентных специалистов в образовательном пространстве.
3. Каждая программа коллекции *уникальна*, не содержит в себе других программ (полностью или частично) и не содержится сама (полностью или частично) в других программах коллекции.
4. Программы коллекции могут быть *вариативными*, т.е. содержать альтернативные способы обучения и (или) аттестации (различные методы, методики, технологии и т.п. для разработки того или иного результата образования).
5. Модульная коллекция учебных программ является самой подвижной частью содержания образования, т.к. их разработка напрямую связана с результатами образования.

Литература

1. Болонский процесс: середина пути/ Под науч. ред. д-ра пед. наук, профессора В.И. Байденко. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов. Российский Новый Университет, 2005. 379с.
2. Васильев В.Н., Лисицына Л.С., Лямин А.В. Методический интернет-центр. СПб.: Питер, 2005. 96 с.: ил. (опубликована на сайте www.ito-center.ifmo.ru)

ПЛАНИРОВАНИЕ ОЖИДАЕМОГО РЕЗУЛЬТАТА ОБРАЗОВАНИЯ

Л.С. Лисицына

Статья посвящена проблеме разработки ожидаемого результата образования профессиональным сообществом на основе сетевой информационно-образовательной технологии [1]. Рассматриваются задачи и методы автоматизации планирования ожидаемого результата образования по модели результатов образования в виде план-графа [2]. Показана связь ожидаемого результата образования с содержанием целостного образовательного процесса для подготовки компетентного специалиста с минимизацией затрат.

Введение

Идентификаторы ожидаемого результата образования устанавливаются профессиональным сообществом на основе анализа требований рынка труда к подготовке компетентных специалистов, а также могут быть сформулированы на основании ожиданий Заказчика образовательных услуг, которым может и должен стать сам обучаемый – студент [1]. Наличие в модели результатов образования [2] всех идентификаторов ожидаемого результата образования во многом определяют успех в разработке ожидаемого результата образования. Среди идентификаторов ожидаемого результата образования особое место занимают компетенции.

Свойства компетенций

Подчеркнем основные свойства компетенций, которые заложены в концепцию сетевой информационно-образовательной технологии разработки результатов образования [1]/

1. Компетенции, независимо от их характера (предметные, ключевые, социальные и т.д.), *могут детализироваться*, следовательно, покрывать образовательное пространство неделимыми элементарными компетенциями и, тем самым, деконструировать результаты образования.
2. Компетенции, независимо от их характера, *могут иметь сопоставимые состояния компетентности*, которые устанавливают различные требования к тому, что конкретно должен знать и уметь делать обучаемый. Формулировки требований, как и формулировки компетенций, должны быть на языке результатов, т.е. не зависеть от конкретики содержания образования: методов, моделей, технологий и т.п., используемых для достижения данного состояния компетентности.
3. Профиль образования позволяет сформулировать требования к состояниям компетентности с учетом профессиональной направленности подготовки.
4. Уровень образования позволяет сформулировать требования к состояниям компетентности в соответствии с общими требованиями к уровню теоретических знаний и практических умений бакалавров и магистров.

Задачи планирования ожидаемого результата образования

Цель планирования ожидаемого результата образования – составление учебно-методического плана и отбор модульного учебно-методического комплекса (УМК) для целостного образовательного процесса подготовки компетентного специалиста с условием минимальных затрат на его подготовку. Планирование ожидаемого результата образования проводится в два этапа.

Первый этап служит для *компетентностного планирования* подготовки специалистов. Здесь производится синтез минимального модульного плана (ММП), который содержит только то, что необходимо и достаточно для получения ожидаемого результата образования. ММП является компетентностной моделью специалиста, т.е. описывается не дидактикой дисциплин обучения, а идентификаторами результатов образова-

ния [2]. ММП служит также основанием для принятия решения о том, сможет ли вуз взяться за разработку ожидаемого результата образования или его образовательное пространство требует доработки и насколько. Синтез ММП по модели результатов образования в виде план-графа производится при решении следующих задач:

1. задача минимизации перечня состояний компетентности, освоение которых необходимо и достаточно для ожидаемого результата образования;
2. задача определения порядка освоения состояний компетентности.

Второй этап служит для *отбора содержания образования*. Ключом для отбора модулей УМК является ММП. В результате отбора будет получен модульный учебно-методический план с характеристиками нагрузки и видами занятий. Минимизация затрат (суммарной нагрузки) на подготовку специалиста на этом этапе сводится к решению задачи выбора модулей УМК из имеющихся альтернативных.

Минимизация перечня состояний компетентности

На основании свойств план-графа [2] можно сделать заключение, что эта задача решается на основании поиска композиции минимальных путей, ведущих в план-графе к множеству вершин $X_{ц}$ из одной или нескольких вершин $X_{и}$. Результатом решения этой задачи будет построение гиперграфовой модели ММП – ММП-граф.

Дано: план-граф $H(X,P)$ и $X_{и} \subset X$ и $X_{ц} \subset X$ – множество состояний исходной и целевой компетентности обучаемого, соответственно ($X_{и}, X_{ц} \neq \emptyset, X_{и} \cap X_{ц} = \emptyset$).

Найти: ММП-граф

Решение: МПП-граф совпадает с подгиперграфом $H'(X',P')$ после удаления из него множества дуг VP' . Подгиперграф $H'(X',P')$ порожден в план-графе $H(X,P)$ множеством вершин X' таким, что:

$$X' = (\cup F(\eta_i)) \setminus (\cup F(\eta_i)) \cup X_{и} \cup X_{и}', \quad (1)$$

$$\forall x_i \in X_{ц} \quad \forall x_i \in X_{и}$$

где η_i – путь, определяемый, как в [2], по план-графу $H(X,P)$; $F(\eta_i)$ – операция преобразования последовательности вершин пути $\eta_i = (x_0, \dots, x_i)$ в множество вершин $\{x_0, \dots, x_i\}$; $X_{и}'$ – множество вершин таких, что

$$\forall x_j \in X_{и}' \quad \exists (x_s \in X_{и} \& X_i = \{\dots, x_j, \dots, x_s, \dots\}).$$

Множество дуг для удаления $VP' \subset P'$ содержит такие дуги, что

$$\forall p_r = (x_s, x_r) \in VP' \quad (x_s, x_r \in (X_{и}' \cup X_{и})). \quad (2)$$

Пример: Для планирования некоторого ожидаемого результата образования в сфере дополнительного образования (повышение квалификации слушателей в области информационно-коммуникационных технологий) необходимо найти ММП-граф по фрагменту план-графа [3].

Исходная компетентность слушателя:

- умеет создавать электронные почтовые ящики на общедоступных серверах и настраивать почтовый клиент;
- умеет писать электронные письма и прикреплять к ним файлы;
- умеет отвечать и пересылать письма;
- умеет пользоваться адресной книгой.

Требования к ожидаемому результату образования:

- создавать средствами текстового редактора документы любой сложности;
- преобразовывать эти документы в pdf- форматы, уметь редактировать их;
- осуществлять поиск необходимой информации в Интернете.

Установим по модели результатов образования [3] состояния исходной и целевой компетентности слушателя. Состояния целевой компетентности ожидаемого результата образования – 1.4-1.3, 1.7-2.2 и 1.7-4.2 (соответствующие вершины образуют множест-

во $X_{ц}$ и на рис. 1 отмечены звездочками). Исходная компетентность соответствует одной вершине план-графа – 1.8-1.2, которая определяет в план-графе два множества вершин – X_n и X_n' , отмеченных на рис. 1 жирными точками и кружками, соответственно. Множество вершин X' , найденное на основании (1), порождает в план-графе подгиперграф, дуги которого выделены на рис. 2 жирными сплошными и пунктирными линиями. После удаления из него множества дуг VP' (2), показанных на рис. 2 пунктиром, мы получим ММП-граф (его дуги выделены жирными сплошными линиями). ММП-граф и является моделью искомого ММП.

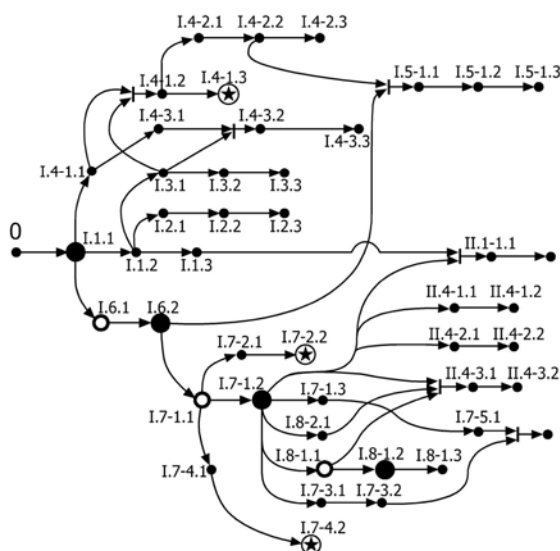


Рис. 1. Установка состояний компетентности

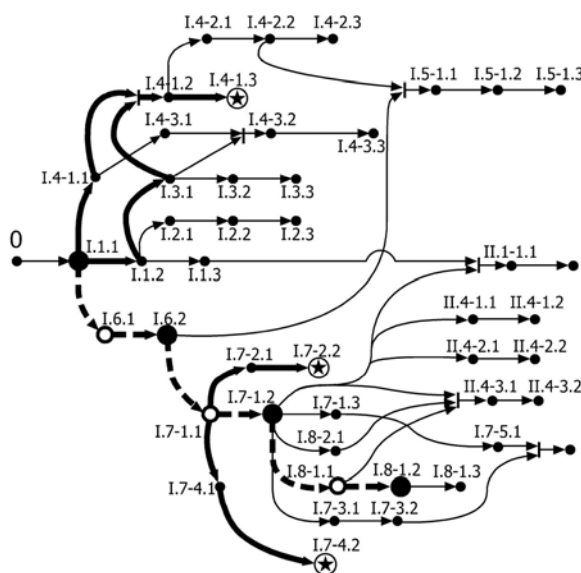


Рис. 2. ММП-граф

Определение порядка освоения состояний компетентности

Каждая компонента связности ММП-графа, отличная от изолированной вершины, моделирует самостоятельную (с точки зрения порядка освоения компетенций) часть ММП. Например, ориентированный ММП-граф (рис. 2) содержит три компоненты связности, которые могут служить основой для трех параллельных образовательных

процессов ожидаемого результата образования. Пусть $H'_k(X'_k, P'_k)$ - k -компонента связности подгиперграфа $H'(X', P')$. Очевидно, что

$$\exists X''_k \subset X'_k, X''_k \neq \emptyset (\forall x_i \in X''_k : \rho^+(x_i) = 0). \quad (3)$$

Тогда порядок следования программ k -части ММП-плана определяется порядком следования гиперребер в следующем подмножестве:

$$P''_k = Up (H'_k(X'_k, P'_k), X''_k), \quad (4)$$

где Up – процедура обхода и упорядочения гиперребер k -компоненты $H'_k(X'_k, P'_k)$ методом в глубину [4], начальными вершинами для которой поочередно служат вершины $x_i \in X''_k$ (3).

Построение учебно-методического плана

Множество гиперребер P' ММП-графа (рис. 2) определяет отбор модулей УМК, содержание которых обеспечивает освоение соответствующих состояний компетентности ММП, а мощность $|P'|$ – количество таких модулей. Каждый модуль УМК характеризуется суммарной нагрузкой по всем видам занятий, что и определяет вес соответствующего гиперребра – $t(p_j)$. Для вариативного модуля, имеющего множество $W(p_j)$ альтернативных вариантов содержания образования, вес гиперребра определяется как $t(p_j) = f(W(p_j))$, где $f(x)$ – процедура выбора варианта модуля. Тогда оптимистическая оценка затрат на подготовку может быть выражена через продолжительность подготовки и определяется с помощью ММП-графа как

$$t_{opt} = \sum t(p_j), \quad \forall p_j \in P' \quad (5)$$

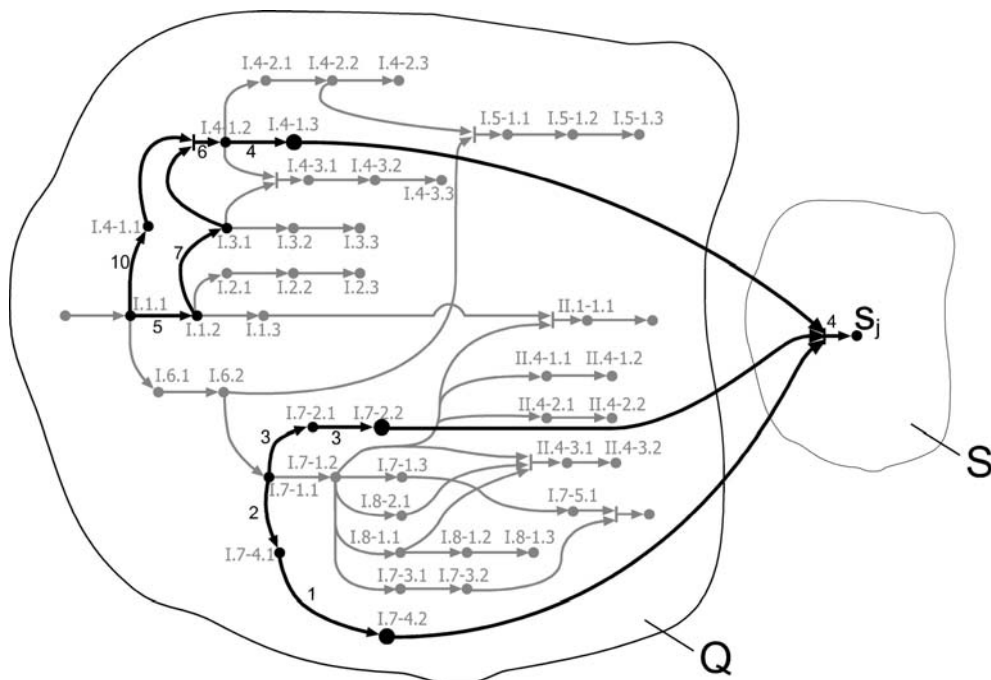


Рис. 3. Модель ожидаемого результата образования

На рис. 3 для приведенного выше примера показана модель ожидаемого результата образования, построенная на основе ММП-графа: веса гиперребер установлены после отбора в [3] соответствующих модулей УМК. Здесь показаны два дискретных пространства: Q – пространство формирования компетентности обучаемого и S – пространство ожидаемых результатов образования (вершина s_j моделирует ожидаемый результат образования). Гиперребро, имеющее в качестве истока множество вершин X_{ii} в

пространстве Q и в качестве стока - вершину s_j в пространстве S , моделирует испытание ожидаемого результата образования. Для подтверждения ожидаемого результата образования предусмотрено испытание в виде подготовки и защиты выпускной работы (4 часа), демонстрирующей знания и умения слушателя по поиску в Интернете информации по заданной тематике и оформлению отчета по найденным материалам в виде doc-документа и pdf-документа. Перейдя по модели ожидаемого результата (рис. 3) к описанию учебных программ отобранных модулей УМК с сохранением установленного в ММП порядком обучения и добавив в него требования к выпускной работе, мы получим учебно-методический план подготовки слушателя с характеристиками нагрузки и видами занятий.

Заключение

Таким образом, планирование ожидаемого результата образования по план-графу, в котором присутствуют идентификаторы ожидаемого результата образования и состояния исходной компетентности обучаемого, может быть формализовано и автоматизировано в сетевой информационной системе. Модель ожидаемого результата образования непосредственно связана с содержанием образования, а основой для ее построения послужил минимальный модульный план – ММП.

Литература

1. Васильев В.Н., Лисицына Л.С. Концепция сетевой информационно-образовательной технологии для разработки результатов образования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2005. № 23. С. 149–156.
2. Лисицына Л.С. Учимся строить модель результатов образования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2005. № 22. С. 100–108.
3. Васильев В.Н., Лисицына Л.С., Лямин А.В. Методический Интернет-центр. СПб.: Питер, 2005. 96 с.: ил. (см. сайт www.ito-center.ifmo.ru).
4. Андерсен Дж. Дискретная математика и комбинаторика: Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. 960 с.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АСТПП

Д.Д. Куликов, Б.С. Падун, Е.И. Яблочников

Введение

Современный рынок промышленных товаров и услуг за последние 10 лет претерпел существенные изменения. Производимая продукция перестала носить массовый характер и стала ориентироваться на удовлетворение запросов различных групп потребителей. Производство товаров перестало быть «локальным», так как оно может быть организовано во многих точках мира. Появились новые формы кооперации в виде распределенных (виртуальных) предприятий, когда каждый этап производства выполняется в той стране и на том предприятии, где это наиболее выгодно. Эта кооперация стала возможной благодаря развитию информационных технологий в сфере проектирования, производства и реализации продукции. В этих условиях изменились сами критерии деятельности предприятия. Деятельность стала рассматриваться не с точки зрения функционирования структурных подразделений предприятия, а с точки зрения организации и протекания в нем деловых и производственных процессов. Все это дает основание определить совокупность происходящих изменений как глобальную трансформацию промышленного производства.

Особое значение приобрело отслеживание всех этапов жизненного цикла изделия (ЖЦИ). Была предложена концепция новой технологии информационной поддержки ЖЦИ, которая получила название ИПИ/CALS [1]. Согласно концептуальным положениям ИПИ/CALS, реальные бизнес-процессы отображаются на виртуальную информационную среду, в которой определение продукта представлено в виде полного электронного описания изделия, а среда его создания и среда эксплуатации – в виде систем моделирования соответствующих процессов. Все три составляющие (определение продукта, среды его создания и среды эксплуатации) не только взаимосвязаны, но и непрерывно развиваются на всем протяжении ЖЦИ.

Одним из важнейших этапов жизненного цикла изделий была и остается технологическая подготовка производства (ТПП), уровень которой во многом определяет качество производимого изделия, сроки его выхода на рынок и, в конечном счете, конкурентоспособность предприятия в целом.

В 60–80-х гг. в нашей стране были созданы научные школы по теории и практике организации ТПП и ее автоматизации [2–6]. Результаты работы этих школ были обобщены в комплексе стандартов ЕСТПП и ЕСТД. Эти стандарты закрепили достижения СССР по проблемам организации производств и автоматизации ТПП. На базе научных исследований ведущими по данной проблеме организациями были разработаны и внедрены комплексы автоматизированных систем технологического назначения. Трудности создания таких систем обуславливались слабой формализацией задач ТПП.

Очередная смена поколения ЭВМ и переход на персональные ЭВМ потребовали серьезных вложений в создание новых систем, однако смена в 90-х гг. экономической обстановки в стране и отсутствие должной государственной поддержки не дали возможности осуществить полноценный перевод подсистем ТПП на персональные ЭВМ. Не были реализованы новые идеи, накопленные на основе анализа результатов функционирования ранее созданных промышленных САПР технологического назначения. В этот период наблюдался регресс в области создания новых подсистем ТПП и замедление теоретических исследований в области автоматизации технологической подготовки производства.

На современном этапе применение информационных технологий предполагает рассмотрение проблемы автоматизации этапа ТПП в контексте общей информационной поддержки этапов ЖЦИ и соответствующих бизнес-процессов.

Исследования, проводимые Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики, позволили на базе общих принципов ИПИ разработать ряд положений, которые, на наш взгляд, могут быть объединены в общую методологию построения и функционирования АСТПП. Рассмотрим более подробно основные аспекты создаваемой методологии.

1. Общий подход к автоматизации ТПП

Применение ИПИ в ТПП носит двоякий характер. С одной стороны – это использование автоматизированной системы ТПП (АСТПП) для обеспечения технологического этапа ЖЦИ. Результатом работы АСТПП является комплекс технологической документации, планы проведения работ, технологическая оснастка, базы данных и знаний и т.п.

С другой стороны – это проектирование, эволюция и адаптация автоматизированной системы ТПП. В этом случае под продуктом понимается система ТПП, которую необходимо спроектировать и внедрить, или модифицировать на предприятии. Таким образом, осуществляется поддержка этапов жизненного цикла АСТПП.

Создаваемая методология должна учитывать двоякий характер применения ИПИ в ТПП, и в нее должны входить методики использования информационных технологий как на стадии реорганизации ТПП, так и при функционировании самой технологической подготовки производства

ТПП предполагает решение большого числа разнообразных задач. В ГОСТах ЕСТПП выделено четыре класса задач, содержащих: управление ТПП, анализ и унификация изделий и технологических процессов, проектирование технологических процессов, проектирование и изготовление оснащения. Автоматизация ТПП потребовала переосмыслить эту классификацию [4]. Главным положением этой классификации является разделение всех функций ТПП на два класса: целевые и собственные. Целевые функции связаны с организацией и подготовкой производства изделий, а собственные – с развитием методов и форм ТПП. Появление новых технологий производства изделий и методов организаций производства приводят к изменению состава и взаимосвязи целевых функций и задач, а развитие методов и способов организации ТПП – к изменению состава и взаимосвязи собственных функций и задач. Поэтому автоматизация производства меняет целевые функции, а автоматизация ТПП – собственные функции.

Состав функций и задач ТПП многообразен – это задачи проектирования объектов и процессов; задачи анализа и унификации объектов и процессов; задачи технико-экономического обоснования проектных решений; задачи изготовления средств технологического оснащения, задачи планирования и управления ТПП; задачи развития ТПП и адаптации АСТПП; задачи обучения технологов и сотрудников служб ТПП и т. д. Между этими задачами существуют как детерминированные связи, так и случайные связи, которые возникают в зависимости от конкретной ситуации на производстве и вне производства.

Поэтому для обеспечения эффективного функционирования ТПП основополагающими положениями являются:

- организация единого информационного пространства (ЕИП);
- применение автоматизированных систем управления ТПП для управления и контроля задач как с детерминированными связями, так и с неопределенными связями. В первом случае могут применяться PDM–системы, а во втором случае должны быть разработаны средства оперативного (пошагового) управления;
- создание методов решения задач, позволяющих быстро адаптировать ТПП при изменении производственных условий и условий взаимодействия с другими предприятиями.

Указанные положения определяют как информационное взаимодействие между подсистемами ТПП, так и способы организации жизненного цикла изделия на технологической стадии.

2. Единое информационное пространство

Под единым информационным пространством будем понимать интегрированную информационную среду ТПП, использующую обобщенные модели изделий и интегрированные базы данных и знаний.

Как показано в работе [4], интеграцию автоматизированных систем проектирования целесообразно выполнить на основе обобщенной модели изделия, при этом создаваемые трансляторы должны быть ориентированы на использование единого тезауруса и промежуточного языка-посредника. Исследование информационной совместимости на уровне систем ТПП позволило выделить два вида совместимости: параметрическую (в свою очередь, разделяемую на идентификационную, синтаксическую и семантическую) и структурную. Для определения совместимости введен ряд метрик, позволяющих оценить степень информационной совместимости не только по отдельным параметрам, но и отдельных систем ТПП.

Идентификационная и синтаксическая совместимость параметров может быть достигнута при совместном использовании единого тезауруса, позволяющего в едином формате представлять входные и выходные параметры систем. Семантическая совместимость означает совпадение понятий, отображаемых параметрами. В случае отсутствия семантической совместимости необходимо разработать соответствующий интерфейсный слой между системами, как это имеет место в случае интеграции конструкторских и технологических САПР. Разработка транслятора для перехода от одной системы в другую может быть достаточно сложной задачей. К тому же, если не продумать информационную совместимость при интеграции систем ТПП, то возникает необходимость в разработке большого числа трансляторов.

Проведенные исследования на базе PDM SMARTTEAM показали, что, при наличии семантической совместимости параметров, можно обеспечить простую передачу данных из одной системы в другую на основе использования формата XML.

Единое информационное пространство позволяет реализовать принцип неизменности нахождения информационного объекта. Документ любого вида находится в интегрированной базе на всех стадиях его создания и согласования, что дает возможность быстрого и авторизованного доступа к документу. Возможность распараллеливания выполняемых над документом работ является важным достоинством интегрированной базы, позволяющим сокращать сроки ТПП изделий. Например, просмотр документа может выполняться одновременно всеми подразделениями ТПП, которые должны его утвердить. Следовательно, любой документ, сформированный при решении технологической задачи, должен быть занесен в интегрированную базу независимо от уровня автоматизации решения этой задачи

В автоматизированной ТПП циркулируют модели разного типа (графические, текстовые, табличные, бинарные и т. д.). Эти модели в процессе ТПП изделий проходят цикл создания и взаимного преобразования. Кроме того, в процессе ТПП между ними образуются сложные и динамические связи. Поэтому для разработки информационного обеспечения необходимо иметь современную методику анализа информационных потоков ТПП. Такая методика может быть разработана на основе стандартов IDEF0 или на основе методологии, ориентированной на использование унифицированного языка моделирования (UML). Анализ информационных потоков ТПП завершается созданием концептуальной модели предметной области ТПП.

Для перехода от концептуальной к логической модели предметной среды ТПП целесообразно применить объектно-ориентированный подход (ООП), дающий возможность выполнить разработку классов данных и выявить связи между ними. Для каждого класса определяются его свойства и методы, позволяющие для объектов класса задать идентификационные и поисковые параметры, параметры, относящиеся к жизненному циклу и состоянию объекта, а также ссылки на файлы с моделями объекта. Классы объектов, объединенные ассоциациями типа «целое – часть», «имеет – принадлежит», образуют логическую модель предметной среды ТПП. Реальное функционирование информационных потоков в ТПП может быть выражено как функционирование информационных объектов, порожденных спроектированными классами. Под информационным объектом (ИО) будем понимать комплекс, состоящий из объекта, порожденного одним из разработанных классов, и множества моделей, закрепленных за этим объектом.

Информационные объекты объединяются в обобщенную модель изделия (Generalized Model of Product – GMP), представляющую собой систему связанных между собой информационных объектов, принадлежащих изделию на текущий момент его жизненного цикла. Связи между информационными объектами могут быть выражены в виде направленного графа, вершинами которого являются информационные объекты, а дуги отображают отношение «имеет – принадлежит».

В первом приближении будем считать указанный граф графом типа «дерево». Корневой вершиной дерева является информационный объект класса «Изделие». Эта вершина связана с вершинами для информационных объектов класса «Сборочные единицы», которые, в свою очередь, могут быть связаны с вершинами объектов этого же класса, но следующего уровня детализации, и (или) с вершинами объектов класса «Деталь». Вершины «Деталь» связаны с вершинами «Процесс», и т. д.

Логическая модель данных фиксируется с помощью системы управления данными о продукте/изделии (PDM-системы), что позволяет обобщенную модель изделия визуально выражать в виде дерева проекта PDM-системы, в котором для каждого информационного объекта регистрируется учетная карточка (паспорт объекта). В этом случае жизненный цикл изделия на стадии ТПП отслеживается с помощью инструментальных средств PDM-системы. Эти средства позволяют редактировать или удалять ИО из дерева проекта, регистрировать новый ИО и его модели в дереве проекта.

Исследования, проведенные на базе PDM SMARTTEAM, показали, что может быть разработана типовая логическая модель предметной среды ТПП, основанная на стандартах ЕСТПП и учитывающая возможности современных информационных технологий [7]. Такая логическая модель может рассматриваться как некоторый шаблон, который при внедрении АСТПП дорабатывается с учетом специфики конкретного машиностроительного предприятия.

Интегрированная база данных включает в себя базы данных технологического назначения (технологическое оснащение, припуски, режимы резания и т. д.), графические библиотеки с технологической оснасткой, государственные и отраслевые стандарты, применяемые в ТПП и т.п. Для интегрированной базы данных разрабатывается комплекс классов данных, устанавливается их иерархия, определяются правила поиска объектов. При ведении проектов на объекты интегрированной базы данных устанавливаются логические ссылки, после чего объекты становятся информационными объектами GMP. Интегрированная база данных может быть распределенной и для работы с такой базой необходимо использовать коммуникационные технологии.

3. Инструментальные средства проектирования

Совершенствование ТПП – это сложный и продолжительный во времени процесс. Поэтому необходимо иметь эффективную методику и инструментальные средства для

разработки автоматизированных систем ТПП. Следовательно, имеет смысл говорить о некоторой метасистеме, с помощью которой выполняется проектирование самой АСТПП. Такую метасистему назовем «Системой проектирования технологической подготовки производства» (СП ТПП). Эта система является неотъемлемой частью автоматизированной ТПП. Необходимость и возможность такого подхода показана в работе [4]. СП ТПП строится таким образом, чтобы реализовать конкретный подход к автоматизации решения задач ТПП. Она должна, как и все подсистемы ТПП, функционировать в едином информационном пространстве и использовать концепции ИПИ.

С помощью СП ТПП реализуется заданная стратегия развития ТПП и ее автоматизированных систем. Стратегия развития АСТПП направлена на определение способов организации жизненного цикла подсистем ТПП. От выбранной стратегии во многом зависит эффективность функционирования подсистем ТПП. В настоящее время при разработке сложных программных систем наибольшее применение получают подходы, основанные на объектно-ориентированном анализе и проектировании программных комплексов. Эти подходы пришли взамен каскадных и спиральных моделей проектирования программных систем. Одной из наиболее перспективных в настоящее время считается методология, в основе которой лежит «унифицированный процесс» (Unified Process – UP), под которым понимается формализованная технология разработки сложных программных систем, использующая универсальный язык моделирования UML [8]. Наиболее законченный вид эта методология нашла в унифицированном процессе компании Rational Software Corporation (Rational Unified Process – RUP), важной особенностью которого является, помимо большого набора справочных пособий и шаблонов для основных артефактов, наличие инструментария (Rational Suite) для эффективного проектирования сложных программных систем.

На наш взгляд, стратегия, основанная на UP, в наибольшей степени соответствует предлагаемой концепции создания АСТПП, так как позволяет достаточно быстро проектировать работоспособные варианты подсистем ТПП и запускать их в эксплуатацию.

Разработанный на базе UP комплекс диаграмм (прецедентов, взаимодействий, видов деятельности и т.д.) дает возможность с необходимой проектанту полнотой описать процесс технологической подготовки изделий на конкретном предприятии. Результаты анализа ТПП используются при формировании архитектуры будущей автоматизированной ТПП. Однако разнообразие существующих программных продуктов, возможность различной очередности ликвидации «узких» мест, уровень квалификации разработчиков собственных программных модулей и финансовые ресурсы, которыми располагает предприятие, приводят к существенному разнообразию вариантов начальной архитектуры подсистем ТПП. Следовательно, необходимо определить метрики, на основе которых можно было бы выполнять хотя бы приближенную оценку возможных вариантов автоматизации ТПП, выделять опасные риски и в процессе итераций последовательно их пересматривать и минимизировать.

4. Технология «workflow»

Отслеживание жизненного цикла изделия на этапе его технологической подготовки является одной из важнейших управляющих функций ТПП. Наличие PDM-системы позволяет эффективно выполнять анализ состояния изделия и дает возможность в любой момент определить, на какой стадии разработки (проектирования, согласования или утверждения) находятся информационные объекты ТПП и кто участвует в их разработке. Такой контроль дает возможность своевременно выполнить необходимые корректирующие воздействия на процесс технологической подготовки изделия.

Выполнение контроля в АСТПП основано на автоматизации документооборота с помощью встроенной в PDM-систему технологии «workflow». Для этого создается мо-

дель деловых процессов (бизнес-процессов), существующих в ТПП предприятия. В настоящее время имеется ряд методик и инструментальных средств для разработки и анализа моделей бизнес-процессов. Эффективными, на наш взгляд, являются средства, основанные на использовании UML. На базе диаграмм UML выполняется анализ моделей существующих бизнес-процессов и их доработка применительно к автоматизированной ТПП [9]. В результате образуется сеть, состоящая из деловых операций и дуг, которые связывают операции в единый деловой процесс. В то же время перспективным является освоение и применение для построения и моделирования бизнес-процессов методик и средств ARIS, нашедших наибольшее применение в настоящее время при разработке и внедрении проектов управления предприятиями.

Планирование ТПП изделия целесообразно вести на базе существующих инструментальных средств, например, MS Project. План-графики составляются с учетом разработанных бизнес-процессов. Анализ критических путей позволяет минимизировать время ТПП изделий. PDM SMARTTEAM интегрирована с MS Project, и это открывает перспективу их совместного эффективного использования при планировании и управлении ТПП.

Функционирование моделей бизнес-процессов ТПП начинается после того, как они с помощью соответствующих инструментальных средств PDM-системы введены в базу данных. Модели деловых процессов ТПП составляются отдельно для каждого изделия и далее синхронизируются между собой с учетом разработанных план-графиков для этих изделий.

Необходимо отметить, что модели бизнес-процессов ТПП могут быть составлены с любой требуемой степенью подробности и, в целом, образуют многоуровневый комплекс деловых процессов, который в процессе ТПП изделия корректируется и уточняется.

Возможность автоматизации наблюдения и контроля процесса ТПП является важной особенностью технология «workflow». Исполнители имеют свои почтовые ящики, которые обслуживаются специальной компонентой PDM-системы. Кроме того, исполнители закреплены за задачами, наблюдение за процессом выполнения которых поручено отдельным деловым операциям. После активизации деловой операции исполнителю на его почтовый ящик автоматически отправляется распоряжение на выполнение задачи, закрепленной за этой операцией. Деловая операция остается активной до тех пор, пока не придет сообщение о завершении данной задачи. В зависимости от результатов выполнения задачи осуществляется либо переход и активизация следующей деловой операции, либо возврат на предшествующую операцию. Если задача не решена вовремя, то посылается сообщение исполнителю о нарушении сроков выполнения задачи. Такая технология контроля, с одной стороны, позволяет в любой момент получить информацию о состоянии ТПП компоненты любого изделия, а с другой стороны, автоматически зафиксировать отклонения от графика выполнения задач, необходимых для ТПП конкретного изделия. Таким образом, технология «workflow» является важной составной частью современной системы управления ТПП.

5. Виртуализация ТПП

Виртуализация ТПП является важной формой ее совершенствования, так как позволяет сложные задачи ТПП передать организациям, специализирующихся в их решении, тем самым повысив качество решений и сократив сроки. Эффективность виртуализации во многом зависит от форм использования современных информационных технологий [10].

Целесообразно различать два вида виртуализации: виртуальные рабочие места и виртуальные предприятия, решающие отдельные задачи ТПП. Первый вид необходим

для использования опытных технологов, острая потребность в которых ощущается в последние годы на промышленных предприятиях и рабочие места которых являются удаленными. Компоненты PDM-системы, использующие коммуникационные технологии, обеспечивают доступ к дереву проекта из удаленного рабочего места и выборку из дерева проекта любого информационного объекта, к которому разрешен доступ. Информационные объекты, созданные на виртуальном рабочем месте, регистрируются и заносятся в дерево проекта. Виртуальные рабочие места также могут быть охвачены технологией «workflow».

Второй вид виртуализации необходим для использования предприятий, специализирующихся на решении отдельных задач ТПП, и используется как одно из важнейших направлений совершенствования ТПП, обеспечивающих высокую организационную гибкость. Например, существуют небольшие фирмы, проектирующие и изготавливающие сложные конструкции технологической оснастки.

При организации виртуальных предприятий используется термин «межорганизационный потенциал отношений», который определяется как сеть ресурсов, образованная организационными единицами (ОЕ). Под ОЕ понимается любое юридическое лицо, которое может принимать участие в выполнении заказа, ориентированного на решение задач ТПП. Организационные единицы объединяются в сеть ресурсов с помощью информационных и функциональных связей.

Под функциональной связью понимаются материальные потоки, отражающие последовательность выполнения заказа организационными единицами, например, передача полуфабрикатов, заготовок, деталей и сборочных единиц с одного на другое предприятие. Информационная связь заключается в передаче какой-либо информации об изделии и технологии его изготовления. Например, технологическое бюро, в котором проектируются управляющие программы для обработки сложных формообразующих деталей пресс-формы, функционально и информационно связано с предприятием, на котором будут изготавливаться эти детали.

Для выполнения заказа необходимо о каждой ОЕ знать выполняемые ею задачи и ресурсы, реализующие эти задачи. В сети ресурсов могут быть ОЕ, которые могут выполнять одинаковые задачи. В этом случае ОЕ вступают в конкурентную борьбу за получение задания на выполнение этой задачи. Таким образом, сеть ресурсов является динамической сетью, в которой меняется состав вершин, их функции и ресурсы, а также связи между вершинами.

Результаты выполнения заданий каждой ОЕ фиксируются в дереве проекта с помощью стандартных средств PDM-системы. Для контроля процесса выполнения заданий ОЕ в модель ТПП включаются деловые операции, связанные с деятельностью рабочей сети ресурсов. Отсюда следует, что использование PDM-системы и технологии «workflow» являются, на наш взгляд, важным условием эффективной виртуализации ТПП и повышения организационной гибкости ТПП.

Заключение

Рассмотренная методология автоматизации ТПП в настоящее время применяется для проектирования подсистем АСТПП и является результатом исследований, выполняемых на кафедре технологии приборостроения СПбГУ ИТМО. Авторы считают, что предложенные подходы открывают путь к созданию АСТПП нового поколения. Однако требуется проведение большого объема дальнейших исследований по использованию современных информационных технологий в ТПП.

Литература

1. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 320 с.
2. Митрофанов С.П. Научная организация машиностроительного производства. Л.: Машиностроение, 1976. 712 с., с ил.
3. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. В 2-х томах, 3-е изд., перераб. доп. Л.: Машиностроение, 1983. 404 с., с ил.
4. Технологическая подготовка гибких производственных систем / С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов, О.Н. Миляев, Б.С. Падун. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987.
5. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении / Г.К. Горанский, В.А. Кочуров, Р.П. Франковская и др.; Под ред. чл.-кор. АН БССР Г.К. Горанского. М.: Машиностроение, 1976. 240 с., с ил.
6. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. Минск: Наука и техника, 1980. 264 с., с ил.
7. Яблочников Е.И. Организация единого информационного пространства технической подготовки производства с использованием PDM SmartTeam. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2001. № 3. С. 22–29.
8. Буч Г., Рамбо Дж., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя. Пер. с англ. М.: ДМК, 2000. 432 с.
9. Яблочников Е.И. Построение функциональных моделей процессов технологической подготовки производства с применением диаграмм UML // Инновации в науке, образовании и производстве; Труды СПбГПУ, № 488. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004. С. 221–227.
10. Зильбербург Л.И., Молочник В.И., Яблочников Е.И. Реинжиниринг и автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении. СПб: Компьютербург, 2003. 152 с.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИН МАССОПЕРЕНОСА В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ

З.Г. Симоненко

Данная работа посвящена вопросам параметрического анализа сложных информационно-измерительных систем (ИИС) измерения величин массопереноса в сплошных средах для решения задачи информационной и системной интеграции процесса автоматизированного проектирования при моделировании ИИС.

Введение

В настоящее время разработка и применение высокоточных быстродействующих комплексных методов и новых технических систем, ведущих к повышению информативности и обеспечивающих получение сведений о совокупности свойств экспериментального и модельного исследования, являются основной тенденцией развития приборостроения. При интенсивном внедрении вычислительной техники (ВТ) приоритетное направление получают методы автоматизированного проектирования (АП) на базе новых информационных технологий (ИТ).

АП включает в себя два основных направления – построение общей теории проектирования сложных систем и объектов и разработку систем автоматизированного проектирования (САПР) на базе ВТ [1] – содержащие широкий спектр теоретических и прикладных работ, связанных как с разработкой вопросов теории АП, так и ориентированных на заданные классы и типы объектов.

Наиболее актуальным в АП являются вопросы интеграции автоматизированных систем (АС), используемых на различных этапах жизненного цикла изделий (ЖЦИ). Эта тенденция, называемая CALS-технологией, представлена множеством моделей и методов, вариантов программного обеспечения (ПО), международных и национальных стандартов.

Для методологического обоснования базовыми являются:

1) методология создания САПР АС, которая основывается на том, что качество производства любой АС определяется качеством и согласованным взаимодействием проектной, технологической и производственной сред ее реализации. Это требует увязки жизненных циклов разнородных объектов, например, АС и ее компонентов, организационных и других элементов;

2) структура абстрактной задачи АС, которая является минимальной понятийной конструкцией, позволяющей представлять любые процессы АС с необходимой степенью детализации путем насыщения компонент задачи различными объектами.

В рамках методологии проектирования интегрированных автоматизированных информационно-измерительных систем в данной работе рассматривается метод концептуального моделирования, применяемый для выявления методологических, теоретических и практических оснований, определения структуры и состава концептуальных представлений, выявления закономерностей формирования концептуальных моделей и их интеграции [2].

Представление концептуальных моделей включает в себя концептуальные представления предметных задач (КППЗ), определяющих строение системы знаний для конкретных предметных областей и включающих концептуальные модели объектного и конкретного уровней абстрагирования, связанные между собой покомпонентно статическими и динамическими составляющими.

Информационно-измерительные системы (ИИС) измерения величин массопереноса в сплошных средах, в которых реализуются присущие им специфические процедуры получения и преобразования измерительной информации с заданной и гарантированной

точностью, сопоставления сигналов измерительной информации с размерами общепринятых единиц измерения, сложны и дороги. Это требует перехода от проектирования большого числа новых моделей для различных целей исследования к возможности их отображения с помощью одной модели [3].

Конкретное содержание процесса проектной разработки, обусловленное этими представлениями, включает в себя создание концептуальной модели комплекса для изучения нетрансляционного переноса масс в анизотропных средах. Эта многоступенчатая задача последовательного нахождения оптимального решения решается путем синтеза типовых, унифицированных, готовых и апробированных деталей и блоков деталей, блоков и вариантов, стандартизации и конструкторско-технологической унификации вариантов сложной информационно-измерительной системы (ИИС), включающих в себя классификацию объектов по конструктивно-параметрическим признакам, выбор конструкции базового изделия по данному классу систем, установления единого конструктивно-параметрического решения для этих объектов.

При реализации информационной и системной интеграции процесса автоматизированного проектирования (АП) для данного класса ИИС проведен параметрический анализ с различным уровнем детализации и особенностями структурно-функциональной организации процесса измерения параметров массопереноса.

Основная часть

В качестве анализируемой выберем разработанную модель ИИС [4] для измерения параметров массопереноса (или диффузии) в жидкой бинарной среде с границей раздела, основанную на использовании оптических методов поляризационной интерферометрии и лазерной нуль-эллипсометрии [5].

Схема одноканального лазерного эллипсометрического диффузиометра представлена на рис. 1. Пучок света от источника излучения 1, поляризованный линейным поляризатором 2 – полуволновой пластиной ($\lambda/2$), разделяется при помощи первой двулучепреломляющей пластины из исландского шпата 3, установленного с азимутом 45° к плоскости поляризации полуволновой пластины 2, на два пучка.

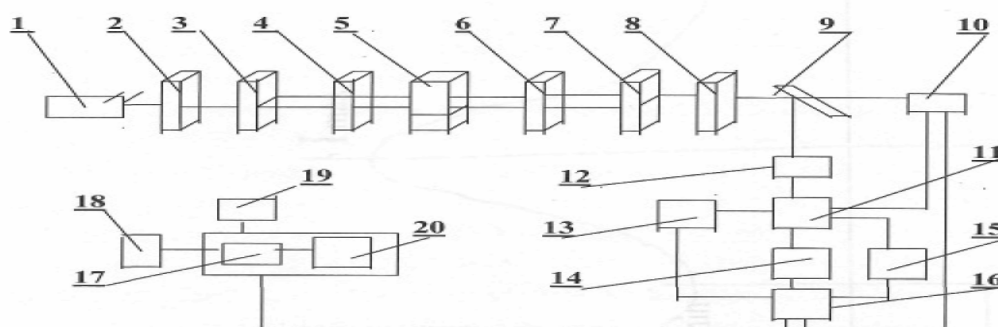


Рис.1. Схема лазерного одноканального поляризационного прибора для измерения параметров массопереноса

Оба пучка, разведенных на величину двоения шпатам 3, проходят через рабочую кювету 5 и фазосдвигающие четвертьволновые пластины 4 и 6. Эти пластинки находятся в схеме до и после рабочей кюветы 5 и установлены так, что они оптически сопряжены с двулучепреломляющей пластиной 3 и линейным поляризатором 2; вторая пластина 6 установлена на вычитание по отношению к первой пластине 4. Затем второй двулучепреломляющей пластиной 7 (аналогично пластине 3), оптически сопряженной с линейным поляризатором 2, опять сводят два пучка в один и пропускают через непод-

видно установленный анализатор 8, непрерывно выделяя синусную составляющую интенсивности излучения (анализатор установлен с азимутом 45° к плоскости поляризации поляризатора 2).

Регистрация моментов времени τ_i производится с момента установления резкой границы раздела исследуемых сред. Пучок, прошедший через анализатор 8, разделяется светоделительным элементом 9 на два пучка, один из которых попадает на фотоприемник 10. С него световой оптический сигнал, преобразованный в электрический, попадает в информационно-управляющий модуль 11, результаты с которого получены в виде численных данных либо в графическом виде. Экспериментальная полученная кривая скорости массопереноса дает адекватное представление о феноменологии процесса, протекающего в реальном масштабе времени [6].

Для устранения ряда систематических аппаратурных погрешностей была разработана вторая модель двухканального лазерного поляризационного прибора [7] с возможностью измерения мгновенных значений величин параметров массопереноса, представленная на рис. 2. Схема включает в себя: 1 – источник излучения, 2 и 3 – светоделительные элементы (зеркала), 4 – поляризатор (полуволновая пластина $\lambda/2$), 5 и 9 – двулучепреломляющие пластины из исландского шпата, 6 и 8 – четвертьволновая пластина ($\lambda/4$), 7 – рабочая кювета, 10 – механический прерыватель-синхронизатор, 11 и 12 – фотоприемники, 13 – информационно-измерительный модуль.

Работает устройство в оптической части так же, как и предыдущее, однако выделение интенсивностей здесь происходит при помощи четырех анализаторов, которые с диафрагмами установлены на диске механического прерывателя-синхронизатора 10, расположенного перед фотоприемником 11. При фиксированных азимутах поляризационных элементов 5, 6, 8, 9 диск механического прерывателя-синхронизатора 10 синхронно вращается вокруг оси, параллельной оптической оси, с постоянной угловой скоростью ω . После диска 10 формируются четыре оптических световых сигнала, сдвинутых друг относительно друга по пространственной фазе на 90° .

Эти четыре сигнала после диска 10 с механической модуляцией падают на рабочие поверхности фотоприемников 11 и 12, а выходные сигналы с них, преобразованные в электрические сигналы, соответственным образом попадают в информационно-измерительный модуль 13.

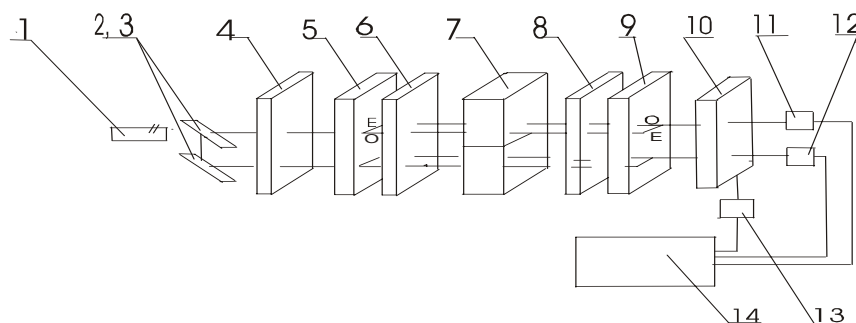


Рис. 2. Схема двухканального лазерного поляризационного прибора для измерения мгновенных значений величин массопереноса

Анализ параметров сравниваемых схем показывает, что в основе измерений лежит принципиальная схема с пластинками Тарди [8], с помощью которой реализован один из наиболее чувствительных методов получения эллиптически поляризованного излучения. Пучок света в ней (рис. 3) преобразуется в линейно поляризованный при помощи линейного поляризатора 1. Установленный за ним поляризационный элемент двоения 2 делит линейно поляризованный пучок на два плоско поляризованных во вза-

имно перпендикулярных плоскостях. Элемент 2 устанавливают так, чтобы интенсивности обоих пучков были равны. На пути обоих пучков за элементом 2 устанавливают кювету 4 с исследуемыми жидкостями. Оба пучка, разделенные элементом 2 на величину двоения поляризационного элемента 2, распространяются параллельно границе раздела двух исследуемых сред, которые по мере прохождения пучков через диффундирующий слой приобретают на пути h разность фаз δ . Сведение элементов производится с помощью элемента двоения 6, который оптически сопряжен с элементом двоения 2. В анализируемой схеме имеется две четвертьволновые пластинки 3 и 5 ($\lambda/4$), установленные до и после кюветы 4. В отсутствие в схеме пластинок ($\lambda/4$) полностью нарушается рассматриваемая принципиальная схема.

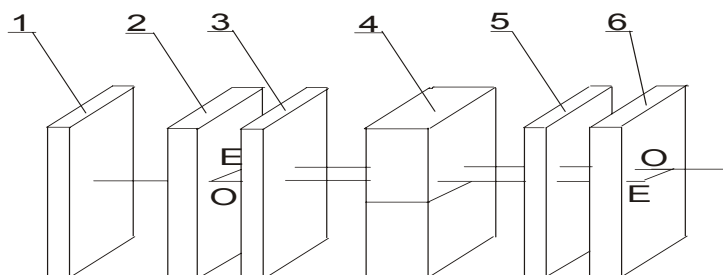


Рис. 3. Принципиальная схема измерительного блока ИИС

Анализ представленных схем позволяет сделать следующие выводы.

1. Имеется модель ИИС с экспериментально измеренными параметрами массопереноса бинарной жидкой среды с границей раздела, которая для достоверности параметров последующих проектируемых моделей выбирается в качестве базовой с экспериментально апробированными начальными и граничными условиями задачи массопереноса сплошной среды.
2. Одноканальная схема позволяет непрерывно исследовать параметры массопереноса в реальном масштабе времени, двухканальная схема позволяет получать мгновенные значения параметров массопереноса.
3. В качестве типового измерительного блока выбрана принципиальная схема с пластинами Тарди или блок Тарди с диффузионной кюветой подслаивания.

Широко применяемый и успешно используемый в данной работе метод модульного проектирования позволяет представить с помощью параметрического анализа описанных приборов-аналогов проектируемые модифицированные части новой модели ИИС.

В качестве модуля А выбран модуль, содержащий светоделительные элементы 1 и 2 (см. рис. 2) с блоком Тарди и диффузионную кювету подслаивания и предназначенный для работы с двумя каналами – рабочим и опорным.

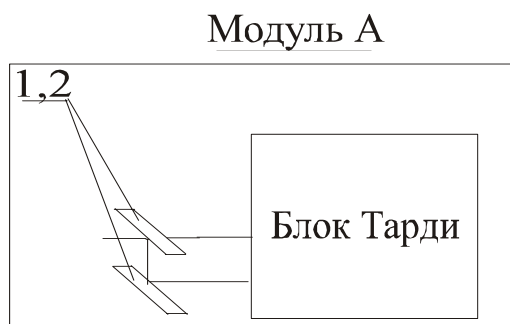


Рис. 4. Модуль А функциональной схемы ИИС

Модуль В, представленный на рисунке 5, содержит искомый модуль А, который введен в разрабатываемую схему с со светоделительными элементами 1 и 2, а также поляризационными элементами 3, 4 и 6 (см. рис. 3).

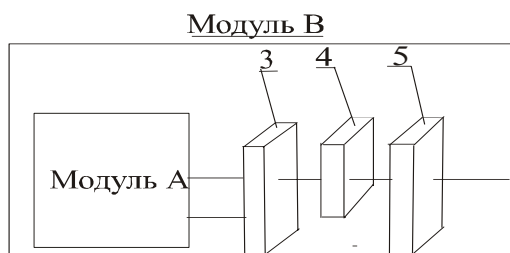


Рис. 5. Модуль В функциональной схемы ИИС

Модуль С, представленный на рис. 6, включает в себя модуль А и модуль В.

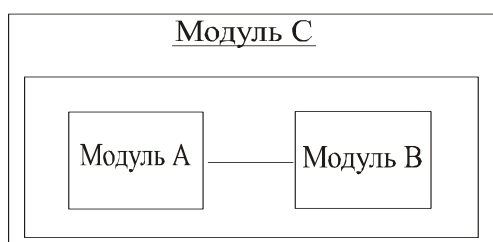


Рис. 6. Модуль С функциональной схемы ИИС

Модуль D содержит для всех рассмотренных вариантов ИИС фотоприемник ФП, блок таймера Т и блок управления БУ (рис. 7).

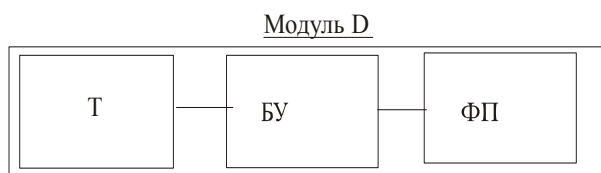


Рис. 7. Модуль D функциональной схемы ИИС

Модуль Е представляет собой информационно-управляющий модуль и содержит вычислительное устройство ВУ, аналого-цифровой преобразователь АЦП, оперативный блок запоминания вычислительного устройства БЗ ВУ, блок цифрочитающего устройства ЦПУ, графопостроитель ГП (рис. 8).

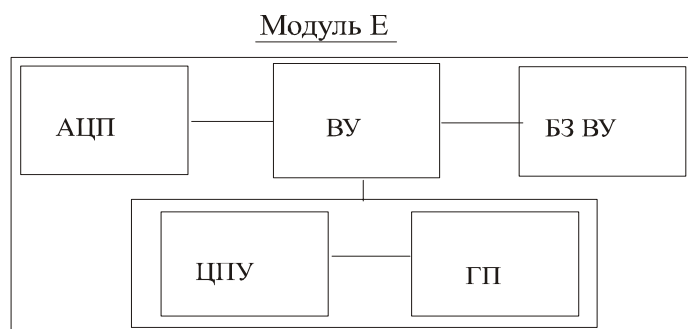


Рис. 8. Модуль Е функциональной схемы ИИС

Разработанная с учетом интегративно-конструктивных представлений обобщенная функциональная схема ИИС неразрушающего контроля жидкой бинарной среды с границей раздела, после первого этапа анализа приборов-аналогов, представлена в наиболее общем виде на рисунке 4, и включает в себя источник излучения – лазерный источник излучения, конструктивно – измерительный модуль, и информационно-управляющий модуль.

Таким образом, обобщенная функциональная модель ИИС включает в себя модули А, В, С, D и E (рис. 9).

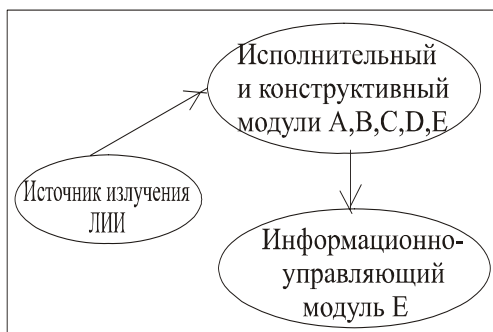


Рис. 9. Функциональная схема ИИС

Модель информационно-измерительной системы представлена на рис. 10. Разработанный вариант схемы ИИС содержит следующие элементы: 1 – источник излучения, 2 и 3 – светоделительные элементы (полупрозрачные зеркала), 4 – поляризатор (полуволновая пластина $\lambda/2$), 5 и 9 – двулучепреломляющие пластины из исландского шпата, 6 и 8 – четвертьчетвертьволновая пластина ($\lambda/4$), 7 – кювета диффузионная, 10 – третья четвертьволновая пластина ($\lambda/4$), 11 – полуволновая пластина ($\lambda/2$), 12 – компенсатор Сенармона, 13 – фотодиод, 14 – аналого-цифровой преобразователь, 15 – блок управления, 16 – блок оперативной памяти, 17 – таймер, 18 – процессор, 19 – ЦПУ (цифропечатающее устройство), 20 – самописец.

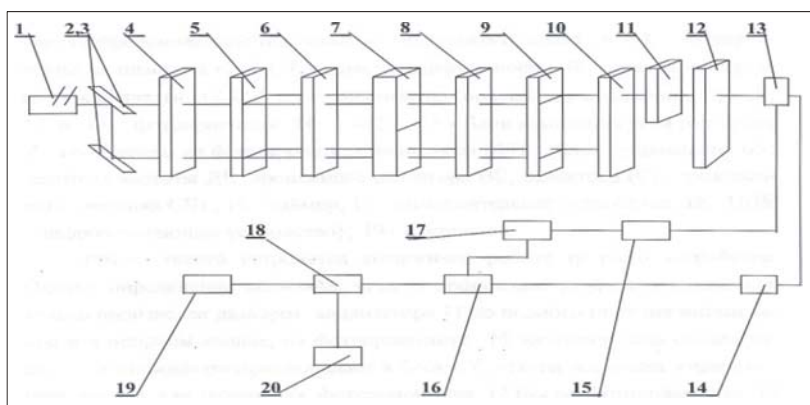


Рис. 10. Разработанный вариант схемы ИИС

Созданная с помощью модульного проектирования третья модель ИИС позволяет измерять величину разности фаз от разности углов поворота плоскостей поляризации в рабочем и опорном каналах. При этом за счет произведенного поворота с помощью поляризационного элемента 12 производится исключение дополнительной разности фаз, вносящей погрешность в измерение. Описание предложенного метода и созданной схемы приведено в [9].

Заключение

В результате проведенного параметрического анализа рассмотрены вопросы интеграции проектирования концептуальной модели ИИС для измерения параметров не-трансляционного переноса масс в сплошных средах, создана обобщенная функциональная модель информационно-измерительной системы для измерения и контроля величин массопереноса в жидкой бинарной среде с границей раздела.

Проведение параметрического анализа с помощью метода модульного проектирования в данной работе позволило разработать третий вариант модели ИИС для контроля параметров массопереноса, сформулированы интегративно-функциональные представления для автоматизации проектирования искомой унифицированной ИИС со значительным удешевлением ее реализации, столь необходимые для решения задач мониторинга параметров массопереноса сплошных сред.

Литература

1. Норенков И.П. Автоматизированное проектирование. М. Высшая школа, 2000.
2. Гатчин Ю.А, Коробейников А.Г., Немолочнов О.Ф, Падун Б.С. Информационные технологии в САПР. / Учебное пособие. СПб, 2003
3. Симоненко З.Г. Современные оптические методы исследования элементной базы электроники. / Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С.124–129.
4. Симоненко З.Г., Шмуйлович Г.А., Равдель А.А., Порай-Кошиц А.Б. Способ определения коэффициента молекулярной диффузии в жидкостях и устройство для его реализации. / Авторское свидетельство СССР. № 976307. // Бюллетень ОИ ПОТЗ, 1985.
5. Симоненко З.Г., Исследование параметров скорости массопереноса в жидких бинарных системах с границей раздела. // Материалы IV Международной научной конференции «Проблемы пространства, времени и движения». СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000. С. 22.
6. Симоненко З.Г. Плотников В.В., Ильина Л.П., Федоров В.Н., Мануйлов К.В. Теорема Остроградского и решение параболических уравнений. / Научная конференция «Петербургская математическая школа в период XIX века», посвященная 200-летию со дня рождения М.В. Остроградского. 24–28 сентября 2001г., С-Петербург.
7. Симоненко З.Г., Порай-Кошиц А.Б., Москалев В.А. Способ определения коэффициента молекулярной диффузии в жидкостях и устройство для его реализации. / Авторское свидетельство СССР. № 1349452. // Бюллетень ОИ ПОТЗ, 1987. № 45. С. 218.
8. Аззам Р, Башара Н.М, Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. С. 44.
9. Симоненко З.Г. Лазерные поляризационные интерферометры для измерения параметров массопереноса в жидких бинарных средах с границей раздела. / Автореферат дисс. к.т.н. СПб, 2000. 19 с.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И СОЗДАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО УЧЕБНО-НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦЕНТРА СПбГУ ИТМО - ОАО «ЛОМО» «ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ» (УНПЦ «ОТИС»)

Н.В. Никоноров, С.А. Козлов, В.О. Никифоров, Н.Р. Белашенков

Создан интегрированный учебно-научно-производственный центр СПбГУ ИТМО - ОАО «ЛОМО» «Оптические технологии и системы» (УНПЦ «ОТИС»), реализующий принцип целевой опережающей подготовки и переподготовки специалистов по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации и критическим технологиям, а также разрабатывающий и обеспечивающий коммерциализацию перспективных оптических технологий и систем. Разработана концепция УНПЦ «ОТИС», включающая установление и использование интегрированных горизонтально-ориентированных связей между субъектами образовательной, научной и производственной деятельности. Определены цели и задачи УНПЦ «ОТИС». Разработана модель взаимодействия СПбГУ ИТМО – ОАО «ЛОМО» и утверждено Положение об УНПЦ «ОТИС». Сформирован Координационный совет, структура и Центральная рабочая группа УНПЦ «ОТИС». Определены участники рабочей группы: от ОАО «ЛОМО» - ЦКБ и отдел маркетинга, от СПб ГУ ИТМО - кафедра системотехники оптических приборов и комплексов (базовая ОАО «ЛОМО»), факультет фотоники и оптоинформатики, факультет оптико-информационных систем и технологий, Инновационно-технологический центр, Центр трансфера технологий, НИИ «Оптоинформатика». Формирование УНПЦ «ОТИС» обеспечивается на основе комплекса двухсторонних взаимовыгодных соглашений по таким направлениям, как развитие научных исследований, обучение и подготовка инженерных и научных кадров, инновационная деятельность. Деятельность УНПЦ «ОТИС» организовывается путем координации целей и методов при сохранении индивидуального характера СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО». Разработан долгосрочный учебно-научно-организационный план развития УНПЦ «ОТИС» и программа коммерциализации наиболее перспективных («прорывных») научных достижений и разработок СПбГУ ИТМО и ОАО ЛОМО.

Введение

Актуальность. Радикальные изменения в мировой индустрии XXI века, несомненно, будут связаны с достижениями оптических технологий и систем, которые уже сейчас определяют как основную базу инновационных технологий в информатике, телекоммуникациях и других областях науки и техники. Благоприятные условия для создания оптического УНПЦ сложились за последнее время в системе образования, науки и производства г. Санкт-Петербурга, где в конце 2001 года Министерствами образования, промышленности, науки и технологий, а также Российским агентством по обычным вооружениям были приняты меры по организационному сближению оптических организаций – учебного СПбГУ ИТМО, научного ГОИ им. С.И. Вавилова и ОАО «ЛОМО» – обладающих высоким педагогическим, научным и производственным потенциалом в области оптических систем и технологий. Таким образом, создание интегрированного оптического УНПЦ «ОТИС» в Санкт-Петербурге является крайне актуальной и необходимой задачей. Оптическое направление деятельности интегрированного УНПЦ «ОТИС» совпадает с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники (информационно-телекоммуникационные системы, индустрия наносистем и материалы, безопасность и противодействие терроризму, перспективные вооружения, военная и специальная техника) и перечнем критических технологий Российской Федерации.

Цель работы. Разработка модели и создание интегрированного учебно-научно-производственного центра СПбГУ ИТМО – ОАО «ЛОМО» «Оптические технологии и системы» (УНПЦ «ОТИС»), реализующего принцип целевой опережающей подготовки и переподготовки специалистов по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации и критическим технологиям, а также разрабатывающего перспективные оптические технологии и системы и обеспечивающего их коммерциализацию.

Задачи:

- определение оптимальной модели взаимодействия СПбГУ ИТМО – ОАО «ЛОМО» для создания УНПЦ «ОТИС»;
- разработка концепции и структуры УНПЦ «ОТИС»;
- разработка долгосрочного учебно-научно-организационного плана развития УНПЦ «ОТИС»;
- разработка программы коммерциализации наиболее перспективных («прорывных») научных достижений и разработок СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО»;
- создание совместной группы стратегического планирования и анализа рынков оптических приборов и систем;
- создание научно-методических основ организации учебного процесса в УНПЦ «ОТИС» и разработка комплекса методических материалов и организационных мероприятий по привлечению студентов и молодых специалистов к научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам в рамках инновационных проектов, финансируемых совместно СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО».

1. Концепция, миссия, цель и задачи УНПЦ «ОТИС»

1.1. Концепция УНПЦ «ОТИС»

На современном этапе развития экономики РФ, в условиях оживления производственной деятельности, возрастает потребность в высококвалифицированных научных, инженерных и руководящих кадрах, отвечающих требованиям современной науки и производства. Вместе с тем, простое увеличение выпуска инженеров, бакалавров и магистров не решает проблему обеспечения научного и инженерно-технического сопровождения отечественного производства. Для обеспечения позитивных изменений в российской экономике требуется ускоренное внедрение в производство инноваций, современных и наукоемких технологий, высокотехнологичной продукции. Решение этих задач возможно при условии качественных изменений в подготовке научных, инженерных и технических кадров. Необходимыми условиями в подготовке кадров должно стать углубленное изучение фундаментальных и базовых дисциплин, развитие творческих и организационных навыков, способности ученых и инженеров работать в условиях рынка и мировой конкуренции.

Один из путей преодоления кадрового кризиса состоит в привлечении заинтересованных субъектов промышленного комплекса РФ к организации учебно-научных производственных центров (УНПЦ), включающих в свой состав филиалы кафедр университетов, научные лаборатории и т.п. УНПЦ позволяют решить ряд организационных проблем при организации учебных и производственных практик, предусмотренных государственным образовательным стандартом для инженерных специальностей и направлений подготовки бакалавров и магистров, осуществлять выполнение реальных курсовых и дипломных проектов, предусматривающих создание новых опытных образцов и технологий, решение задач организации инновационной деятельности. Создание УНПЦ на базе инженерного направления университетов позволяет координировать просветительскую, учебно-методическую, научную работу, развитие дистанционного и открытого образования, целевой подготовки специалистов, переподготовки и дополнительного обучения кадров, подготовки кадров высшей квалификации, внедрение высоких технологий и инновационных разработок в процесс обучения. Бывшие образовательные институты, а теперь университеты, обладают большим потенциалом для создания гибкой системы непрерывного образования, подготовки и переподготовки кадров, повышения квалификации, профессионального образования, в особенности для инновационной сферы, на основе технологий традиционного и дистанционного образования.

Для инновационной экономики характерны интегрированные формы организации как самого воспроизводства, так и отдельных его фаз. Не случайно в развитых странах значимой степенью взаимной интеграции отличается наука и производство, инновации и инвестиции, капиталовооруженность и производительность труда и т.д. Именно макроэкономическая интеграция составляет главную особенность всех тех «моделей», которые считаются наиболее передовыми по реальным результатам: франко-германской, китайской, американской и т.п.

Современная российская экономика, напротив, имеет низкий уровень интеграции. Вместо интеграции преобладают разобщенность и раздробленность: между добывающими и обрабатывающими комплексами промышленности, между предприятиями материального производства и банковским сектором, а также между образованием, наукой и производством.

Преодоление дезинтеграции воспроизводственных цепочек, восстановление их целостности, включение в них действенных научных звеньев, способных превращать достижения НИР и НИОКР в инновации, технологические инвестиции и основные передовые технологии – в этом состоит центральная задача современной государственной политики, ориентированной на конкурентоспособность и подъем национальной экономики.

Таким образом, в сложившейся экономической ситуации в России в настоящее время первостепенное значение приобретает решение проблемы интеграции университетов и отраслевых предприятий в целях обеспечения:

- подготовки специалистов современного профиля, адаптированных к актуальным проблемам развития соответствующей области науки, методам квалифицированной работы на современном научном, стендовом оборудовании, задачам и способам их решения по созданию новых видов наукоемкой продукции;
- предоставление студентам традиционных и качественно новых рабочих мест для проведения производственной практики, дипломного проектирования;
- более полного и эффективного использования научной, информационной, экспериментально-производственной и других составляющих располагаемого потенциала.

Интегрированный УНПЦ – это органическое соединение четырех ключевых компонентов: образовательных учреждений, научных институтов, производства и инновационных центров, занятых продвижением на рынок (коммерциализацией) наиболее перспективных научных достижений и разработок, причем роль последнего из компонентов в современных условиях России становится определяющей. Такая структура способна объединить студентов, преподавателей, ученых, производственников и бизнесменов. Это объединение происходит на базе взаимного интереса, так как оно одновременно позволяет повысить уровень и престиж науки и образования, омолодить научные и преподавательские кадры, укрепить связь разработчиков наукоемкой продукции с ее потребителями, обеспечить востребованность молодых специалистов в ключевых областях отечественной экономики и поднять материальный уровень вовлеченных в процесс сторон. Таким образом, создание таких интегрированных центров в России является крайне важной задачей.

Благоприятные условия для создания оптического УНПЦ сложились за последнее время в системе образования, науки и производства г. Санкт-Петербурга, где в конце 2001 года Министерствами образования, промышленности, науки и технологий, а также Российским агентством по обычным вооружениям были приняты меры по организационному сближению оптических организаций – учебного СПб ГУ ИТМО, научного ГОИ им. С.И. Вавилова и ОАО «ЛОМО» – обладающих высоким педагогическим, научным и производственным потенциалом в области оптических систем и технологий. Таким образом, создание интегрированного оптического УНПЦ «ОТИС» в

Санкт-Петербурге является крайне актуальной и необходимой задачей. Оптическое направление деятельности интегрированного УНПЦ «ОТИС» совпадает с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники (информационно-телекоммуникационные системы, индустрия наносистем и материалы, безопасность и противодействие терроризму, перспективные вооружения, военная и специальная техника) и перечнем критических технологий Российской Федерации.

1.2. Миссия, цель и задачи УНПЦ «ОТИС»

Миссия УНПЦ «ОТИС». УНПЦ «ОТИС» – это структура, объединяющая студентов, преподавателей, ученых, производителей и бизнесменов, позволяющая повысить уровень и престиж оптической науки и образования, омолодить научные и преподавательские кадры, укрепить связь разработчиков наукоемкой оптической продукции с ее потребителями, обеспечить востребованность молодых специалистов в области оптических технологий и систем и поднять материальный уровень вовлеченных в процесс сторон, создать механизмы изменения вектора развития экономики Российской Федерации в сторону экономики знаний, разработать эффективные стратегии коммерциализации научно-технических разработок.

Цель УНПЦ «ОТИС»

- Основной целью организации УНПЦ «ОТИС» является создание интегрированной системы целевой подготовки инженерных и научных кадров для промышленных предприятий, организаций и научных учреждений, работающих в области оптических и информационных технологий по Федеральной целевой научно-технической программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники».
- Решение комплексной задачи создания и поддержки деятельности системы эффективного использования научного, производственного и педагогического потенциала организаций-участников в области развития совместных фундаментальных исследований и обеспечения науки и производства с образовательным процессом.

Основные задачи УНПЦ «ОТИС»

- Научно-методическое, нормативно-правовое и организационно-экономическое обеспечение целевой подготовки инженерно-технических и научных кадров для промышленных предприятий, организаций и научных учреждений, работающих в области оптических и информационных технологий по Федеральной целевой научно-технической программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники».
- Формирование перечня направлений и специальностей высшего профессионального образования и контингента студентов соответствующего профиля обучения для организации их целевой подготовки.
- Формирование перечня направлений диссертационных исследований в области оптических и информационных технологий, формирование контингента аспирантов и соискателей для организации их целевой подготовки в вузовских и отраслевых аспирантурах.
- Организация мониторинга кадрового обеспечения по оптическим и информационным технологиям.
- Создание современных образовательных программ по специальностям в области оптических и информационных технологий.
- Создание баз данных в области оптических и информационных технологий для дальнейшего совершенствования их инфраструктуры.

2. Модель взаимодействия СПбГУ ИТМО - ОАО «ЛОМО» и структура УНПЦ «ОТИС»

2.1. Модель взаимодействия СПбГУ ИТМО - ОАО «ЛОМО»

При функционально-целевом подходе к организационному сближению образовательных, научных и производственных учреждений с разной правовой формой для большинства интеграционных процессов не требуется юридических действий в виде слияния и на этой основе организации единого юридического лица. Формирование УНПЦ «ОТИС» будет обеспечиваться на первом этапе на основе комплекса взаимовыгодных двухсторонних соглашений по таким направлениям, как развитие научных исследований, обучение и подготовка инженерных и научных кадров, инновационная деятельность. Совместная деятельность будет организовываться путем координации целей и методов при сохранении их индивидуального характера на каждом предприятии или учреждении (ОАО «ЛОМО», базовая кафедра «ЛОМО», ИТЦ, ЦТТ, НИИ «Оптоинформатика», факультет фотоники и оптоинформатики).

Особую роль в активном продвижении процессов организационного сближения призваны играть Координационный совет и Центральная рабочая группа. Главной задачей Координационного совета и Центральной рабочей группы является формирование единых целей и задач развития оптического направления, а также определение путей их реализации.

Приоритетным направлением деятельности УНПЦ «ОТИС» будет являться подготовка квалифицированных кадров для предприятий Северо-Западного ФО в сфере оптических и информационных технологий. Вспомогательными направлениями работы УНПЦ «ОТИС» будут научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, выполняемые в рамках государственных заказов, совместных с промышленностью проектов, а также инициативные проекты, обладающие высоким инновационным потенциалом и представляющие интерес для инвесторов, включая иностранные компании и фонды. При этом модель деятельности УНПЦ предусматривает широкие возможности интеграции ведущих специалистов в области современного оптического производства в лице сотрудников ОАО «ЛОМО» в образовательные программы СПбГУ ИТМО, их участие в формировании учебных программ подготовки студентов, разработки новых курсов и лабораторных практикумов.

2.2. Структура УНПЦ

На начальном этапе создания УНПЦ сформирован Координационный совет и Центральная рабочая группа.

Общее руководство деятельностью УНПЦ «ОТИС» осуществляется Координационным советом, в состав которого входят руководители, ведущие ученые и профессорско-преподавательский состав СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО». Конкретный состав Координационного совета определяется на совместном организационном собрании руководителей организаций-участников. Координационный совет возглавляют два сопредседателя:

- ректор СПбГУ ИТМО профессор В.Н. Васильев, являющийся Председателем межведомственного совета по развитию оптического приборостроения, а также Председателем Совета ректоров вузов г. Санкт-Петербурга;
- генеральный директор ОАО «ЛОМО» Аронов А.М.

Оперативное руководство работой УНПЦ «ОТИС» осуществляется Центральной рабочей группой, состав которой определяется совместным приказом руководителей организаций-участников. Центральную рабочую группу возглавляет проректор СПбГУ ИТМО профессор В.О. Никифоров, являющийся одновременно техническим директором ОАО «ЛОМО». Центральной рабочей группой разрабатывается проект Положения об УНПЦ «ОТИС».

В состав УНПЦ «ОТИС» входит Координационный совет, Центральная рабочая группа, представляющая 8 подразделений (рис.1).

От ОАО «ЛОМО»:

- ЦКБ и отдел маркетинга (ОМ).

От СПб ГУ ИТМО:

- кафедра системотехники оптических приборов и комплексов – базовая кафедра ОАО «ЛОМО» (КСОПК); факультет фотоники и оптоинформатики (ФФиО); факультет оптико-информационных систем и технологий (ФОИСТ); Инновационно-технологический центр (ИТЦ); Центр трансфера технологий (ЦТТ); НИИ «Оптоинформатика»(НИИО).

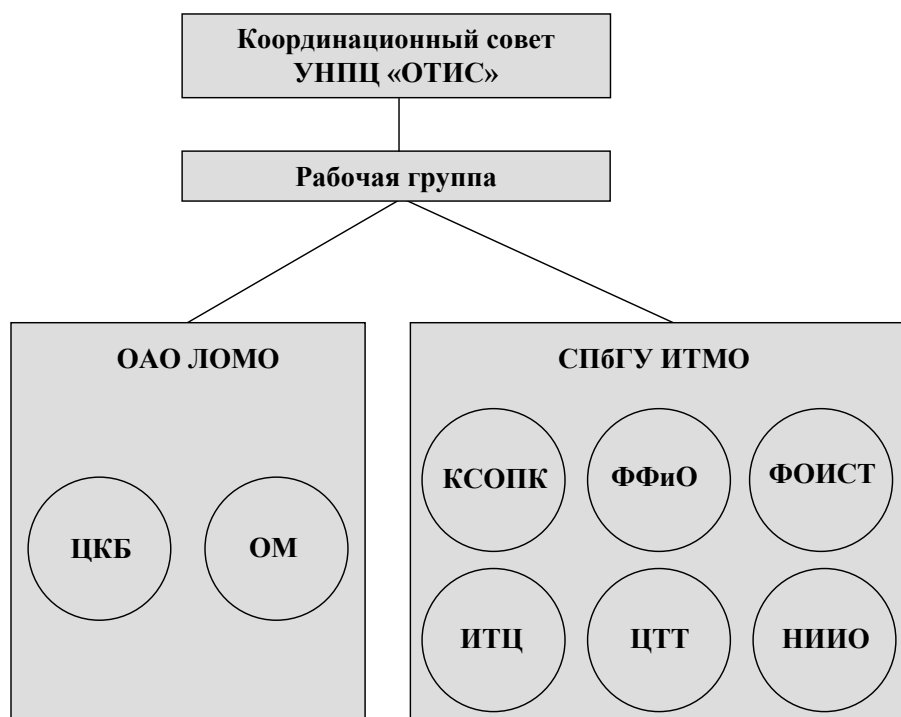


Рис. 1. Центральная рабочая группа УНПЦ «ОТИС»

3. Организации-участники, входящие в состав УНПЦ «ОТИС»

3.1. Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) на сегодняшний день является мировым лидером в области информационных и оптических технологий (интернет-ресурсы университета представлены на портале вуза: <http://www.ifmo.ru/>).

Университет как высшее профессиональное учебное заведение ведет свою историю с 1900 года, когда решением Государственного совета Российской империи в Санкт-Петербурге было создано особое механико-оптическое и часовое отделение Ремесленного училища цесаревича Николая. Дальнейшее развитие этого учебного заведения соответствовало развитию нашего государства в целом и российского профессионального образования, в частности.

В 1917–1920 гг. путем ряда последовательных преобразований был создан Ленинградский техникум точной механики и оптики. В 1925 г. техникум получил право подготовки и выпуска специалистов с высшим образованием. Первый выпуск инженеров точной механики и оптики состоялся в 1930 г.

В 1930 г. был создан Учебный комбинат точной механики и оптики, в состав которого входил Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО). В 1933 г. ЛИТМО выделился в самостоятельное учебное заведение. В своей дальнейшей многогранной деятельности ЛИТМО сформировал ряд всемирно-известных научно-педагогических школ, подготовил около 50 тысяч специалистов, работавших и работающих в различных областях науки и техники России, ближнего и дальнего зарубежья.

В 1994 г. институт по итогам государственной аттестации получил статус университета и название Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (технический университет). В 2003 г. по результатам государственной аккредитации вуз был переименован в Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики.

В университете в соответствии с Государственным образовательным стандартом России реализуется многоуровневая система высшего профессионального образования: бакалавр наук – 4 года, дипломированный специалист – 5,5 лет, магистр наук – 6 лет обучения. Учебные планы подготовки позволяют студентам в процессе обучения выбирать уровень подготовки. При этом вся система подготовки в университете нацелена на то, чтобы выпускники вуза были востребованы.

На дневном отделении обучаются более 8 тысяч студентов. В университете работают более 700 преподавателей, из них более 500 докторов и кандидатов наук. Профессиональная подготовка ведется по 33 образовательным программам высшего профессионального образования.

Дневное отделение университета составляют 8 факультетов: инженерно-физический, информационных технологий и программирования, компьютерных технологий и управления, оптико-информационных систем и технологий, фотоники и оптоинформатики, точной механики и технологий, естественнонаучный и гуманитарный. В состав факультетов входят 49 кафедр (из них 26 – выпускающих). В институтах РАН и на предприятиях города университет имеет 8 базовых кафедр.

Существенную долю в образовательных программах высшего профессионального образования в университете занимает подготовка специалистов в области оптической науки и техники. Университет выпускает инженеров по 22 специализациям и специальностям, (например, «Оптико-электронные приборы и системы», «Оптические технологии и материалы», «Лазерная техника и лазерные технологии»), а также бакалавров и магистров по направлениям «Оптехника» и «Фотоника и оптоинформатика».

Университет возглавляет с 1988 г. Учебно-методическое объединение (УМО) Минобразования России по оптическому и приборостроительному образованию. Ректор университета, доктор технических наук, профессор В.Н.Васильев является председателем Совета УМО по оптическому и приборостроительному образованию. В состав УМО входят более 70 вузов и ведущих профильных предприятий России и ближнего зарубежья, среди которых Санкт-Петербургский государственный технический университет, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Московский государственный университет геодезии и картографии, Московский энергетический институт (технический университет), МАТИ – Российский государственный технологический университет, Новосибирский государственный технический университет, Самарский государственный технический университет и другие. Более подробная информация о деятельности УМО представлена в Интернет по адресу: <http://www.umo.ifmo.ru/>.

В соответствии с приказами Минобразования и науки России университет в течение многих лет проводит открытый конкурс на лучшую научную работу студентов по естественным, техническим, гуманитарным наукам в высших учебных заведениях России (раздел «Оптико-электронные приборы и системы, оптические и лазерные технологии») и конкурс выпускных работ по оптическим специальностям и направлениям. Ежегодно в них участвуют работы студентов многих университетов Москвы, Санкт-Петербурга, Томска, Новосибирска, Хабаровска и других городов. Лучшие работы этих конкурсов рекомендуются для участия в Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика», традиционно проводимой в Санкт-Петербурге.

3.2. Открытое акционерное общество «ЛОМО»

Предприятие хорошо известно в России и за рубежом как крупнейшая российская компания, занимающаяся производством и реализацией оптико-механических и оптико-электронных приборов. Деятельность «ЛОМО» охватывает и такие направления, как производство спектральных приборов, безопасных для глаз лазеров, специальной техники для армии, авиации, флота и космоса.

Основанное в 1914 г., предприятие стало первым в стране производителем оптики и на начальном этапе выпускало продукцию для российской армии. В 1993 г. «ЛОМО» было приватизировано и сейчас представляет собой предприятие со 100% частным капиталом, владельцами которого являются более 16.000 акционеров. На «ЛОМО» работает около 6,5 тысяч сотрудников. Предприятие производит приблизительно 150 видов продукции. Примерно 50% объема продаж компании составляют экспортные поставки в США, Канаду, Германию, Австрию, Израиль и другие страны. «ЛОМО» имеет сертификаты, подтверждающие соответствие системы качества предприятия международному стандарту ISO 9001 от всемирно известной компании ТЮФ (Германия) по гражданской продукции и от фирмы «Оборонсертифика» по продукции оборонного назначения.

В настоящее время модернизация технологических процессов, поиск путей импортозамещения, снижение себестоимости выпускаемых изделий и повышение их качества являются приоритетными направлениями развития ОАО «ЛОМО». Внедрение и развитие инновационного комплекса, включающего ряд малых дочерних предприятий ОАО «ЛОМО», способствует ускорению коммерциализации новых идей и повышению их экономической эффективности.

«ЛОМО» и УИТМО уже долгие годы связывает крепкая дружба, прочные партнерские отношения. Многие выпускники вуза приходят работать на петербургскую оптическую фирму, а специалисты предприятия принимают большое участие в подготовке кадров молодых ученых – ведут преподавательскую работу в УИТМО, помогают студентам в процессе их научных исследований. «ЛОМО» намерено и дальше укреплять плодотворное и взаимовыгодное сотрудничество с научными школами города, уделяя особое внимание поддержке молодых ученых.

В конце ноября 2002 г. на ОАО «ЛОМО» состоялась церемония присуждения именных стипендий фирмы студентам Технического университета ИТМО. Конкурс на получение именных стипендий проводится предприятием уже третий год подряд. Они назначаются дирекцией «ЛОМО» тем студентам, которые достигли определенных успехов в учебной, научно-производственной и общественной работе. В этом году двум представителям УИТМО присуждена стипендия им. М.П. Панфилова (первый генеральный директор «ЛОМО») и еще двум - стипендия ОАО «ЛОМО».

Привлечение молодых специалистов – выпускников ИТМО к решению производственных задач ОАО «ЛОМО» осуществляется на основе соглашения, предусматривающего участие студентов и аспирантов выпускающих оптических кафедр Университета в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, выполняе-

мых в рамках целевого бюджетного финансирования по направлениям, представляющим практический интерес.

4. Мероприятия и реальные шаги интеграции СПбГУ ИТМО – ОАО «ЛОМО»

За отчетный период сделано несколько реальных шагов по пути глубокой интеграции СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО» с целью создания УНПЦ «ОТИС».

- Подписано соглашение между СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО» о создании УНПЦ «ОТИС».
- Разработана концепция УНПЦ «ОТИС», определены цели и задачи УНПЦ «ОТИС», разработана модель взаимодействия СПбГУ ИТМО – ОАО «ЛОМО» и сформирована структура УНПЦ «ОТИС».
- Создан Координационный совет УНПЦ «ОТИС», возглавляемый двумя сопредседателями – ректором СПбГУ ИТМО Васильевым В.Н. и генеральным директором ОАО «ЛОМО» Ароновым А.М.
- Сформирована Центральная рабочая группа по интеграции СПбГУ ИТМО – ОАО «ЛОМО», представляющая 10 подразделений:
 - от ОАО «ЛОМО»: СКБ-09, СКБ-14, СКБ-17 и отдел маркетинга,
 - от СПб ГУ ИТМО: кафедра системотехники оптических приборов и комплексов (базовая кафедра ОАО «ЛОМО»), факультет фотоники и оптоинформатики, факультет оптико-информационных систем и технологий, Инновационно-технологический центр, Центр трансфера технологий, НИИ «Оптоинформатика».
- разработано и утверждено Положение об УНПЦ «ОТИС».
- проведен ряд совместных научно-технических, инновационных и образовательных проектов (например, НИР: «Исследование путей модернизации продукции «ЛОМО» на базе современных оптико-электронных и цифровых технологий», НИР: «Подготовка совместной программы коммерциализации научных достижений и разработок СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО»);
- организован новый факультет фотоники и оптоинформатики. Этот факультет интегрирован в структуру ВЦ ГОИ им. С.И. Вавилова. Планируется его интеграция в структуру ОАО «ЛОМО»;
- создан новый НИИ «Оптоинформатика» при СПбГУ ИТМО. Планируется, что в 2006 г. новый НИИ будет интегрирован в структуру ОАО «ЛОМО» и ВЦ ГОИ им. С.И. Вавилова;
- совместно с ОАО «ЛОМО» и ВЦ ГОИ им. С.И. Вавилова проведен ряд научных, научно-методических конференций:
 - II Межвузовская конференция молодых учёных (март 2005),
 - «Телематика» (май 2005),
 - Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике (ICONO/LAT) (май 2005),
 - Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика -2005» (октябрь 2005 г.).
- Принято участие в работе «Круглого стола» на тему «Интеграция науки и образования как необходимое условие инновационного развития экономики России» в рамках девятого Петербургского международного экономического форума (июнь 2005).
- Сформирована Межотраслевая Программа «Фотоника и оптоинформатика» на 2004–2007 гг. (см. Приложение). Программа разработана с учетом и на основе одобренных Правительством Российской Федерации приоритетов и критериев формирования межотраслевых программ, предлагаемых к финансированию за

счет средств Федерального бюджета, региональных и собственных средств организаций.

- В рамках «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» сформирована Подпрограмма коммерциализация инновационных проектов «СТАРТ-ЛОМО».
- 7 компаний оптического профиля (ООО «ЛОМО ФОТОНИКА», ЗАО «Премьер Технолоджи», ЗАО «УНП Лазерный Центр ИТМО», ЗАО «Системо Техника», ЗАО «А.Б.С. Патент», ООО «СтартИнТех», ООО «НВ СТАРТ») приняли декларации о присоединении к программе УНПЦ «ОТИС». Они заявили о своей заинтересованности в результатах деятельности УНПЦ «ОТИС», а также о согласии и готовности:
 - содействовать осуществлению практической подготовки студентов СПбГУ ИТМО по профильным специальностям силами своих сотрудников по согласованным учебным планам и программам;
 - обеспечивать возможность участия студентов СПбГУ ИТМО в работе своих научных подразделений и способствовать формированию у них навыков работы на современном оборудовании и по современным технологиям.
- Принято Положение об экспертах ОАО «ЛОМО» по перспективным научно-техническим направлениям. Сотрудники СПбГУ ИТМО введены в экспертную группу и научно-технический совет ЦКБ ОАО «ЛОМО». Совместно с экспертами проведено 2 семинара и 3 научно-технических совета ОАО «ЛОМО» по перспективным направлениям – «Лазерная техника» и «Микроскопия». Результатом такого взаимодействия стало создание нового совместного конкурентоспособного продукта – «Микровизор».
- Проведен конкурс именных стипендий, учрежденных ОАО «ЛОМО». Назначены на стипендию имени М.П. Панфилова 5 студентов СПбГУ ИТМО:
 - Богатинский Е., студент гр. 5314, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
 - Лазарева Е., студентка гр.5314, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
 - Слутовский С., студент гр.5314, кафедра системотехники оптических приборов и комплексов;
 - Авсянникова Н., студентка гр.6301, кафедра прикладной и компьютерной оптики;
 - Струтинская Ю., студентка гр.6323, кафедра системотехники оптических приборов и комплексов

5. Долгосрочный учебно-научно-организационный план развития УНПЦ «ОТИС»

Исходя из целей УНПЦ «ОТИС», можно сформулировать стратегические задачи и долгосрочный учебно-научно-организационный план развития:

- научно-методическое, нормативно-правовое и организационно-экономическое обеспечение целевой подготовки инженерно-технических и научных кадров для промышленных предприятий, организаций и научных учреждений, работающих в области оптических и информационных технологий по Федеральной целевой научно-технической программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники»;
- формирование перечня направлений и специальностей высшего профессионального образования и контингента студентов соответствующего профиля обучения для организации их целевой подготовки;

- формирование перечня направлений диссертационных исследований в области оптических и информационных технологий, формирование контингента аспирантов и соискателей для организации их целевой подготовки в вузовских и отраслевых аспирантурах;
- организация мониторинга кадрового обеспечения по оптическим и информационным технологиям;
- создание современных образовательных программ по специальностям в области оптических и информационных технологий;
- создание баз данных в области оптических и информационных технологий для дальнейшего совершенствования их инфраструктуры;
- координация просветительской, учебно-методической, научной работы;
- развитие дистанционного и открытого образования,
- целевая подготовка специалистов, переподготовка и дополнительное обучение кадров, подготовка кадров высшей квалификации, повышение качества подготовки специалистов путем активного использования результатов научных исследований и разработок в учебном процессе, широкого привлечения студентов к их выполнению;
- внедрение высоких технологий и инновационных разработок в процесс обучения;
- целенаправленное использование научного потенциала для решения задач обновления производства и проведения социально-экономических преобразований в регионе;
- освоение, развитие и использование инновационных проектов с целью ускорения формирования рынка наукоемкой научно-технической продукции и интеллектуальной собственности;
- опережающее развитие фундаментальных исследований для создания и освоения новых технологий, укрепления лидирующего положения вузовской науки по основным направлениям вуза;
- защита интеллектуальной собственности и авторских прав исследователей и разработчиков как основы укрепления и развития вузовской науки;
- создание собственной производственной базы в виде опытных производств (участков) с целью эффективной реализации разрабатываемых технологий, а также материальной поддержки сотрудников университета, аспирантов и студентов.

6. Программа коммерциализации «прорывных» научных достижений и разработок СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО»

В документе «Основы политики Российской Федерации в области развития науки и технологии на период до 2010 года и дальнейшую перспективу» поставлены две взаимосвязанные стратегические задачи – обеспечить переход к инновационному пути развития страны и формирование национальной инновационной системы, создающей благоприятные условия для продвижения новых технологий в производстве, развитие венчурного финансирования инновационных проектов и объектов инновационной инфраструктуры.

Для реализации этих стратегических задач необходимо выработать эффективную стратегию инновационной деятельности УНПЦ «ОТИС», отвечающую современным экономическим условиям. Основы этой стратегии можно свести к следующим положениям.

1. Инновации являются фундаментом экономического развития, обеспечения экономического роста, повышения эффективности воспроизводства, расширения ассортимента и повышения качества продукции. Снижение инновационной активности свидетельствует о застое и ведет к технологическому и экономическому кризису, падению конкурентоспособности продукции. Поэтому одна из важнейших задач – создание максимально благоприятных условий для инновационной деятельности и непосредственное участие в реализации базисных инноваций.

2. На рубеже XXI века в мире развернулся глубочайший научно-технологический переворот, суть которого – в становлении индустриального технологического способа производства и адекватного ему шестого технологического уклада, который будет определять условия эффективности, качества и конкурентоспособности на мировом рынке и в национальных отношениях в 20–50-е гг. наступившего столетия. Для России этот переход начался с наиболее неблагоприятных стартовых позиций, удельный вес отечественных производителей товаров и услуг на мировом и внутреннем рынках сократился в два и более раз, многократно уменьшилось число инноваций. Поэтому в первую очередь необходимо преодолеть негативные тенденции, сделать реальный поворот к стратегии научно-технологического прорыва.

3. Суть инновации – в освоении новейших научно-технических достижений и незамедлительной их коммерциализации. Наиболее привержена инновациям молодежь, однако наблюдается значительное постарение кадрового потенциала, многократное сокращение притока в науку талантливой молодежи, миграции за рубеж значительной ее части. Если эти тенденции сохранятся еще несколько лет, процесс разрушения научно-технического потенциала может стать необратимым. В то же время возможности исследований в университетах, обладающих естественным притоком молодых пытливых умов и талантов, используются совершенно недостаточно. Поэтому одна из главных стратегических задач УНПЦ «ОТИС» – на основе использования образовательных ресурсов привлечь к инновационной деятельности молодых ученых, специалистов, создать новое поколение интеллектуальных менеджеров и коммерсантов.

4. Стратегия инновационной деятельности УНПЦ должна опираться на долгосрочные, периодически обновляемые прогнозы научно-технического развития, рынка и реализовываться в научно-технических и инновационных целевых программах. Поэтому необходимо сосредоточить усилия на реализации узкого круга стратегических приоритетов, определенных аналитиками развития науки, техники и бизнеса.

При формировании стратегических приоритетов инновационной деятельности УНПЦ на долгосрочную перспективу необходимо опираться на следующие методологические принципы.

1. Стратегические приоритеты инновационной деятельности должны, прежде всего, учитывать общие закономерности научно-технического развития мирового сообщества. В настоящее время осуществляется переход от пятого технологического уклада, связанного с широким использованием компьютерной техники и технологий, к шестому технологическому укладу, в котором обеспечивается непрерывное совершенствование изделий и продуктов на всех этапах их жизненного цикла – от научного обоснования до утилизации использованных экземпляров. Стратегические приоритеты УНПЦ должны учитывать указанные закономерности научно-технического развития в мире, поскольку научные и конструкторские исследования, не вписывающиеся в общую научно-техническую направленность мирового развития, обречены на провал.

2. Вторым принципиальным фактором, который следует учитывать при формировании инновационной деятельности – наличие заделов в приоритетных фундаментальных исследованиях, конструкторских разработках. Основной причиной падения уровня научных исследований в России стало резкое сокращение их финансирования, лишившее научные коллективы возможности приобретать оборудование и материалы, необходи-

мые для постановки и осуществления новых научных экспериментов. Уровень исследований удержался преимущественно в теоретических областях, не требовавших значительных финансовых затрат: математике, теоретической физике, лингвистике, программировании и некоторых других. Однако именно эти направления фундаментальных исследований в настоящее время наиболее востребованы в мире, что свидетельствует о неэффективном использовании созданного задела. Соответственно, приоритеты УНПЦ должны быть отданы областям с наибольшим заделом.

3. Третий важнейший методологический принцип формирования приоритетов инновационно-технологического развития – оценка возможности использования существующей и вновь создаваемой научно-технологической базы для проведения прикладных исследований на прорывных научных направлениях. Отмеченные выше приоритетные направления фундаментальных исследований не требуют больших капитальных и текущих затрат. Однако для их реализации в производственных технологиях потребуются разработка новой техники и новых материалов, подготовка соответствующих кадров. Должен быть оценен инновационный потенциал создания новых продуктов и технологических процессов, по возможности проведен сравнительный анализ технических и функциональных характеристик разрабатываемых в стране продуктов с зарубежными аналогами, создаваемыми промышленно развитыми странами.

4. Четвертый принцип: формирование приоритетов инновационно-технологического развития должно осуществляться с учетом возможных размеров сегмента внутреннего и внешнего рынков продукции. В этих целях необходимо составить долгосрочный прогноз географического распространения технологических процессов, лежащих в основе второй и третьей стадии шестого технологического уклада, оценить место продуктов и процессов, разрабатываемых в России, в этих технологических процессах, а также наличие возможных конкурентов на мировом рынке этих продуктов и процессов.

5. Последний по месту, но не по значению методологический принцип определения стратегических приоритетов инновационно-технологического развития – возможность финансового обеспечения реализации всей технологической цепочки создания продуктов и соответствующих производственных мощностей. Для финансового обеспечения стратегических приоритетов инновационного технологического развития должны привлекаться как отечественный, так и зарубежный частный капитал, а также государственные ресурсы. Последние следует использовать, прежде всего, для поддержки фундаментальных исследований на приоритетных направлениях стратегии инновационно-технологического развития, для расшивки узких мест, связанных с неопределенностью эффективности в далекой перспективе приоритетных прикладных исследований, а также для формирования государственного заказа на продукцию приоритетных технологий, обеспечивающую безопасность страны.

Частный капитал инвестируется в технологии, по которым прозрачна перспективная эффективность вложений. Поэтому частным инвесторам должна быть предоставлена прогнозная информация о возможном ареале распространения инновационных продуктов и технологий, о предполагаемой структуре затрат на их воспроизводство и о возможной эффективности производства, а иностранному инвестору – дополнительно – также информация о государственных гарантиях по защите иностранного капитала.

Формирование системы критериев оценки относительной перспективности основных направлений инновационно-технологической стратегии УНПЦ имеет целью обеспечить максимальную реализацию имеющихся фундаментальных, изобретательских и конверсионных заделов.

Принцип критической проверки. Подход, базирующийся на этом принципе, состоит в отказе от априорной апелляции к догмам и недопущении догматизации в решении научных задач. Согласно этой концепции, в контексте обоснования того или иного

научного утверждения речь идет не о его априорном признании или столь же априорном отбрасывании, а о критическом исследовании и проверке.

Важное преимущество метода критической проверки состоит в том, что с его помощью можно значительно расширить поле научного поиска перспективных научных направлений, которые могут реализоваться в базисных инновациях.

Экспериментальная обоснованность инновационно-технологических проектов. Принцип надежного экспериментального обоснования играет ключевую роль при оценке перспективности альтернативных научно-технологических направлений. Известны многочисленные примеры грубых ошибок в определении перспектив многих технологических инноваций, допущенных самыми авторитетными специалистами. Например, в 1977 г. президент корпорации Digital Equipment К. Олсон заявил, что не существует причин, по которым кто-то захочет иметь дома компьютер, а в 1981 г. появилась фирма Apple. Подобные ошибки обусловлены, главным образом, тремя причинами. Во-первых, это твердая уверенность их авторов в догматах усвоенной ими научной парадигмы, неспособность заглянуть за ее пределы. Во-вторых, это следование жестким принципам классической рациональности. Третий источник ошибочных прогнозов состоит в недоверии к эксперименту.

Критерии приоритетов инновационно-технологической стратегии. Методология определения приоритетов варьируется в зависимости от того, к какому классу направлений относятся рассматриваемые инновационные проекты – фундаментальные исследования, изобретательские предложения или конверсионные заделы. Отличие фундаментальной научной работы от всех прочих научных исследований – это ее базовое значение для широкого круга принципиально новых инновационных технологий. Именно фундаментальные научные достижения служат теоретической основой научно-технологического прорыва и смены технологических укладов.

Иной подход необходимо использовать при ранжировании инновационных изобретений. Для решения этой задачи может быть использован системный комплекс критериев относительной ценности проектов:

1. техническая новизна;
2. приоритетность, или сопоставление с альтернативными решениями;
3. практическое значение;
4. экономическая эффективность;
5. техническая безопасность;
6. надежность;
7. экономическая совместимость.

Следует подчеркнуть, что комплекс этих критериев носит целостный, системный характер, а потому, если по какому-либо из указанных критериев для того или иного предложения выполнить оценку невозможно, то рассмотрение этого предложения целесообразно отложить. Систему инновационных критериев можно перевести на количественный уровень определения относительной ценности инновационных проектов. Для этой цели пригоден способ, основанный на составлении альтернативных уточняющих вопросов по каждому из перечисленных критериев.

Оценка приоритетов инновационно-технологической стратегии в области конверсионного задела осуществляется с помощью третьего варианта системной методологии. Решающими критериями в этом случае являются:

- возможность решения задач двойного назначения (повышения обороноспособности страны и народнохозяйственная нацеленность);
- степень завершенности работы;
- конкурентоспособность на мировом и внутреннем рынке;
- готовность производственно-технологической базы к проведению проекта в жизнь;

– наличие дополнительных источников финансирования со стороны заинтересованных спонсоров.

Условия реализации фундаментальных, изобретательских и конверсионных заделов. 30 марта 2002 г. Президент В.В. Путин утвердил «Основы политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2010 г. и дальнейшую перспективу». В этом документе развитие науки отнесено к числу высших приоритетов России и отмечена базовая роль отечественной фундаментальной науки, имеющей признанные научные школы и достижения мирового уровня, а также развитую систему высшего образования. Этот документ может приобрести основополагающее значение для развития в России науки как базы для технологического прорыва к историческому этапу постиндустриальной трансформации. В качестве следующего, решающего шага необходим переход от ориентации на сырьевые отрасли к поддержке инновационным наукоёмких технологий.

Согласно мировой статистике, для нормального развития научных исследований в стране на них необходимо выделять не менее 4% ВВП, в противном случае начнутся необратимые процессы свертывания и распада научной деятельности. В России финансирование науки отстает от этого критического показателя в два раза. Кроме того, основная часть этих денег выделяется Российской академии наук, хотя в Советском Союзе большинство инновационно-технологических разработок выполнялось предприятиями отраслевой науки, а не менее половины докторов наук – базового костяка научных исследований – трудилось в системе высшей школы. Перераспределение сильно оскудевших финансовых средств поддержки науки главным образом в пользу РАН ведет, очевидно, к недоиспользованию того новаторского научно-технологического потенциала, которым обладает страна. При этом следует иметь в виду, что многие научные центры, как находящиеся в системе РАН, так и относящиеся к отраслям народного хозяйства и к высшим учебным заведениям, нуждаются даже не столько в прямой финансовой поддержке, сколько в продуманной системе преференций (льготы по налогообложению, по оплате энергоресурсов, по льготному растаможиванию приборов и экспериментального оборудования, по льготам для независимых спонсоров, готовых к финансовой поддержке научных исследований и др.).

На основе приведенных выше критериев выбора стратегических приоритетов произведен отбор научно-технологических приоритетов и реализующих их критических технологий для УНПЦ «ОТИС» из числа приоритетных направлений, определенных правительством России.

Основу научно-технологического и инновационного прорыва составляют фундаментальные исследования межотраслевого характера и долгосрочные прогнозы, разработку которых должны осуществлять ученые. Приоритетное значение при этом имеют исследования, которые занимают ключевое место в постиндустриальной научной парадигме, разработка фундаментальных основ ведущих направлений шестого ТУ.

Инновационную деятельность предполагается вести в области новейших оптоинформационных технологий и систем фотоники и оптоинформатики, эффективных систем программирования и моделирования, создания информационных систем в областях образования, науки и т.п.

Среди производственных технологий новых поколений, ключевое значение приобретают CALS-технологии, обеспечивающие электронное сопровождение на протяжении всех стадий жизненного цикла изделий и их быструю адаптацию к конкурентным колебаниям конкретных рынков.

Исходя из приоритетов в области космической оптики как Университета ИТМО, так и «ЛОМО», особую роль приобретает инновационная деятельность по разработке новых оптических и оптико-информационных изделий для космоса, средств космической связи и т.д.

Обеспечение безопасности страны и населения невозможно без оснащения Вооруженных сил и правоохранительных органов техническими средствами новых поколений, в том числе и предназначенных для борьбы с терроризмом – данный аспект, несомненно, должен входить в список приоритетных.

Заключение

Принято соглашение о создании интегрированного учебно-научно-производственного центра «Оптические технологии и системы» (УНПЦ «ОТИС») на базе СПб ГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО».

Определены цели и задачи нового УНПЦ «ОТИС». Сформулирована концепция и сформирована структура УНПЦ «ОТИС». УНПЦ «ОТИС» предназначен решать задачи организации учебных и производственных практик, предусмотренных государственным образовательным стандартом для инженерных специальностей и направлений подготовки бакалавров и магистров. Создание интегрированной структуры УНПЦ позволит координировать просветительскую, учебно-методическую и научную работу, обеспечит целевую подготовку специалистов, переподготовку и дополнительное обучение кадров, подготовку кадров высшей квалификации. Формирование УНПЦ «ОТИС» обеспечивается на основе комплекса двухсторонних взаимовыгодных соглашений по таким направлениям, как развитие научных исследований, обучение и подготовка инженерных и научных кадров, инновационная деятельность. Деятельность УНПЦ «ОТИС» организуется путем координации целей и методов при сохранении индивидуального характера СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО».

Разработана модель взаимодействия СПбГУ ИТМО – ОАО «ЛОМО» и утверждено Положение об УНПЦ «ОТИС».

Сформирован Координационный совет, структура и Центральная рабочая группа УНПЦ «ОТИС». Определены участники рабочей группы: от ОАО «ЛОМО» – ЦКБ и отдел маркетинга, от СПб ГУ ИТМО – кафедра системотехники оптических приборов и комплексов (базовая ОАО «ЛОМО»), факультет фотоники и оптоинформатики, факультет оптико-информационных систем и технологий, Инновационно-технологический центр, Центр трансфера технологий, НИИ «Оптоинформатика».

Разработан долгосрочный учебно-научно-организационный план развития УНПЦ «ОТИС» и программа коммерциализации наиболее перспективных («прорывных») научных достижений и разработок СПбГУ ИТМО и ОАО «ЛОМО».

Приложение.

Фотоника и оптоинформатика – приоритетные направления УНПЦ «ОТИС»

Фотоника – область науки и техники, связанная с исследованием и использованием светового излучения (или потока фотонов) в оптических элементах, системах и устройствах, в которых распространяются, модулируются и детектируются оптические сигналы, а также производится их отображение или запись.

Оптоинформатика – область науки и техники, связанная с использованием оптики и фотоники в обработке, передаче и хранении информации, построении телекоммуникационных линий, создании оптического компьютера. Термин «Оптоинформатика» в России и за рубежом – относительно новый, но в последнее время он активно проникает в научную сферу:

- как самостоятельное направление в России оно выделено постановлением президиума РАН «Об утверждении основных направлений фундаментальных исследований» от 2003 года;

- комитет с одноименным названием появился в Optical Society of America – крупнейшем объединении оптиков США;
- конференции «Оптоинформатика» стали регулярными в International Commission for Optics – крупнейшей организации европейских ученых.

Фотоника и оптоинформатика (ФОИ) являются взаимосвязанными направлениями и определяют дальнейшее развитие информационного общества. Основные составляющие ФОИ: (1) оптические телекоммуникационные системы; (2) лазерные системы; (3) системы детектирования, отображения, обработки и хранения оптического излучения; (4) оптические материалы; (5) оптоэлектроника. Все вышеперечисленные составляющие также структурированы и, в свою очередь, состоят из направлений. Основными направлениями оптических телекоммуникационных систем являются: (а) волоконная оптика; (б) системы спектрального мультиплексирования и демультимплексирования оптических сигналов; (в) системы оптического переключения каналов, в том числе на основе микроэлектромеханических устройств; (г) оптические волоконные усилители; (д) оптические компоненты волоконной линии (разветвители, изоляторы, фильтры). Лазерные системы можно подразделить на: (а) полностью твердотельные; (б) газовые; (в) полупроводниковые; (г) нелинейно-оптические преобразователи лазерного излучения; (д) прочие, в том числе рентгеновские и гамма-лазеры. Системы детектирования, отображения и обработки оптического излучения подразделяются на: (а) приемники-измерители оптического излучения УФ, видимого и ИК диапазонов спектра; (б) матричные приемники (CCD, CMOS и т.д.); (в) системы машинного видения; (г) спектральные приборы; (д) ИК визуализаторы; (е) голографические оптические устройства; (ж) прочие. Оптические материалы подразделяются на: (а) лазерные; (б) нелинейно-оптические; (в) магнито- и электрооптические; (г) стекла с уникальными характеристиками; (д) оптические покрытия; (е) полимерные оптические материалы. Оптоэлектроника представлена как: (а) интегрально-оптические системы и устройства; (б) излучающие структуры; (в) нанооптоэлектроника; (г) излучатели терагерцового диапазона спектра.

Покажем преимущества развития ФОИ на основе двух примеров. Одно из важнейших направлений ФОИ – развитие и создание новых оптических телекоммуникационных систем. Уже в настоящее время в мире доминирует использование оптических волоконных линий на основе многомодового волокна (на расстояния до 1 км) и одномодового волокна (на расстояния до 200 км без повторителей) для передачи информации со скоростью до 40 Гб/с, причем использование спектрального уплотнения и полностью оптического усиления на основе вынужденного комбинационного рассеяния позволило исследователям из Lucent Technologies (США) передать по одному волокну поток информации 2,5 Тб/с при использовании 64 спектральных каналов на расстояние 4000 км и достичь на сегодняшний день рекорда удельной передачи информации 10^{16} бит - км/с [2]. Для примера можно отметить, что передача сигнала с плотностью 10 Гб/с возможна по специальному коаксиальному кабелю только на расстояние нескольких метров, а передача сигнала с плотностью выше 100 Гб/с вообще невозможна.

Возникает вопрос, зачем нужны столь большие плотности передачи информации? Для дальнейшего развития мирового информационного общества необходима система глобального Интернета с предоставлением любому пользователю канала с плотностью не менее 2,5 Мб/с («fiber to home» – волокно в каждый дом) для реализации таких возможностей, как цифровое интерактивное телевидение высокой четкости, видеотелефон, быстрый доступ к информационным банкам данных и т.д. Несложный расчет показывает, что для организации такой связи между Москвой и Санкт-Петербургом при числе потенциальных пользователей 2 млн. необходима линия с пропусканием 10 Гб/с. Для связи между странами необходима плотность на два–три порядка больше, т.е. 1–10 Тб/с. В настоящее время в мире строятся несколько систем с пропусканием

10 Гб/с, например, между Пертом и Мельбурном через Аделаиду в Австралии на расстоянии 3875 км [3], разрабатывается подобная система связи между исследовательскими и образовательными центрами 30 европейских стран, включая бывшие прибалтийские республики СССР [4]. Для разработки и создания новых волоконных систем с полностью оптической обработкой информации и необходимо развивать инфраструктуру ФОИ.

Оценим предельные возможности оптических волоконных линий. При использовании волокон (или систем волокон), прозрачных в диапазоне 400–1800 нм¹ полоса пропускания составляет ~ 1 ПГц (10¹⁵ Гц), при использовании спектральных каналов, разделенных на 100 ГГц, и полосой информационного сигнала 40 Гб/с по ним возможна передача информации со скоростью 100 Тб/с. Одно такое волокно способно обслужить одновременно 4 млрд. потенциальных пользователей, что, очевидно, является далекой перспективой.

В результате развития и создания все более мощных компьютеров и сетей компьютерной связи люди работают более эффективно, не вставая с рабочего стола, связываются со всем миром и получают информацию из всех уголков земного шара, отдыхают более комфортно. Появление мощных цифровых электронно-вычислительных машин (ЭВМ) стало возможным благодаря созданию технологии интегрирования миллионов транзисторов и межсоединений на кремниевых микрочипах. Начиная с 70-х годов число электронных компонентов, расположенных на микрочипе, удваивалось каждые 18 месяцев, позволяя компьютерам развивать вдвое большие скорости счета (рис. 13). Хотя эта тенденция, которая была предсказана в 60-х годах Гордоном Муром [5] из фирмы Intel, может продолжаться в течение следующих нескольких лет, предел скорости, с которой интегральные схемы смогут работать, скоро будет достигнут. Сейчас можно купить персональный компьютер с процессором, работающим на тактовой частоте 3 ГГц, но появление настольного компьютера, с электронным микрочипом на 100 ГГц через 10 лет с точки зрения современной науки кажется проблематичным. Даже если размер отдельного элемента будет значительно уменьшен путем использования рентгенолитографии, частота интегральной схемы будет ограничена временем переключения в транзисторах, которое практически не уменьшается с его габаритами.

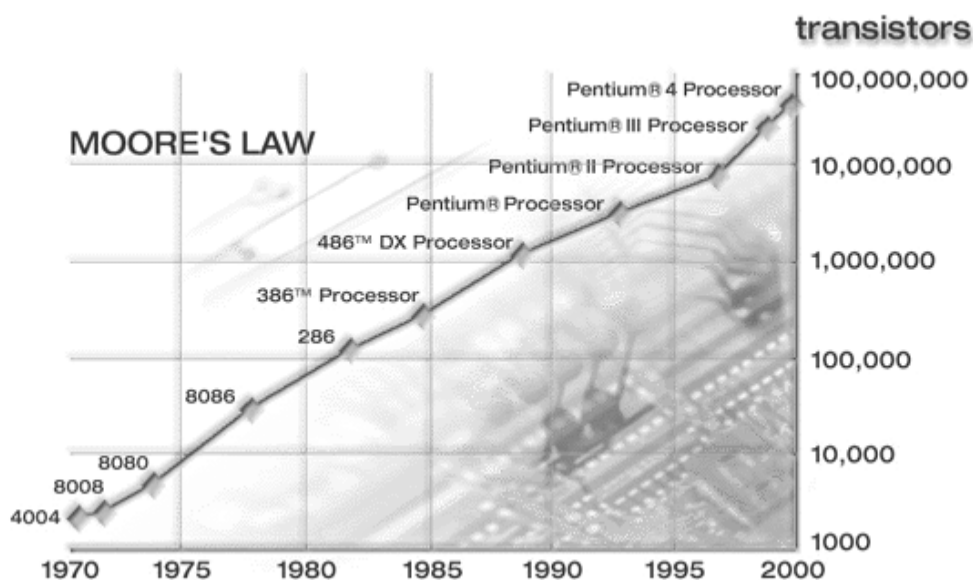


Рис. 1. Развитие микропроцессоров (закон Мура)(www.intel.com)

¹ В настоящее время обычно используется полоса пропускания 10 ТГц (10¹³ Гц) вблизи 1550 нм

Недавно [6] был проведен анализ перспектив и фундаментальных ограничений на параметры существующих и будущих электронных интегральных схем. Одни из наиболее важных параметров микрочипов – время и мощность, затрачиваемая на одно переключение в отдельном транзисторе. На рис. 2 приведена обобщенная картина предельных параметров CMOS-технологии. Линии a и b представляют собой термодинамический и квантово-механический пределы, линии c и d обуславливают пределы материала (кремния), линия e – пределы транзистора как устройства, f – логической ячейки, g – системы из логических ячеек. Нижние границы линий e, f, g с обратной пропорциональной зависимостью мощности от времени переключения обусловлены наличием минимума энергии на переключение транзистора. Верхние границы с квадратичной зависимостью ($P \sim t^2$) обусловлены минимумом времени, требуемого на переключение транзистора. Системные ограничения (линия g) – более жесткие и в основном связаны с наличием емкости электрических межсоединений между логическими ячейками. В работе предполагается, что предел характеристик микрочипов расположен в области i рис. 2., с временем переключения 50 пс (20 ГГц) и средней мощностью 500 мкВт, что соответствует энергии 25 фДж на одно переключение.

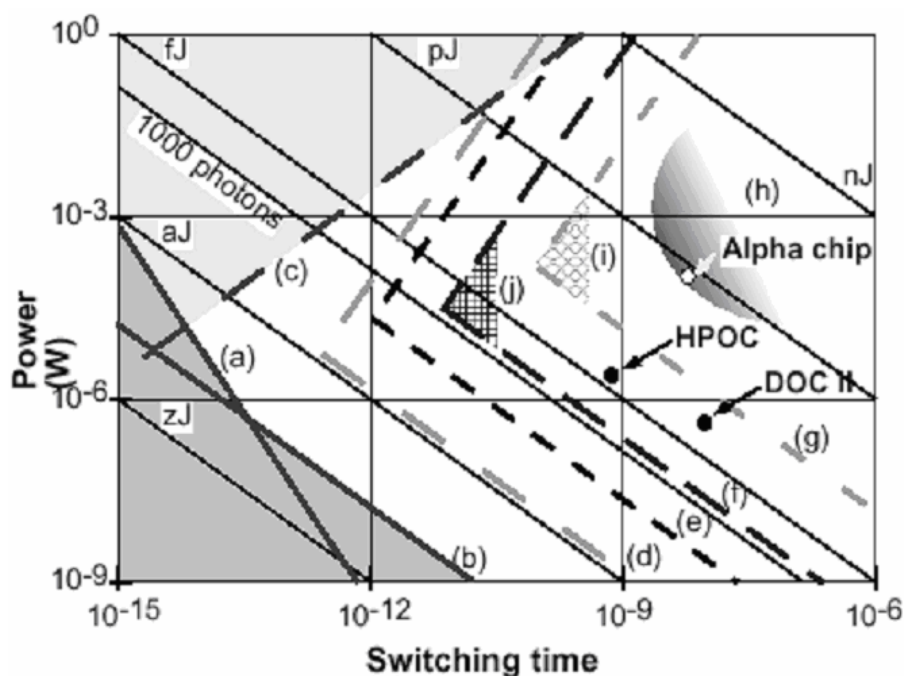


Рис. 2. Предельные параметры микроэлектронных и оптических компьютеров

Исходя из вышесказанного, микроэлектроника, скорее всего, не сможет гарантировать прогресс в информационных технологиях, и необходимо искать альтернативные решения, обеспечивающие более плотную и более быструю информационную связь между логическими элементами.

XXI век называют веком оптических технологий, основываясь на бурном развитии в конце XX века таких направлений, как волоконно-оптическая связь, полупроводниковая оптоэлектроника, лазерная техника, являющиеся составляющими частями ФОИ. Однако это может быть только началом широкого использования ФОИ в информационных технологиях. Возможности использования света в обработке информации практически безграничны. Если использовать свет для передачи данных между чипами или логическими элементами, проблемы с временем задержки на межсоединениях не будет существовать, поскольку передача информации будет происходить действительно со скоростью света. Большое число световых пучков может свободно проходить по

одной и той же области пространства, пересекаться и не влиять друг на друга. Параллельный многоканальный характер оптических информационных систем явным образом вытекает из двумерной природы светового потока, а оптика пучков, свободно распространяющихся в пространстве, естественно подходит для создания в широком масштабе параллельных соединений между различными плоскостями информационных устройств.

Современная оптическая система может разрешать и отображать миллионы пикселей, каждый из которых может быть информационным каналом с частотной шириной полосы передачи свыше 40 ГГц. Следует также отметить возможность спектрального уплотнения, позволяющего по одному световому пучку передать сотни и тысячи каналов, которые практически не влияют друг на друга. Пространственное и спектральное разделение информационных каналов даже при небольшой скорости обработки одного канала позволяет реализовать гигантские скорости общей обработки информации.

Чтобы использовать уникальные возможности оптики для обработки информации, необходимо разработать подходящие технологии создания устройств генерации, детектирования оптических сигналов, а также оптических логических элементов, управляемых светом. Элементарная оптическая ячейка должна потреблять энергии меньше, чем элемент микрочипа, быть интегрируемой в большие массивы и иметь возможность связи с большим числом подобных элементов. Именно это является основной задачей ФОИ в ближайшие десятилетия.

Начиная с середины 80-х годов, исследователи ФОИ интенсивно работали над созданием полностью оптических компьютеров нового поколения [7–9]. Сердцем такого компьютера должен был стать оптический процессор, использующий элементы, в которых свет управляет светом, а логические операции осуществляются в процессе взаимодействия световых волн с веществом. Значительные усилия, направленные на создание оптического компьютера, привели к определенным успехам. Принципиальным недостатком макетов первых оптических компьютеров являлась неинтегрируемость его отдельных компонентов. Исходя из этого, основной задачей следующего этапа работ по оптическому компьютеру было создание его интегрального варианта.

В настоящее время ведутся работы по созданию интегрального модуля гибридного оптоэлектронного компьютера с логической матрично-тензорной основой, названного НРОС (High Performance Optoelectronic Communication) [10]. В устройстве планируется использовать входную матрицу вертикально-излучающих лазерных диодов, соединенную планарными волноводами и обычной оптикой с матрицами переключения, на основе дифракционных оптических элементов, и выходную систему, состоящую из матрицы лавинных фотодиодов, совмещенной с матрицей вертикально-излучающих диодов. В модуле используется GaAs, Bi-CMOS и CMOS технологии, а оптические межсоединения организованы с использованием свободного распространения световых пучков в пространстве и в волноводах, что организует квази-четырёхмерную структуру. Опытные образцы показали производительность 4.096 Тб/с, а оценки показывают, что данная система способна развить скорость 10^{15} операций в секунду с энергией менее 1 фДж на одно переключение.

Как пример одного из последних достижений фотоники и оптоинформатики на рис. 3 иллюстрируется созданный в 2004 г. коммерческий оптический процессор с быстродействием, в тысячу раз превышающим быстродействие электронных аналогов. Такой процессор, решающий задачи расчета траекторий баллистических ракет, установлен на спутнике NASA США. Эти процессоры планируется установить и на самих баллистических ракетах.

Следует отметить, что размеры и вес системы, построенной из модулей, на настоящее время превышают размеры используемых сейчас микрочипов. Анализ состояния современных разработок ФОИ показывает, что полностью оптический процессор

может быть построен из так называемых фотонных кристаллов и квазикристаллов – материалов с периодической структурой, которые могут управлять и манипулировать потоками фотонов. В 1986 г. Эли Яблонович из Университета Калифорнии в Лос-Анджелесе высказал идею создания трехмерной диэлектрической структуры, подобной обычным кристаллам, в которой бы не могли распространяться электромагнитные волны определенной полосы спектра [11].

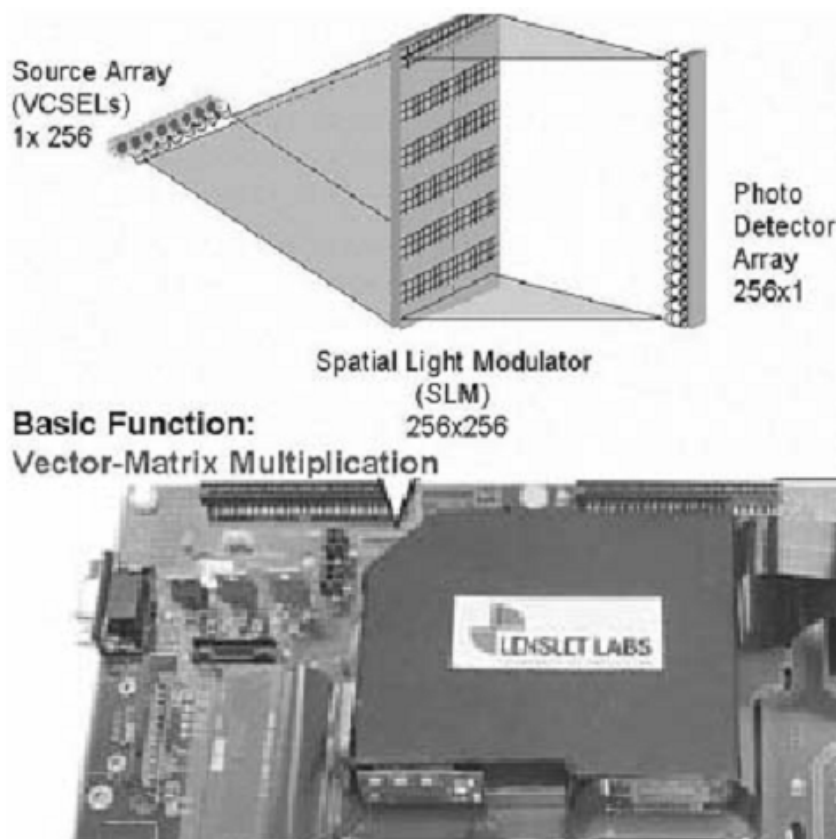


Рис. 3. Первый коммерческий оптический процессор

Такие среды получили название фотонных структур с запрещенной зоной (photonic bandgap) или фотонных кристаллов (photonic crystals). В настоящее время с использованием идеологии фотонных структур созданы беспороговые полупроводниковые лазеры и лазеры на основе редкоземельных ионов, высокочастотные резонаторы, оптические волноводы, спектральные фильтры и поляризаторы [12]. Изучением фотонных кристаллов занимаются в 21 стране мира (в том числе и в России), и количество публикаций растет по экспоненциальному закону, что свидетельствует о расцвете данного направления. Предсказания всегда трудны, однако прогнозы на будущее фотонно-кристаллических устройств довольно-таки оптимистичны. Уже сейчас в исследовательских лабораториях создаются полупроводниковые лазеры и мощные однофотонные светодиоды с использованием трехмерных фотонно-кристаллических резонаторов, волноводные оптические цепи с 90°-ными поворотами, оптические лимитеры, суперпризмы, фотонные волокна. Через несколько лет большинство этих устройств появится на мировом рынке высокотехнологичных изделий. Но, все-таки, главная перспектива для таких структур – это интегральный фотонно-кристаллический процессор – фотонный микрочип. Основные предпосылки для его создания уже сделаны – определена структура логических ячеек, созданы фотонные цепи, в недалеком будущем обязательно появится фотонно-кристаллический аналог транзистора [13, 14]. Оценки показывают, что при существующем темпе развития первые фотонные микрочипы могут

появиться приблизительно через 10 лет. Рассматривая развитие электронных микрочипов – от момента создания первого процессора фирмой Intel в 1970 году до их повсеместного использования прошло 25–30 лет – можно предположить аналогичную тенденцию и для оптического компьютера.

Оценим предельные возможности использования технологий ФОИ для оптического компьютера. Время оптического переключения «свет–свет» на основе нелинейно-оптических эффектов ограничена временем возмущения электронных оболочек атомов, которое составляет 10^{-15} с, однако квантовые флуктуации уменьшают это время на порядок. Соответственно, максимальная тактовая частота оптического компьютера может составлять 0,1 ПГц (10^{14} Гц), что на 4 порядка выше существующих электронных аналогов. Однако для переключений с такой тактовой частотой необходимо иметь управляющий сигнал с такой же тактовой частотой, т.е. световой сигнал, модуляция в котором осуществляется на уровне одного колебания светового поля. Более реалистичным кажется использование терагерцового излучения (с частотой порядка 1 ТГц, субмиллиметровые длины волн) как модуляционного для светового излучения [15]. Соответственно, более реально определить предел быстродействия оптического компьютера тактовой частотой 1–10 ТГц.

В передовых технологических странах мира, начиная с 1996 г., наблюдается значительный рост интереса к ФОИ. Об этом свидетельствуют ежегодно проводимые с 1990 г. международные конференции, объединенные общим названием «Photonics». Например, конференция “Photonics West – 2002” (Сан-Хосе, 19–25 января 2002 г., США) собрала около 15000 участников, несмотря на мировой кризис в области телекоммуникаций и падение экономических условий в мире (2000–2002 гг.). Помимо чисто научных журналов, посвященных проблемам ФОИ, выпускается несколько научно-коммерческих и популярных журналов: Photonics Spectra (с 1966 г. см. сайт www.photonics.com), Laser Focus World (с 1964 г. см. сайт www.laserfocusworld.com), WDM Solutions (с 1998 г. см. сайт www.wdm-solutions.com), Lightwave Europe (с 2002 г. см. сайт www.lightwave-europe.com). Следует отметить, что вложения в данную область исчисляются десятками миллиардов долларов США в год.

На сегодняшний день направление «Фотоника и оптоинформатика» признано во всем мире. Доход от продаж относящихся к нему устройств и систем, по оценкам экспертной фирмы Strategies Unlimited из США, составляет свыше 4 миллиардов долларов в год и в последние три года стабильно растет.

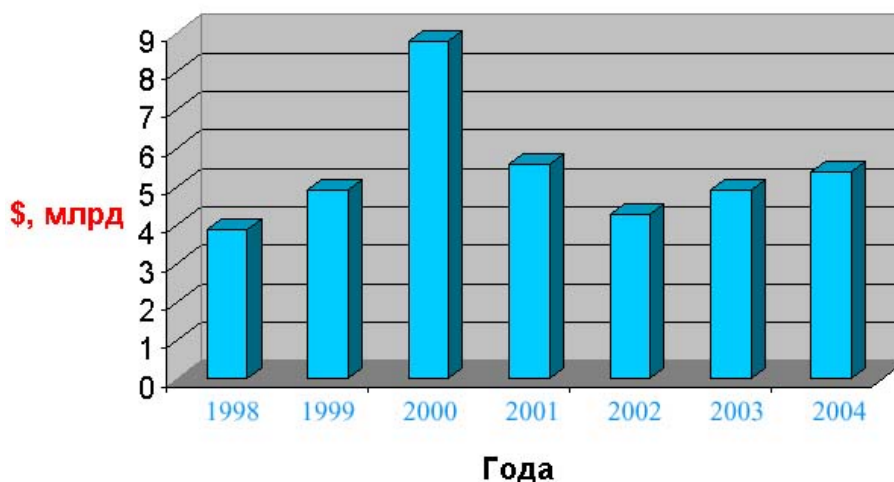


Рис. 4. Доходы предприятий, выпускающих компоненты и устройства фотоники и оптоинформатики

Прогноз научного и инновационного освоения и рыночного распространения фотоники и оптоинформатики в ведущих странах мира

I. Период до 2010 г.

По оптическим телекоммуникационным системам. Повсеместное распространение волоконных линий связи со скоростью 10 Гб/с, соединение в единую волоконную сеть ведущих стран мира со скоростью не менее 2,5 Гб/с. Внедрение полностью оптических систем мультимплексирования и демультимплексирования оптических сигналов с управляемым переключением между каналами. Разработка фотонно-кристаллических волокон с минимальными потерями в видимой области спектра. Внедрение систем интерактивного цифрового телевидения и видеотелефонии через Интернет. Разработка и внедрение линий волоконной связи со скоростью 1 Тб/с.

По лазерным системам. Полностью твердотельные системы с полупроводниковой накачкой достигнут непрерывной мощности 100–500 кВт при к.п.д. не менее 30%, что позволит их широко использовать в технологических процессах обработки материалов. Создание полностью твердотельных лазерных систем в сине-голубом и зеленом областях спектра с полупроводниковой накачкой. Широкое внедрение полупроводниковых лазеров сине-голубого диапазона спектра позволит создать и широко использовать перезаписываемые DVD-диски с объемом до 100 Гб. Создание эффективных нелинейно-оптических устройств позволит разработать и создать лазер перестраиваемого излучения от УФ до среднего ИК диапазона спектра, в том числе лазерных систем домашнего кинотеатра. Разработка и создание рентгеновских лазеров для систем литографии с элементом разрешения до 10 нм. Повсеместное использование фемтосекундных лазеров, разработка и создание лазеров аттосекундного диапазона длительностей.

По системам детектирования, отображения и обработки оптического излучения. Промышленный выпуск высокоэффективных неохлаждаемых приемников ИК диапазона спектра для систем оптической томографии и ночного видения. Создание CCD и CMOS матриц 10000×10000 элементов и широкое использование в фотокинотехнике, полная замена фотопленки. Дальнейшее совершенствование и микроминиатюризация спектральных приборов и создание на их основе малогабаритных приборов мониторинга окружающей среды (в том числе индивидуального пользования). Создание голографической перезаписываемой памяти с плотностью 1 Тб/см².

По оптическим материалам. Разработка и создание широкой гаммы лазерных сред для полупроводниковой накачки, создание оптических материалов с высокой радиационной и тепловой стойкостью для систем космического базирования. Разработка и создание новых нелинейно-оптические материалов с высокими эффективностями преобразования, в том числе и на основе фотонно-кристаллических структур.

По оптоэлектронике. Создание интегрального оптического процессора и оптического компьютера с тактовой частотой 100 ГГц. Создание солнечных элементов с квантовой эффективностью 80% для космических электростанций.

II. Период до 2020 г.

По оптическим телекоммуникационным системам. Повсеместное распространение волоконных линий связи со скоростью 1 Тб/с, соединение в единую глобальную волоконную сеть стран мира со скоростью не менее 100 Гб/с. Использование фотонно-кристаллических волокон с минимальными потерями в видимой области спектра, что позволит достичь скорости передачи информации до 1 Пб/с. Внедрение систем интерактивного цифрового объемного (голографического) телевидения и видеотелефонии через Интернет. Разработка и внедрение линий волоконной связи со скоростью 1 Пб/с.

По лазерным системам. Увеличение выходной мощности полностью твердотельных систем с полупроводниковой накачкой до 1 МВт позволит их использовать для передачи солнечной энергии из космоса. Широкое использование рентгеновских лазеров

для систем литографии с элементом разрешения до 10 нм позволит создать фотонно-кристаллические структуры для полностью оптического компьютера.

По системам детектирования, отображения и обработки оптического излучения. Дальнейшая микроминиатюризация систем, широкое встраивание в бытовую технику.

По оптическим материалам. Продолжение работ по разработке фотонно-кристаллических структур.

По оптоэлектронике. Разработка и создание макетов интегрального оптического процессора и оптического компьютера с тактовой частотой до 1 ТГц.

II. Период до 2030 г.

По оптическим телекоммуникационным системам. Повсеместное распространение волоконных линий связи со скоростью 10 Тб/с, соединение в единую глобальную волоконную сеть стран мира со скоростью не менее 1 Тб/с.

По лазерным системам. Увеличение выходной мощности полностью твердотельных систем с полупроводниковой накачкой до 10 МВт позволит их реально использовать как оружие для «Звездных войн» и для предотвращения космических катаклизмов (уничтожение астероида, болида, падающего на Землю, и т.д.). Разработка и создание полупроводниковых лазеров УФ диапазона спектра позволит создать DVD-диски с объемом до 1 Тб.

По системам детектирования, отображения и обработки оптического излучения. Дальнейшая микроминиатюризация систем, широкое встраивание в бытовую технику.

По оптическим материалам. Продолжение работ по разработке фотонно-кристаллических структур.

По оптоэлектронике. Широкое использование интегрального оптического процессора и оптического компьютера с тактовой частотой до 1–10 ТГц.

Прогноз развития фотоники и оптоинформатики в России

Оптический комплекс Российской Федерации по многим направлениям научных разработок ФОИ находится на уровне промышленно развитых стран, а по некоторым направлениям, таким как оптоэлектроника, даже опережает их, о чем свидетельствует вручение Нобелевской премии академику РАН Ж.И. Алферову. Однако по уровню выпуска конкурентоспособных изделий ФОИ Россия значительно отстает от передовых стран, и за последние годы общая ситуация значительно ухудшилась. В связи со снижением платежеспособного спроса на продукцию оптического комплекса произошли резкий спад производства и отток высококвалифицированных кадров. На настоящее время в России практически отсутствует база изготовления оптических волокон с требуемыми характеристиками для волоконных линий связи большой плотности, не ведутся разработки оптических элементов следующего поколения волоконно-оптических линий связи (полностью оптических усилителей, устройств спектрального уплотнения и т.д.). Практически отсутствуют разработки в направлении оптического компьютера и его составных частей. В области лазерной техники существует значительное отставание по материальной базе.

До 2010 г. в России будет формироваться база ФОИ, преодолевая отставание от передовых стран. Основной упор необходимо сделать на подготовку квалифицированных кадров – научных работников, инженеров. Следует отметить, что высокотехнологичные компании, как правило, организуются из лиц, имеющих степень PhD (наш аналог кандидата наук). Таким образом, подготавливая высококвалифицированные кадры, можно преодолеть отставание.

До 2020 г. необходимо минимально сократить разрыв, а в некоторых областях выйти вперед. Прежде всего необходимы разработки полностью оптического интегрального процессора, основанного на новых принципах.

К 2030 г., при должном финансировании, Россия должна выйти на лидирующие позиции в мире в области ФОИ.

Объем инвестиций

В настоящее время наибольшие вложения идут в сферу производства лазерной техники. Мировой лазерный рынок в 2002 г., по прогнозам, должен составить 6,2 млрд. долларов США, что на 10% выше показателей 2001 г. [16]. Несмотря на падение рынка на 36% в 2001 г. по сравнению с 2000 г., средний рост лазерного рынка, начиная с 1996 г., составляет 16,9% [17], что позволяет надеяться на рост рынка до 10 млрд. долларов США к 2005 г. Большая часть лазерного рынка относится к сфере оптических телекоммуникационных систем – 47%; сфера лазерных систем для обработки материалов составляет 26%; за ними следуют системы оптического хранения информации (системы CD-ROM, CD-RW, DVD) – 14%; системы медицинских лазеров – 8%; лазеры для научных исследований – 1,5%; остальные – 3,5% [16, 17].

Несмотря на падение телекоммуникационного рынка в 2001 г., продолжается рост рынка оптических компонент для систем телекоммуникаций. Так, если общие инвестиции в телесоммуникационные системы стремительно упали с 134 млрд. (2000 г.) до 29 млрд. (2001 г.) долларов США, то инвестиции в оптические компоненты упали только с 1,8 млрд. (2000 г.) до 1,3 млрд. (2001 г.) долларов США [18]. Положительным моментом является то, что около 3,7 млрд. долларов США были вложены в производство оптических компонент в течение 1999–2001 г.г. [18]. В 2002 г. ожидается увеличение инвестиций в оптические компоненты телекоммуникационных систем: по оптимистическим прогнозам 30%, по пессимистическим 10% [18]. Если ориентироваться на среднюю цифру роста рынка лазеров для телекоммуникационных систем в 2002 г. (16% [17]), то можно ожидать увеличения инвестиций в оптические компоненты до 2 млрд. долларов США к 2005 г.

Следует отметить, что такая фирма, как Intel, обратила внимание на разработку оптических телекоммуникационных систем, и в 2001 г. 1 млрд. долларов был затрачен на разработку новых оптоэлектронных интегральных схем и изделий [19]. Доход от продаж оптических интегральных схем в 2005 г., по прогнозам, должен достичь 3 млрд. долларов США [19].

В России основной объем инвестиций ФОИ идет посредством реализации Федеральной программы «Национальная технологическая база», рассчитанной на 2002–2006 гг. В программе существуют два раздела, посвященные ФОИ – раздел «Технологии коммуникаций» (общий объем НИОКР 1034,6 млн. руб.) и раздел «Оптоэлектронные, лазерные и инфракрасные технологии» (объем НИОКР 503 млн. руб., капитальные вложения 344 млн. руб.). Существуют предложения по увеличению вдвое финансирования по разделу «Оптоэлектронные, лазерные и инфракрасные технологии», однако они будут реализованы в 2003 г.

Существуют также отдельные программы, связанные с ФОИ, Российских агентств по обычным вооружениям, по системам управления, авиационно-космического агентства, однако общее финансирование на порядок меньше, чем программа «Национальная технологическая база». Таким образом, общее финансирование ФОИ в России можно определить суммой приблизительно 2–2,5 млрд. руб. на 2002–2006 гг., или 400–500 млн. руб. в год. Такие цифры, конечно, явно недостаточны для развития ФОИ.

Подготовка кадров по направлению «Фотоника и оптоинформатика»

Образовательные программы и учебные курсы университетов должны поддерживать ключевые перспективные направления науки, техники и технологии. Для УНПЦ «ОТИС» таким направлением должны стать фотоника и оптоинформатика.

Для развития направления науки, техники и технологий «Фотоника и оптоинформатика» нужны высококвалифицированные специалисты, которые умеют решать задачи создания полифункциональных оптических материалов и систем, миниатюризации и интеграции оптических элементов и устройств, разработки полностью оптических сверхбыстродействующих устройств передачи, обработки и записи информации, оптических технологий искусственного интеллекта и так далее.

Десятки ведущих университетов мира осуществляют подготовку по сходным направлениям (Photonics, Photonics Networks и др.), выпускники которых востребованы компаниями, выпускающими высокотехнологическую продукцию (Coherent, Schott, Lucent Technology и др.) Подготовка высококвалифицированных кадров по данному направлению соответствует долгосрочным планам развития России и отвечает тенденциям Болонского процесса по сближению образовательных систем разных стран.

Экспертная оценка Межведомственного Совета по развитию оптического приборостроения России, в который входят руководители крупнейших предприятий ряда министерств, а также представители Академии наук, показывает, что востребованность бакалавров и магистров в области фотоники и оптоинформатики на сегодня превышает 400 человек в год, а к 2010 году будет составлять 2000 человек.

Однако к началу настоящего проекта бакалавров и магистров по «Фотонике и оптоинформатике» в рамках самостоятельного образовательного направления в России не готовили. Возникал естественный вопрос: можно ли было организовать подготовку специалистов по «Фотонике и оптоинформатике» в рамках близких направлений? Анализ ГОСов России показал, что такая подготовка в их рамках не представилась возможной.

Значимым заданием по данному проекту является открытие в 2004 году нового образовательного направления подготовки бакалавров и магистров, поддерживающего стратегически важную для России область науки, техники и технологий – «Фотоника и оптоинформатика». Согласно подготовленному участниками проекта образовательному стандарту, бакалавры и магистры должны получать глубокие знания и практические навыки в области оптической физики, теории информации и кодирования, архитектуры вычислительных систем, оптического материаловедения, оптической информатики, систем и технологий фотоники и так далее.

План мероприятий Программы «Фотоника и оптоинформатика»

Содержание проблемы и обоснование необходимости ее решения программными методами. Межотраслевая программа «Фотоника и оптоинформатика» на 2004–2007 годы (далее именуется – Программа) разработана в соответствии с совместным приказом Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации, Министерства образования Российской Федерации и Российского агентства по обычным вооружениям.

Традиционно вопросами развития фотоники и оптоинформатики занимается оптический комплекс Российской Федерации, который по многим направлениям научных разработок и качества выпускаемых приборов (например, космическая оптика) находится на уровне промышленно развитых стран. Однако за последние годы общая ситуация в оптическом комплексе значительно ухудшилась. В связи со снижением платежеспособного спроса на продукцию комплекса произошли резкий спад производства и отток высококвалифицированных кадров. Особую тревогу вызывает резкое сокращение научно-

исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию оптической продукции нового поколения, разрыв в цепи «фундаментальные исследования – опытно-конструкторские работы – производство – рынок». Усилия предприятий отрасли, принимаемые для преодоления сложившейся острой критической ситуации, оказываются недостаточными. Настоящая Программа предусматривает объединение усилий различных ведомств по сохранению потенциала оптического комплекса, его структурному преобразованию и созданию предпосылок развития в приоритетных направлениях науки, технологий и техники Российской Федерации.

Наряду с США, Германией, Францией, Японией, Россия обладает уникальным оптическим комплексом, полностью реализующим цикл создания оптических приборов и систем – от фундаментальных и поисковых работ до производства оптических материалов и серийной продукции. В нашей стране накоплен потенциал, который позволяет поддерживать мировой уровень технологии оптических материалов и покрытий, спектроскопии, дифракционной оптики, проектирования оптических систем, лазеров, голографии, квантовой оптики, приборов высокоточного наведения, прицеливания и обнаружения, оптико-электронного приборостроения аэрокосмического назначения, оптического станкостроения.

В состав оптического комплекса России входят научные организации и промышленные предприятия Министерства промышленности, Министерства образования и науки Российской Федерации и Российского агентства по обычным вооружениям, научно-исследовательские организации Российской Академии наук, а также ряд предприятий Российского космического агентства и других ведомств.

Программа разработана с учетом и на основе одобренных Правительством Российской Федерации приоритетов и критериев формирования межотраслевых программ, предлагаемых к финансированию за счет средств федерального бюджета, региональных и собственных средств организаций.

Программа учитывает особенности современной международной и внутренней ситуации и исходит из необходимости не допустить отставания от мирового уровня по приоритетным направлениям развития науки и техники, критическим технологиям федерального уровня и в области важнейших видов наукоемкой продукции.

Программа направлена на решение следующих основных задач:

- 1) создание широкой номенклатуры конкурентоспособных оптических приборов нового поколения общепромышленного, научного и медицинского назначения на базе использования достижений фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, научно-технологического задела;
- 2) разработка технологий подготовки и повышение профессионального уровня кадров для оптического комплекса;
- 3) активизация процессов коммерческого использования оптических и оптоинформационных технологий.

Программа будет реализовываться на основе следующих принципов:

- комплексности и инновационности разработок и создания нового поколения изделий фотоники и оптоинформатики;
- сосредоточения основных усилий на создание конкурентноспособной на мировом рынке оптической продукции;
- непрерывности процесса от фундаментальных исследований и разработки технологий до опытно-конструкторской разработки промышленных технологий, создания на их основе образцов наукоемкой оптической продукции нового поколения и выхода на рынок высокотехнологичных изделий;
- гибкости выбора конкретных проектов, реализуемых в рамках Программы, возможности маневра отраслевыми, региональными и собственными бюджетными средствами органи-

заций-участников и их концентрации на приоритетных направлениях для обеспечения наибольшей эффективности Программы;

– обеспечении эффективного управления реализацией Программы и контроля за целевым использованием выделенных средств;

– конкурсного отбора проектов для реализации в рамках Программы с целью обеспечения наибольшей ее эффективности;

– создания условий для продуктивного сотрудничества государства и частного бизнеса, основанных на сочетании экономических интересов и соблюдении взаимных обязательств.

Цель, задачи и сроки выполнения Программы. Целью данной Программы является создание информационно-телекоммуникационных технологий нового поколения, основанных на оптических принципах, обеспечение потребностей реальных секторов экономики страны, наращивание экспорта и увеличение импортозамещения в области систем и устройств фотоники и оптоинформатики на основе развития научно-технического и производственного потенциала оптического комплекса.

Для реализации указанной цели требуется выполнение ряда задач, включающих создание широкой номенклатуры конкурентоспособных устройств, систем и технологий фотоники и оптоинформатики различного назначения на базе использования достижений фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, научно-технологического задела; подготовку и повышение профессионального уровня специалистов в области фотоники и оптоинформатики.

Достижение цели Программы осуществляется путем скоординированного выполнения комплекса взаимосвязанных программных мероприятий, ни одно из которых не может быть успешно выполнено автономно, вне связи и без опоры на достижения, получаемые в процессе реализации других мероприятий. В результате общий эффект от реализации Программы существенно превосходит сумму результатов выполнения ее отдельных мероприятий. Каждое программное мероприятие представляет собой комплекс научно-исследовательских, опытно-конструкторских и других работ, требующих значительных ресурсных и временных затрат, и не может быть выполнено в результате разовых или краткосрочных действий. Из числа первоочередных программных мероприятий в оптическом комплексе должны быть выбраны те, которые могут обеспечить быстрейшую отдачу вложенных средств.

В Программе предусмотрена система количественных показателей, позволяющих оценить степень соответствия результатов реализации отдельных мероприятий поставленным целям и задачам.

Срок реализации Программы: 2004–2007 г.г.

Система программных мероприятий. Программные мероприятия включают в себя проведение научно-исследовательских работ по созданию новых методов и технологий и опытно-конструкторских работ по созданию новых устройств и систем фотоники и оптоинформатики, в том числе:

– создание материалов, элементной и приборной базы фотоники и оптоинформатики;

– разработка оптических систем и технологий передачи, обработки, анализа и хранения информации, систем искусственного интеллекта;

– разработка оптических приборов и систем диагностики в медицине и экологии, контроля безопасности атомной энергетики, качества сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов, космической разведки, борьбы с терроризмом и др.

– подготовка молодых специалистов и повышение профессионального уровня кадров, работающих в области фотоники и оптоинформатики.

Реализация основных мероприятий программы осуществляется в рамках следующих подпрограмм:

– новые принципы фотоники и оптоинформатики;

- оптические методы и системы передачи информации;
- оптические методы и системы обработки и хранения информации;
- методы и системы управления излучением в фотонике и оптоинформатике;
- материалы для фотоники и оптоинформатики;
- методы и системы фотоники и оптоинформатики для борьбы с терроризмом;
- методы и приборы для измерений и диагностики;
- фотоника и оптоинформатика в образовании.

Подпрограмма «Новые принципы фотоники и оптоинформатики». Основные мероприятия этой подпрограммы состоят в проведении фундаментальных поисковых работ по разработке новых принципов и концепций создания нового поколения оптических информационно-телекоммуникационных систем, в том числе при использовании:

- лазерных импульсов фемто- и субфемтосекундной длительности;
- оптических методов квантовой обработки информации;
- фотонно-кристаллических структур;
- голографических технологий систем искусственного интеллекта.

Результатами выполнения данной подпрограммы будет:

- разработка новых методов сверхбыстрой передачи и обработки информации с использованием световых импульсов с малым числом колебаний фемто- и субфемтосекундного диапазона длительностей;
- разработка и экспериментальная реализация оптических методов квантовой обработки информации;
- разработка и создание голографических методов реализации основных принципов информатики мозга;
- разработка новых методов информационной голографии на базе широкодиапазонных перестраиваемых по частоте фемтосекундных источников света;
- создание новой элементной базы для Y-разветвителей, оптических ключей, мультиплексоров и демультимплексоров на основе одно- и двумерных фотонных кристаллов;
- разработка методов использования системы двумерный фотонный кристалл / металлическая пленка с регулярным рельефом в качестве сверхчувствительного детектора одиночных молекул и квантовых точек.

Подпрограмма «Оптические методы и системы передачи информации». Основные мероприятия этой подпрограммы состоят в разработке и создании устройств для сверхбыстрой передачи информации в оптическом диапазоне по волоконно-оптическим линиям и в свободном пространстве. В результате выполнения подпрограммы будут разработаны:

- методы генерации спектрального суперконтинуума с заданными параметрами и способы его модуляции, которые обеспечат скорость передачи информации по волоконно-оптическим линиям связи до 1 Тб/с;
- двумерные фотонные структуры (микроструктурированные волокна) для систем сверхскоростной передачи информации;
- экспериментальный комплекс для одновременного измерения хроматической дисперсии, поляризационной модовой дисперсии и хроматической дисперсии второго порядка;
- экспериментальные образцы многоканальных мультиплексоров и демультимплексоров для высокоскоростных волоконно-оптических линий связи, а также технология их производства;
- методы и устройства оптической передачи информации в УФ диапазоне спектра на расстояния от единиц см до 10 км с пропускной способностью до 10 Гбит/сек.

Подпрограмма «Оптические методы и системы обработки и хранения информации». В данной подпрограмме предлагается выполнить работы, направленные на соз-

дание элементной базы оптических компьютеров, систем хранения информации на основе оптических и квантовых методов, в том числе такие, как:

- разработка математической модели лингвистического нейропроцессора на базе Фурье-оптики и моделей самоорганизации на основе конкуренции в нейронных структурах;
- разработка нелинейно-оптических методов обработки информации на основе диагностики состояния поляризации света в веществе, использования явления комбинационного эха, порождаемого предельно короткими импульсами, диссипативных оптических солитонов;
- разработка методов оптического когерентного контроля квантовых состояний в «нульмерных» полупроводниковых наноструктурах (квантовых точках) для систем квантовой информатике и криптографии;
- разработка физических принципов квантовооптической памяти;
- разработка протокола квантовой криптографии на основе кутритов;
- разработка методов резонансной оптической обработки информации в технике фотонного эха;
- разработка полупроводникового лазера фиолетового диапазона спектра, на базе нитридов металлов III группы для оптических устройств обработки и хранения информации в DVD формате.

Подпрограмма « Методы и системы управления излучением в фотонике и оптоинформатике». Мероприятия подпрограммы направлены на создание новой элементной базы, приборов, систем и технологий управления когерентным излучением. В результате выполнения подпрограммы будут разработаны и изготовлены:

- светодиоды, оптические усилители и лазеры для ближней ИК области, включая 1,54 мкм, на основе кремния, легированного редкоземельными элементами;
- новые когерентные и некогерентные источники излучения в вакуумной ультрафиолетовой области спектра, использующих в качестве рабочей среды излучение гетероядерных димеров тяжелых инертных газов;
- преобразователи частоты лазерного излучения на основе новых принципов ВКР генерации в высокодобротных резонаторах и с использованием фазового квазисинхронизма;
- селекторы и узкополосные фильтры на основе объемных и динамических голограмм;
- жидкокристаллические и светуправляемые модуляторы света;
- нелинейные абсорберы и частотные преобразователи излучения;
- голограммные поляризационно-независимые дифракционные решетки для ближней ИК-области спектра;
- устройства пассивной синхронизации мод лазерного излучения на основе современных низкоразмерных гетероструктур;
- широкополосные оптические модуляторы лазерного излучения на эффекте нарушенного полного внутреннего отражения;
- устройства на основе использования плазменного резонанса в поверхностных кластерных наноструктурах и изменении оптическим методом размеров кластерных структур для управления спектральными характеристиками;
- спектрометр с многоэлементной регистрацией и оптоволоконным входом;
- радиационно-стойкие детекторы ультрафиолетового излучения на основе поли- и монокристаллических алмазных пленок;
- тонкопленочные приемники излучения ИК и субмиллиметрового диапазонов спектра на основе жидких кристаллов.

Подпрограмма «Материалы для фотоники и оптоинформатики». В ходе выполнения подпрограммы предполагается разработать и создать новые перспективные оптические материалы для интегрально-оптических устройств систем телекоммуникаций, в том числе:

- полифункциональные лазерные фоторефрактивные стекла для волноводных оптических усилителей света и микролазеров;
- стеклокристаллические материалы, легированных ионами переходных металлов, для высокоэффективных пассивных лазерных затворов;
- магнитооптические стекла и оптическое волокно на их основе с постоянной Верде, на 10–15 % превышающей нынешний мировой уровень, для оптических изоляторов Фарадея;
- светочувствительные халькогенидные стекла для объемных голограммных оптических элементов;
- многослойные микрорезонаторные гетероструктуры для матричных оптоэлектронных устройств.

Подпрограмма «Методы и системы фотоники и оптоинформатики для борьбы с терроризмом». Основные мероприятия по подпрограмме заключаются в разработке оптических приборов и устройств для борьбы с терроризмом, а также для целей радиационной безопасности и решения задач разведки, в том числе:

- разработка оптического комплекса, способного детектировать пары тринитротолуола с концентрацией меньше чем 8 «ppb» на расстоянии до 10 м;
- создание многоспектрального авиационного сканирующего радиометра нового поколения;
- разработка и создание волоконно-оптических систем мониторинга ядерных объектов;
- создание оптических схем и конструкций космических телескопов дифракционного качества разрешения, спектральной аппаратуры и систем лазерной локации для разведки и целеуказания, работающих в УФ, видимой и ИК областях спектра;
- разработка устройств для измерения неровностей слепок пули и края плоского объекта с обработкой результатов измерения на ЭВМ.

Подпрограмма «Методы и приборы для измерений и диагностики». Основные мероприятия по подпрограмме заключаются в разработке оптических приборов нового поколения для решения широкого спектра задач промышленного и научного характера в базовых отраслях – металлургии, нефтехимии, машиностроении, лесопромышленном и аграрном комплексах – при осуществлении экспрессного и лабораторного технологического контроля, а также в обеспечении контроля за окружающей средой в режиме мониторинга для определения загрязняющих веществ в атмосфере, воде и почве, в том числе в создании нового поколения высокоэффективных спектрофотометров для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Основные ожидаемые результаты по подпрограмме:

- создание поляриметрической аппаратуры для неразрушающего контроля параметров полупроводниковых материалов и изделий;
- разработка технологий и установок на основе методов ближнепольной оптики для тестирования элементов интегральной оптики;
- разработка и изготовление экспериментального образца мобильной оптико-электронной интерферометрической системы для восстановления топографии поверхностей различных сложных объектов;
- разработка новых методов и аппаратуры оптической томографии микронного разрешения;
- разработка унифицированного комплекса отечественных автоматических анализаторов ДНК;
- создание новой элементной базы малогабаритных спектрометров комбинационного рассеяния света;
- разработка комплекса аппаратуры контроля параметров поверхностной и объемной однородности материалов, заготовок, покрытий и изделий, в том числе сложной формы, на основе метода зонального спектрофотометрирования;

- создание лабораторного макета комплекса аппаратуры, позволяющей проводить анализ широкого класса жидких и газообразных проб с пределами обнаружения на уровне единиц «процент/миллиард»;
- разработка и создание экспериментального образца газоанализатора для определения предельно низких уровней содержания молекулярных газов в смесях;
- разработка и изготовление экспериментального образца цифрового портативного спектроколориметра;
- разработка сверхвысокочувствительных люминесцентных методов и аппаратуры определения загрязнения токсичными элементами питьевой воды, воздуха и пищевых продуктов;
- разработка новых неинвазивных оптических методов и средств медицинской диагностики для решения проблем систем жизнеобеспечения и защиты человека;
- изготовление опытного образца лазерного стереоинтровизора;
- создание образцов нового поколения офтальмологических асферических объективов;
- создание эффективного рельефного оптоэлектронного модулятора, преобразователя оптического изображения в поверхностную структуру;
- разработка интерферометров для контроля формы плоских и сферических оптических поверхностей диаметров от 3 мм до 30 мм с погрешностью 0,005 мкм;
- разработка и внедрение в производство ТУ на пленкообразующие материалы для оптических покрытий; разработка нестандартных средств контроля и аттестации;
- создание единой информационной базы данных по оптическим постоянным широкого класса материалов и веществ.

Подпрограмма «Фотоника и оптоинформатика в образовании». Основная цель мероприятий подпрограммы – создание условий формирования квалифицированных кадров для оптической науки и промышленности. Мероприятия по подпрограмме будут направлены на:

- создание новых и модернизацию существующих учебно-исследовательских оптических лабораторий;
- создание методов и средств дистанционного обучения, электронных тестов и учебников, виртуальной лаборатории, образовательных сайтов;
- разработку концепции объединения академической, вузовской и отраслевой науки в целях формирования кадров высшей квалификации для оптической науки и промышленности.

Ресурсное обеспечение Программы

Ресурсное обеспечение Программы предусматривает смешанную систему инвестирования с привлечением:

- средств Федерального бюджета;
- внебюджетных средств, формируемых за счет собственных средств организаций и предприятий-исполнителей Программы, с возможным привлечением отечественных и иностранных инвесторов (банков, фондов, коммерческих структур).

Финансирование по программе намечается осуществлять с привлечением дополнительных внебюджетных источников, что может быть осуществлено за счет создания необходимых условий и предпосылок для повышения заинтересованности инвесторов и самих предприятий в создании конкурентоспособной продукции.

Объем финансирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по всем направлениям Программы за счет внебюджетных средств составит одну четвертую часть от общей стоимости работ и будет уточняться по результатам проведения конкурсного отбора исполнителей мероприятий Программы.

Распределение ассигнований по направлениям Программы будет уточняться в установленном порядке в ходе выполнения программных мероприятий и с учетом актуальности проектов для обеспечения национальных интересов государства. Финансирование работ (проектов) по Программе будет осуществляться на конкурсной основе.

Оценка эффективности реализации Программы

Успешное выполнение Программы позволит:

- разработать и создать образцы высокотехнологичной, наукоемкой оптической продукции мирового уровня, обеспечивающей отечественными разработками потребности основных секторов экономики (перерабатывающую промышленность; оборонную промышленность; сферу медицинского обеспечения; системы экологического мониторинга; системы управления, связи и телекоммуникации);
- сформировать научные и технологические основы для повышения экспортных возможностей и конкурентоспособности выпускаемой продукции, закрепления традиционных и освоения новых сегментов мирового рынка оптических изделий и приборов;
- сохранить и создать новые рабочие места на отечественных предприятиях оптической промышленности;
- сохранить существующие оптические научные школы, обеспечить преемственность поколений и подготовки высококвалифицированных кадров для оптической промышленности, преодолеть наметившееся опасное для безопасности страны отставание от мирового уровня по приоритетным направлениям науки и критическим технологическим направлениям.

Литература к Приложению

1. Стратегические приоритеты инновационно-технологического развития России. / Под ред. Ю.В. Яковца. М.: МФК, 2002. 179 с.
2. Фотоника. / Под ред. М. Балкански, П. Лалемана. М.: Мир, 1978. 416 с.
3. Gnauck A. All-Raman-amplified spans transmit at 10 petabit-km/s. // *Laser Focus World*. 2002. V.38. №5. P.11.
4. Mabon M. Soliton solution for longest overland, repeaterless link. // *Lightwave Europe*. 2002. V.1. №3. P.30–31.
5. Research network goes live. // *Lightwave Europe*. 2002. V.1 №5. P. 33. (www.dante.net).
6. Moore G.E. Progress in digital integrated electronics. // *IEEE IEDM Tech. Dig.* 1975. P. 11–13.
7. Meindl J.D. Low power microelectronics: retrospect and prospect. // *Proc. IEEE*. 1995. V. 83. P. 619–635.
8. McAulay A.D. *Optical Computer Architectures: the Application of Optical Concepts to Next Generation Computers*, John Wiley & Sons, New York, NY (1991).
9. Arrathoon R. ed. *Optical Computing: Digital and Symbolic*, Marcel Dekker, New York, NY (1989).
10. Feitelson D. G., *Optical Computing: A Survey for Computer Scientists*, MIT Press, Cambridge, MA (1988).
11. Guilfoyle P.S., McCallum D.S. High-speed low-energy digital optical processors. // *Optical Engineering*. 1996. V. 35. P. A3–A9.
12. Yablonovitch E., Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 58. P. 2059–2061.
13. Photonic & Sonic Band-Gap Bibliography. <http://home.earthlink.net/~jpdowling/pbgbib.html#Y>.
14. Sajeev J., Marian Florescu. Photonic bandgap materials: towards an all-optical micro-transistor. // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2001. V. 3. P. S103–S120.

15. Беспалов В.Г., Васильев В.Н.. Информационные технологии, оптический компьютер и фотонные кристаллы. / В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики, СПб, 2000. С. 88–110.
16. Беспалов В.Г., Крылов В.Н., Путилин С.Э., Стаселько Д.И. Генерация излучения в дальнем ИК диапазоне спектра при фемтосекундном оптическом возбуждении полупроводника InAs в магнитном поле. // Опт. и спектр. 2002. Т 92. № 5. С.409–416.
17. Kincade K., Anderson S.G. Review and forecast of the laser markets. Part I: Nondiode lasers. // Laser Focus World. 2002. V.38. №1. P.81–105.
18. Kincade K., Anderson S.G. Review and forecast of the laser markets. Part II: Diode lasers. // Laser Focus World. 2002. V.38. №2. P.61–81.
19. Nighan B., Chang M. Rebooting: The next opportunities in photonics. // Laser Focus World. 2002. V.38. № 3. P.S9–S11.
20. Bechtel G. Optical IC market speeds up. // WDM Solutions. 2001.V.3. № 7. P. 29.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Н.Ф. Гусарова, А.В. Маятин

Введение

Рост уровня автоматизации современных технических, в том числе информационных, систем парадоксальным, на первый взгляд, образом сочетается с возрастанием роли в них человеческого фактора. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, в орбиту практики и, следовательно, науки вовлекается все больше задач столь высокого уровня сложности, что успешно парировать его с использованием только технического подхода или только человеческого интеллектуального потенциала уже не удастся. Во многих случаях, особенно при построении сложных¹ информационных и информационно-управляющих систем, более эффективными оказываются комплексные решения, сочетающие способности человека и возможности программно-технических средств по переработке информации. Во-вторых, активно развиваются информационные системы, которые по сути своей являются человеко-машинными. Ярким примером здесь может служить Интернет.

Проектирование сложных систем сегодня идет по пути создания полимодельных комплексов [2, 3]. В связи с этим исследование существующих и создание новых моделей человека (МЧ) для включения их в состав таких комплексов представляется актуальным.

В работе анализируются подходы к моделированию роли человека, характерные для технических наук, поддерживающих разработку информационных и информационно-управляющих систем. Делается вывод о наличии в них определенных противоречий, ставится комплекс задач по разрешению последних. Рассматриваются классификационные признаки МЧ, предлагается их дополнение. Предлагается МЧ, построенная на основе теории координации [4], описывается ее использование при моделировании ТП с учетом текущей активности его участников.

1. Анализ подходов технических наук к моделированию человека в информационных системах

Движение к моделированию функций и способностей человека проявляется сегодня в различных технических науках. Так, применительно к искусственному интеллекту в [5] отмечается: «Важная характеристика искусственного интеллекта – он имеет дело только с теми механизмами компетентности, которые носят вербальный характер (допускают символическое представление). Далекое не все механизмы, которые использует для решения задач человек, таковы». Соответственно, важнейшим направлением теории и практики искусственного интеллекта назван перенос компетентности человека в базу знаний системы.

К проблематике роли человека и ее модельного представления обращается теория управления в технических системах, в частности, теория идентификации. Так, в [6] выделен подход к решению задач идентификации, использующий знания не только о типах моделей и их уравнений, но и знания о конструктивных, технологических свойствах системы, а также экспертных знаний о системе. В [7] предложена неклассическая концепция структурной идентификации, согласно которой идентификацией называется

¹ В настоящей статье мы следуем терминологии [1]: «Сложной называется система, модель которой, используемая для управления ею, неадекватна заданной цели, или в ней не хватает информации для эффективного управления»

вся познавательная деятельность лица, принимающего решение (ЛПР), создающая необходимые условия для практического использования формальных основ теории управления при решении конкретной прикладной задачи

Различные варианты построения информационных систем с участием человека демонстрируют работы последних лет в области теории систем и системного анализа. Так, в работах [8, 9] предлагается алгоритмический принцип автоматизированного управления ситуацией с переменной структурой системы в зависимости от критичности возникающих ситуаций, под которой понимаются величины отклонения текущих параметров объекта управления от заданных. При этом интеллектуальная деятельность ЛПР в управлении производственными процессами отображается системой подстраиваемых моделей с интеллектуальным модулем в ситуационных цепях обратной алгоритмической связи по трем способам формирования управляющих воздействий:

- автоматически – на основе формализованных знаний об объекте управления;
- в автоматизированном режиме – на основе формализованных знаний и обобщенного опыта управления ЛПР, т.е. автоматически после параметрической настройки системы;
- в интерактивном режиме – управляющие воздействия задаются ЛПР и могут быть впоследствии включены в контур самообучения системы.

В работе [10] для использования естественного языка при автоматизации проектирования программных и информационных систем предлагается строить модель текста на основе формальной системы $\Psi=(T, G, A, P)$, определяемой над нечеткими структурами. Здесь T – множество гипотез и фактов, выделяемое (очевидно, экспертным путем) в конкретной предметной области, G – грамматика, A – множество принципов, частично формализующих предметную область, P – правила вывода, задаваемые, в том числе, эвристически. Тогда структура текста может быть представлена в виде нечеткого семантического гиперграфа, к которому применимы различные операции вывода.

Использованию неструктурированной, в первую очередь текстовой, информации при проектировании информационных систем посвящена также работа [11]. Здесь не предусматривается какого-либо априорного описания, схемы, модели предметной области или анализируемой проблемы, но существенно используются уникальные возможности человека по интерпретации содержания текстовой информации и установлению связей между фрагментами текста (в первую очередь это происходит на стадии индексации информации).

В работе [12] предлагается проводить системный анализ объекта управления путем его декомпозиции до уровня 10 базисных когнитивных операций (когнитивного конфигуратора по В.А. Лефевру [1]) – присвоение имен, восприятие, обобщение, абстрагирование, оценка адекватности модели, идентификация и прогнозирование, дедукция и абдукция, классификация и генерация конструкторов, содержательное сравнение, планирование и принятие решения об управлении. Модель объекта управления включает 2 семантических подпространства – пространство классов и пространство атрибутов, причем координатами в них являются не коды классов и атрибутов, как обычно, а их информативности. Для реализации задачи управления – перевода объекта управления в заданное целевое состояние – на основе эмпирических данных строится его информационная модель в виде таблицы весовых коэффициентов (какое количество информации система управления получает о наступлении события «объект управления перейдет в j -е состояние» из сообщения «на объект управления действует i -й фактор»).

В работе [13] на основе теории гипернечетких чисел строится глобальный критерий качества сложных систем, формируемый в виде многоуровневой иерархической структуры, определяющей причинно-следственную диаграмму взаимосвязей. При этом исходной информацией служат критерии различных уровней иерархии, которые конструируются на основе экспертных оценок.

Вопросы моделирования человека как звена информационных и информационно-управляющих систем в той или иной мере затрагиваются также в ряде монографий ([14, 15]), а также в большом количестве отдельных публикаций, появившихся за последние несколько лет.

Проведенный краткий обзор позволяет сделать вывод о преимущественной направленности предлагаемых технических решений на создание автономных машинных комплексов, позволяющих формализовать и алгоритмизировать решение интеллектуальных задач. Человек здесь выступает, главным образом, как внешний источник информации однократного или итеративного применения (заполнение матрицы связей, назначение тезауруса предметной области, индексация текста и т.п.) или элемент принятия решения, а рассмотрению его свойств в динамике и возможной их параметризации уделяется недостаточно внимания.

В известной мере альтернативой рассмотренным подходам является концепция гибридного интеллекта, предложенная В.Ф. Вендой [16]. По мысли автора, техническая подсистема не противопоставляется интеллекту человека, а лишь является его интеллектуальным средством, органично дополняя его и многократно увеличивая его возможности. Эта концепция развивается, в частности, научными школами Таганрогского радиотехнического университета [17, 18], однако предлагаемые варианты ее технологической реализации в основном развивают техноцентрический подход.

Так, в работе [19] разрабатывается компьютерная адаптивная интеллектуальная система гибридного интеллекта, позволяющая организовать процесс решения интеллектуальных задач субъектами гибридного интеллекта – человека и ЭВМ (интеллектуальной информационно-советующей системы, программного обеспечения и т.д.). Функционирование модели гибридного интеллекта основано на использовании нечеткой ситуационной сети. Для построения нечетких ситуационных сетей и анализа нечетких ситуаций используются матрицы взаимозависимости значений признаков, коэффициенты которых формируются либо экспертным путем, либо в процессе эксперимента с использованием механизма синтеза знаний. Процесс решения человеком задач, в которых цель достигается посредством последовательной реализации множества взаимосвязанных подцелей, предложено моделировать нечетким недетерминированным автоматом, функция переходов которого, отражающая уже имеющийся у ЛППР опыт управления, строится экспертным путем индивидуально для каждого ЛППР.

В рамках концепции гибридного интеллекта позиционируется также работа [20]. Здесь гибридный интеллект трактуется как сочетание формальных моделей и методов традиционных АСУ ТП с преимуществами систем, основанных на знаниях. Участие человека в работе предусмотрено на уровне блока формирования моделей цели и критериев, где в диалоговом режиме осуществляется декомпозиция глобальных целей управления объектом на последовательность целей более низкого уровня, а также на уровне назначения весовых коэффициентов различных матриц связи.

Этот вывод подтверждает отмеченное в [21] противоречие: теоретические позиции большинства разработчиков современной техники, подкрепленные результатами, полученными в инженерной психологии и эргономике, соответствуют антропоцентрическому подходу, и на концептуальном уровне проблема автоматизации воспринимается ими как междисциплинарная; в то же время на уровне практической реализации прослеживается техноцентрическая ориентация, подкрепляемая возможностями вычислительных средств.

Для разрешения указанного противоречия необходима разработка методик проектирования информационных и информационно-управляющих систем с участием человека как полимодельных комплексов [3], с включением в них модели человека на уровне, адекватном решаемой задаче – не только функциональном, но и структурном, логико-лингвистическом, теоретико-множественном, категорно-функторном и т.д.

Важно отметить, что концептуальная база для моделирования участия человека в информационных системах очень широка: это исследования в области психологии, в том числе в ее когнитивном и социальном аспектах (В.П. Зинченко, Т.П. Зинченко, В.Д. Шадриков, В.Н. Пушкин, Г.М. Андреева и др.); в области искусственного интеллекта (Г.С. Пospelов, Д.А. Пospelов, Г.С. Осипов, А.С. Нариньяни, Т.А. Гаврилова, Л.С. Берштейн и др.); в области гибридного интеллекта (В.Ф. Венда, В.Г. Захаревич, С.В. Астанин и др.); в области теории систем и системного анализа, в том числе рефлексивных и активных систем (Ф.П. Перегудов, Ф.П. Тарасенко, В.А. Лефевр, В.Е. Лепский, Д.А. Новиков, В.Н. Бурков и др.); в области теории принятия решения (О.И. Ларичев, А.Б. Петровский и др.); в области теории моделей и полимодельных комплексов, в том числе их идентификации и квалиметрии (С.В. Емельянов, Н.С. Райбман, В.С. Пугачев, Б.Н. Петров, Я.З. Цыпкин, И.В. Прангишвили, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов и др.); в области информационных технологий, в том числе распределенных информационных систем и интеллектуальных САПР (Б.Я. Советов, В.Н. Васильев, А.А. Шальто, Ю.А. Гатчин, В.М. Курейчик и др.). Кроме того, необходимо опираться на специфику конкретной предметной области, для которой создается информационная или информационно-управляющая система.

В рамках обозначенной проблемы первоочередной интерес, на наш взгляд, представляют следующие вопросы:

- факторы, обуславливающие необходимость вывода информационной системы на уровень гибридного интеллекта, и возможности их идентификации;
- уникальные задачи, решаемые человеком в системах гибридного интеллекта, и пути их описания в рамках полимодельных комплексов;
- особенности восприятия информации как акта принятия решения;
- особенности квалиметрии полимодельных комплексов, описывающих информационные системы с участием человека.
- возможности параметризации МЧ в составе полимодельных комплексов гибридного интеллекта с целью их идентификации;
- пути моделирования аспекта самоорганизации информационных систем и использование теории координации как базы для построения таких моделей;

В настоящей статье рассматриваются два последних вопроса из обозначенного круга проблем.

2. Классификационные признаки МЧ

Концептуальная разнородность существующих подходов к включению человека в состав полимодельных комплексов проявляется уже на уровне терминологии. Приведем только некоторые термины: системы «человек-машина»; эргатические системы или системы «человек-машина-среда»; человеко-машинные (ЧМ) комплексы (системы); гуманистические системы; активные системы [22–26]. Не менее разнообразны и предложенные различными авторами классификации МЧ и подходов к их построению. В табл. 1 приводятся некоторые характерные примеры таких подходов, которые в рамках статьи освещаются очень коротко и только применительно к проблеме включения МЧ в полимодельный комплекс техногенной природы.

Таблица 1

№\п/п	Классификация	Классификационные признаки	Источник
1	1. Технократический подход 1.1. Робототехнический	1. Цель проектирования (обеспечить максимальную эффектив-	[21]

	<p>1.2. Техноцентрический</p> <p>1.3. Системотехнический</p> <p>2. Антропо-социологический подход</p> <p>2.1. Антропологический</p> <p>2.2. Антропоцентрический</p> <p>2.3. Социально-культурный</p>	<p>ность техники / человека).</p> <p>1.1–1.3. Степень автоматизации.</p> <p>2.1–2.3. Отношение человека к техническому объекту (как к элементу деятельности, орудию труда, элементу социальной культуры).</p>	
2	<p>1. Системотехнический подход</p> <p>2. Кооперативный подход</p> <p>3. Человекоцентрический подход</p>	Распределение функций и ответственности между человеком и техническим средством	[26]
3	<p>1. Управляющие системы</p> <p>2. Обслуживающие системы</p> <p>3. Обучающие системы</p> <p>4. Информационные системы</p> <p>5. Исследовательские системы</p>	Целевое назначение системы	[22]
4	<p>1. Моносистемы</p> <p>2. Полисистемы</p>	Количество участвующих людей	[22]
5	<p>1. Инструментальные системы</p> <p>2. Простейшие ЧМ системы</p> <p>3. Сложные ЧМ системы</p> <p>4. Системотехнические комплексы</p>	Сложность технического компонента: 1 – инструменты и приборы; 2 – преобразователи энергии; 3 – технологические процессы и системы автоматического управления; 4 – иерархические системы, неполностью детерминированные связи, коллектив людей.	[22]
6	<p>1. Автоматизированные системы</p> <p>2. Системы «человек-машина»</p> <p>3. ЧМ комплексы</p>	Сложность среды: 1 – оператор – средство технического резервирования; 2 – оператор непосредственно управляет в условиях функциональной сложности, актуальной неопределенности и сложного интерфейса; 3 – то же, что 2, но возможно разрушение системы в целом.	[21]
7	<p>1. А</p> <p>2. В</p> <p>3. С</p>	Динамика изменения цели: А – постоянно (оператор постоянно участвует в управлении); В – эпизодически (оператор участвует на отдельных этапах управления); С – отсутствует (оператор включается только в нештатных ситуациях)	[27]
8	<p>1. Руководитель</p> <p>2. Оператор-исследователь</p> <p>3. Оператор-технолог</p> <p>4. Оператор-манипулятор</p> <p>5. Оператор-наблюдатель</p> <p>6. Оператор-проектировщик</p>	Степень алгоритмизованности действий человека: 1 – полностью нестандартные ситуации; 2 – построение новых концептуальных моделей на базе известных ему; 3 – формальное перекодирование и передача информации; 4 – сенсомоторная регуляция движений; 5 – аналог 3 с редуkcией навыков	[27]

		управления; 6 – выбор модели из БД в диалоге с машиной (САПР)	
	Активные объекты – люди и системы с их участием: организационно-технические, технологические и человеко-машинные системы, коллективы предприятий, экипажи, различные группы населения, электорат, социум, а также сложные и интеллектуальные технические системы с качественно изменяющимися параметрами		[28]

Сравнительный анализ таблицы позволяет говорить о следующем. Во-первых, представленные подходы отражают, скорее, не варианты построения МЧ, а варианты моделирования интерфейсов между человеком и технической системой. Во-вторых, в них не усматривается возможность согласования целей технической системы и текущих целей (активности) человека как ее элемента, что необходимо для решения поставленных во введении задач.

2. Механизмы представления и обработки информации как основание для классификации МЧ

Человек выполняет в современных технологических комплексах (ТК) разнообразные функции (ср. табл. 1, поз. 8), которые в литературе [28–30] принято группировать в несколько основных ролей – оператор, диспетчер, наладчик, эксперт, лицо, принимающее решение (ЛПР). На понятийном уровне эти роли можно очертить следующим образом.

Оператор, вручную или с помощью приборов, осуществляет непосредственное управление ТС. Усложнение ТК влечет за собою изменение характера деятельности оператора от относительно постоянного набора стандартных задач до динамического управления автоматизированной системой. В последнем случае чаще используется термин «диспетчер». Диспетчерское управление означает, что один или более операторов устанавливают начальные условия для выполнения работы, периодически корректируют ход процесса и принимают информацию от компьютера, который сам замыкает цепи обратной связи с внешними датчиками, рабочими органами и средой выполнения работы. Наладчик (специалист по техническому обслуживанию) диагностирует и, по возможности, устраняет неисправности технологического оборудования. Эксперт (специалист) рассматривается как носитель знаний (компетентности), накопленных в результате профессионального опыта.

ЛПР, располагая собственным или коллективным набором ценностей, отражающим отдельные аспекты ТК, выбирает такие действия, которые наилучшим образом удовлетворяют этому набору, причем несет ответственность за возможные негативные последствия принятых решений. Для облегчения принятия решения разработан целый ряд методик системного анализа [31], основанных на коллективном принятии решений, формализованном моделировании и активизации ЛПР.

Таким образом, техноцентрический взгляд на ролевые функции человека в технологическом процессе можно обобщить следующим образом [31]. Оператору, диспетчеру и наладчику в технической системе предписываются вполне определенные правила поведения, и нерелевантность их как звеньев системы считается пренебрежимо малой. С другой стороны, роль эксперта или ЛПР в системе состоит в снижении уровня ее слож-

ности на основе использования интеллектуально-интуитивных способностей. Такой подход во многом противоречит реальным задачам, решаемым ТК [21].

Поведение человека в технологическом процессе может быть структурировано по различным признакам, образующим своего рода «поведенческое пространство». Сводка таких классификаций [32] представлена в табл. 2.

Таблица 2

№	Признак	Содержание	Характеристики
1	Задачи человека	1.1. Планирование работы	В автономном режиме
		1.2. Программирование системы	В соответствии с задачей процесса
		1.3. Оперативный контроль выполнения задачи процесса	Убедиться, что все идет по плану; выявить возможные неисправности. Часто производится в терминах нечетких множеств типа 1..
		1.4. Вмешательство (вывод из автоматического режима)	Для задания новой цели или в аварийной ситуации
		1.5. Самообучение	Периодически, после нескольких циклов работы системы
2	Физиологические функции человека	2.1. Сенсорные	Доступ к индикаторным табло, наблюдение, восприятие и т.д.
		2.2. Когнитивные	Оценка ситуации, принятие локального решения
		2.3. Ответные (эффекторные)	Отработка принятого решения
3	Уровни деятельности человека	3.1. Практический (рутинный)	Высокая сенсомоторная и когнитивная производительность. Осуществляется бессознательно. Проявляется в виде отработанных, целостных, шаблонных действиях. Внешняя информация используется лишь для запуска подходящего действия
		3.2. Нормативный	Сознательная активизация в памяти определенного набора правил (инструкций, опыта). Новые правила не выводятся
		3.3. Основанный на знаниях	В совершенно новых или сложных ситуациях. Производится полномасштабное решение задачи с привлечением всех когнитивных ресурсов
4	Уровни представления знаний	4.1. Знания для их изложения	Предназначены для аргументации, для изложения на междисциплинарном уровне и т.п. Форма - вербальная
		4.2. Знания, применяемые в собственной реальной практике	Еще вербализуемые, но уже нерелексивные
		4.3. Собственно опыт	Знания на самом глубоком, неосознаваемом уровне. Обеспечивают решения типа озарения (инсайта) и творческие акты. Форма - интуитивная

Анализ табл. 2 применительно к описанным выше ролевым функциям человека в технологическом процессе позволяет сделать вывод, что четкая граница между ними в современных условиях исчезает. Хорошим примером здесь может служить применение термина «оператор» к человеку, осуществляющему дистанционное управление луно- или марсоходом [33]. В процессе выполнения технологической задачи он использует практически все позиции табл. 1.2.1, а при реализации {1.2, 1.4, 3.3} включает не только когнитивные, но и творческие ресурсы, сочетая в своей деятельности контекстно-независимое и контекстно-зависимое управление. В то же время до сих пор распространено мнение, что роль оператора ограничивается позициями {1.3, 1.4, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2}. Видимо, поэтому в литературе по теории автоматического управления субъективность оператора часто расценивается как недостаток и ставится задача полного устранения человека из ТП. С другой стороны, в зависимости от задач ТП эксперт или ЛПР может работать на любом из уровней групп 3 и 4 [29].

Таким образом, имеет смысл структурировать место человека в ТК по признаку используемых им механизмов представления и обработки информации. Базой для такого структурирования может служить целый ряд фундаментальных результатов, полученных современной когнитивной психологией [34, 35].

3. Уровень системной сложности как основание для классификации МЧ

Материалы раздела 2 позволяют сделать вывод, что, несмотря на концептуальную значимость антропоцентрического подхода к построению МЧ, наибольший интерес для разработчиков представляют те модели, которые сравнительно легко встраиваются в техноцентрическую парадигму, т.е. те, в которых человек выступает как звено системы управления того или иного типа. В этом плане представляется целесообразным ввести расширение традиционных техноцентрических моделей за счет введения в них параметра внутренней активности человека, которая изменяет выходной вектор системы. Соответствующая обобщенная схема приведена на рис. 1.

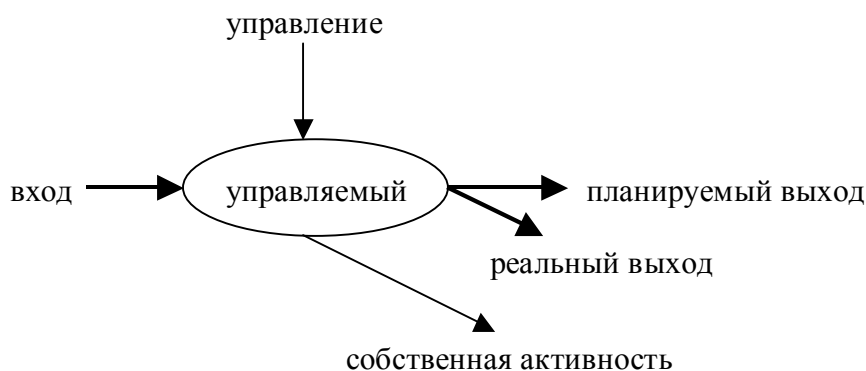


Рис. 1. Модель человека как звена системы управления

Очевидно, что эффективность систем с участием человека во многом зависит от уровня и направленности активности человека. Поэтому для расширения инструментальных возможностей включения МЧ в структуру полимодельных комплексов представляется целесообразным использовать в качестве еще одного основания для классификации системно-структурный уровень (по [36]) актуально решаемой задачи и, соответственно, актуальное состояние его активности. Напомним классификацию систем, предложенную в [36]:

1. статические структуры;
2. простые динамические системы с predetermined движениями;
3. системы с управляемой обратной связью;

4. самосохраняющиеся структуры;
5. генетически-общественных структуры (растения);
6. животные;
7. отдельный человек как система;
8. социальные институты;
9. трансцендентные системы.

Отдельный человек сочетает в себе практически все эти уровни, но для моделирования включения его в информационные системы наибольший интерес представляют три уровня переработки информации – уровень неживой природы (3), уровень живой природы (6) и уровень сознания (7), в том числе социальной активности (8). Какой именно уровень будет доминировать в том или ином поведенческом проявлении человека, во многом зависит от решаемой задачи, в частности, от условий ее постановки и предъявления, причем эта зависимость, как показывает опыт, является динамической и может изменяться в ходе решения задачи. Представляется, что одним из основных параметров управления здесь выступает характер структурирования и предъявления перерабатываемой человеком информации (А), определяющий актуальную для него пару «положение человека как системной единицы на шкале Боулдинга (В) – активность человека (С)», причем для определенной задачи существует зона {А, В, С} устойчивости решений.

МЧ как элемента системы с управляемой обратной связью (уровень 3) можно соотнести с теми задачами, в которых внутренняя активность управляемого игнорируется или подавляется. Тогда управляемого можно рассматривать как одно из звеньев кибернетической системы и использовать для его описания хорошо разработанные формализмы – передаточные функции, системы массового обслуживания, конечные автоматы и др. Этому уровню соответствует моделирование человека как пассивного звена технической системы, которое производится с использованием многочисленных формализмов, анализ которых выходит за пределы настоящей работы.

МЧ как представителя животного мира (уровень 6) целесообразно соотнести с теми задачами, где внутренняя активность человека рассматривается как управляемая. Такие модели на лингвистическом уровне хорошо разработаны в психологии группового поведения. Актуальной областью их применения представляются, например, информационные системы, использующие групповую поведенческую активность пользователей сети Интернет.

МЧ уровня 7 целесообразно использовать в тех случаях, когда содержание задачи требует полномасштабного включения в ее решение внутренней активности человека.

Моделирование активности человека как участника технической системы производится с разных позиций.

Как показывает обзор, проведенный в работе [21], в психологии, в том числе инженерной психологии, активность субъекта-профессионала изучается главным образом в социальном контексте – в плане оценки компетентности, ответственности, личностной зрелости, уверенности, межличностных отношений. Здесь используются, главным образом, лингвистические модели.

В теории активных систем [37] люди и системы с их участием рассматриваются как активные объекты, имеющие собственную систему целеполагания и принятия решений, а также адаптивную модель предметной области, включая модели самого себя (т.е. являются рефлексивными) и управляющих систем различного уровня и назначения, которые воздействуют на АО как на объект управления. Для моделирования таких систем в качестве базы используется теория игр, в том числе кооперативных и коалиционных.

В теории принятия решений [38] активность субъекта моделируется актом принятия решения, который рассматривается как выработка управления на бифуркационном этапе развития системы и сразу после него. При каждом прохождении через точку би-

фуркации необходим новый синтез модели объекта управления, т.е. в этом случае адаптации (количественного уточнения существующей модели) уже недостаточно. Поэтому акт принятия решения рассматривается как существенно неформализуемый и осуществляется только человеком. Задача модели состоит в том, чтобы максимально облегчить для человека процесс познания предметной области, создав для этого наиболее комфортные информационные и функциональные условия.

С другой стороны, активность субъекта является предметом изучения целого ряда гуманитарных дисциплин – эргономики, инженерной, когнитивной и социальной психологии, социологии, экономики и др. Практически в каждом из этих направлений за последние годы получены важные результаты, и сведение их на уровне построения полимодельных комплексов для формирования управления в сложных ТК является актуальной проблемой.

4. Моделирование человека на основе теории координации

Адекватная МЧ в составе ТК должна удовлетворять двум основным требованиям: отражать отдельные, наиболее важные с позицией решаемой задачи аспекты поведения человека в ТК, а также «вписываться» по своему формализму в общую модель ТК.

Материалы раздела 2 показывают, что в ряде ТК от человека, являющегося их неотъемлемым звеном, «по умолчанию» ожидается поведение, содержащее неформализуемые, эмерджентные [1] элементы и, следовательно, не сводимое к кибернетической модели. Для организации управления таким ТК целесообразно полномасштабное применение системного подхода. Так, в [39] предложена замена классической, «сигнальной» парадигмы управления на парадигму согласования структур данных. Здесь управление рассматривается не как непосредственная подача управляющего сигнала, а как процедура согласования структуры (контекстной связи) данных, которыми оперирует объект (в роли которого в нашем случае выступает человек – участник ТК) и субъект управления. Отметим, что при таком подходе мы вынуждены допустить принципиальное ограничение наблюдаемости человека как объекта управления, т.е. слабую формализуемость его действий и их последствий в ТК.

В определенном смысле объединяющим подходом стали бы МЧ, отражающие его способность к самоорганизации (текущей структурной адаптации) в изменяющихся условиях. Основанием для построения таких моделей может служить предложенная в [4] и активно развиваемая в настоящее время [40] теория координации в иерархических многоуровневых системах. Отмечая, что эта теория разрабатывалась ее авторами [4], в частности, для моделирования поведения человека в организации на уровне ЛПП, выделим ее существенную особенность: для применения ее формализмов достаточным является условие, чтобы состояние системы, в котором ее цель достигнута, могло быть опознано, по крайней мере, самой системой. Для человека как активной системы это условие выполняется практически всегда.

В работе [32] для моделирования активности человека как участника ТК предложена иерархическая модель (рис. 2), базирующаяся на концепции координации. Два нижних уровня модели, $S_{\text{когн}}$ и P , описывают мыслительный (когнитивный) и исполнительный уровень человека при решении им некоторой задачи P : $\omega \rightarrow y$. Вектор соответствующих управляющих сигналов и сигналов обратной связи обозначен как $\{m, z\}$. Верхний уровень, $S_{\text{афф}}$, выполняет роль координатора, задавая (параметризуя) критериальную функцию задачи посредством координирующего сигнала γ . С содержательной точки зрения такое сочетание позволяет отразить взаимовлияние когнитивной (семантической) и аффективной (эмоционально-мотивационной, т.е. активностной) компоненты субъективного пространства человека.

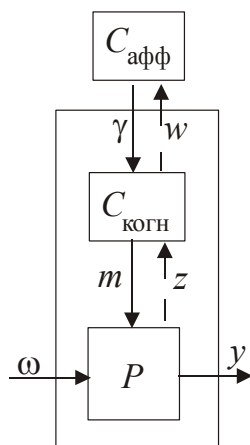


Рис. 2. Модель человека-звена ТК как иерархической системы

Проиллюстрируем возможности модели на примере организации взаимодействия двух участников ТК компьютерной дорепродукционной подготовки полиграфической продукции [41] – заказчика З и исполнителя И – при разработке макета обложки для издания (рис. 2). Исполнитель И представлен тремя блоками. Блок P соответствует исполнительным (моторным) функциям, необходимым при выполнении задачи. Блок $C_{КОГН}^И$, отражающий когнитивный (мыслительный) уровень человека, можно интерпретировать как фрагмент ментального пространства исполнителя, относящийся к выполняемой задаче. Блок $C_{афф}^И$ описывает аффективный (оценочный) уровень исполнителя, который с помощью сигнала $\beta_И$ актуализирует конфигурацию ментального пространства $C_{КОГН}^И$, достаточную для выполнения задачи на определенном уровне качества. Взаимодействие $C_{афф}^И \rightarrow C_{КОГН}^И$ можно рассматривать как динамическое преобразование базы знаний исполнителя. Заказчик З представлен двумя блоками – $C_{КОГН}^З$ и $C_{афф}^З$, так как он при решении задачи не выполняет непосредственно исполнительских функций.

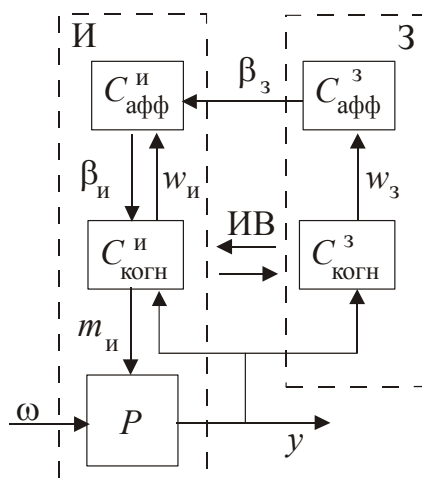


Рис. 3. Модель информационного взаимодействия участников ТК

Если между когнитивными блоками заказчика З и исполнителя И не происходит информационного взаимодействия ИВ, то процесс выполнения задачи выглядит следующим образом. Исполнитель представляет заказчику вариант обложки y , выполненный под воздействием управляющего сигнала $m_И$, соответствующего определенному уровню $\beta_И$. Заказчик сравнивает этот вариант с собственным представлением (вирту-

альной моделью, имеющейся у него в ментальном пространстве $C_{\text{когн}}^3$) и по результатам сравнения в блоке $C_{\text{афф}}^3$ формирует оценку β_3 . Под воздействием этой оценки в блоке $C_{\text{афф}}^{\text{и}}$ формируется новый сигнал $\beta_{\text{и}}'$, который, в свою очередь, инициирует новое значение сигнала управления $m_{\text{и}}'$.

На первом этапе координации в исходном признаковом пространстве V выделяется односвязная область V_n , на которой выполняется завершающее улучшение (этот процесс подробно рассмотрен в [32]). Если достигнута односвязность признакового пространства рисунка, т.е. его стилевая концепция не подлежит изменению, то сигнал $m_{\text{и}}'$ соответствует неким формальным преобразованиям элементов этого рисунка (например, изменению их относительного положения, размеров, шрифтов и т.п.), которые легко выполняются программным образом и приводят к изменениям рисунка, т.е. новому сигналу y' , который вновь оценивается заказчиком.

В этом случае исполнитель, получая только бинарную оценку y' (типа «нравится / не нравится»), не имеет информации для формирования рациональной стратегии улучшения, и сходимость процесса не гарантируется. Если же такая информация поступает в одностороннем порядке по связи ИВ (заказчик прямо указывает исполнителю, какие именно изменения нужно внести в рисунок), то процесс решения задачи улучшения становится сходящимся, но вырождается в одноцелевое многоуровневое управление, т.е. исполнитель переходит в пассивный режим. Тогда при решении следующей задачи требуется столь же полномасштабное участие заказчика.

Противоположный вариант выполнения задачи имеет место в том случае, когда между заказчиком и исполнителем происходит симметричный информационный обмен ИВ. Здесь в процессе итераций формируется общее понимание задачи на когнитивном и аффективном уровнях, т.е. общие для заказчика и исполнителя базы $C_{\text{когн}}$ и $C_{\text{афф}}$, что и гарантирует его сходимость. Как показывает наш опыт, следующие задачи из этой односвязной области признаков исполнитель уже может решать без участия заказчика.

Между рассмотренными случаями лежит целый спектр возможного развития взаимоотношений заказчика и исполнителя, определяемый, в основном, соотношением прямого и обратного информационных потоков по связи ИВ. Однако их успешность применительно к решению последующих задач, как легко видеть, определяется степенью гомоморфности $C_{\text{когн}}^3$ и $C_{\text{когн}}^{\text{и}}$, достигнутой по окончании итераций.

Заключение

В статье проанализированы подходы к моделированию роли человека в технологических комплексах, характерные для технических наук, поддерживающих разработку информационных и информационно-управляющих систем. Выявлены определенные противоречия в этих подходах, сформулированы задачи по их разрешению. Рассмотрены существующие классификации моделей человека, предложено их дополнение, эффективное с точки зрения введения моделей человека в структуру полимодельных комплексов. Предлагается модель участия человека в технологическом комплексе, построенная на основе теории координации и учитывающая динамику активности человека. Описано ее использование при моделировании технологического процесса в полиграфии.

Литература

1. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1989.

2. Технология системного моделирования. / Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. 520 с.
3. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов. // Известия РАН. Теория и системы управления. 2004. №6. С. 5-16.
4. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
5. Осипов Г.В. Искусственный интеллект: состояние исследований и взгляд в будущее // Компьютерра. 2002. №30 (455).
6. Пащенко Ф.Ф. Метод функциональных преобразований и его применение в задачах моделирования и идентификации систем / Автореф. дисс... д.т.н. : Спец. 05.13.01. Рос. акад. наук, Ин-т пробл. упр. им. В.А. Трапезникова. М., 2001.
7. Прангишвили И.В., Гинсберг К.С. Системные закономерности и теория идентификации. // Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO 2000). Москва, 26-28.09.2000. Пленарный доклад.
8. Парфенов И.И., Парфенова М.Я., Глинкин В.И. Интеллектуальные системы управления на числах Фибоначчи. Уфа: Гилем, 1997. 293 с.
9. Парфенов И.И. Разработка методологии автоматизированного управления ситуациями в организационно-технических системах. / Автореф. дисс... д.т.н. : Спец. 05.13.01. Моск. акад. рынка труда и информ. технологий. М., 2004.
10. Заболеева-Зотова А.В. Лингвистические системы: модели, методы, приложения. Волгоград: ВолгГТУ, 2004. 228 с.
11. Лакаев А.С. Разработка интеллектуальных технологий и методов обработки неструктурированной информации / Автореф. дисс... д.т.н. : Спец. 05.13.01. Моск. гос. ин-т электроники и математики (техн. ун-т). М., 2003.
12. Луценко Е.В. Автоматизация базовых когнитивных операций системного анализа в управлении активными объектами. / Автореф. дисс... д.т.н. : Спец. 05.13.01. Кубан. гос. технол. ун-т. Краснодар, 2002.
13. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология М.: Машиностроение – 1, 2004.
14. Гриф М.Г., Цой Е.Б., Титова В.А., Цой М.Е., Мамонова Е.В. Автоматизация проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем на основе метода последовательной оптимизации / Монография. Изд-во НГТУ, 2005. 264 с.
15. Гладун В.П. Партнерство с компьютером (человеко-машинные целеустремленные системы). К.: Port-Royal, 2000. 128 с.
16. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта: эволюция, психология, информатика. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.
17. Астанин С.В., Берштейн Л.С., Захаревич В.Г. Проектирование интеллектуального интерфейса «человек-машина». Ростов-на-Дону: Изд. ОГК, 1991. 110 с.
18. Астанин С.В., Захаревич В.Г. Информационно-советующие комплексы систем гибридного интеллекта. Таганрог: ТРТУ, 1997. 136 с.
19. Астанин С.В. Нечеткие модели и методы принятия решений в человеко-машинных и организационных системах гибридного интеллекта. / Автореф. дисс... д.т.н. : Спец. 05.13.16. Таганрог: ТРТУ, 1997.
20. Кушников В.А. Модели и методы анализа свойств целей и синтеза критериев в системах управления производственными процессами. / Автореф. дисс... д.т.н. : Спец. 05.13.01. Сарат. гос. техн. ун-т. Саратов, 2000.
21. Голиков Ю.Я. Методология психологических проблем проектирования техники. М.: ПЕРСЭ, 2003. 223 с.

22. Ломов Б.Ф. О путях построения теории инженерной психологии на основе системного подхода. // Инженерная психология: теория, методология, практическое применение. М.: Наука, 1977. С. 31-55.
23. Зинченко В.П., Мунипов В.М. Система «человек и машина» / БСЭ, 3-е изд., 1969-1978 гг.
24. Мунипов В.М. Эргономика / БСЭ, 3-е изд., 1969-1978 гг.
25. Человеко-машинные, социально-экономические и профессиональные вопросы ИТ / Информационный портал по русскоязычным образовательным ресурсам http://window.edu.ru/window/library?p_frubr=1.5&p_rubr=2.2.75.6.23
26. Johanson G. et al. Theoretical problems in man-machine systems and their experimental validation. // Automatica. 1994. № 2. P. 217-231.
27. Информационно-управляющие человеко-машинные системы : Исследование, проектирование, испытания: Справ. / Под общ. ред. проф. А.И. Губинского и проф. В.Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993. 527 с
28. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер, 2000. 384 с.
29. Человеческий фактор. В 6 тт. Т.3. Моделирование деятельности, профессиональное обучение и отбор операторов: Пер. с англ. (Часть 1. Модели психической деятельности). М.: Мир, 1991. 487 с.
30. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам. М.: Мир, 1989
31. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа / Учебник для вузов. СПб: Изд. СПбГТУ, 1997. 510 с.
32. Гусарова Н.Ф. Координация в технологических процессах со слабо формализуемыми критериями. Монография. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2001 271 с.
33. Аппаратные и программные средства интеллектуальных автоматизированных систем в машиностроении / Ред. А.Е. Городецкий. СПб: ИПМ РАН, 1993. 72 с.
34. Величковский Б.М. Современная когнитивная психология. М.: МГУ, 1982.
35. Солсо Р. Когнитивная психология / Пер. с англ. М.: Тривола, 1996. 600 с.
36. Боулдинг К. Общая теория систем – скелет науки // Исследования по общей теории систем. М.: Прогресс, 1969. С. 106–124.
37. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: Синтег, 1999.
38. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах. М.: Логос, 2002. 392 с.
39. Ерофеев А.А., Поляков А.О. Интеллектуальные системы управления. СПб: Изд. СПбГТУ, 1999. 264 с.
40. Курейчик В.В. Эволюционные, синергетические и гомеостатические методы принятия решений. Монография. Таганрог. Изд-во ТРТУ, 2001.
41. Энциклопедия книжного дела. / Ю.Ф. Майсурадзе и др. М.: Юристъ, 1998. 536 с.

ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Н.Ф. Гусарова, А.В. Маятин

Введение

Востребованность процедур обработки оптических изображений в разнообразных практических приложениях не вызывает сомнений – достаточно упомянуть объемы визуальной информации, содержащиеся в сети Интернет. Как научное направление обработка оптических изображений рассматривается с разных сторон, в том числе как приложение компьютерной обработки данных [1], компьютерного зрения [2], иконики [3], распознавания образов [4], искусственного интеллекта [5], причем, как показывает анализ литературы, повышение эффективности обработки изображений сегодня главным образом связывается с ростом уровня ее автоматизации. Значительно меньшее внимание уделяется эффективности использования возможностей человека при обработке изображения и, в частности, более адекватной организации человеко-машинных процедур (ЧМП), входящих в процесс обработки изображений.

В настоящей статье рассматриваются предпосылки организации ЧМП в обработке оптических изображений. Приводятся конкретные примеры таких процедур. Обсуждается круг задач, для решения которых ЧМП являются адекватными, и перспективы развития ЧМП в обработке изображений.

1. Генезис человеко-машинных процедур в обработке оптических изображений

Круг обсуждаемых проблем проиллюстрируем на примерах.

Одной из традиционных задач обработки изображения в полиграфии, подготовке контента для ресурсов Интернет и т.п. является выделение объекта на фоне. На рис. 1а значимые объекты (в данном случае – мягкие игрушки) сфотографированы на однородном фоне, который для дальнейшей работы должен быть удален (заменен на другой). Для автоматизированного решения этой задачи используется выделение соприкасающихся участков изображения с близкими цветовыми координатами (программный продукт Adobe PhotoShop, инструмент magic wand). Максимальное различие цветовых координат в выделяемой области задается шкалируемым параметром «толерантность» t . Однако использовать этот параметр для однозначного разделения фона и объектов не удается: при $t = 10$ захватывается часть объекта (рис. 1б), а при $t = 9$ выделяется не весь фон (рис. 1в). Это вызвано тем, что на отдельных участках изображения разброс цветовых координат фона превышает разность цветовых координат между фоном и объектами (рис. 1д). Несмотря на это, человек однозначно определяет границу между фоном и изображением, если видит «смысловую» часть изображения (рис. 1г), и не может определить границу в противном случае (рис. 1д). Кроме того, эффективность описанного подхода сильно зависит от выбора первой точки, относительно которой осуществляется формирование выделенной области близких цветов: при небольшом увеличении, когда в кадре видна большая область изображения, трудно осуществить точное наведение на точку конкретного цвета, а при сильном увеличении за счет многократных аппаратных и программных интегрирований теряется привязка цветовых координат искомой точки.

Аналогичные проблемы возникают при автоматизации разбраковки полотна в трикотажном производстве. На рис. 2–5 представлены фотографии участков трикотажного полотна из натуральной (рис. 2, 3) и синтетической (рис. 4, 5) пряжи, содержащих дефект «спущенная петля по лицевой стороне» (рис. 2, 4) и «спущенная петля по изнаночной стороне» (рис. 3, 5), а также результаты компьютерной обработки изображе-

ний, моделирующей изменение порога ограничения при бинарном преобразовании с целью выделения дефекта. Дефектные зоны на фотографиях обозначены буквой Д.

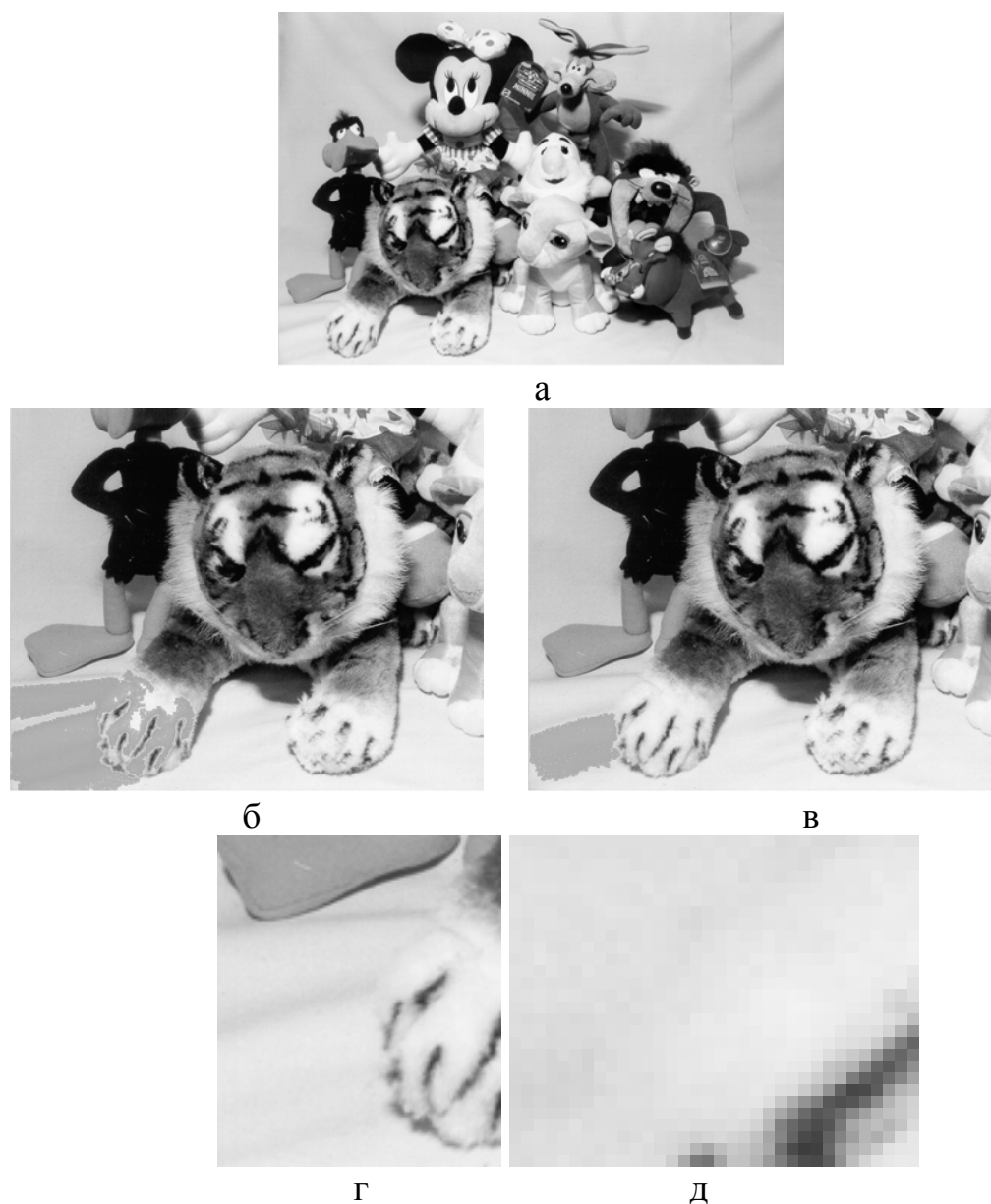


Рис. 1. Устранение фона в изображении: а – исходное изображение, б – выделение фона, значение толерантности 10, в – то же, значение толерантности 9, г – увеличенный фрагмент (граница фона и изображения визуально определима), д – тот же фрагмент с большим увеличением (граница фона и изображения не определяется даже визуально)

Сравнение рис. 2а–5а показывает, что при визуальном контроле полотна дефект уверенно распознается как непрерывная более темная полоса на однородном бездефектном фоне. В то же время результаты автоматического контроля зависят от типа перерабатываемой нити. Так, на полотне из синтетической нити пороговые значения яркости, соответствующие выделению дефекта и бездефектного полотна, составляют $t_{\text{деф}} = 36$, $t_{\text{бездеф}} = 69$ (рис. 4б) и $t_{\text{деф}} = 10$, $t_{\text{бездеф}} = 49$ (рис. 5б), что позволяет организовать выделение дефекта на полотне в автоматическом режиме. В то же время на полотне из натуральной (шерстяной) пряжи и дефектная, и бездефектные зоны представляют собою «штриховые» линии со случайным шагом и трудно различимы по статистическим показателям. Так, для

дефекта «спущенная петля по лицевой стороне» экспериментально определенное значение $t_{\min} = 6$ соответствует точкам минимальной яркости исходного изображения (рис. 2б). При этом одновременно выделяются точки, соответствующие дефекту (зона Д) и бездефектному полотну. Увеличение порога ограничения (например, до $t = 71$, рис. 2в) не улучшает условия распознавания. Аналогичные проблемы возникают и при распознавании дефекта «спущенная петля по изнаночной стороне» ($t_{\min} = 5$, рис. 3б).

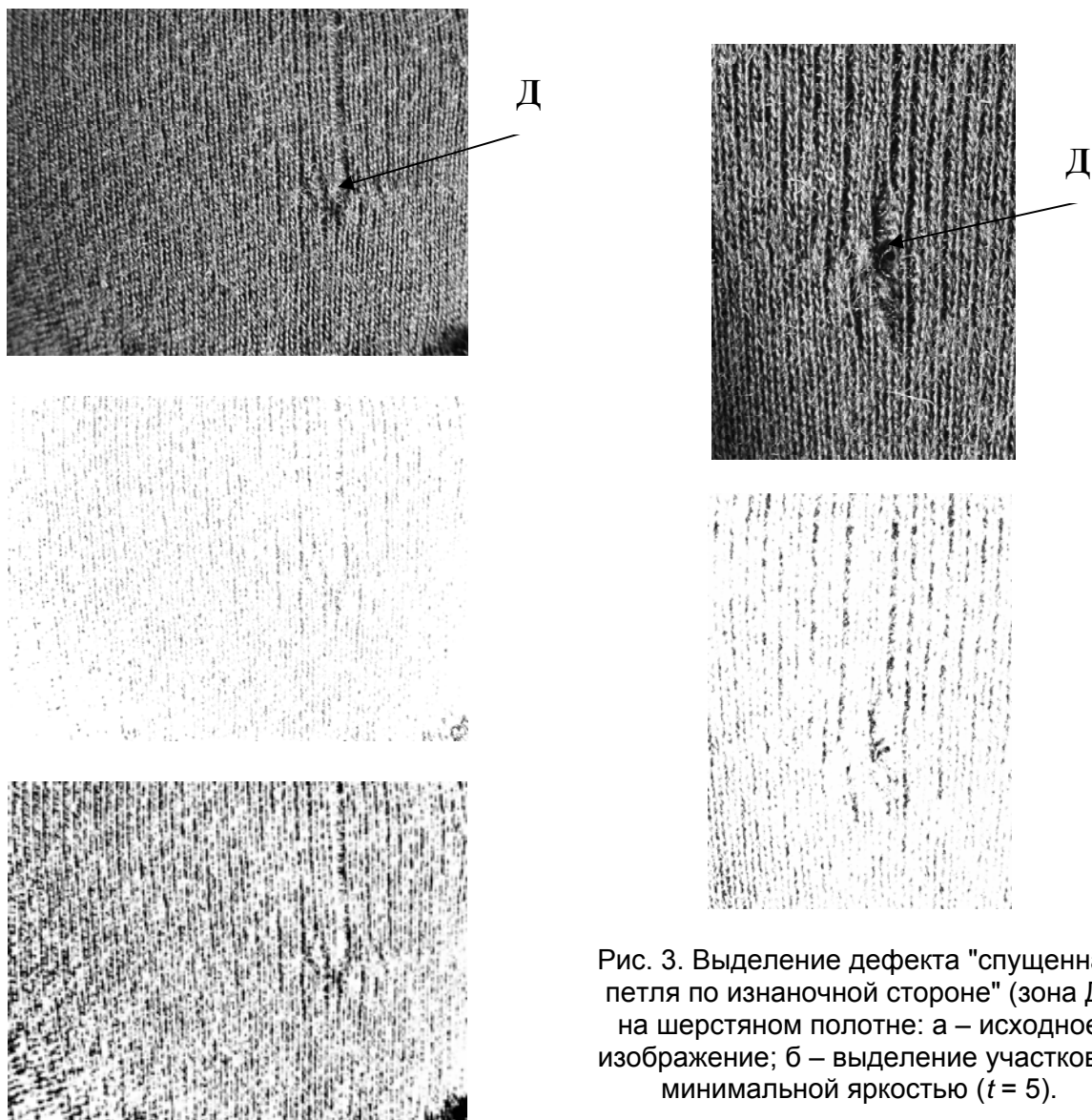
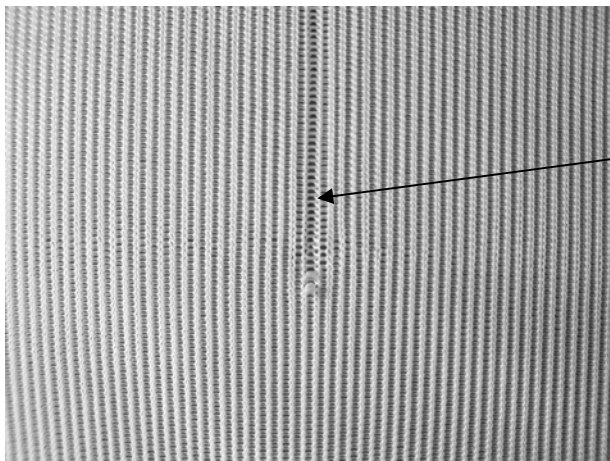
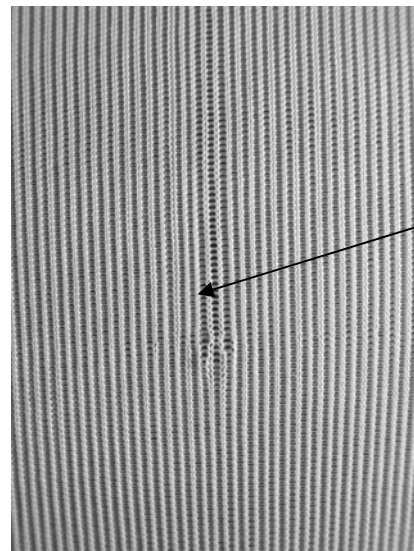


Рис. 2. Выделение дефекта "спущенная петля по лицевой стороне" (зона Д) на шерстяном полотне: а – исходное изображение; б – выделение участков с минимальной яркостью ($t = 6$); в – то же, $t \leq 71$

Рис. 3. Выделение дефекта "спущенная петля по изнаночной стороне" (зона Д) на шерстяном полотне: а – исходное изображение; б – выделение участков с минимальной яркостью ($t = 5$).



Д



Д

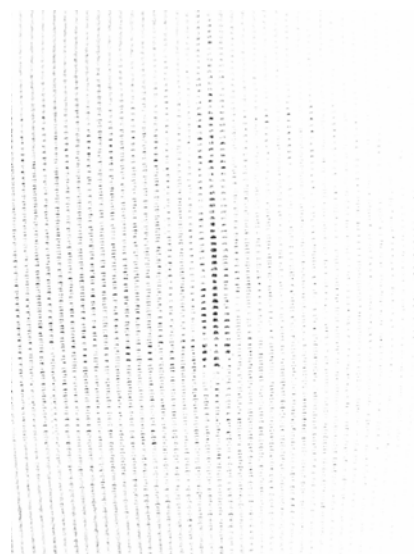
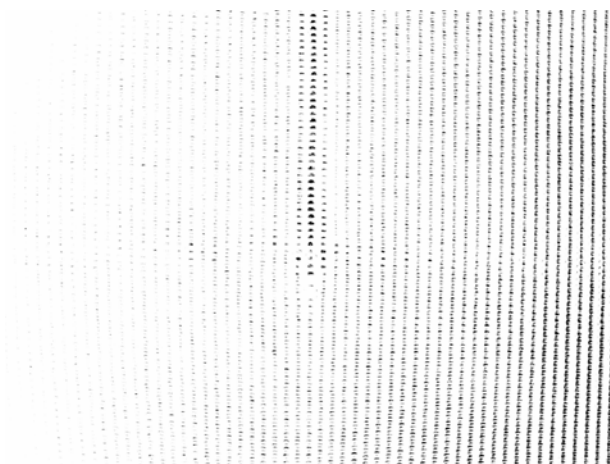


Рис. 4. Выделение дефекта "спущенная петля по лицевой стороне" (зона Д) на синтетическом полотне: а – исходное изображение; б – выделение участков с минимальной яркостью ($t = 36-69$)

Рис. 5. Выделение дефекта "спущенная петля по изнаночной стороне" (зона Д) на синтетическом полотне: а – исходное изображение; б – выделение участков с минимальной яркостью ($t = 10-49$)

Еще одним примером может служить проблема выделения протяженных объектов при построении цифровых карт: для объектов, «не имеющих четко выраженного векторного представления» [1] (например, границы песков), организовать автоматическую процедуру не удастся, и используется ручной ввод координат с помощью «мыши».

Анализ обозначенного круга проблем позволяет говорить о том, что необходимость введения человеко-машинных процедур в обработку оптического изображения обуславливается системной сложностью проблемной ситуации и/или текущей постановки задачи, а сами эти процедуры рассматривать как реализацию управления в условиях неопределенности [6].

В [7] вводится следующая классификация неопределенных факторов:

1. неопределенности среды (природные неопределенности);
2. неопределенность «активного партнера»;
3. неопределенность цели.

Различные проявления неопределенных факторов применительно к задачам управления рассматриваются в [8–10]. Рассмотрим проявления этих факторов применительно к задаче обработки оптического изображения.

Неопределенность среды традиционно [11, 12] связывается с внесением в проблемную ситуацию непредсказуемых возмущений со стороны внешней среды. При этом целесообразно рассматривать не только возмущения, происходящие непосредственно в момент фиксации результата, но и все возмущения, повлиявшие на его формирование. Таким образом, не менее важный аспект неопределенности для обработки оптических изображений лежит в специфике объектов естественной природы, входящих в состав проблемной ситуации, в частности, в их фрактальной структуре [13].

Так, перерабатываемые в трикотажной промышленности нити образуются путем скручивания (прядения) из отдельных волокон. Синтетические моноволокна, образуемые путем выдавливания из фильер, и нити из них характеризуются регулярностью формы (в основном цилиндрической) и физических свойств. В результате полотно из синтетического материала (рис. 4, 5) имеет четкую объектную структуру (полотно в целом – нити – волокна) и, соответственно, выраженную форму, границы и статистические параметры на каждом уровне структурной организации.

Волокна из природных материалов, напротив, обладают сложной формой, а их физические параметры часто не подчиняются теореме сжатия. Например, хлопковое волокно имеет вид штопора или сверла, оно обычно искривлено, а на его поверхности имеются включения, трещины и т.д. Нити из таких волокон представляют собою длиномерную структуру со сравнительно плотной приосевой зоной, окруженной «ореолом» из выбивающихся волокон. Этот «ореол» сохраняется на поверхности полотна в целом (рис. 6), что и позволяет говорить о фрактальности (масштабном самоподобии) полотна. Кроме того, в ходе ТП вместе с текущим участком нити могут провязываться и "выбивающиеся" волокна, принадлежащие соседним участкам. В результате в определенной степени теряется объектная структура полотна, становятся нечеткими понятия границ и параметров объектов и слабо формализуемым – понятие дефекта полотна.

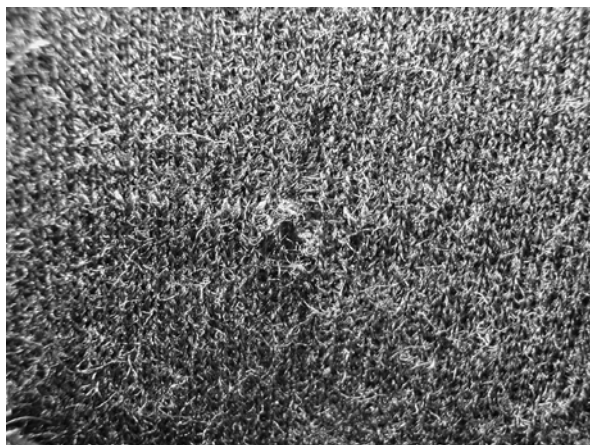


Рис. 6. Поверхность шерстяного полотна с «ореолом» из выбивающихся волокон

Физическая нечеткость границы объекта сказывается и на решении проблемы, иллюстрированной рис. 1а: лапа тигра выполнена из ворсованного материала (меха), сквозь который просвечивает фон. Другим примером здесь может служить обработка портретных изображений, содержащих волосы.

Неопределенность «активного партнера». В качестве последнего чаще всего [11, 12] рассматривается человек как звено системы обработки (технологического процесса) или как элемент внешней среды. Приводимые далее примеры показывают, что

не менее значимыми источниками такой неопределенности оказываются объекты естественного происхождения, которые в существенном для решаемой задачи пространственно-частотном диапазоне не подчиняются статистическим закономерностям. Так, попытки выделения в изображении ворсинок пряжи по среднеквадратическому или другим статистическим критериям приводят к появлению артефактов, неприемлемых для оценки конечным потребителем [14], или к эффекту «комикса» («искусственности» выделенной границы)¹. Подчеркнем, что это обстоятельство правомерно нашло свое отражение в ОСТ 17-706-83, регламентирующем виды дефектов трикотажного полотна при его приемочном контроле. Он включает в себя такие показатели, как «утолщения и утонения, заметные»; «провязывание загрязненной и масляной нити, заметное»; «нарушение рисунка при вязании, оттенки, заметные» и др.

Неопределенность цели трактуется в [7] как неточное знание цели в сложной системе и, соответственно, как проблема перехода от цели, сформулированной на естественном языке, к вектору показателей, обладающему независимостью свойств, ограниченной размерностью и полнотой описания исходной цели, или как параметрическая неопределенность скалярного показателя. Его влияние в рамках концепции интеллектуального управления парируется [6, 10] путем использования при управлении базы знаний о предметной области и базы целей системы в целом. Однако, как подчеркивается в [15], создание таких баз является, как правило, весьма ресурсоемким и должно быть экономически оправдано. Соответствующие возможности при решении задач обработки изображения обсуждаются в разделе 2.

Как показывает анализ, при обработке изображений могут проявиться и другие аспекты неопределенности цели, которые связываются с диверсификацией целевой аудитории (например, оценки кондиционности полотна у различных потребителей и для различных групп потребителей не совпадают, так как во многом определяются социальными ожиданиями), с различием когнитивных оценок проблемной ситуации, а также с некоторой противоречивостью подцелей (например, обеспечить выпуск бездефектного полотна при сохранении естественно-нерегулярной структуры нитей). Заметим, что все это приобретает особое значение при обработке изображений, предназначенных для размещения в сети Интернет.

2. Человеко-машинные процедуры в обработке оптических изображений как целостный выбор

Перечисленные в разделе 1 неопределенности затрудняют автоматизацию обработки оптического изображения. Рассматривая обработку изображения с позиции распознавания образов, возникающие «инструментальные» проблемы можно свести к следующему: начиная с определенного пространственно-частотного диапазона, критерии, по которым производится выделение характерных объектов, формируют множество недоминируемых альтернатив (множество Парето), и попытки увеличить номенклатуру критериев приводят только к расширению этого множества. Например, как показывают исследования [1], практически все двумерные признаки (ширина, глубина, пространственная частота и т.д.) дефекта полотна, выполняемого из натуральных нитей, оказываются контекстно-зависимыми, а функция принадлежности множества параметров признака не удовлетворяет условию выпуклости (область значений параметра на дефектном участке пересекается с областью значений того же параметра на бездефектном участке).

Свой вклад вносят также характерные для рассматриваемых проблемных ситуаций ресурсные ограничения. Как правило, здесь речь идет об обработке малых партий

¹ Заметим, что аналогичные эффекты характерны для обработки объектов естественного происхождения и в других информационных диапазонах – например, при обработке аудиофайлов.

(вплоть до уникальных) изображений, каждая из которых с точки зрения статистики составляет отдельную генеральную совокупность, что существенно ограничивает применимость аппарата статистической классификации. В то же время попытки формализации контроля путем экстенсивного наращивания вычислительных мощностей оказываются не только неприемлемыми для конечного потребителя по экономическим соображениям, но и малоэффективными в техническом плане.

Так, альтернативным путем решения проблемы выделения фона является организация бестеновой фотосъемки объектов на цветоконтрастном фоне. Однако затраты на такую съемку, как правило, неприемлемы для заказчика по ценовым соображениям. Кроме того, этот путь принципиально не снимает проблемы обработки уникальных изображений.

То же самое справедливо и для контроля ТП трикотажного полотна. Как можно видеть из предыдущего обсуждения, увеличение степени автоматизации контроля дефектов можно связывать с построением трехмерной оценки текущего направления нити, которое, в общем случае, не является усредненным значением каких-либо ее параметров (диаметра, оптической плотности и т.п.). Такая оценка представляет собою самостоятельную проблему даже на уровне постановки, а ее техническая реализация методами неразрушающего контроля выходит за рамки социально обусловленных ресурсных ограничений. Кроме того, даже в этом случае не снимается проблема задания критерия, отражающего субъективные и социальные ожидания потребителей.

Удовлетворительным решением проблемы обработки оптических изображений в условиях неопределенностей может оказаться их парирование путем введения человека в процедуру обработки на уровне звена принятия решения.

Правомерность трактовки процесса восприятия зрительного образа как принятия решения находит подтверждение в психологии [16] и в теории принятия решений [17]. Согласно [17], в этом случае человек имеет целостное представление, образ альтернативы, причем одновременно выступает и как эксперт, и как лицо, принимающее решение.

Изучение механизмов зрительного восприятия [18–20] показало, что для решения контекстно-зависимых задач визуального распознавания человек в процессе эволюции выработал мощные подсознательные алгоритмы, аналоги которых в современной технике отсутствуют. Применительно к рис. 1а–5а здесь можно назвать процессы заполнения разрывов и гладкого продолжения, применяемые к участкам, оцениваемым как нарушения непрерывности, а также достройку отдельных участков изображения до полного или знакомого контура. Другими словами, человек проводит оценку и принимает решение не на тех (физических) объектах, параметры которых доступны измерению, а на их ментальном отображении, которое строится им с учетом контекста и с привлечением прежнего опыта. В частности, сопоставление рис. 1а, 1г и 1д, а также рис. 2а–5а и рис. 2б–5б демонстрирует разницу между «субъективным» (посредством зрительного аппарата человека) и «объективным» (посредством оптико-электронного прибора) восприятием одного и того же изображения.

Таким образом, привлечение человека может оказаться эффективным при решении задач распознавания в условиях, когда не представляется возможным или целесообразным сформировать полное формальное пространство критериев.

3. Применение человеко-машинных процедур при выделении объекта на изображении с помощью программного продукта Photoshop CS

Рассмотрим особенности организации человеко-машинных процедур при обработке изображения на примере описанной выше задачи выделения объекта на фоне в полиграфии.

Сразу следует отметить, что выделение объекта (его контура) в дизайне и полиграфии не является самоцелью, а производится для того, чтобы произвести с выделенной областью какие-то дальнейшие преобразования, из которых наиболее характерным являются:

- цветокоррекция участка изображения;
- монтаж этого участка с другим изображением;
- локализация применения фильтра.

Выделение границы объекта в полиграфии рассматривается в комплексе с последующей обработкой и чаще всего организуется как итеративный процесс чередующихся выделения/обработки. Соответственно, выбирая метод выделения и формируя критерии для формализации этого выбора, необходимо учитывать, в каком контексте (в смысле общей задачи) будет использоваться данная операция выделения границ.

Исключением служит характерная для геоинформационных систем задача трассировки (векторизация) [1], в которой получение четкой границы объекта является окончательным результатом. Здесь выбор инструмента основывается практически на одном экспертно определяемом параметре – четкости границы выделяемого объекта на определенном участке или на всем изображении.

В общем же виде можно сформулировать следующие критерии, влияющие на выбор того или иного алгоритма выделения или их комбинации.

1. Исходная четкость границы фигура/фон.
2. Требования к выходной четкости фигуры/фона. Подчеркнем, что в данном случае под требованиями необходимо понимать не уровень качества выделения, а запросы конкретной общей задачи – где-то нужно как можно четче, а где-то наоборот).
3. Степень отличия выделяемой фигуры после изменений, произведенных с выделенной областью, от ее исходного состояния (вероятность проявления артефактов несоответствия на границах).
4. Необходимость последующей корректировки границы.
5. Общие требования к качеству производимой продукции.
6. Временные ограничения (лимит времени, стоимость часа и т.д.).
7. Индивидуальные предпочтения специалиста (опыт использования, глубина понимания, просто привычки).

Большой набор таких алгоритмов предоставляет программный продукт Adobe Photoshop CS. Ниже приводится их список, упорядоченный по мере убывания «автоматичности» базового инструмента этого алгоритма.

1. Волшебная палочка (Magic Wand) – инструмент, выделяющий замкнутую область соседствующих точек, цвета которых находятся в заданной окрестности в цветовом пространстве от точки, к которой применяется инструмент.
2. Магнитное лассо (Magnetic Lasso) – инструмент, позволяющий при ручном обведении контура автоматически подстраивать границу под наиболее контрастный переход в определенных окрестностях каждой точки обводимого контура.
3. Лассо (Lasso) – полностью ручной инструмент, позволяющий обвести точки контура, считывая значения каждой точки по которой производится обведение.
4. Перо (Pen) – ручное создание контура как Безье-кривой.
5. Быстрая маска (Quick Mask Mode) – ручное создание контура с помощью кистей с различными параметрами размера и размытия кисти, позволяющее гибко управлять степенью четкости границы

Кроме того, можно выделить ряд инструментов, непосредственно не формирующих границу, использование которых вместе с основными инструментами позволяет повысить эффективность последних для решения конкретной задачи.

1. Feather – автоматический инструмент повышения размытости границы выделения – позволяет размыть границу выделенной области при использовании инструментов, формирующих только четкую границу. Размытие при этом получается равномерным на всей протяженности границы. Для более адекватного (ручного) размытия лучше применять быструю маску.
2. Контрастирование изображения (например, с помощью кривых (Curves)) – применяется для улучшения эффективности применения автоматических инструментов выделения границ
3. «Подчеркивание» границ (например, фильтры Ink Outlines и Glowing Edges) – более автоматизированные варианты контрастирования, позволяющие усилить контраст изображения в районе существующих контрастных границ при одновременном снижении контраста в других областях.

Таким образом, при решении конкретной задачи специалист выстраивает алгоритм из перечисленных основных и вспомогательных инструментов на основе перечисленных выше критериев, применяемых к конкретной общей задаче. При этом вряд ли можно говорить о непосредственном отображении каждого критерия на каждый инструмент с построением алгоритма как суперпозиции принятых решений. Скорее, речь идет о проекции подмножества критериев на подмножество инструментов с последующей оптимизацией выбранного подмножества инструментов в конкретную последовательность их применения. Это позволяет достигнуть разумного баланса между автоматизацией и ручной работой для эффективного решения задачи, включающей в себя этап(ы) выделения границ областей изображения.

Заключение

В статье продемонстрированы примеры задач обработки изображений, в которых человек «по умолчанию» является носителем целостного образа альтернативы. Выделены факторы, обуславливающие эффективность применения человеко-машинных процедур для решения таких задач. Рассмотрены аспекты организации такой процедуры при решении задач компьютерного дизайна в программном продукте Adobe Photoshop CS, связанных с выделением фигуры на фоне.

Литература

1. Абламейко С.В., Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы, применение. Мн: Амалфея, 2000. 304 с.
2. Форсайт Д.А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
3. Иконика – новое направление в изучении изображений // Тр. Гос. опт. ин-та. 1982. Т. 51. В. 185.
4. Ту Дж., Гонсалес Ф. Распознавание образов. М.: Наука, 1986.
5. Осипов Г.В. Искусственный интеллект: состояние исследований и взгляд в будущее // Компьютерра. 2002. №30 (455).
6. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х тт. Т.3: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 29000. 748 с.
7. Моисеев Н.Н. Математические методы системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.
8. Боулдинг К. Общая теория систем – скелет науки. / Исследования по общей теории систем. М.: Прогресс, 1969. С. 106–124.
9. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 288 с.

10. Ерофеев А.А., Поляков А.О. Интеллектуальные системы управления. СПб: СПбГТУ, 1999. 264 с.
11. Технология системного моделирования. / Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. 520 с.
12. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1989.
13. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
14. Акимов П.С. и др. Сигналы и их обработка в информационных системах. М.: Радио и связь, 1994. 256 с.
15. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер, 2000.
16. Ломов Б.Ф. Методологические и теоретические проблемы в психологии. М.: Наука, 1984.
17. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах. М.: Логос, 2002. 392 с.
18. Марр Д. Зрение: информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. М.: Радио и связь, 1987. 400 с.
19. Грановская Р.М., Березная И.Я., Григорьева А.Н. Восприятие и признаки формы. М.: Наука, 1981. 208 с.
20. Гаврилова Т.А., Червинская К.Р. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. М.: Радио и связь, 1992.

НАШИ АВТОРЫ

Абрамов Алексей Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного научно-исследовательского института информационных технологий и телекоммуникаций «Информика»(филиал в Санкт-Петербурге).

Андреева Ольга Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фотоники и оптоинформатики СПбГУ ИТМО

Артемьев Сергей Васильевич – заведующий лабораторией кафедры фотоники и оптоинформатики СПбГУ ИТМО

Баландин Андрей Владимирович – руководитель подразделения, ЗАО КБ «Юпитер»

Белашенков Николай Романович – помощник технического директора ОАО «ЛОМО»

Бонч-Бруевич Алексей Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор СПбГУ ИТМО

Бронштейн Игорь Григорьевич – директор, ИТЦ «Оптико-информационные технологии и системы» СПбГУ ИТМО

Бурункова Юлия Эдуардовна – научный сотрудник кафедры оптики квантоворазмерных сред СПбГУ ИТМО

Бутянов Сергей Владимирович – аспирант кафедры оптики квантоворазмерных сред СПбГУ ИТМО

Вартамян Тигран Арменакович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник СПбГУ ИТМО

Васильев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, ректор СПбГУ ИТМО

Власов Олег Николаевич – инженер ЗАО КБ Юпитер

Гримм Вячеслав Антонович – старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики СПбГУ ИТМО

Губанова Людмила Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры оптических технологий СПбГУ ИТМО

Гуров Игорь Петрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой компьютерной фотоники СПбГУ ИТМО

Гусарова Наталия Федоровна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий профессионального обучения СПбГУ ИТМО

Денисюк Игорь Юрьевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой оптики квантоворазмерных сред СПбГУ ИТМО

Зверев Виктор Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной и компьютерной оптики

Иванов Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент, проректор по экономике и финансам СПбГУ ИТМО

Козлов Сергей Аркадьевич – доктор физико-математических наук, профессор, декан факультета фотоники и оптоинформатики СПбГУ ИТМО

Куликов Дмитрий Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии приборостроения СПбГУ ИТМО

Леонов Никита Борисович – кандидат физико-математических наук, сотрудник ЦИОТ СПбГУ ИТМО

Лившиц Ирина Леонидовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник СПбГУ ИТМО

Лисицына Любовь Сергеевна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой информационных образовательных технологий СПбГУ ИТМО

Логунов Александр Евгеньевич – инженер ЦИОТ СПбГУ ИТМО

Лопатин Александр Иосифович – кандидат физико-математических наук, нач. отделения микроскопии ОАО «ЛОМО»

Маятин Александр Владимирович – кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных систем

Никифоров Владимир Олегович – доктор технических наук, технический директор ОАО «ЛОМО»

Никоноров Николай Валентинович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой оптоинформационных технологий и материалов СПбГУ ИТМО

Орлов Вячеслав Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и оптоинформатики СПбГУ ИТМО

Павлов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и оптоинформатики СПбГУ ИТМО

Падун Борис Степанович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии приборостроения СПбГУ ИТМО

Парамонов Александр Александрович – ведущий инженер кафедры фотоники и оптоинформатики СПбГУ ИТМО

Пржибельский Сергей Григорьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник СПбГУ ИТМО

Путилин Эдуард Степанович – доктор технических наук, заведующий кафедрой оптических технологий СПбГУ ИТМО

Сергеев Александр Олегович – кандидат технических наук, доцент СПбГУ ИТМО

Сигалов Алексей Викторович – кандидат технических наук, заместитель директора Государственного научно-исследовательского института информационных технологий и телекоммуникаций «Информика» (филиал в Санкт-Петербурге).

Симоненко Зинаида Григорьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и прикладной математики СПбГУ ИТМО

Скуратов Алексей Константинович – кандидат технических наук, заместитель директора Государственного научно-исследовательского института информационных технологий и телекоммуникаций «Информика» (филиал в Санкт-Петербурге).

Смирнов Сергей Александрович - старший преподаватель кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики СПбГУ ИТМО

Хромов Валерий Васильевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник СПбГУ ИТМО

Яблочников Евгений Иванович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии приборостроения СПбГУ ИТМО

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВОПРОСЫ ОПТОИНФОРМАТИКИ.....	3
Бутянов С.В., Бурункова Ю.Э., Денисюк И.Ю. Размерные параметры наночастиц фталоцианина и их связь со структурой полиморфных кристаллических форм.....	3
Бонч-Бруевич А.М., Вартанян Т.А., Леонов Н.Б., Логунов А.Е., Пржибельский С.Г., Хромов В.В. Направленная оптическая модификация поверхностных металлических наноструктур.....	13
Андреева О.В., Артемьев С.В., Васильев В.Н., Козлов С.А., Орлов В.В., Павлов А.В., Парамонов А.А. Учебная лаборатория оптоинформатики кафедры фотоники и оптоинформатики.....	18
Гуров И.П. Компьютерная фотоника: инновационные исследовательские проекты.....	24
Белашенков Н.Р., Гуров И.П., Лопатин А.И., Никифоров В.О. Инновационный проект создания нового поколения микроскопов с оптико-цифровым каналом.....	34
2. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	42
Губанова Л.А., Путилин Э.С. Градиентные многослойные диэлектрические системы.....	42
Губанова Л.А., Путилин Э.С. Ахроматические просветляющие покрытия ($\lambda_1:\lambda_2\approx 1:3$, $\rho\leq 1\%$).....	47
Зверев В.А. Сложность и диапазон задач в области оплотехники, решаемых учёными СПбГУ ИТМО.....	53
Иванов А.В. Математические модели для обеспечения условий работоспособности оптической системы.....	56
Иванов А.В. Математические модели для обеспечения условий конструктивности оптической системы.....	60
Баландин А.В., Бронштейн И.Г., Власов О.Н., Лившиц И.Л. Аспекты исследования качества изображения для объективов современных цифровых камер.....	65
Гримм В.А., Смирнов С.А. Лазерные сканирующие телескопы.....	73
3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ.....	93
Абрамов А.Г., Васильев В.Н., Сергеев А.О., Сигалов А.В., Скуратов А.К. Информационно-аналитический центр по мониторингу приоритетных направлений развития в области информационно-телекоммуникационных систем.....	93
Лисицына Л.С. Учимся строить модель результатов образования.....	100
Лисицына Л.С. Планирование ожидаемого результата образования.....	109
Куликов Д.Д., Падун Б.С., Яблочников Е.И. Методологические основы построения АСТПП.....	114
Симоненко З.Г. Параметрический анализ информационно-измерительной системы измерения величин массопереноса в сплошных средах.....	122.

Никоноров Н.В., Козлов С..А., Никифоров В.О., Белашенков Н.Р. Разработка модели и создание интегрированного учебно-научно-производственного центра СПбГУ ИТМО - ОАО ЛОМО «Оптические технологии и системы» (УНПЦ «ОТИС»)	129
Гусарова Н.Ф., Маятин А.В. Моделирование человека при проектировании информационных систем	163
Гусарова Н.Ф., Маятин А.В. Человеко-машинные методы обработки изображений	177
НАШИ АВТОРЫ	187

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК СПбГУ ИТМО
Выпуск 22

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКИХ
И ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Главный редактор
доктор технических наук, профессор
В.Н. Васильев

Дизайн обложки В.А. Петров

Редакционно-издательский отдел СПбГУ ИТМО

Зав. РИО Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.

Подписано в печать 24.12.05.

Заказ 907. Тираж 100 экз.