

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

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

---

# **НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК**

**Выпуск 21**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
СОВРЕМЕННЫХ ОПТИКО-  
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
И ТЕХНОЛОГИЙ**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2005**

Выпуск содержит материалы XXXIV научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО, посвященной 100-летию первого выпуска специалистов вуза  
Конференция была проведена 2–4 февраля 2005 г. Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики в сотрудничестве с  
ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова,  
Институтом аналитического приборостроения РАН,  
Институтом проблем машиноведения РАН,  
Комитетом по науке и высшей школе Администрации Санкт-Петербурга,  
ВНИИМ им. Д.И. Менделеева,  
ОАО «ЛОМО»,  
ОАО «Техприбор»,  
ОАО «Электроавтоматика»,  
ЦНИИ «Электроприбор».

#### **Программный комитет конференции:**

Васильев В.Н. (СПбГ ИТМО) – председатель

Аронов А.М. (ЛОМО)	Маслов Ю.В. (ОАО «Техприбор»)
Викторов А.Д. (КНВШ)	Мирошник И.В. (СПбГУ ИТМО)
Гатчин Ю.А. (СПбГУ ИТМО)	Мусалимов В.М. (СПбГУ ИТМО)
Гуров И.П. (СПбГУ ИТМО)	Парамонов П.П. (ОАО «Электроавтоматика»)
Дукельский К.В. (НИИ ТИОМ)	Пешехонов В.Г. (ЦНИИ «Электроприбор»)
Индейцев Д.А. (ИПМаш РАН)	Путилин Э.С. (СПбГУ ИТМО)
Карасев В.Б. (ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова)	Ханов Н.И. (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева)
Козлов С.А. (СПбГУ ИТМО)	Храмов В.Ю. (СПбГУ ИТМО)
Колесников Ю.Л. (СПбГУ ИТМО)	Шехонин А.А. (СПбГУ ИТМО)
Курочкин В.Е. (ИАНП РАН)	Яковлев Е.Б. (СПбГУ ИТМО)

#### **Организационный комитет конференции:**

Никифоров В.О. – председатель

Студеникин Л.М. – зам. председателя

Казар Л.Н. – ученый секретарь

Горкина Н.М.	Прудентова Т.А.
Гусарова Н.Ф.	Савельева Л.П.
Метляков А.П.	Ткалич В.Л.
Подлесных В.И.	Яковлев Е.Б.

ISBN 5-7577-0272-9

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

# ИТОГИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНА НАУЧНО- ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ УНИВЕРСИТЕТА, ПРОВОДИМЫХ ПО ЗАДАНИЮ МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В 2005 ГОДУ

---

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ФОТОНИКА: ПРИНЦИПЫ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

И.П. Гуров

Рассматриваются методы и системы компьютерной фотоники, активно развивающегося направления науки и техники, которое объединяет современную физическую и квантовую оптику, математику и компьютерные технологии. Перспективы развития компьютерной фотоники определяются фундаментальными и прикладными исследованиями и разработками приборов и систем, широко востребованных в области биомедицины, высоких технологий и инженерных приложениях.

### Введение

В течение последних десятилетий достигнуты значительные успехи в области оптики, которую по праву называют наукой XXI века. 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 техники, 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.

Характерной чертой развития современной оптики становится активное внедрение достижений фундаментальной науки в практические разработки. Ярким примером являются информационные технологии, перспективы развития которых основываются на оптических принципах представления, передачи, обработки и хранения информации. Активно возрастающие функциональные и вычислительные возможности компьютерных технологий создали необходимые предпосылки развития компьютерной фотоники, базирующейся на принципиальной интеграции фотоники и компьютерных технологий. Компьютерная фотоника объединяет современную физическую и квантовую оптику, математику и компьютерные технологии и находится на этапе активного развития, когда становится возможным реализовать новые идеи, методы и технологии.

В статье представлены примеры современных методов компьютерной фотоники, рассматриваются особенности их практической реализации и перспективы развития. Рассматриваемые методы, разумеется, далеко не исчерпывают возможности и

перспективы компьютерной фотоники, они наглядно характеризуют последние достижения в этой области.

Важно подчеркнуть, что методы оптической томографии, цифровой голографии и трехмерной фотографии, представленные в статье, в весьма короткие сроки прошли путь от фундаментальных исследований до создания приборов и систем, широко востребованных в области биомедицины, в высоких технологиях и инженерных приложениях [1].

Рассматриваемые методы недостаточно представлены в отечественной научно-технической литературе, и целью статьи является попытка восполнить пробел в дополнение к другим публикациям [2-4].

### Оптическая когерентная томография

Методы томографии, как известно, позволяют исследовать трехмерную внутреннюю структуру объектов на основе использования различных физических принципов (см. список литературы в публикации [3]). Оптическая томография основывается на реконструкции трехмерного распределения физических свойств объекта при решении обратной задачи распространения и рассеяния оптического излучения в среде, при этом наибольшие успехи достигнуты в оптической когерентной томографии (ОКТ), обеспечивающей разрешающую способность от единиц до долей микрометра, недостижимую другими методами томографии. Поэтому ОКТ является по существу «микротомографией», которая, применительно к области биомедицины, позволяет проводить исследования на клеточном микроуровне, что исключительно важно для медицинской диагностики.

Принцип ОКТ состоит в освещении объекта оптическим излучением с определением степени отражения излучения по глубине среды (рис. 1). При освещении объекта оптическое излучение проникает в среду на глубину до нескольких миллиметров, и для получения информации о внутренней микроструктуре среды необходимо определить степень отражения от каждого отдельного слоя.

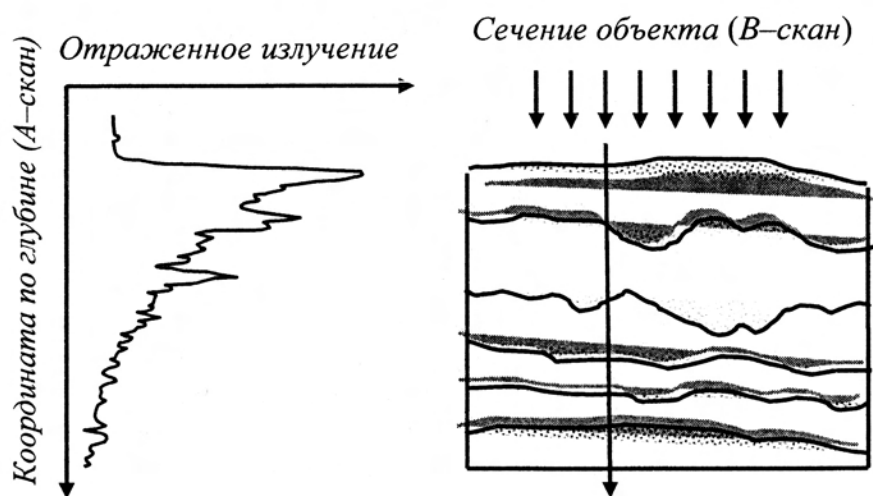


Рис. 1. Принцип формирования изображений в ОКТ

Определить степень отражения от отдельных слоев возможно при освещении среды коротким световым импульсом и измерении интенсивности отраженного излучения в зависимости от времени прохождения импульса до каждого слоя внутри

среды. Очевидно, что более глубоким слоям соответствует большее время задержки отраженного импульса. Однако ввиду высокой скорости распространения, полное время прохождения импульса на интервале в несколько миллиметров составляет несколько пикосекунд, и для обеспечения разрешающей способности в 1 мкм погрешность измерения времени задержки не должна превышать единиц фемтосекунд, что является технически сложной задачей.

Другим подходом к решению проблемы является использование источников непрерывного излучения с широким спектром и малой степенью когерентности. В отличие от монохроматического излучения с постоянной амплитудой и частотой, излучение малой когерентности формируется в форме суперпозиции большого числа «волновых цугов», каждый из которых излучается отдельным атомом, и поэтому имеет случайную начальную фазу (см. рис. 2). Частота волновых цугов варьируется в определенных пределах  $\Delta\nu$  вследствие взаимодействия атомов.

При освещении объекта излучением малой когерентности можно определить степень отражения от отдельных слоев за счет селекции по времени прохождения последовательности волновых цугов до каждого слоя. Для этого, аналогично принципу радиолокационного радара, достаточно иметь «эталонную» копию зондирующего сигнала и варьировать задержку этого сигнала так, чтобы он точно совпал с отраженным сигналом. При этом время задержки равно времени прохождения зондирующего сигнала.

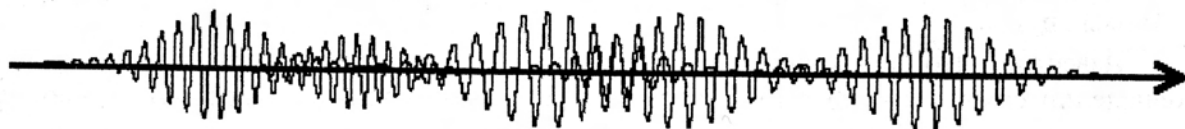


Рис. 2. Волновые цуги

В ОКТ в качестве радара используется двухлучевой интерферометр (см. рис. 3), в котором «эталонная» копия формируется с помощью светоделителя, и время задержки варьируется за счет перемещения опорного отражателя.

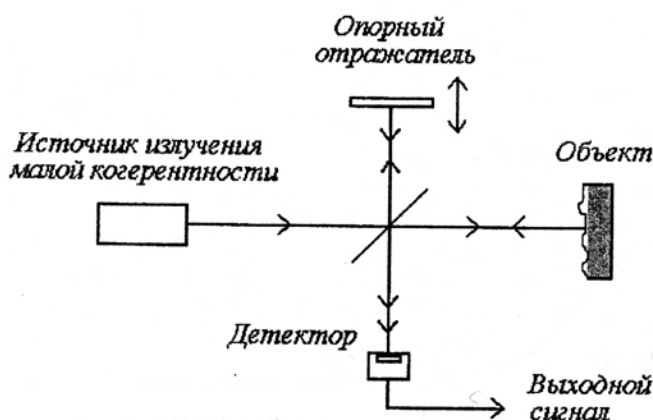


Рис. 3. Схема интерферометра малой когерентности

Значения комплексных составляющих электрического поля измерительной и опорной волн в фиксированной точке наблюдения можно выразить в форме

$$E_{1i}(t) = ra_i(t)\exp[j2\pi\nu_i(t)], \quad (1)$$

$$E_{2i}(t) = a_i(t+\tau)\exp[-j2\pi\nu_i(t+\tau)], \quad (2)$$

где индекс  $i$  обозначает различные волновые цуги с амплитудами  $a_i(t)$  и частотами  $\nu_i$ ,  $\tau = \Delta/c$  – интервал времени запаздывания измерительной волны при оптической разности хода  $\Delta$ ,  $r$  – амплитудный коэффициент отражения измерительной волны ( $r \leq 1$ ),  $c$  – скорость света.

Интенсивность света на выходе интерферометра определяется выражением

$$I(\tau) = \left\langle |E_{1i}(t) + E_{2i}(t + \tau)|^2 \right\rangle_i = I_0 + 2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Re} V(\tau), \quad (3)$$

где угловые скобки обозначают операцию усреднения по ансамблю волновых цугов,  $I_0 = I_1 + I_2$  – некогерентная фоновая составляющая, не зависящая от  $\tau$ ,  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности излучения измерительной и опорной волн,  $V(\tau)$  – нормированная функция взаимной когерентности интерферирующих волн,

$$V(\tau) = \left\langle E_1(t) E_2^*(t + \tau) \right\rangle / (I_1 I_2)^{1/2}, \quad (4)$$

звездочкой обозначена комплексно сопряженная величина.

При отсутствии дисперсии в среде функция (4) совпадает с функцией когерентности исходного излучения источника

$$V(\tau) = \left\langle E(t) E^*(t + \tau) \right\rangle / \left\langle E(t) E^*(t) \right\rangle, \quad (5)$$

т.е. с нормированной автокорреляционной функцией случайного процесса излучения волновых цугов.

Известно, что автокорреляционная функция максимальна при  $\tau = 0$ , т.е. при совпадении сомножителей в (5). Часть измерительной волны, отраженная от слоя на глубине  $z$  (отсчитываемой от поверхности объекта), имеет задержку  $\tau = 2nz/c$ , где  $n$  – показатель преломления (который для простоты полагаем постоянным). При перемещении опорного отражателя на величину  $2z/c$  ( $n \cong 1$ ) достигается максимум корреляции для данного слоя, что позволяет селективировать отражение от каждого слоя в отдельности.

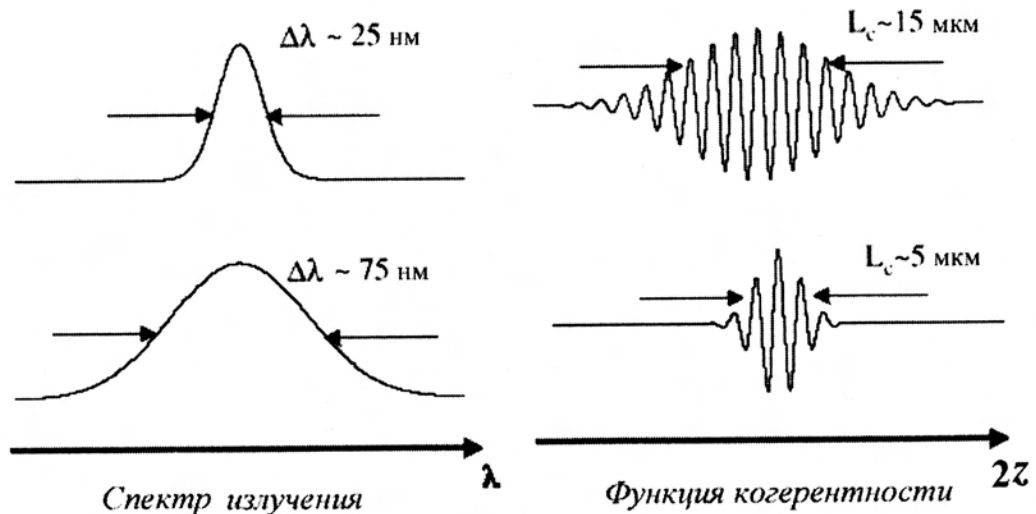


Рис. 4. Примеры соотношения между шириной спектра излучения и длиной когерентности ( $\langle \lambda \rangle = 920$  нм)

Интересно отметить, что в случае «абсолютно случайной» функции  $E(t)$ , ее автокорреляционная функция представляет собой бесконечно узкую дельта-функцию

при  $\tau = 0$ , которая совпадает с автокорреляционной функцией дельта-импульса. Поэтому использование в интерферометре (рис. 3) источника с широким спектром вместо источника сверхкоротких импульсов позволяет получить те же результаты более простыми техническими средствами.

Реальные источники излучения имеют ограниченный спектр, и корреляционная функция имеет конечную протяженность (см. рис. 4), которая определяет разрешающую способность метода ОКТ.

Длина когерентности  $L_c$  (ширина корреляционной функции) для распределения спектра гауссовой формы определяется выражением (см., например, [5])

$$L_c = (4\sqrt{\ln 2} / \pi) / (\langle \lambda \rangle^2 / \Delta \lambda) \approx 0,44 \langle \lambda \rangle^2 / \Delta \lambda, \quad (6)$$

где  $\langle \lambda \rangle$  - среднее значение длины волны,  $\Delta \lambda$  - ширина спектра.

Несмотря на внешнюю простоту принципа ОКТ, создание и совершенствование систем ОКТ требует решения ряда сложных научно-технических проблем, особенно при обеспечении высокой разрешающей способности и достоверности получаемых результатов.

Проблематику ОКТ можно отнести к классу обратных задач. С позиций теории систем, при известном воздействии на систему и определении отклика можно получить оценку характеристик системы. Известно, что решение обратных задач является однозначным, устойчивым и точным при наличии достаточной априорной информации о системе. Иными словами, исследование свойств неоднородных сред требует знания особенностей взаимодействия излучения со средой, таких как процессы отражения, рассеяния, поглощения, степень анизотропии среды, распределение показателя преломления, влияние поляризации излучения и т. д.

Другой проблемой является создание источников излучения в виде сверхкоротких (фемтосекундных) импульсов или источников с широким равномерным спектром в диапазоне до сотен нанометров, имеющих достаточную мощность и пространственную когерентность при приемлемой стоимости.

Вследствие использования свойства когерентности излучения, необходимо снижать влияние шума «пятнистой структуры» (спеклов), возникающего при дифракции когерентного излучения на микронеоднородностях среды, что приводит к потере деталей в изображении.

На рис. 7 представлен пример томограммы, полученной методом ОКТ, на которой заметно существенное влияние шума спеклов.

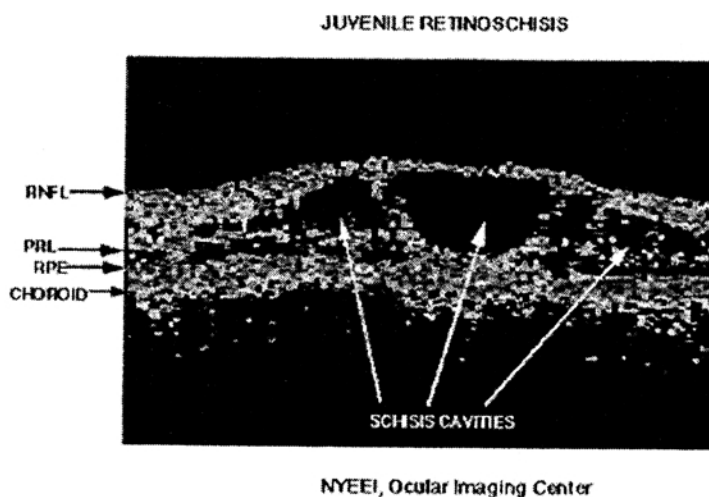


Рис. 7. Пример томограммы сетчатки глаза (B-скан), полученной методом ОКТ

На рисунке ясно видны полости между слоями ткани, что свидетельствует о клинических нарушениях. Метод ОКТ является в настоящее время единственным клиническим методом неразрушающей диагностики состояния глазного дна в офтальмологии.

В настоящее время ведутся активные исследования и разработки в области создания волоконно-оптических систем ОКТ для эндоскопии и диагностики внутренних органов, разработаны различные методы и схемы ОКТ, получившие широкое распространение, сведения о которых приведены в публикациях списка литературы работы [3].

На рис. 8 представлены примеры эндоскопических ОКТ-изображений [6].

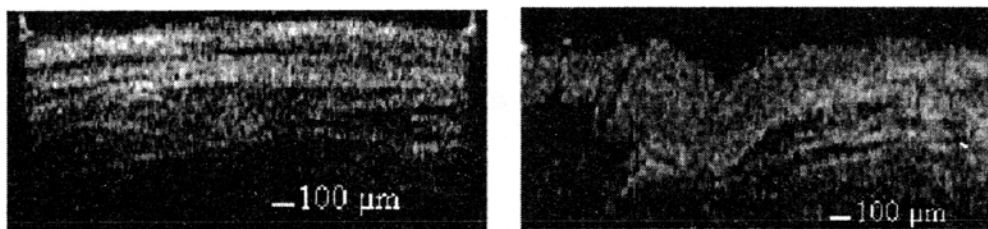


Рис. 8. Томограммы биоткани в состоянии нормы (слева) и с клиническими нарушениями (справа)

Для наблюдения живых биотканей требуются быстродействующие системы ОКТ, обеспечивающие трехмерную реконструкцию с высоким разрешением в реальном времени. Для этой цели разработаны различные технические решения (см., например, [5]).

Важно подчеркнуть, что реализация методов ОКТ в значительной мере основывается на возможностях компьютерных технологий, обеспечивающих регистрацию изображений, преобразование, анализ и визуализацию томограмм, управление системой. При этом повышенное разрешение достигается компьютерными методами решения обратной задачи с использованием методов цифровой обработки трехмерных изображений.

### Цифровая голография

Идея применения компьютерной обработки для восстановления голографически записанного изображения была впервые предложена Дж. Гудменом и Р. Лоуренсом [7], а также Р.В. Кронродом и др. [8, 9]. Развитие компьютерных технологий и твердотельных приемников излучения позволило записывать голограммы с помощью светочувствительных матриц на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-камер) в цифровой форме. При этом процесс записи и обработки голограмм является полностью цифровым и получил название *цифровой голографии*.

Применение цифровой голографии открывает широкие возможности для точного количественного анализа свойств объекта, таких как смещение точек поверхности при анализе деформаций, определение формы объекта, измерение коэффициента преломления в прозрачных средах, изучение траекторий частиц, микроскопия. В упомянутых случаях изменение состояния изучаемого объекта приводит к изменению характеристик объектной волны и получаемой интерференционной картины, которая записывается цифровым образом.

Принцип цифровой голографии можно проиллюстрировать с помощью схемы установки для записи голограмм (рис. 9).



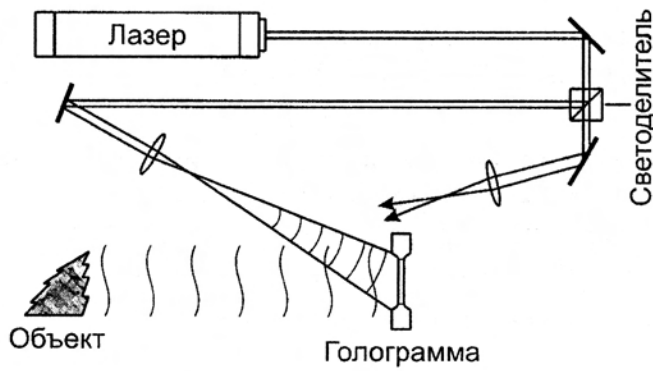


Рис. 9. Схема процесса записи голограммы

Распределение интенсивности  $I(x, y)$  в плоскости записи голограммы  $(x, y)$  определяется квадратом модуля суммы комплексных амплитуд объектной  $O(x, y)$  и опорной  $R(x, y)$  волн, а именно

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + R(x, y)O^*(x, y), \quad (7)$$

$O(x, y) = |O(x, y)| \exp[i\phi_o(x, y)]$  — комплексная амплитуда объектной волны с вещественной амплитудой  $|O(x, y)|$  и фазой  $\phi_o(x, y)$ ,  $R(x, y) = |R(x, y)| \exp[i\phi_r(x, y)]$  обозначает аналогичным образом комплексную амплитуду опорной волны. В традиционной голографии голограмма (7) записывается на фотопленку. Изображение объекта восстанавливается путем освещения голограммы опорной волной.

В цифровой голографии не требуется использование промежуточного носителя (фотопленки), поскольку голограмма  $I(x, y)$  записывается непосредственно на видеокамеру, и осуществляется компьютерная реконструкция записанного изображения.

Для пояснения математического принципа, лежащего в основе голографической реконструкции изображения, умножим записанную голограмму, т. е. интенсивность интерференционной картины  $I(x, y)$ , на значения поля опорной волны  $R(x, y)$ :

$$R(x, y)I(x, y) = R(x, y)|R(x, y)|^2 + R(x, y)|O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 O(x, y) + R^2(x, y)O^*(x, y). \quad (8)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (8) пропорционально значению  $R(x, y)$  опорной волны, второе слагаемое описывает пространственно изменяющееся «облако» вокруг первого порядка дифракции. Вместе они составляют нулевой порядок дифракции, или фоновую составляющую. Третье слагаемое с точностью до известного множителя  $|R(x, y)|^2$  представляет собой точную копию исходного поля  $O(x, y) = |O(x, y)| \exp(i\phi_o(x, y))$  и поэтому называется мнимым изображением (или просто изображением) объекта. Четвертое слагаемое относится к еще одному изображению объекта, «изображению-двойнику», которое называется действительным изображением.

В процессе записи цифровой голограммы исследуемый трехмерный объект с рассеивающей свет поверхностью располагается на расстоянии  $d$  от ПЗС-камеры. Записанная голограмма может рассматриваться как пропускающий транспарант, на котором дифрагирует опорная волна. Для получения исследуемой объектной волны в

цифровой голографии применяется численный расчет распространения оптического поля в форме произведения  $R(x, y)I(x, y)$  от плоскости голограммы до плоскости объекта ( $\xi, \eta$ ).

Численное восстановление записанной цифровым образом голограммы производится в соответствии со скалярной теорией дифракции в приближении Френеля для интеграла дифракции Рэлея-Зоммерфельда [10, 11]. Восстановленное дифрагированное поле  $Q(\xi, \eta)$  в плоскости изображения ( $\xi, \eta$ ) на расстоянии  $d$  от плоскости голограммы может быть представлено в параксиальном приближении следующим образом:

$$Q(\xi, \eta) = \frac{1}{i\lambda d} \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}d\right) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y)I(x, y) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}\left[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2\right]\right] dx dy. \quad (9)$$

Уравнение (9) служит отправной точкой для численного восстановления изображений в цифровой голографии в параксиальном приближении, при котором значения координат  $x$  и  $y$ , как и соответствующих им  $\xi$  и  $\eta$ , малы по сравнению с расстоянием  $d$ .

Из уравнения (9) видно, что результирующее поле определяется двумерным Фурье-преобразованием произведения распределения интенсивности в голограмме  $I(x, y)$ , комплексной амплитуды опорной волны  $R(x, y)$  и квадратичной фазовой функции пространственного распространения волны

$$w(x, y) = \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right]. \quad (10)$$

Отметим, что интеграл (9) является интегралом свертки первых двух сомножителей и функции (10).

Интенсивность  $I(x, y; d)$  и фаза  $\phi(x, y; d)$  восстановленного изображения могут быть получены из рассчитанного на расстоянии  $d$  комплексного поля  $Q(\xi, \eta)$  с помощью простых соотношений:

$$I(x, y; d) = |Q(x, y)|^2, \\ \phi(x, y; d) = \arctg\left(\frac{\text{Im}(Q(x, y))}{\text{Re}(Q(x, y))}\right) = \arg(Q(x, y)).$$

Значения фазы  $\phi(x, y; d)$ , полученные по этой формуле, соответствуют разрывной функции с областью изменения в пределах интервала  $[-\pi, \pi]$ . Для восстановления непрерывной развернутой картины значений фазы может быть применен один из известных алгоритмов развертывания фазы.

Особенности алгоритмов восстановления изображений в цифровой голографии подробно рассмотрены в работе [4].

Приведем пример использования метода цифровой голографии в целях исследования характеристик элементов микроэлектромеханических систем, которые активно разрабатываются в последние годы [12].

На рис. 10 показаны изображения микроэлектромеханического элемента, восстановленные методом цифровой голографии.

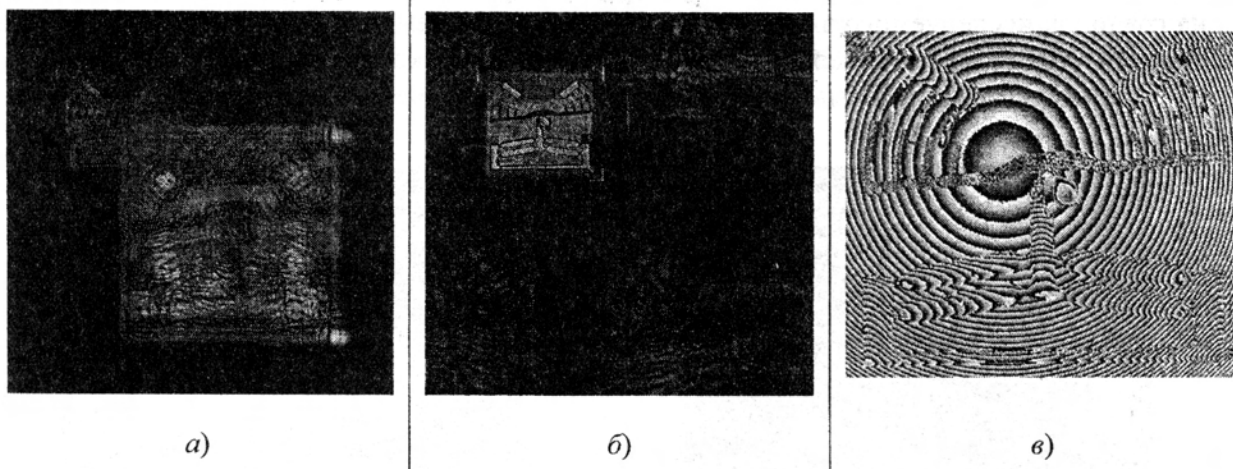


Рис. 10. Восстановленное распределение амплитуд (а), распределение амплитуд при устранении нулевого порядка дифракции (б) и распределение фаз в условиях aberrаций объектива (в)

Изображение в нулевом порядке дифракции (яркий прямоугольник в центральной части рис. 10, а) устраняется методом цифровой фильтрации, в результате чего выделено изображение объекта (рис. 10, б). Восстановленное распределение фаз изображения (рис. 10, в) искажено влиянием aberrаций объектива. Для устранения фазовых aberrаций записывалась дополнительная цифровая голограмма на соседнем плоском участке поверхности, и при восстановлении распределения фаз получена оценка aberrаций (см. рис. 11).

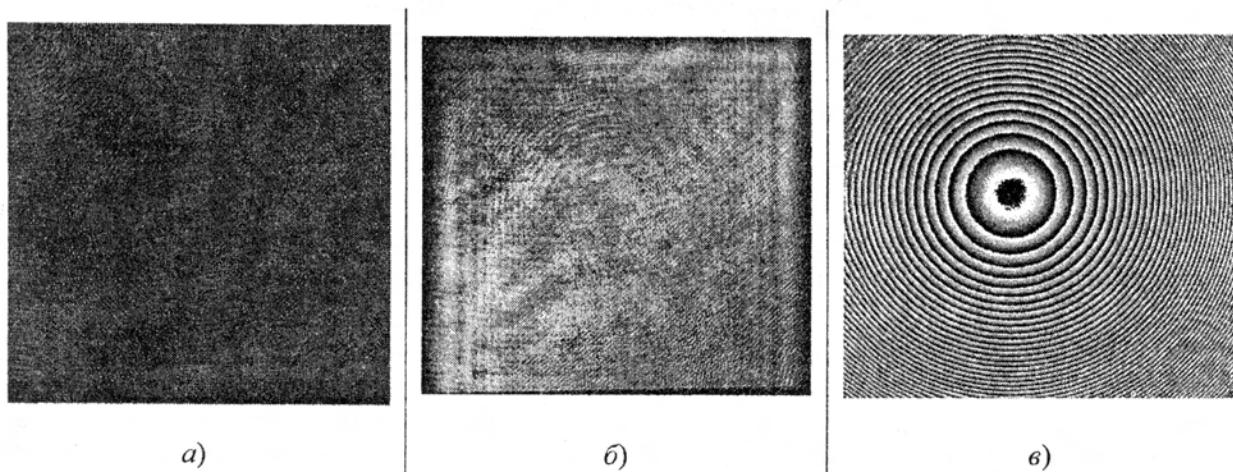


Рис. 11. Цифровая голограмма плоской поверхности вблизи контролируемого микроэлектромеханического элемента (а), реконструированное распределение амплитуд (б) и фаз (в) изображения

После вычитания распределения фаз (рис. 11, в) из распределения фаз в изображении объекта (рис. 10, в) обеспечивается компенсация фазовых aberrаций (см. рис. 12, б).

Для восстановления рельефа необходимо выполнить развертывание значений фазы (рис. 12, б) вне пределов  $[-\pi, \pi]$ . Ввиду неоднозначности разрывов функции изменения значений фазы и влияния шумов, задача развертывания фазы может быть однозначно решена при условии наличия априорной информации о рельефе поверхности. В частности, необходимо предварительное знание о том, является ли рельеф непрерывным, а его области – связанными друг с другом. Кроме этого, диапазон однозначности значений фазы равен  $2\pi$ , поэтому при резких скачках рельефа

на границах исследуемого элемента положение этого элемента относительно подложки определяется только заранее известной конструкцией микросистемы.

В результате развертывания фазы восстановлен рельеф поверхности (рис. 12, в).

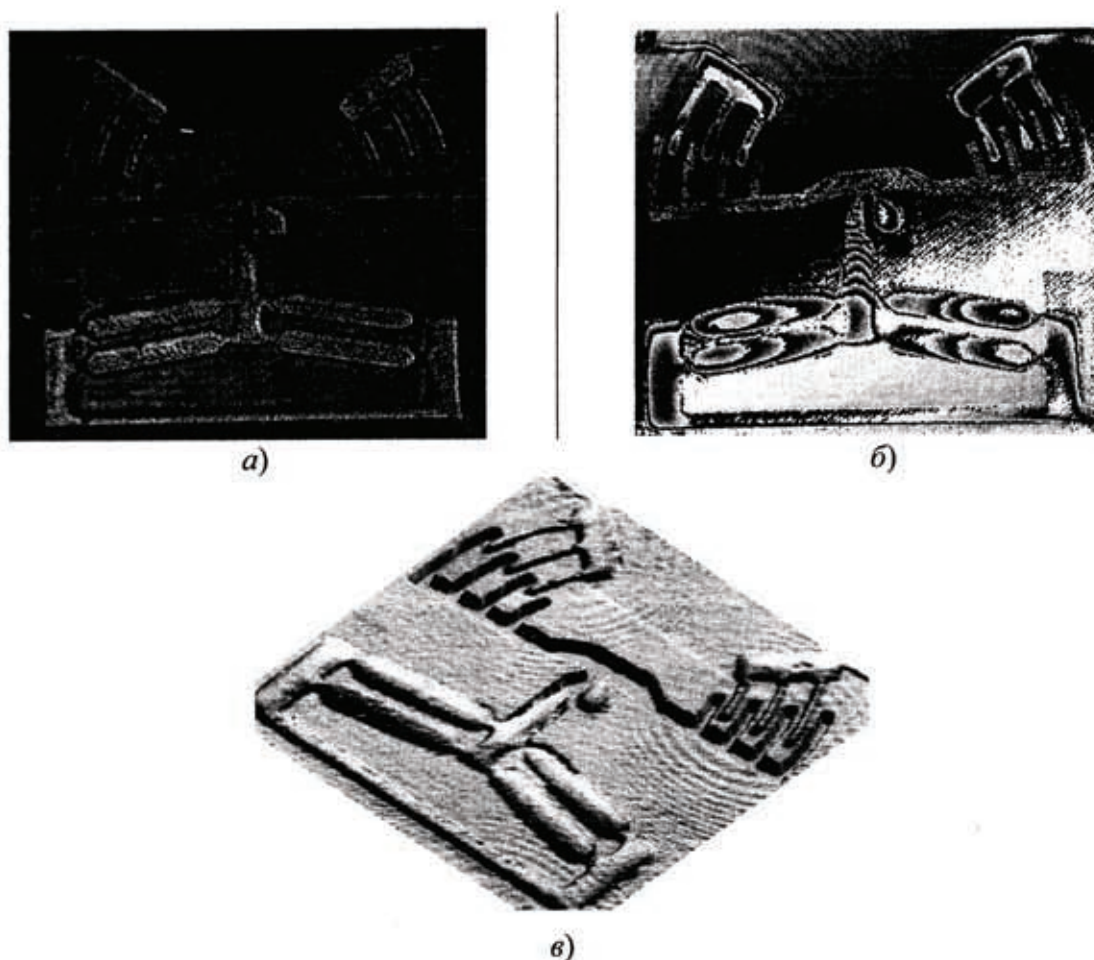


Рис. 12. Изображение микрорелевального элемента (а), восстановленное распределение фаз (б) и восстановленный рельеф поверхности (в)

Технология компьютерной записи голограмм и восстановления изображений позволяет провести полноценную цифровую обработку и предоставляет широкие возможности для анализа по сравнению с традиционным оптическим процессом, причем для исследования доступны как амплитудные, так и фазовые характеристики поля.

Методы цифровой голографии основаны на количественном расчете распространения волн, что позволяет восстанавливать амплитуду и фазу оптического поля, причем как в плоскости объекта, так и на любом промежуточном расстоянии между объектом и плоскостью голограммы.

Цифровая обработка позволяет отфильтровать фоновые шумы изображения и устранить нулевой порядок дифракции. Пространственное разрешение восстановленного объектного поля может быть улучшено путем настройки параметров алгоритма восстановления голограммы, компенсируя тем самым более низкое по сравнению с фотопластинкой пространственное разрешение ПЗС-камеры.

В последние годы проведены исследования, направленные на совершенствование методов и техники цифровой голографии. Перспективными направлениями исследований в области цифровой голографии являются многоволновая (цветная) голография, цифровая голография с использованием источников излучения малой

когерентности, помехоустойчивые методы развертывания полной фазы объектной волны, быстродействующие алгоритмы компьютерной обработки цифровых голограмм в реальном времени для исследования динамических объектов.

### Трехмерная фотография

Известно, что традиционная фотография обеспечивает получение двумерных изображений трехмерных объектов, при этом утрачивается информация об объекте вдоль третьей координаты. В ряде случаев возможно восстановить утраченную информацию, например, используя закономерности распределения яркости в картинах полутонов [13], однако в общем случае это не обеспечивает однозначности получаемых результатов.

Известны методы определения формы трехмерных поверхностей на основе оптических стереосистем [13], которые можно отнести к классу систем «пассивного» наблюдения. Наряду с достоинствами (простота и относительно невысокая стоимость), такие системы обладают существенными недостатками – зависимостью результатов от характера объекта и условий освещения, чувствительностью к влиянию фоновых засветок, сложностью математических методов и компьютерных алгоритмов обработки и др.

В последние годы получили широкое распространение системы «активного» типа, в которых объект освещается источником излучения с известными свойствами, что позволяет преодолеть указанные выше недостатки традиционных методов. В качестве источника излучения может использоваться лазер, пучок которого сканирует объект. Использование различных методов модуляции излучения, чаще всего по амплитуде или частоте, позволяет реализовать режим лазерного дальномера для восстановления трехмерного рельефа поверхности [14, 15].

Активное развитие компьютерных технологий и совершенствование технологии многоэлементных приемников излучения (видеокамер) позволило заменить электромеханическое сканирование электронным и создало предпосылки разработки методов восстановления трехмерной формы объектов более простыми техническими

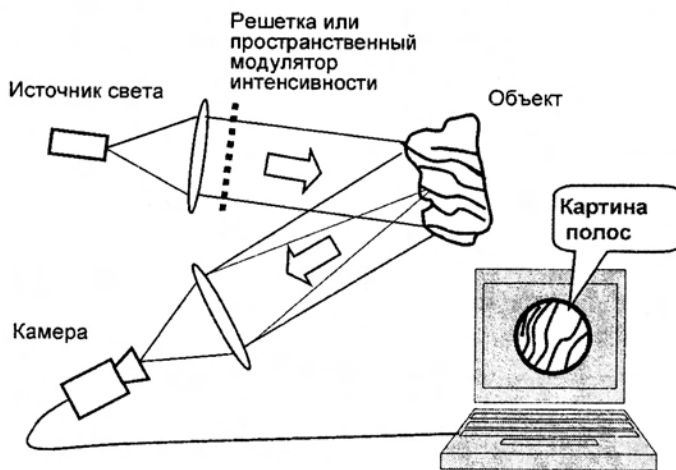


Рис. 13 Принцип структурированного освещения

средствами на основе использования принципа «проекции полос», сформированных в когерентном или некогерентном свете (см., например, [16-18]) и «структурированного освещения» [19-21] - освещения объектов некогерентным излучением с заданным пространственным распределением яркости.

На рис. 13 - 14 иллюстрируется принцип формирования изображений при структурированном освещении [22].

Восстановление трехмерной формы объектов при структурированном освещении основывается на принципе триангуляции: при известном взаимном угловом расположении осей источника (проектора) и видеокамеры обеспечивается однозначное соответствие элементов проецируемого распределения яркости (так называемого «паттерна») и элементов видеокамеры в области наблюдения.

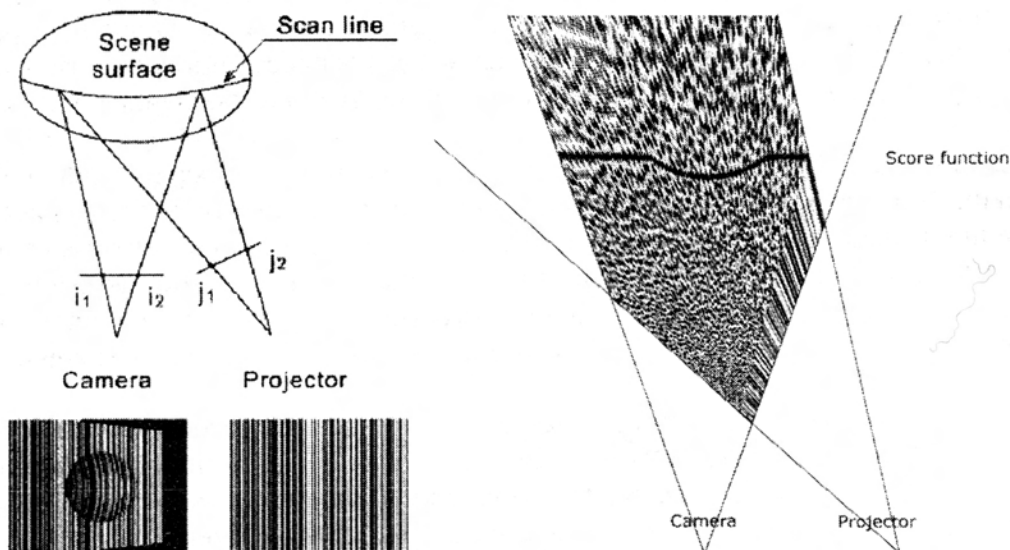


Рис. 14. Пример функции соответствия

При освещении объекта набором «паттернов» с известным распределением яркости, каждый «паттерн» деформируется в соответствии с рельефом поверхности, и расстояние до каждой точки поверхности представляется бинарным кодом [21]. Операция декодирования позволяет получить оценку расстояния до каждой точки поверхности. При проекции параллельных полос картина полос видоизменяется в соответствии с формой освещаемой поверхности. В правой части рис. 14 показан пример функции соответствия для одной горизонтальной линии. Немонотонность рельефа реальных объектов, обусловленная, например, резкими скачками или затенением отдельных участков, может приводить к разрывам функции соответствия. Для преодоления этой проблемы функция соответствия анализируется на отдельных ее сегментах [22].

Использование бинарных паттернов (рис. 13) ограничивает быстродействие системы, поскольку для получения данных о рельефе в широком диапазоне однозначности требуется формирование и регистрация нескольких паттернов с различным шагом полос. Этот недостаток устраняется при использовании цветных паттернов, которые содержат суперпозицию нескольких паттернов, разделяемых по принципу спектральной селекции [22, 23].



Рис. 15. Синтезированный паттерн для метода структурированного освещения

Формирование оптимальных цветных паттернов с устранением избыточности в повторяемости цветов и обеспечением наибольшего различия цветов в соседних полосах паттерна является важной задачей, одно из возможных решений которой дано в работе [22]. Пример оптимизированного паттерна показан на рис. 15 (в полутоновом представлении).

Методы структурированного освещения позволяют восстанавливать форму трехмерных объектов сложного вида. Один из примеров восстановления [22] иллюстрируется на рис. 16.

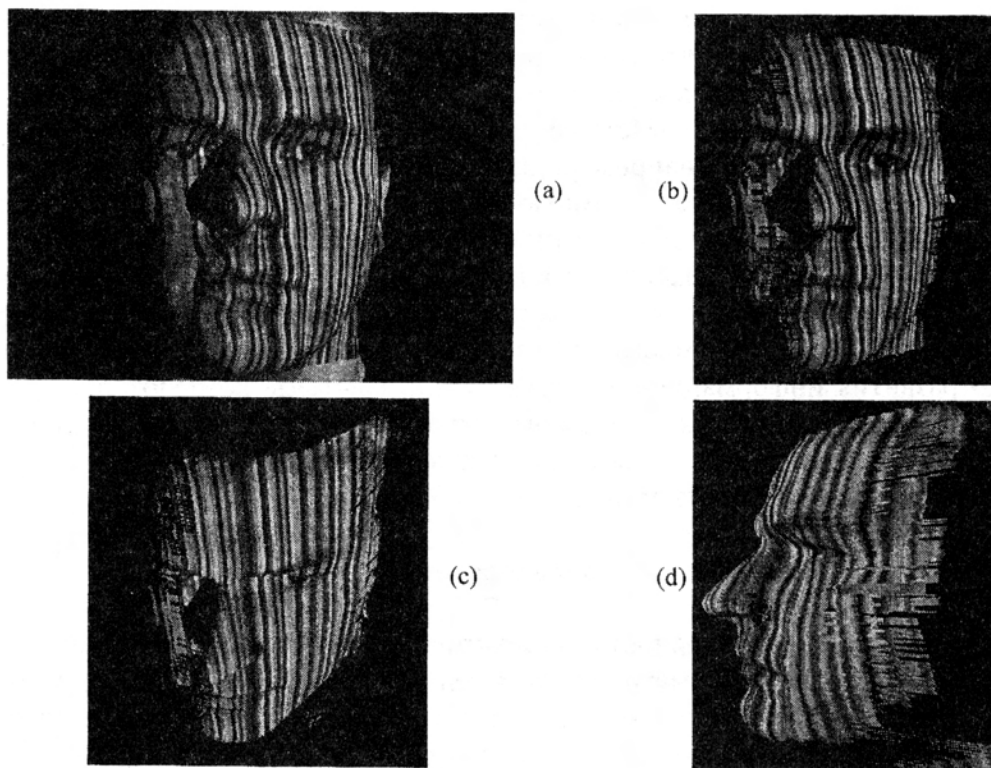


Рис. 16. Пример восстановления трехмерной формы поверхности при использовании метода структурированного освещения с цветным паттерном: исходный объект (а) и реконструкция формы (вид с различных ракурсов)

На рис. 16 заметны дефекты реконструкции формы при наблюдении объекта с одного направления под ограниченным углом, вследствие чего возникают искажения на затененных участках. Этот недостаток преодолевается при расширении угла наблюдения видеокамеры или при регистрации изображений с нескольких ракурсов.

Системы структурированного освещения находят широкое применение при реконструкции формы различных объектов в расширенном диапазоне геометрических размеров – от биологических объектов (см., например, [16]) до ценных предметов искусства [15, 24]. Перспективной областью применения являются методы реинжиниринга в технологиях проектирования, когда информация о форме поверхности объектов позволяет оптимизировать технологии создания объектов аналогичного назначения.

## Заключение

Рассмотренные методы, относящиеся к области компьютерной фотоники, отражают современные направления научных исследований и разработок, проводимых в ведущих университетах, международных научных центрах и лабораториях. Представленные примеры относятся к ряду научно-технических задач, получивших развитие в последние годы [1], в решении которых приняли активное участие сотрудники, аспиранты и студенты Санкт-Петербургского государственного университета ИТМО.

Компьютерная фотоника включает перспективные методы и технологии компьютерной обработки когерентных и некогерентных изображений, в том числе сформированных в гиперспектральной области – от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов. Методы компьютерной обработки изображений рассмотрены в ряде книг (см., например, [25-27]).

Важно отметить, что компьютерная фотоника является областью информационных технологий и ориентирована на решение проблем формирования, преобразования, передачи, обработки и визуализации изображений. В последние годы эффективность информационных технологий рассматривается с позиций соотношения качества обслуживания и стоимости создаваемых систем [28], что является важнейшим критерием развития информационных технологий. Системы компьютерной фотоники основываются на достижениях фундаментальной науки и одновременно определяют инновационные перспективы высоких технологий при решении актуальных потребностей современного информационного общества.

## Благодарности

Автор выражает благодарность аспирантам и студентам, принявшим активное участие в исследованиях по тематике настоящей работы, и, прежде всего, А. Захарову, в течение ряда лет выполнившему исследования и разработки методов и компьютерных программ в области оптической когерентной томографии, М. Волкову, разработавшему эффективные методы и алгоритмы двумерной локально-адаптивной фильтрации когерентных изображений с реконструкцией фазы, С. Балтийскому, выполнившему работы по компьютерной реконструкции изображений в цифровой голографии, А. Штучкину, создавшему новые компьютерные алгоритмы восстановления формы трехмерных объектов на основе структурированного освещения и динамического программирования.

## Литература

1. Proc. Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision (OSAV'2004, St. Petersburg, Russia, 19-21 October 2004). Saint Petersburg State University ИТМО, 2004.
2. В.Н. Васильев, И.П. Гуров. Технология бесконтактного контроля объектов на основе когерентного и спектрального радаров в биомедицинских исследованиях и промышленности /В кн.: Оптические и лазерные технологии. Сборник статей /Под ред. В.Н. Васильева. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2001. С. 160-176.
3. 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.



4. 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.
5. Schmitt J.M. Optical coherence tomography: a review //IEEE J. Select Topics Quant. Electron. 1999. V.5. P. 1205-1215.
6. Danilchenko D., Sachs M., Lankenau E., Koenig F., Huettmann G., Schnorr D., Al-Shukri S. Optical coherence tomography (OCT) of bladder. Potential of a new high-resolution imaging technique by endoscopic diagnosis //Proc. OSAV'2004 (St. Petersburg, Russia, 19-21 October 2004). Saint Petersburg State University ITMO, 2004. P. 367-368.
7. Goodman J.W., Lawrence R.W. Digital image formation from electronically detected holograms //Appl. Phys. Lett. 1967. V.11. P. 77-79.
8. Kronrod R.W., Merzlyakov N.S., Yaroslavskii L.P. Reconstruction of a hologram with a computer //Sov. J. Tech. Phys. 1972. V.17. P. 333-334.
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. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
12. Baltiysky S., Gurov I., De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., Coppola G. Characterization of microelectromechanical systems by the digital holography method //The Imaging Science Journal, submitted for publication.
13. Хорн Б.К.П. Зрение роботов. М.: Мир, 1989.
14. Carlsson T.E., Wei A. Three-dimensional measurement using light-in-flight speckle interferometry /In: Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, W. Jueptner and W. Osten, eds. Akademie Verlag, Berlin, 1997. P. 164-170.
15. Schirripa Spagnolo G., Guattari G., Sapia C., Ambrosini D., Paoletti D., Accardo G. Three-dimensional optical profilometry for artwork inspection //J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2000. V.2. P. 353-361.
16. Surrel J., Surrel Y. The fringe projection technique for shape acquisition of live biological objects //J. Opt. 1998. V.29. P. 6-13.
17. Notni G., 360-deg shape measurement with fringe projection: calibration and application /In: FRINGE'01, 4th Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, W. Osten and W. Jueptner, eds. ELSEVIER, 2001. P. 311-323.
18. Gurov I., Vozniuk J. Rough surface shape retrieval in a fringe projection technique by the image enhancement and fringe tracing method /In: Proc. QCAV'2001, Int. Conf. on Quality Control by Artificial Vision (Le Creusot, France, May, 21-23, 2001), Toulouse, CÉPADUÈS-ÉDITIONS, 2001. V.1. P. 79-84.
19. Posdamer J.L., Altschuler M.D. Surface measurement by space-encoded projected beam systems //Computer Graphics and Image Processing. 1982. V.18, N.1. P. 1-17.
20. Kujawinska M., Wegiel M., Sitnik R. Real-time 3D shape measurement based on color structure light projection /In: FRINGE'01, 4th Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, W. Osten and W. Jueptner, eds. ELSEVIER, 2001. P. 324-331.
21. Salvi J., Pagès J., Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems //Pattern Recognition. 2004. V.37, N.4. P. 827-849.
22. Shtuchkin A., Gurov I. Structured light range sensing using color patterns and two stage dynamic programming /In: Proc. OSAV'2004, Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision (St. Petersburg, Russia, 19-21 October 2004). Saint Petersburg State University ITMO, 2004. P. 40-47.

23. Zhang Li, Curless B., Seitz S. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming /Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization and Transmission. Padova, Italy, 2002. P. 24-36.
24. Sansoni G., Docchio F. From the Vittoria Alata to the Mille Miglia Ferrari racing car: 3D optical acquisition, CAD and rapid prototyping of unique examples of cultural heritage /In: Proc. ODIMAP IV, 4th Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements and Applications (University of Oulu, Finland, 16-18 June 2004). P. 292-303.
25. Прэртт У. Цифровая обработка изображений. В 2-х томах. М.: Мир, 1982.
26. Хромов Л.И., Цицулин А.К., Куликов А.Н. Видеоинформатика. Передача и компьютерная обработка видеоинформации. М.: Радио и связь, 1991.
27. Реконструкция изображений /Под ред. Г. Старка. М.: Мир, 1992.
28. Häusler G. Low cost high performance 3D-sensors by information theoretical optimization /In: Proc. ODIMAP IV, 4th Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements and Applications (University of Oulu, Finland, 16-18 June 2004). P. 260-261.

# АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДВУМЕРНОЙ ЛОКАЛЬНО-АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В.Н. Васильев, М.В. Волков, И.П. Гуров

Представлены результаты разработки и исследования помехоустойчивого метода анализа сложных изображений в виде картин полос с восстановлением двумерного распределения развернутой фазы полос

Развитие методов компьютерной обработки изображений имеет важное значение для современных информационных технологий. Изображения, получаемые в системах бесконтактного контроля объектов, часто искажены вследствие физических, технических ограничений и влияния помех, что существенно осложняет их анализ и обработку.

Задачи бесконтактного контроля характеристик различных объектов актуальны во многих областях науки и техники. В ряде случаев, таких как контроль качества поверхностей промышленных изделий, исследования деформаций и колебаний, предпочтительными оказываются неразрушающие оптические методы исследования, наиболее точными из которых являются интерферометрические и голографические методы. Помехоустойчивые методы компьютерной обработки и анализа изображений в виде картин полос позволяют значительно расширить области применения высокоточных методов бесконтактного контроля объектов. Полезная информация содержится в значениях фазы полос, однако извлечение этой информации может быть осложнено влиянием помех и значительными изменениями локальных характеристик изображения. Анализ локальных характеристик полос в условиях помех является важной задачей компьютерной обработки, решение которой позволяет значительно упростить задачу восстановления фазы полос и повысить точность бесконтактного контроля объектов.

Известные методы восстановления фазы [1-5], например, на основе преобразования Фурье-Гильберта [1,2], часто не обеспечивают необходимой помехоустойчивости при обработке реальных сложных картин полос.

В данной работе рассматривается адаптивный метод подавления помех и восстановления фазы, основанный на определении локальных характеристик картин полос [6].

## Анализ и обработка картин полос

Методы обработки изображений, как известно, основываются на априорном знании свойств информационной составляющей и помехи. При обработке картин полос используется тот факт, что полосы характеризуются значениями локального шага и локального направления (пространственной ориентации) в отличие от пространственно изотропного шума и локальных дефектов. При этом целесообразно использовать метод подавления помех, использующий итерационную процедуру определения локального шага полос и локального направления полос.

Блок-схема алгоритма обработки приведена на рис. 1.

На каждом  $q$ -ом шаге итерации,  $q \geq 1$ , новые значения сигнала полос  $\xi^q(i, j)$  определяются усреднением значений сигнала полос на предыдущем шаге обработки  $\xi^{q-1}(i, j)$  в пределах областей фильтрации, сформированных для каждой точки адаптивно с учетом оценок локального шага полос  $T^q(i, j)$  и локального направления полос  $\alpha_f^q(i, j)$ . Оценки  $T^q(i, j)$  и  $\alpha_f^q(i, j)$  вычисляются по значениям  $T^{q-1}(i, j)$  и

$\xi^{q-1}(i, j)$ , причем  $\xi^0(i, j) = \xi(i, j)$ ,  $T^0(i, j) = T_{\min}$ , где  $\xi(i, j)$  – исходный сигнал полос,  $T_{\min}$  – минимальное значение шага полос для обрабатываемой картины.

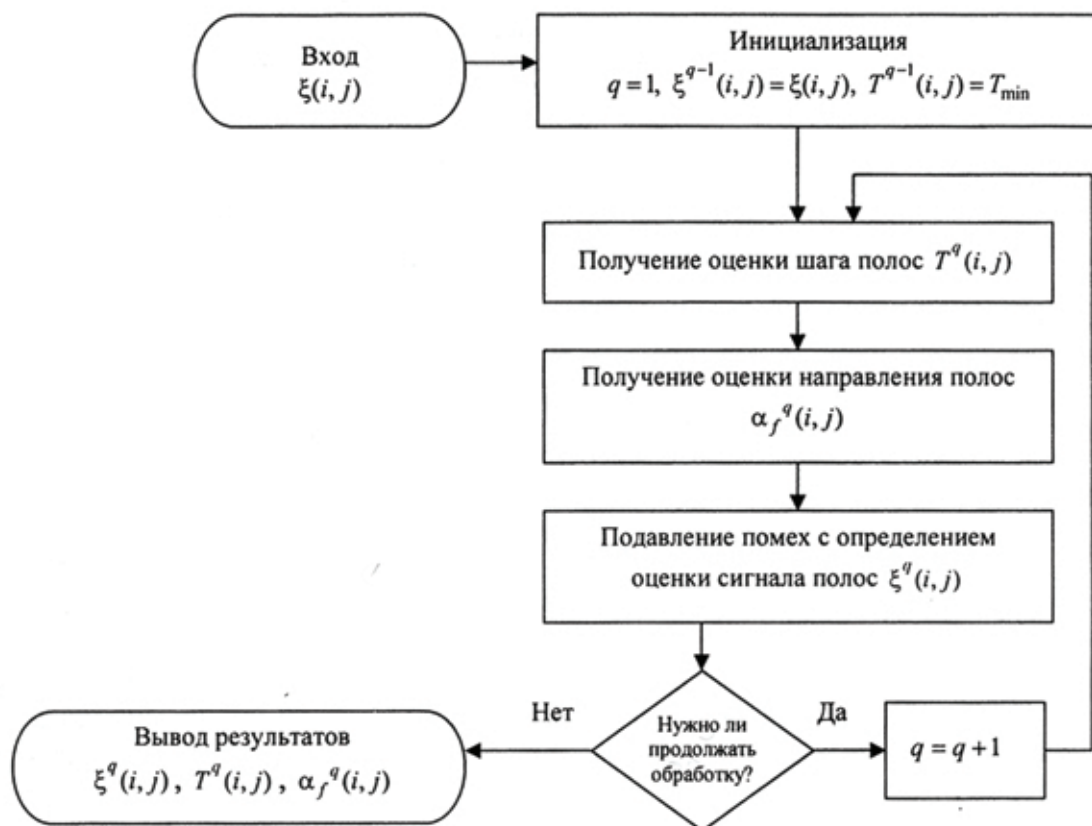


Рис. 1. Блок-схема итерационного алгоритма подавления помех и определения характеристик картин полос

Адаптивное формирование областей фильтрации на каждом шаге обработки в каждой точке картины полос позволяет обеспечить эффективное подавление помех, в том числе близких по частоте с сигналом полос, без существенного снижения контраста полос.

### Определение шага полос

Для всей картины полос перед началом обработки задается начальное приближение для величины шага полос  $T^0(i, j) = T_{\min}$  (см. блок-схему рис. 1).

Определение шага полос  $T^q(i, j)$  на каждом шаге  $q$  итерационной обработки осуществляется следующим образом. Для каждой точки  $(i, j)$  выбираются  $M \geq 8$  направлений  $\alpha(m) = 2\pi m / M$ ,  $m = 1, \dots, M$ , и в каждом направлении определяются координаты точки на замкнутом контуре  $P(m)$  (см. рис. 2) с максимальной разностью фаз  $|\Delta\phi(P(m), (i, j))| = \mu\pi$ , где  $\mu$  – коэффициент, обеспечивающий условие устойчивости итерационных вычислений. Предполагается, что одно из направлений  $\alpha(m)$  близко к направлению градиента фазы. Значения предполагаемой разности фаз определяются по известной на предыдущем шаге итерации величине  $T^{q-1}(i, j)$ .

Координаты точек на контуре (рис. 2) вычисляются по следующим формулам:

$$P(m) = P(m, N) = P(i, j, m, N) \Leftrightarrow (x(i, m, r(m, N)), y(j, m, r(m, N))) = (i + r(m, N) \cos \alpha(m), j + r(m, N) \sin \alpha(m)), \quad (1)$$

$$r(m, N) = (1/2N) \sum_{k=0}^{n-1} \mu T^{q-1}(x(i, m, r(m, k)), y(j, m, r(m, k))), \quad (2)$$

где коэффициент  $N$  определяет количество промежуточных точек уточнения шага полос.

Отметим, что форма и положение рассматриваемого контура учитывают изменение локального шага полос. При этом в примере рис. 2 точка  $A$  контура с центром в рассматриваемой точке изображения переходит в точку  $A'$ .

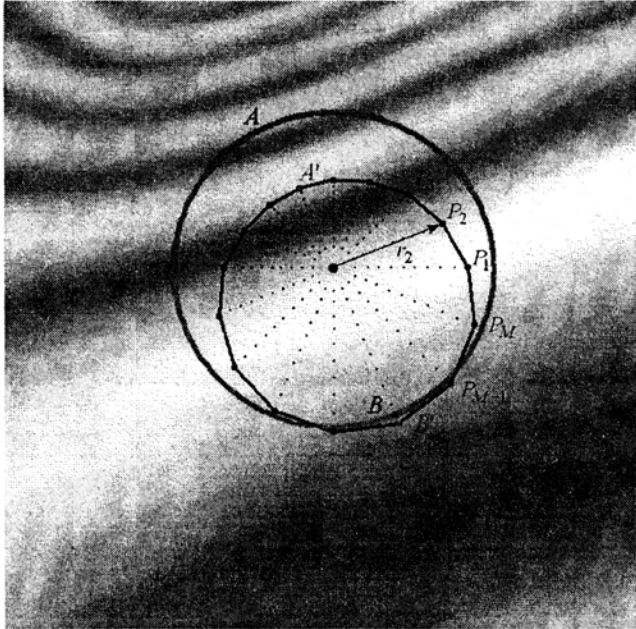


Рис. 2. Оценивание локального шага полос при обходе по замкнутому контуру

Оценка локального шага полос  $T^q(i, j)$  в точке  $(i, j)$  на  $q$ -ом шаге обработки вычисляется по формуле

$$T^q(i, j) = (1 - \mu_1) T^{q-1}(i, j) + \mu_1 \max[T_{\min}; 4\mu T^{q-1}(i, j) A^q(i, j) / D^q(i, j)], \quad (3)$$

где  $A^q(i, j)$  – оценка амплитуды сигнала на контуре,

$$A^q(i, j) = 0,5 [ \max_{m=1, \dots, M} (\xi^{q-1}(P(m))) - \min_{m=1, \dots, M} (\xi^{q-1}(P(m))) ], \quad (4)$$

$D^q(i, j)$  – оценка изменения сигнала на контуре,

$$D^q(i, j) = 0,5 \sum_{m=1}^M \left| \xi^{q-1}(P(m)) - \xi^{q-1}(P(m-1)) \right|, \quad P(0) = P(M), \quad (5)$$

коэффициент  $\mu_1$  определяет скорость возрастания оценки локального шага полос и характер сходимости при значениях шага полос, близких к истинному значению  $T(i, j)$ .

### Определение локального направления полос

Для каждой точки  $(i, j)$  картины полос для углов  $\alpha_l = \pi l / L$ , где  $l \in [0, L-1]$ ,  $L \geq 3$  – количество анализируемых направлений, вычисляются модули производных по направлениям  $l$  в форме

$$d(i, j, l) = 0.5 \left\{ \left| \xi^{q-1}(i + \cos(\alpha_l), j - \sin(\alpha_l)) - \xi^{q-1}(i, j) \right| + \left| \xi^{q-1}(i - \cos(\alpha_l), j + \sin(\alpha_l)) - \xi^{q-1}(i, j) \right| \right\}. \quad (6)$$

Далее вычисляются локальные значения модуля производных

$$D(i, j, l) = [2 / (MN^2(N + 1))] \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N nd(P(i, j, m, n), l), \quad (7)$$

получаемые усреднением значений  $d(i, j, l)$  по множеству точек  $P(i, j, m, n)$  адаптивной области с размерами, определяемыми величиной шага полос.

Координаты точек определяются по формулам (1), (2) с переопределенными значениями  $T_{\min} \leftrightarrow 2R_\alpha$  и  $\mu \leftrightarrow \mu_\alpha$ , соответствующими минимальному и относительному значениям размера области усреднения производных при вычислении локального направления полос. Значения модулей производных в точках с вещественными координатами вычисляются по значениям в четырех соседних точках с целочисленными значениями координат.

Локальное направление полос  $\alpha_f^q(i, j) \in [0, \pi)$  определяется как угол, отличающийся на  $\pm \pi/2$  от угла  $\beta$ , для которого сумма модулей проекций (на направление  $\beta$ ) усредненных модулей производных максимальна, т.е.

$$\alpha_f^q(i, j): C[i, j, \alpha_f^q(i, j) \pm \pi/2] = \max_{\beta} C(i, j, \beta), \quad (8)$$

где  $C(i, j, \beta)$  – сумма модулей проекций  $D(i, j, l)$  на направление, определяемое углом  $\beta$ ,

$$C(i, j, \beta) = \sum_{0 \leq l < L} |D(i, j, l) \cos(\beta - \alpha_l)|. \quad (9)$$

### Адаптивное формирование областей фильтрации

Полученные оценки шага  $T^q(i, j)$  и локального направления полос  $\alpha_f^q(i, j)$  позволяют для каждой точки картины полос сформировать анизотропную область фильтрации, определить в пределах области фильтрации для  $H$  упорядоченных точек весовую функцию  $W(x_h, y_h)$ , и по «взвешенным» значениям сигнала  $\xi^{q-1}(x_h, y_h)$  вычислить очередную оценку сигнала полос  $\xi^q(i, j)$ ,

$$\xi^q(i, j) = \sum_{h=1}^H \xi^{q-1}(x_h, y_h) W(x_h, y_h) / \sum_{h=1}^H W(x_h, y_h). \quad (10)$$

Область фильтрации имеет форму эллипса, деформированного с учетом изменения локального направления полос и шага полос. Для построенного набора точек сумма отклонений фазы от значения фазы  $\phi(i, j)$  близка к нулю, и взвешенное усреднение значений сигнала полос по построенному набору точек не приводит к существенному смещению оценок фазы.

На рис. 3 приведены результаты итерационной обработки зашумленной картины полос с изменяющимися амплитудой, шагом и локальным направлением. Для некоторых точек показаны сформированные области фильтрации с весовыми функциями  $W(x_h, y_h)$  и полученные оценки локального шага полос, отображаемые замкнутыми контурами в виде пунктирных линий.

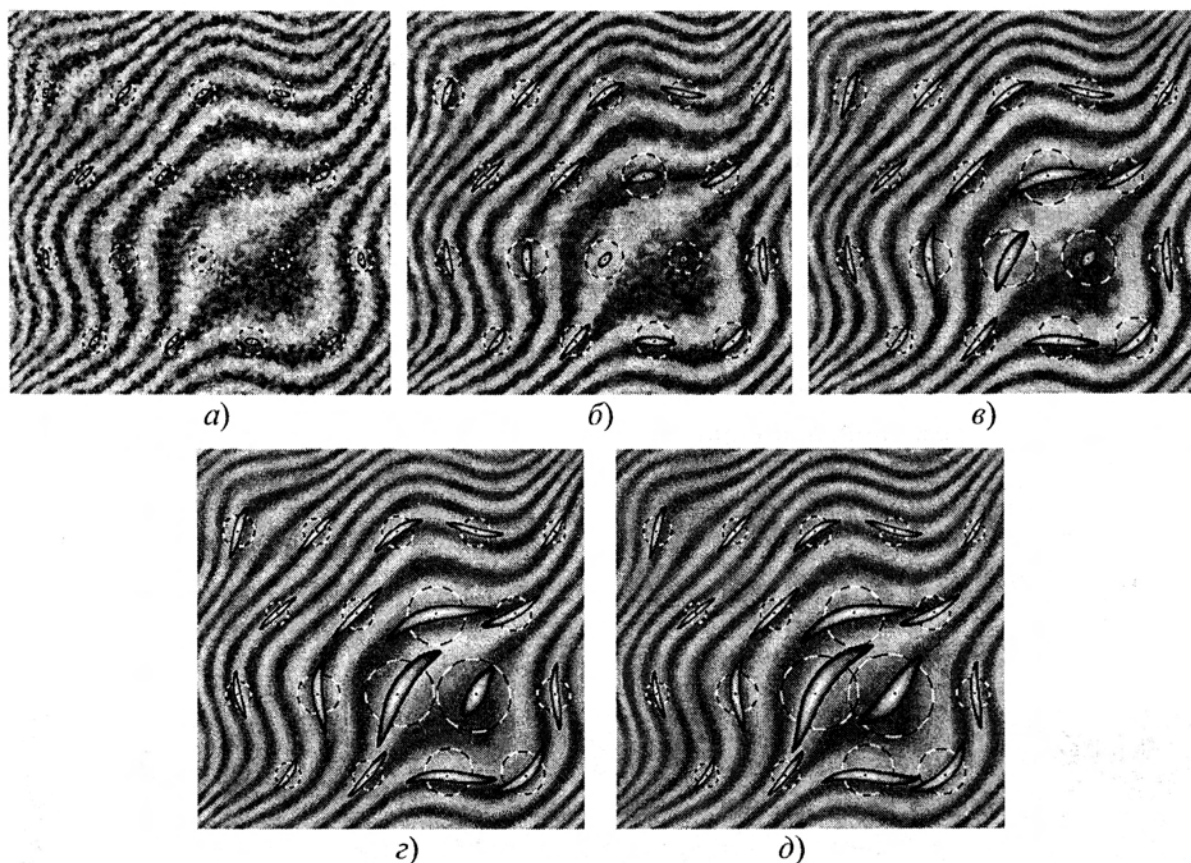


Рис. 3. Результаты итерационной обработки картины полос (значения весовой функции внутри каждой области фильтрации представлены яркостью полутонов)

Сравнение рис. 3, а и рис. 3, д наглядно показывает, что предлагаемый метод обеспечивает эффективное подавление помех без изменения вида картины полос, в том числе на участках со значительно изменяющимися шагом и ориентацией полос.

### Восстановление фазы полос

Вычисленное локальное направление полос  $\alpha_f^q(i, j) \in [0, \pi)$  не позволяет однозначно определить направление возрастания фазы. Для восстановления фазы необходимо задать локальное направление полос однозначно, т.е. определить значения  $\alpha_f(i, j) \in [0, 2\pi)$ . Если обрабатываемая картина полос имеет простую топологию, то во многих случаях достаточно задать точку или непрерывную двумерную область, обход которой в направлении против часовой стрелки однозначно определяет направление полос.

Для каждой точки  $(i, j)$  картины полос по формулам (1), (2), с переопределенным коэффициентом  $\mu \leftrightarrow \mu_{ph} = 1$ , формируется набор  $P(m, n)$  точек, расположенных упорядоченно в пределах области вычисления фазы. Для каждой точки  $P(m, n)$  вычисляется разность фаз  $\Delta\phi((i, j), P(m, n)) = \phi(P(m, n)) - \phi_r(i, j)$  относительно неизвестного истинного значения фазы  $\phi_r(i, j)$ , а также значения сигнала  $\xi(P(m, n))$ , фона  $B(P(m, n))$  и амплитуды  $A(P(m, n))$  картины полос.

Разность фаз вычисляется по формуле

$$\Delta\phi((i, j), P(m, n)) = (0,5\mu 2\pi / N)\gamma \sum_{k=0}^{n-1} \sin(\alpha(m) - \alpha_f(P(m, k))), \quad (11)$$

где коэффициент  $\gamma$  определяет знак фазы, или направление возрастания фазы по отношению к однозначно определенному локальному направлению полос.

Модель картины полос с учетом изменяющегося фона и амплитуды определяется в форме

$$\xi_{mod}(P(m, n), \phi_r(i, j)) = B(P(m, n)) + A(P(m, n)) \cos(\phi(i, j) + \Delta\phi((i, j), P(m, n))). \quad (12)$$

Оценку фазы полос можно вычислить в результате выбора одного из значений фазы  $\phi_k = k\Delta\phi \in [0, 2\pi)$  по критерию минимума дисперсии отклонения модельной картины полос от реальной, а именно

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [\xi(P(m, n)) - \xi_{mod}(P(m, n), \phi_k)]^2 \\ & = \min_{\phi_v = 0, \Delta\phi, \dots, 2\pi - \Delta\phi} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [\xi(P(m, n)) - \xi_{mod}(P(m, n), \phi_v)]^2 \end{aligned} \quad (13)$$

Пример восстановления фазы картины полос представлен на рис. 4.

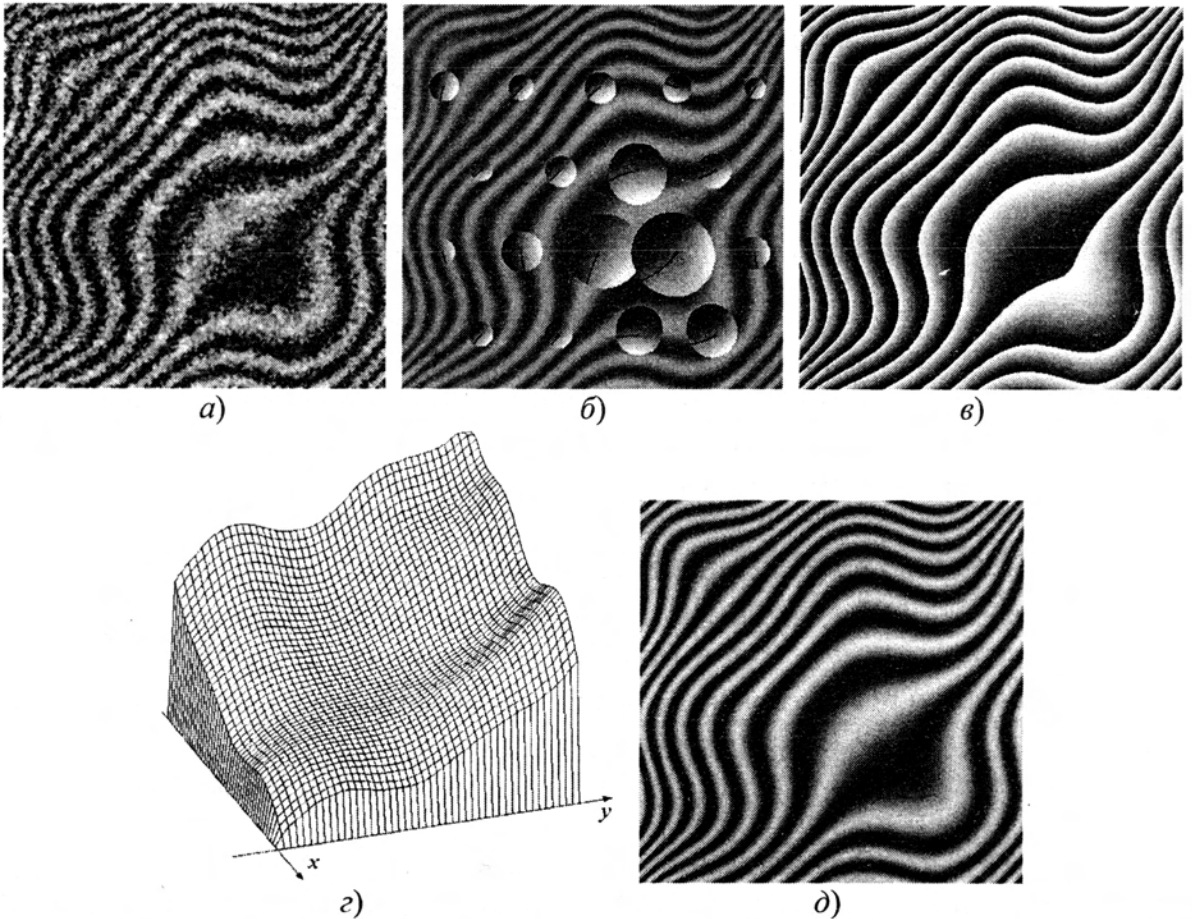


Рис. 4. Восстановление фазы полос: исходная картина полос (а), обработанная картина полос с показанными для некоторых точек областями вычисления фазы и разностями фаз, отображаемыми яркостью полутонов (б), результат вычисления приведенной фазы (в), восстановленная полная фаза (г) и восстановленная по значениям полной фазы картина полос (д)



## Заклучение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о высокой эффективности разработанного итерационного метода анализа и обработки картин полос. Исследования характеристик разработанного алгоритма показали его применимость для решения задачи компьютерной обработки картин полос со сложной топологией, существенно изменяющимися параметрами и высоким уровнем шума. В результате обработки обеспечивается получение оптимальных по критерию минимума дисперсии ошибки оценок локального шага, ориентации и развернутой фазы полос.

На основе представленного алгоритма разработана компьютерная программа, предназначенная для обработки картин полос, получаемых при бесконтактном контроле различных объектов методами голографической, муаровой и классической интерферометрии.

## Литература

1. Takeda M., Ina H., and Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry //J. Opt. Soc. Am. 1982. V. 72. P. 156-160.
2. Roddier C., Roddier F. Interferogram analysis using Fourier transform techniques //Appl. Opt. 1987. V. 26. P. 1668-1673.
3. Schemm J.B., Vest C.M. Fringe pattern recognition and interpretation using nonlinear regression analysis //Appl. Opt. 1983. V.22. P. 2850-2853.
4. Cordero-Davila A., Cornejo-Rodrigues A., Cardona-Nunez O. Polynomial fitting of interferograms with Gaussian errors of fringe coordinates. I: Computer simulations //Appl. Opt. 1994. V.33, P. 7339-7342.
5. Захаров А.С., Волков М.В., Гуров И.П., Темнов В.В., Соколовски-Тинтен К., фон дер Линде Д., Интерферометрическая диагностика кратеров абляции при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов //Оптический журнал. 2002. Т.69. №7. С. 40-45.
6. Gurov I., Volkov M. Distorted noisy interferograms enhancement and evaluation by the nonlinear 2D data-dependent fringe processing, in: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection II: Application in Industrial Design /W. Osten, W.P.O. Jueptner, and M. Kujawinska, eds. //Proc. SPIE. 2001. V. 4398. P. 255-264.

# ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО СИНТЕЗА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.М. Домненко, А.А. Шехонин

Работа посвящена исследованию и разработке новых методов компьютерного синтеза оптических систем различного назначения. В статье рассматривается использование технологий экспертных систем для выполнения структурного синтеза, а также компьютерные средства для выполнения параметрического синтеза на основе различных методик.

## Введение

Активное внедрение оптических методов в самые разнообразные процессы получения и обработки информации вызывает необходимость непрерывного расширения номенклатуры оптических приборов. Важным средством решения проблемы обеспечения потребности в оптических приборах является применение систем автоматизированного проектирования. Процесс автоматизированного проектирования оптических систем предполагает выполнение трех основных проектных процедур: синтеза, анализа и оптимизации [1–3]. Существующие системы автоматизированного проектирования оптических систем в значительной степени обеспечивают средствами автоматизации такие проектные процедуры, как анализ и оптимизацию. Наибольшие трудности для автоматизированного проектирования представляет этап начальной композиции оптической системы [4], т.е. синтеза объекта проектирования.

Задачу исходной генерации оптической системы можно разделить на две подзадачи:

- выбор структуры оптической системы, или структурный синтез;
- выбор численных значений параметров элементов оптической системы, или параметрический синтез.

При решении первой подзадачи определяется количество и вид компонентов, составляющих оптическую систему. Проектировщик имеет дело с математически неопределенными структурными связями, с неметрическими элементами структуры, с неформальным описанием функционирования оптической системы [5]. Поэтому в общем случае выбор структуры не относится к классу формально разрешимых проблем и составляет главное содержание творческой деятельности инженера. Однако с развитием информационных технологий появилась возможность автоматизировать решение эвристических задач. В частности, это возможно благодаря применению технологии экспертных систем [6].

При решении второй подзадачи предполагается, что структура оптической системы определена, а параметры и характеристики оптической системы имеют метрическое выражение [5]. В этом случае синтез параметров сводится к поиску решений, удовлетворяющих метрическим критериям, и, следовательно, является формально разрешимым. Однако большинство разработанных в настоящее время методик автоматизированного синтеза параметров оптических систем носят достаточно частный или упрощенный характер. Они в основном ориентированы на создание систем со специальной структурой [7] или на удовлетворение небольшого набора абберационных и габаритных требований [8]. Это приводит к тому, что многие трудоемкие, но детерминированные задачи параметрического синтеза решаются конструктором без эффективного использования компьютера.

Преодолеть сложившуюся ситуацию возможно на базе разработки универсальных методов автоматизированного синтеза оптических систем, охватывающих стадии габарит-

ритного и абберационного расчета и обеспечивающих соблюдение условий работоспособности, физической реализуемости, конструктивности объектов проектирования.

### Автоматизация структурного синтеза оптических систем с использованием экспертных технологий

Основой успеха структурного синтеза оптических систем является накопленный опыт. Осмысленное и структурированное представление этого опыта позволяет решать задачи синтеза новых оптических систем. Технологии экспертных систем позволяют структурировать и представить накопленный опыт в виде базы знаний, организовать диалог, в процессе которого помочь найти решения [6]. Обобщенная структура экспертной системы представлена на рис. 1.

Функционирование экспертной системы осуществляется в двух режимах: наполнение базы знаний и собственно решения задач синтеза. В первом случае с системой работает эксперт, обладающий опытом, структурирующий этот опыт и представляющий его в электронном виде. Во втором случае с системой работает проектировщик, при этом его опыт и квалификация могут быть невысокими.

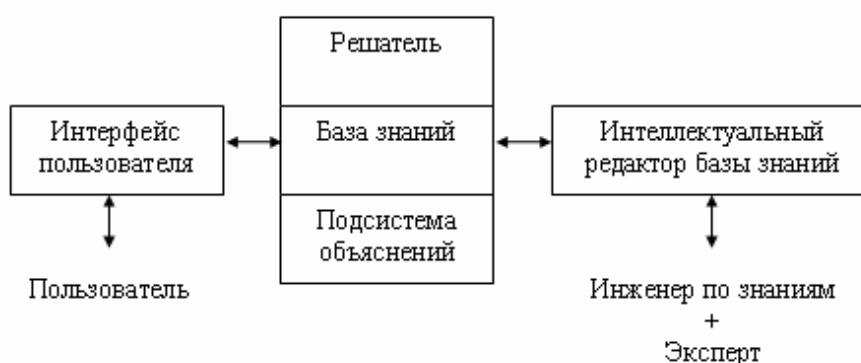


Рис. 1. Структура экспертной системы

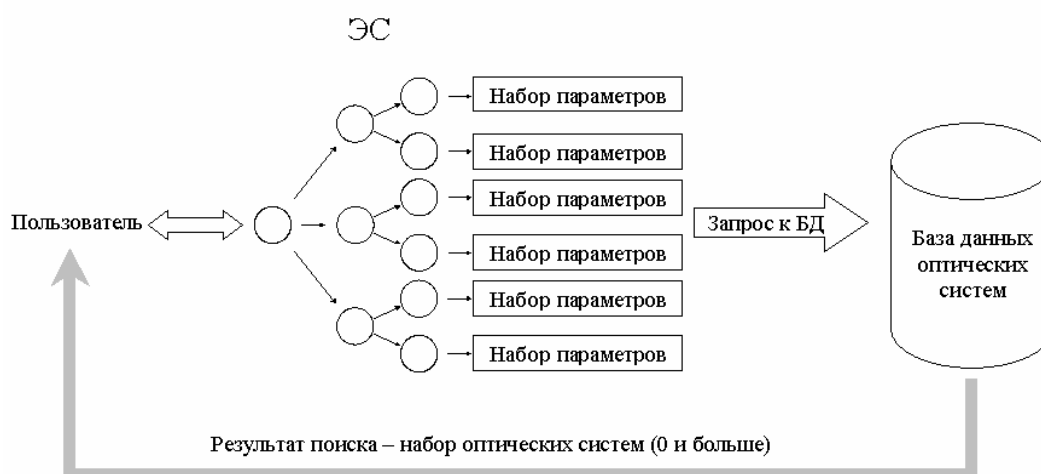


Рис. 2. Принципиальная схема взаимодействия экспертной системы и базы данных

В данной работе проработаны два варианта использования экспертной системы:

- 1) формирование исходной композиции оптической системы;
- 2) формирование запроса в базу данных оптических систем для поиска.

В первом случае экспертная система используется в режиме диалога, результатом которого обязательно будет один и только один вариант исходной композиции оптиче-

ской системы. Целевое действие будет представлять собой описание конфигурации оптической системы. Во втором случае в процессе диалога с экспертной системой формируется запрос в базу данных, который содержит критерии (конкретные значения или диапазоны значений параметров) для поиска системы в базе данных проектной организации. Целевое действие будет представлять собой запрос на языке SQL, который должен быть выполнен СУБД. В результате пользователь получит набор оптических систем или отрицательный ответ, если систем, удовлетворяющих критериям поиска, в базе данных нет (рис. 2).

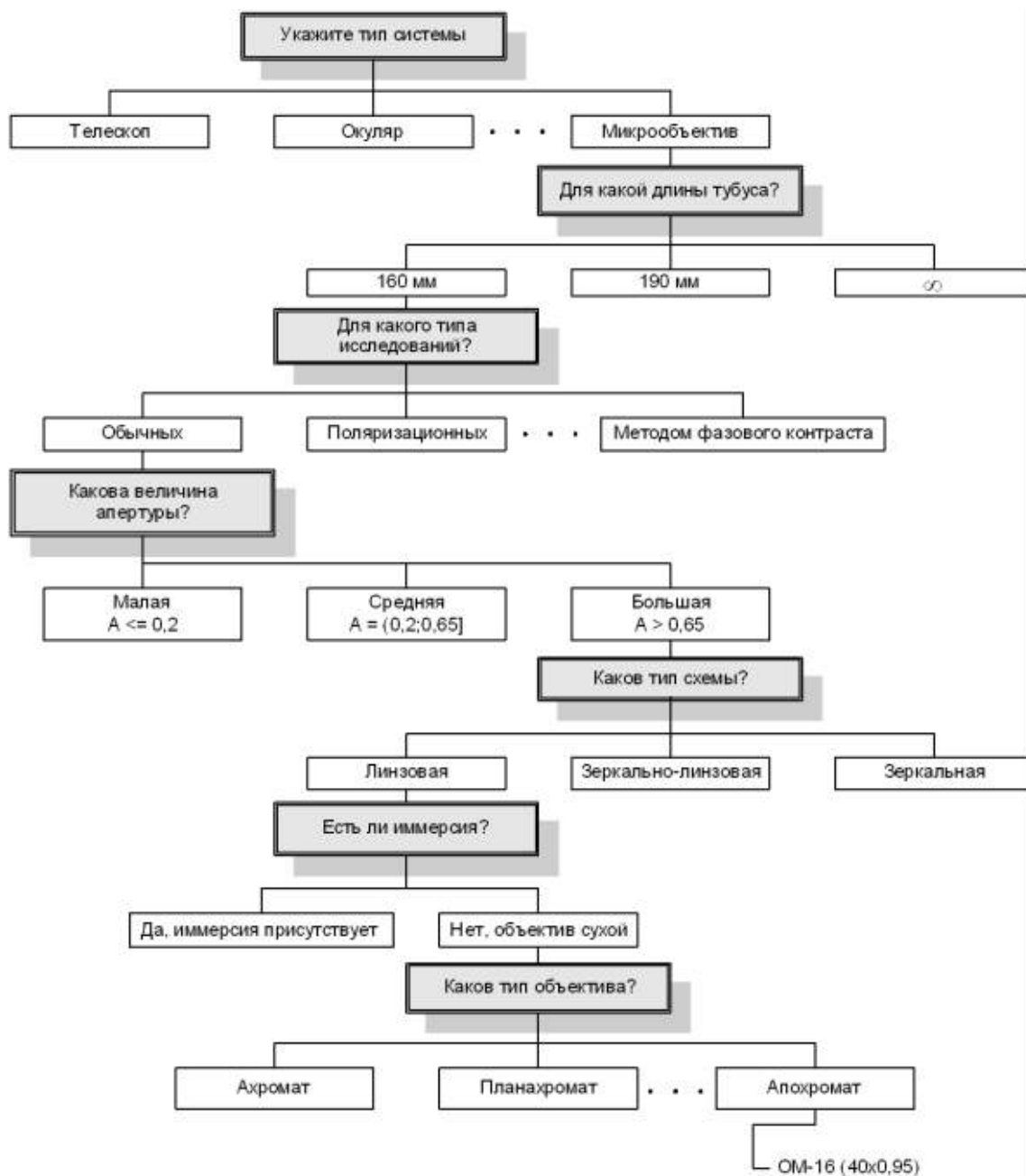


Рис. 3. Фрагмент базы знаний для синтеза оптических систем

В большинстве экспертных систем используется модель, основанная на правилах (продукционная модель представления знаний). Согласно этой модели, знания представляются в виде предложений типа «Если (условие), то (действие)». Под «условием» понимается некоторое предложение-образец, по которому осуществляется поиск в базе знаний, а под «действием» – действия, выполняемые при успешном исходе поиска (они

могут быть как промежуточными, выступающими далее как условия, так и целевыми, завершающими работу системы). Таким образом, совокупность экспертных знаний легко представить в виде графа или древовидной структуры (рис. 3).

Следует отметить, что синтез с использованием экспертной системы представляет собой формирование конфигурации на основе опыта, имеющегося в базе знаний (у экспертов организации). Использование экспертных систем не позволяет автоматически создавать новые конфигурации оптических систем. Таким образом, использование экспертных систем направлено в первую очередь на эффективное использование накопленного опыта и повторное использование проектных решений.

### **Компьютерные средства для автоматизации параметрического синтеза из элементов с заданными свойствами**

Одной из наиболее известных и успешно применяемых на практике методик параметрического синтеза является методика М.М. Русинова [4, 9], которая заключается в формировании композиции системы из элементов с заранее известными аберрационными свойствами. Эта методика выгодно отличается тем, что позволяет избежать введения в систему «лишних» параметров и исследовать свойства и коррекционные возможности элементов в области реальных лучей. В качестве поверхностей с заданными свойствами используются так называемые изопланатические поверхности, вносящие примерно одинаковые аберрации по всему полю предмета.

<b>Название подгонки</b>	<b>Примечание</b>
Подгонка по углу апертурного луча	Кривизна определяется по заданному углу апертурного луча после поверхности
Подгонка по углу главного луча	Кривизна определяется по заданному углу главного луча после поверхности
Подгонка по нормали апертурного луча	Кривизна определяется для обеспечения нормального падения апертурного луча
Подгонка по нормали главного луча	Кривизна определяется для обеспечения нормального падения главного луча
Подгонка к апланатической поверхности	Кривизна определяется для обеспечения апланатичности поверхности
Подгонка к концентричной поверхности	Кривизна определяется по кривизне заданной поверхности с обеспечением концентричности

Таблица 1. Подгонки кривизны поверхностей для реализации методики синтеза из элементов с заданными свойствами

<b>Название подгонки</b>	<b>Примечание</b>
Подгонка по высоте апертурного луча	Осевое расстояние определяется по заданной высоте апертурного луча на следующей поверхности
Подгонка по высоте главного луча	Осевое расстояние определяется по заданной высоте главного луча на следующей поверхности
Подгонка толщины по краю	Осевое расстояние определяется по заданным толщине по краю и световой высоте
Подгонка расстояния от другой поверхности	Осевое расстояние определяется по расстоянию до заданной поверхности
Подгонка суммы осевых расстояний	Осевое расстояние определяется по заданной сумме осевых расстояний

Таблица 2. Подгонки осевых расстояний для реализации методики синтеза из элементов с заданными свойствами

Для автоматизации этой методики в конструкционной модели оптической системы была реализована возможность задания неопределенных (переменных, связанных) конструктивных параметров. Механизмы определения значений таких параметров названы подгонками. Разработаны подгонки кривизны поверхностей (табл.1) и осевых расстояний (табл. 2), которые позволяют сформировать элементы с заданными свойствами и удерживать их в заданном состоянии даже в процессе оптимизации системы.

Неоспоримым преимуществом модульного принципа М.М. Русинова является возможность создания систем непосредственно в области реальных апертур и полей зрения, с коррекцией aberrаций, пригодной для успешной оптимизации. Однако следует отметить и недостатки этого метода: ограниченное число aberrаций, контролируемых в процессе синтеза (сферическая, кома, астигматизм 3-го порядка); сложность синтеза схем с переменными характеристиками и повторным ходом лучей через компоненты; сложность обеспечения заданных характеристик системы в параксиальной области. Все это требует использования альтернативных методик и реализации дополнительных компьютерных средств.

### Компьютерные средства для автоматизации параметрического синтеза из бесконечно-тонких компонентов

Вторая методика параметрического синтеза предложена Г.Г. Слюсаревым [10, 11] и основана на формировании системы из бесконечно тонких компонентов в воздухе, которые характеризуются aberrационными и силовыми параметрами. При использовании этой методики выбирается количество элементов, определяется их назначение и свойства, а затем виртуальные элементы заменяются физически реализуемыми (линзами и др.) Для автоматизации методики Г.Г. Слюсарева в конструкционной модели должна быть реализована возможность использования виртуальных элементов. Конструкционная модель оптической системы, построенная на понятиях «узел» и «направляющая» [12], позволяет это сделать.

Технология объектно-ориентированного программирования позволяет моделировать элементы, параметры и внутренняя структура которых заранее не известны. Если применить наследование от базового объекта «узел», то можно описать следующие виртуальные элементы (рис. 4): идеальную тонкую линзу (ThinLens), параметром которой является оптическая сила; параксиальный элемент (ABCD), параметрами которого являются элементы матрицы Гаусса; сопрягающий элемент (Conjugate), параметрами которого являются сопряженные лучи. Этого набора элементов достаточно для осуществления параметрического синтеза из бесконечно тонких компонентов.

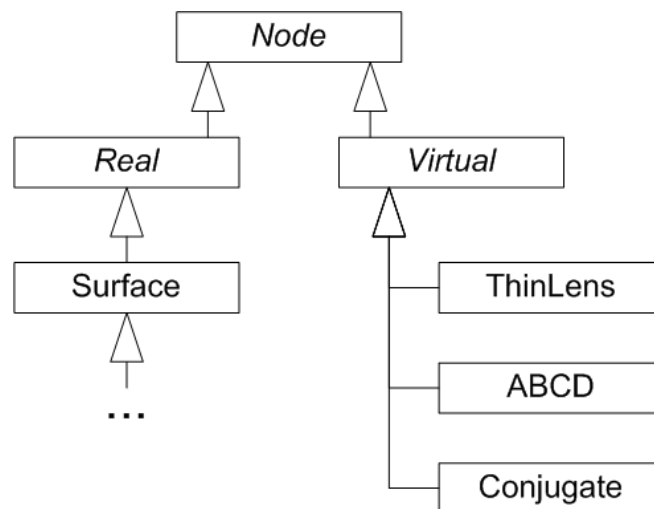


Рис. 4. Использование наследования для реализации виртуальных элементов

При всех достоинствах простоты и универсальности методике Г.Г. Слюсарева присущи и известные недостатки. Синтез систем осуществляется лишь в зейделевой области аберраций. Структура тонких компонентов не может быть выбрана произвольно, так как отсутствуют универсальные способы перехода от тонких компонентов к физически реализуемым элементам. Таким образом, при проектировании оптических систем необходимо иметь средства для реализации альтернативных методик синтеза.

### Заключение

В процессе выполнения работы рассмотрены варианты использования технологий систем управления базами данных для хранения конструктивных параметров оптических систем и поиска решений в процессе синтеза, а также варианты использования технологий экспертных систем для реализации параметрического синтеза. В результате проведенной работы модифицирована конструкционная модель оптической системы как объекта синтеза. Разработаны средства для реализации процедур синтеза оптических систем, алгоритмы для определения значения вычисляемых параметров, алгоритмы расчета нулевых и реальных лучей через виртуальные оптические элементы. В настоящее время ведется компьютерная реализация разработанных методов для включения в систему автоматизированного проектирования оптических систем ОПАЛ.

Работа выполнена в рамках НИР «Исследование и разработка новых методов компьютерного синтеза оптических систем различного назначения» по заданию министерства образования и науки Российской Федерации.

### Литература

1. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. М: Логос, 2000.
2. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем. Л.: Машиностроение, 1982.
3. Родионов С.А., Шехонин А.А. Методология проектирования оптических приборов. Учебное пособие. / Под ред. проф. М.И. Потеева. СПб.: СПБИТМО 1996.
4. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
5. Иванов А.В. Разработка методов автоматизированного синтеза оптических систем: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Л.: ЛИТМО, 1989.
6. Джексон П. Введение в экспертные системы. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001.
7. S. Banerjee, L.N. Hazra. Structural design of doublet lenses with prespecified aberration target. // Opt.Eng. 1997. V 36. №11.
8. Порев В.А., Чиж И.Г., Сокуренок О.М., Сокуренок В.М. Методика расчета оптических систем в области аберраций третьего порядка. // Оптический журнал. 1999. Т. 66. №10.
9. Русинов М. М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979.
10. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969.
11. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975.
12. Domnenko V., Ivanova T., Gantvorg M. New object-oriented model of an arbitrary optical system. // Proc. SPIE 2003. V. 5249. P. 608-615.

# РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОКОНФИГУРАЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. Иванов, М.А. Калинин

В статье представлены основные результаты, полученные при проведении НИР на тему «Разработка методов и алгоритмов оптимального проектирования многоконфигурационных оптических систем». Рассмотрена классификация многоконфигурационных оптических систем, предложен подход к построению конструкционной модели. На основе разработанных моделей и численных методов оптимизации предлагается новый подход к решению задачи параметрического синтеза панкратических систем с механической компенсацией.

## Введение

Новые задачи, возникающие в оптическом приборостроении, стимулируют потребность в создании новых, более сложных оптических систем с повышенными характеристиками. Одним из важных направлений в удовлетворении возрастающих потребностей является использование многоконфигурационных оптических систем. Разнообразие конструкций таких систем позволяет расширить функциональные возможности оптико-электронных приборов, но в то же время требует усовершенствования методов оптимального проектирования. Повышение эффективности проектирования должно идти по пути развития алгоритмов, позволяющих унифицировать и автоматизировать процесс разработки.

К классу многоконфигурационных оптических систем можно отнести все системы, компьютерное моделирование и проектирование которых требует формирования не одной, а нескольких вариантов конструкции. Классическим примером подобного рода систем являются панкратические объективы, в которых изменение увеличения (фокусного расстояния) достигается варьированием по определенному закону одного или нескольких воздушных промежутков между оптическими компонентами. В то же время под данное определение попадают различные комплексные системы, классификация которых будет рассмотрена в статье.

Основная сложность проектирования многоконфигурационных систем заключается в необходимости нахождения оптимальных характеристик функционирования не для каждой отдельной конфигурации, а для всех конфигураций одновременно, что представляет собой поиск компромисса между множеством трудно совместимых требований. В рамках данной работы мы проанализируем проблему описания конструкции многоконфигурационной оптической системы и предложим вариант новой конструкционной модели, позволяющей универсальным образом задавать различные комплексные оптические системы.

На основе разработанных методов и моделей в работе представлен обобщенный подход к синтезу панкратических оптических систем с механической компенсацией, позволяющий избежать трудностей связанных с их расчетом.

## Конструкционная модель многоконфигурационной оптической системы

Исходными данными для решения задачи оптимального проектирования многоконфигурационной оптической системы служат параметры описания её конструкции. Поэтому важной задачей является разработка конструкционной модели, удовлетворяющей требованиям универсальности и простоты модели [1]. Универсальность модели означает пригодность для широкого класса систем, а простота – удобство и эффективность использования. Следует сказать также, что проектирование конструкционной модели многоконфигурационной системы должно удовлетворять требованию обеспечения процесса оптимизации таких систем, т.е. возможности построения оптимизаци-



онной модели. Данное требование можно коротко выразить так: один параметр конструкционной модели – один параметр оптимизации.

В связи с необходимостью удовлетворения названным требованиям при проектировании конструкционной модели были рассмотрены отличительные особенности различных типов многоконфигурационных систем. В их числе – панкратические системы, в которых изменяются осевые расстояния между элементами, и сканирующие системы, содержащие в составе, как правило, качающиеся элементы (зеркала или призмы). Особым видом многоконфигурационных оптических систем можно считать многоканальные системы, например, на основе светоделительного куба. Также к числу многоконфигурационных можно отнести оптические системы, в состав которых входят новые оптические элементы, например, жидкостные линзы [2].

В результате проведенного анализа была предложена следующая классификация многоконфигурационных оптических систем с точки зрения описания конструктивных параметров и присоединительных характеристик:

- оптические системы с подвижными компонентами (панкратические и сканирующие системы);
- оптические системы, работающие в различных спектральных диапазонах (оптические системы тепловизоров, пирометров и приборов ночного видения);
- оптические системы с изменяющимся составом компонентов (оптические системы зрительных труб с дискретной сменой увеличения, а также оптические системы с дополнительными компенсаторами аберраций);
- многоканальные оптические системы (системы со светоделителями, оптические системы интерферометров, системы с синтезированной апертурой).

С учетом данной классификации была разработана новая конструкционная модель, основные компоненты которой учитывают особенности проектирования многоконфигурационных оптических систем. Рассмотрим основные принципы этой модели.

В отличие от известных пакетов программ автоматизированного проектирования (Zemax, CodeV и Oslo), в которых формирование различных конфигураций происходит путем описания отличий каждой отдельной конфигурации от некоторой базовой конфигурации, в нашей модели предлагается пересмотреть само понятие базовой конфигурации. Это связано с недостатком указанного подхода – невозможность простого задания оптических систем с изменяющимся составом компонентов.

Взамен базовой конфигурации в нашей конструкционной модели предлагается использовать понятие состава системы. Состав системы формируется оптиком-расчетчиком перед началом определения отдельных конфигураций сложной системы путем описания всех используемых оптических элементов. Таким образом, в состав системы входят все элементы, задействованные в описании многоконфигурационной оптической системы.

	Тип параметра	Конфигурация №1	Конфигурация №2	Конфигурация №3
1	Расстояние [1]	4.5	5	5.5
2	Расстояние [3]	7	7.3	7.5
3	Радиус [2]	10	12	10
4	Длина волны [1]	0.54607	0.58756	0.54607

Рис. 1. Окно первого этапа формирования конфигураций

Далее формирование каждой отдельной конфигурации такой системы должно осуществляться с помощью двухэтапного процесса. Интерфейс его реализации можно

представить следующим образом. На первом этапе с помощью редактора конфигураций задается изменение выбранного параметра входящего в описание состава оптической системы (рис. 1). На втором этапе с помощью таблицы конструктивных параметров выбираются активные поверхности, которые будут включены в состав текущей конфигурации (рис. 2).

	Радиус	Расстояние	Среда	Световая высота	Активность
Пред	0.000000	30.000000	Воздух	5.000000	<input type="checkbox"/>
1	100.000000	4.000000	K8	10.000000	<input checked="" type="checkbox"/>
Диаф.	-100.000000	15.000000	Воздух	9.000000	<input checked="" type="checkbox"/>
3	0.000000	10.000000	Воздух	7.000000	<input checked="" type="checkbox"/>
4	-60.000000	3.000000	Ф1	5.000000	<input type="checkbox"/>
5	-120.000000	40.000000	Воздух	6.000000	<input type="checkbox"/>
Изоб.	0.000000			3.000000	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 2. Окно второго этапа формирования конфигураций.

Разработанная конструкционная модель позволяет описывать все проанализированные ранее типы многоконfigurационных оптических систем, в том числе решить проблему описания оптические системы с изменяющимся составом компонентов и многоканальных систем.

### Особенности реализации конструкционной модели

Использование объектно-ориентированного подхода при реализации конструкционной модели многоконfigurационной оптической системы позволяет создать унифицированный интерфейс доступа ко всем параметрам. Применяв принципы абстракции и наследования, можно организовать единую иерархию объектов, описывающих конструкцию оптической системы.

Диаграмма наследования классов, реализованная в обозначениях унифицированного языка моделирования (UML, unified modeling language) [3], представлена на рис. 3а. Все классы-наследники (**Поверхность**, **Среда**, **Диафрагма**) реализуют наследуемый интерфейс доступа к своим параметрам от базового класса **Элемент\_конструкции**, тем самым обеспечивая возможность манипулировать своими параметрами вне зависимости от текущей конфигурации.

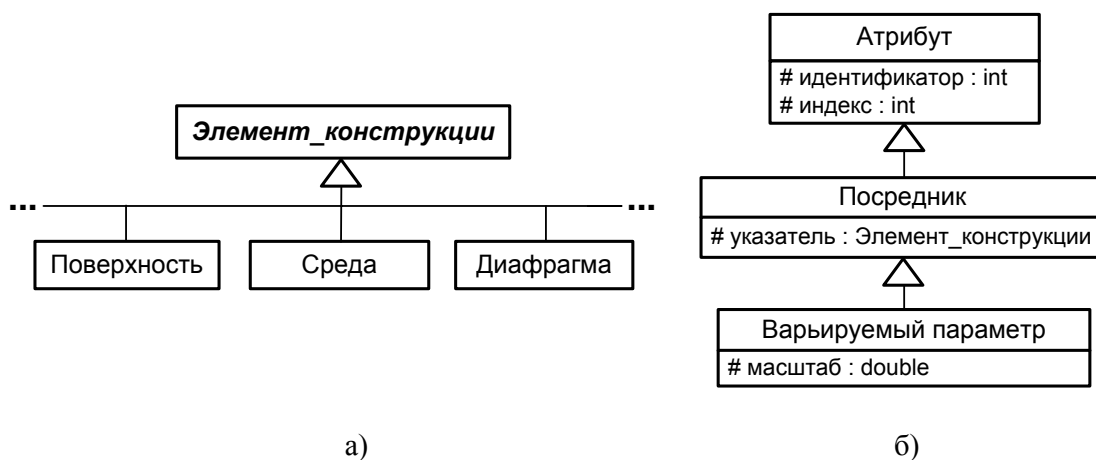


Рис. 3. Иерархия классов конструкционной модели.

Упорядочивание параметров конструкционной модели производится путем введения классов описания параметров (**Атрибут**, **Посредник**). Иерархия этих классов показана на рис. 3б. Для описания отдельного параметра используется его целочисленный идентификатор, целочисленный индекс, а также указатель на объект базового класса **Элемент\_конструкции**.

Используя принцип наследования, легко организовать описание отдельного параметра оптимизации в классе **Варьируемый\_параметр** (рис. 3б). Введение такого компонента в оптимизационную модель позволяет универсальным образом описывать параметры оптимизации как обычных, так и многоконфигурационных оптических систем.

### Метод расчета панкратических систем

Одной из важных и нерешенных проблем проектирования сложных панкратических оптических систем с механической компенсацией является задача определения множества положений (либо смещений) подвижных компонентов с известной оптической силой, исходя из потребности изменения в заданном диапазоне или удержания значений ряда параксиальных характеристик. Математически эта проблема может быть сформулирована в виде построения и решения  $r$  систем нелинейных уравнений:

$$\mathbf{P}(\mathbf{X}) = \mathbf{P}_0 + \delta\mathbf{P}_k, \quad k = 1, 2, \dots, r$$

где  $\mathbf{P}(\mathbf{X})$  – вектор выбранных параксиальных характеристик;  $\mathbf{X}$  – вектор переменных осевых расстояний (или смещений подвижных компонентов);  $r$  – количество изучаемых состояний панкратической системы;  $\mathbf{P}_0$  – вектор заданных значений параксиальных характеристик в некотором основном (принятом за базовое) состоянии;  $\delta\mathbf{P}_k$  – вектор изменений характеристик в  $k$ -ом состоянии. Предполагается, что значения параметров в различных состояниях не только должны удовлетворять уравнениям, но и обеспечивать плавное (без скачков) движение компонентов.

Можно показать, что каждая из систем уравнений представляет собой полиномиальную систему [4], и данная задача может быть сведена к последовательности решений полиномиальных систем уравнений. Такой традиционный подход наталкивается на две проблемы: плохая обусловленность процесса отыскания корней полиномов и отсутствие надежного критерия, по которому корни можно отличить друг от друга.

На основе разработанных моделей и численных методов оптимизации был разработан новый метод параметрического синтеза панкратических оптических систем в параксиальной области, который решает эти две главные проблемы традиционных методов проектирования. Рассмотрим его по шагам.

1. Вначале одно из состояний панкратической системы, для которого известно положение подвижных компонентов  $\mathbf{X}_0$  по результатам «статического» синтеза, принимается за базовое.

2. Далее определяются диапазон (диапазоны) изменения параксиальных характеристик относительно базового состояния.

3. За счет достаточно мелкого дробления найденных диапазонов генерируется и последовательно нумеруется (начиная от базового) множество промежуточных состояний оптической системы. Генерация производится с таким расчетом, чтобы характеристики  $\mathbf{P}(\mathbf{X})$  хорошо кусочно аппроксимировались линейными функциями.

4. Поиск решений образованных систем уравнений осуществляется последовательно друг за другом, в порядке номеров (отдельно для каждого диапазона). Вектор параметров  $\mathbf{X}_k$  находится при известном значении  $\mathbf{X}_{k-1}$  путем решения задачи о наименьших квадратах: минимизировать

$$\varphi(\Delta\mathbf{X}) = [\mathbf{P}(\mathbf{X}_{k-1} + \Delta\mathbf{X}) - \mathbf{P}_0 - \delta\mathbf{P}_k]^T [\mathbf{P}(\mathbf{X}_{k-1} + \Delta\mathbf{X}) - \mathbf{P}_0 - \delta\mathbf{P}_k]$$

Если функция  $\varphi$  в точке минимума достигает нулевого значения с высокой степенью точности, то это означает, что синтез состояния успешно завершен, и вектор  $\mathbf{X}_k$  может быть определен как сумма  $\mathbf{X}_{k-1}$  и найденного вектора  $\Delta\mathbf{X}$ . В противном случае построение оптической системы в данном состоянии считается невозможным (при выбранном исходном решении  $\mathbf{X}_0$ ).

### Заключение

В результате проведенного исследования был осуществлен анализ и выявлены специфические особенности многоконфигурационных оптических систем как объектов оптимального проектирования. Сформулирован подход к описанию конструкции сложных оптических систем. Разработан механизм взаимодействия конструкционной и оптимизационной модели оптической системы на основе объектно-ориентированного подхода, обеспечивающий использование универсальных методов оптимизации при проектировании многоконфигурационных оптических систем. Предложенная структура конструкционной модели учитывает особенности многоконфигурационных оптических систем и предполагает безболезненное расширение, что позволяет избежать в дальнейшем перепроектирования.

Разработанный метод расчета панкратической оптической системы в параксиальной области обладает многими преимуществами перед традиционными способами. В частности:

- метод универсален, поскольку пригоден для самых разнообразных характеристик и их целевых значений;
- осуществляется автоматический отбор решений для обеспечения плавного движения компонентов;
- численный подход избавляет от необходимости аналитического представления параксиальных уравнений, что позволяет применять его для систем различной структуры.

Работа выполнялась в рамках НИР «Разработка методов и алгоритмов оптимального проектирования многоконфигурационных оптических систем» по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации.

### Литература

1. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем. Л.: Машиностроение, 1982. 270 с.
2. L. Saurei, G. Mathieu, B. Berge. Design of an autofocus lens for VGA ¼-in. CCD and CMOS sensors // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5249. P. 288–296
3. Фаулер М., Скотт К. UML. Основы. СПб: Символ-Плюс, 2002. 192 с.
4. V. Ivanov. Generalized method for first-order lens layout // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3780. P. 199–206

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

В.А. Толмачев, А.А. Усольцев, Д.В. Лукичев

В статье рассматривается одно из возможных применений искусственных нейронных сетей в системах векторного управления асинхронным электроприводом в качестве наблюдателя потокосцепления ротора. Анализируются преимущества такого решения.

## Введение

Основные тенденции развития кибернетики в начале третьего тысячелетия можно выразить двумя словами: биологизация и гибридизация. Под биологизацией чаще всего понимается построение и исследование моделей поведения сложных объектов и способов управления ими на основе имитации механизмов, реализованных природой в живых существах. Это связано, прежде всего, с тем, что стремительное увеличение вычислительных мощностей и развитие математического аппарата позволили подступиться к решению таких задач, размерность которых еще 5–10 лет назад была непреодолимым барьером для исследователя.

Гибридизация, в свою очередь, состоит в совместном применении различных методов и/или моделей для обработки информации об одном и том же объекте. Парадигма такого подхода основана на согласии с тем, что любая сколь угодно сложная искусственная модель реального объекта всегда будет примитивнее и проще оригинала, и только многоаспектное его изучение с последующей интеграцией получаемых результатов позволит обрести необходимые знания или приблизиться к оптимальному решению.

В настоящее время наиболее динамично развивается одна из областей современной теории интеллектуальных вычислений (англ.: *computational intelligence*), связанная с построением и применением искусственных нейронных сетей (ИНС). Можно отметить такие преимущества нейросетевого подхода, как:

- быстрое действие за счет параллельной обработки информации,
- устойчивость к изменению параметров среды и объекта управления,
- надежность вследствие избыточности элементов системы,
- возможность использования скрытой информации об объекте управления.

Сформированные в рамках этого направления многослойные сетевые модели, в качестве прототипа которых используются структуры и механизмы функционирования биологических нервных систем, все более серьезно рассматриваются в качестве методологического базиса для создания сверхскоростных систем управления различными техническими устройствами [4].

Практика показала, что попытки реализовать систему управления сложным объектом (преобразователем электрической энергии или электропривода) целиком на одnorodной нейронной сети не приводят к желаемому результату – созданию нейросетевой системы управления, по эффективности близкой или превосходящей систему управления, построенную классическими методами. Причина кроется в том, что для построения такой системы необходима слишком большая сеть, практически трудно реализуемая на настоящем этапе и требующая предварительно обрабатываемой информации большой размерности. Такая сеть требует значительных объемов вычислений при моделировании и обучении. Поэтому целесообразнее использовать нейросетевое устройство в качестве одного из компонентов системы управления либо модуля принятия решений, передающего результирующий сигнал на другие элементы, не связанные непосредственно с искусственной нейронной сетью [3]. Проанализируем эффектив-

ность применения ИНС на примере использования нейросетевого наблюдателя потокоцепления ротора в системе асинхронного электропривода.

## 1. Система векторного управления асинхронного двигателя

Функциональная схема системы векторного управления асинхронного электропривода типа “*TRANSVEKTOR*” представлена на рис. 1 [1], где РП, РС – соответственно регуляторы потокоцепления и скорости асинхронного двигателя (АД), РК – разделитель координат, Р’ – ротор, ПФ2-3(3-2) – преобразователи числа фаз, УМ – усилитель мощности с релейными регуляторами тока, ДАД – двухфазный асинхронный двигатель, Н – наблюдатель потокоцепления ротора АД, ПК – преобразователь координат.

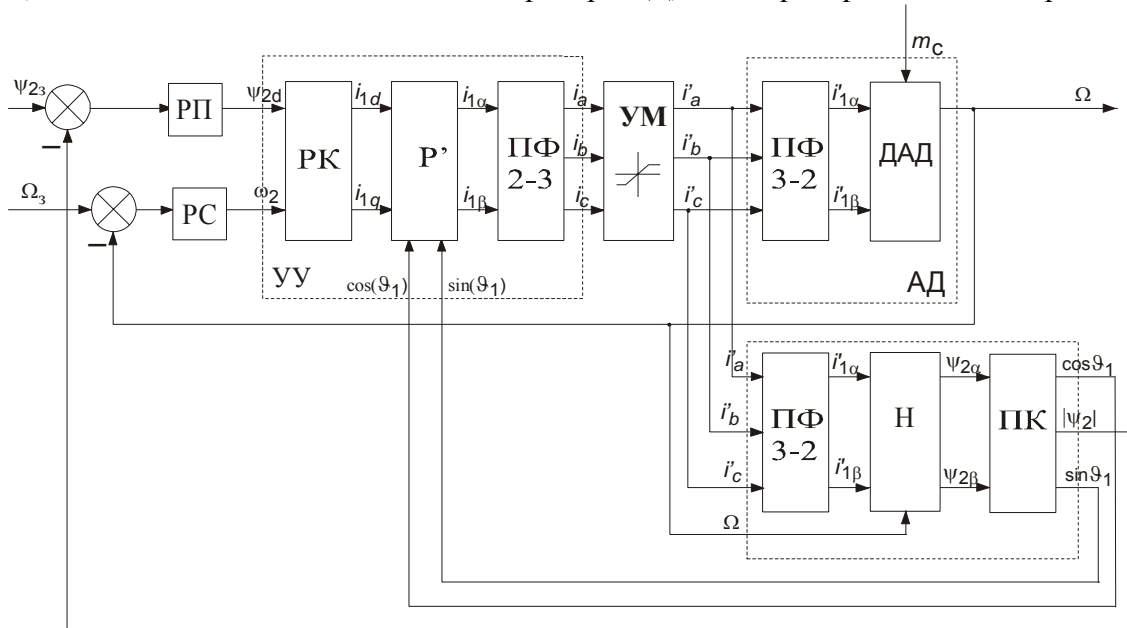


Рис. 1. Функциональная схема системы векторного управления асинхронного электропривода типа “*TRANSVEKTOR*”

Следует отметить, что достоверность работы наблюдателей магнитного потока как основополагающих элементов векторного управления зависит от точности определения параметров асинхронного двигателя. Вследствие нагрева машины изменяются активные сопротивления статора и ротора, что приводит к возникновению ошибок оценивания магнитного потока, а это, в свою очередь, сказывается на снижении энергетической эффективности процесса преобразования энергии и даже потере устойчивости всей системы в целом. Наиболее часто в системах управления применяется модели наблюдателей магнитного потока, которые в качестве входных сигналов используют информацию о напряжении (токе) в обмотках статора и скорости вращения вала АД. Напряжение на выходе УМ имеет вид широтно-модулированного сигнала, при этом ток в обмотках АД представляет собой так называемый «токовый коридор», в котором сигнал пульсирует с некоторой амплитудой вокруг заданного значения. Однако тот факт, что ИНС не могут напрямую работать с широтно-импульсными сигналами, и то, что сложность входных сигналов непосредственно определяет размерность ИНС и связанные с ней трудности в реализации такой сети, задачу построения нейросетевого наблюдателя потокоцепления ротора предлагается разбить на две части:

- синтез нейросетевого фильтра, обеспечивающего сглаживание сигнала тока релейного УМ;
- синтез идеализированного нейросетевого наблюдателя, на вход которого поступают сигналы без искажений.

## 2. Нейросетевой фильтр

Структурная схема релейной системы управления, с помощью которой формируется ток статора в УМ, приведена на рис. 2, а [2]. В ней управление силовым ключом  $S$  осуществляется двухпозиционным релейным элементом с гистерезисом таким образом, что на статорную обмотку подается положительное или отрицательное постоянное напряжение  $U_d$  в соответствии с условиями:

$$u = \begin{cases} +U_d & \text{если } \Delta_i = i_0 - i = -\Delta/2 \\ -U_d & \text{если } \Delta_i = i_0 - i = +\Delta/2 \end{cases} \quad (1)$$

где  $i, i_0$  – соответственно реальный и заданный ток обмотки;  $\Delta_i$  – ширина петли гистерезиса релейного элемента, которая выбирается исходя из допустимой частоты коммутации силовых ключей.

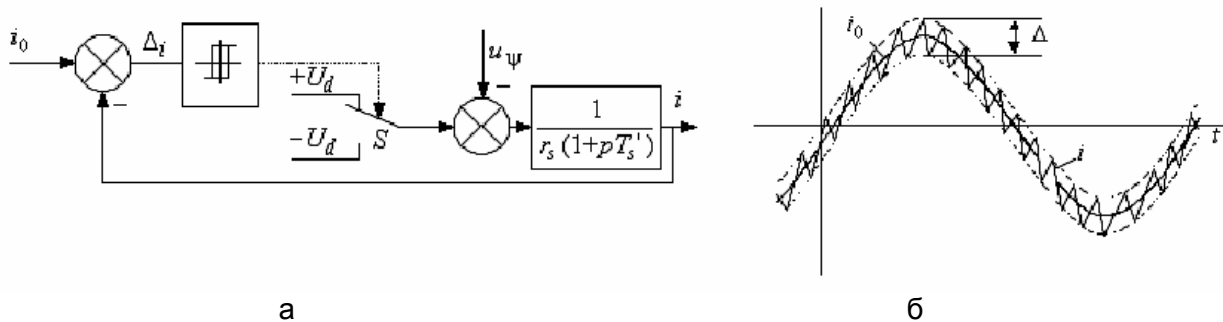


Рис. 2. Структурная схема усилителя мощности релейного типа (а) и временные диаграммы его работы (б)

Приведенное на рис. 2, а аperiodическое звено представляет собой обмотку двигателя, передаточную функцию которой можно получить из уравнения статора в неподвижной системе координат  $\underline{u}_s = \underline{i}_s r_s + \frac{d\psi}{dt}$ , если в нем исключить потокосцепление статора. На рисунке  $T'_s = L'_s / r_s$  – постоянная времени переходного процесса,  $r_s, L'_s$  – активное сопротивление и переходная индуктивность статора,  $u_\psi$  – падение напряжения, создаваемое в обмотках статора магнитным потоком ротора.

Искусственная нейронная сеть должна решать задачу фильтрации временных сигналов, т.е. выполнять функцию предсказывающего фильтра, когда по некоторому количеству предыдущих отсчетов сигнала «токового коридора»  $i(T_k), i(T_{k-1}), \dots, i(T_{k-n-1})$  на выходе получаем значение гладкой составляющей  $i_0(T_k)$  с заданной точностью и во всем диапазоне рабочих частот и амплитуд сигналов.

Для выявления наиболее подходящих параметров ИНС, а также ее особенностей при решении поставленной задачи исследование целесообразно начать с упрощенной модели статорной обмотки АД без учета  $u_\psi$  и с использованием в обучающей выборке только номинальных значений частоты и амплитуды. С помощью данного упрощения, используя метод переменной структуры при оптимизации архитектуры ИНС, был сделан вывод о целесообразности использования в задаче двухслойных сетей, содержащих логические и линейные функций активации соответственно в скрытых и выходных слоях. Также была получена зависимость ошибки обучения ИНС от числа ее входов и количества нейронов в скрытом слое [2].

Обучающая выборка может быть представлена как равномерная сетка, где строки и столбцы являются соответственно значениями частот и амплитуд рабочего диапазона то-

ковых сигналов системы. При таком подходе требуется огромный объем обучающих данных, что, в конечном счете, отразится на размерности ИНС. Таким образом, необходимо определять характерные частоты и амплитуды сигналов, обучившись на которых сеть смогла бы демонстрировать хорошие обобщающие свойства и работать с заданной ошибкой во всем диапазоне сигналов. Анализ работы ИНС при обучении и тестировании на различных сигналах позволил сформировать требуемую обучающую выборку.

В процессе работы различных устройств их параметры могут значительно меняться по сравнению с первоначальным состоянием. Для асинхронных двигателей это прежде всего нагрев обмоток статора и ротора, который может приводить к двухкратному увеличению их сопротивления. Анализ изменения сигналов УМ при вариациях сопротивления АД позволил констатировать, что в обучающей выборке должно быть отражено это изменение. Показано, что обучение ИНС на сигналах с определенными выше значениями частоты и амплитуды при номинальном сопротивлении АД, а также при сопротивлении в 2 раза больше паспортного значения позволяет получить требуемую ошибку не только во всем рабочем диапазоне изменения сигналов тока, но и при вариациях активного сопротивления АД в пределах двухкратного его увеличения.

С учетом требуемых характеристик фильтрующего устройства произведен расчет коэффициентов цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ). В пакете *MATLAB/Simulink* построена модель для сравнения работы ИНС и КИХ- фильтра. На данные устройства с выхода УМ подавался один и тот же «зашумленный» токовый сигнал с номинальной амплитудой и частотой. Сигналы с выходов исследуемых фильтров визуализировались и анализировались средствами пакета *Simulink*. Показано, что интегральный коэффициент гармоник выходного сигнала ИНС ниже соответствующего показателя у КИХ- фильтра.

В среде *Mathcad* были программно реализованы рассчитанный КИХ-фильтр, а также нейросетевой фильтр, обучение и настройка которого была произведена в среде *MATLAB* с помощью пакета расширения *Neural Network Toolbox*. Погрешность их работы определялась как геометрическая сумма двух ее составляющих: фазовой ошибки, появляющейся в результате сдвига фаз соответственно входного и выходного сигналов, а также ошибки по амплитуде, определяемой точностью обработки сигнала. Показано, что полученная ошибка работы ИНС по крайней мере не хуже погрешности традиционного КИХ-фильтра (рис. 3).

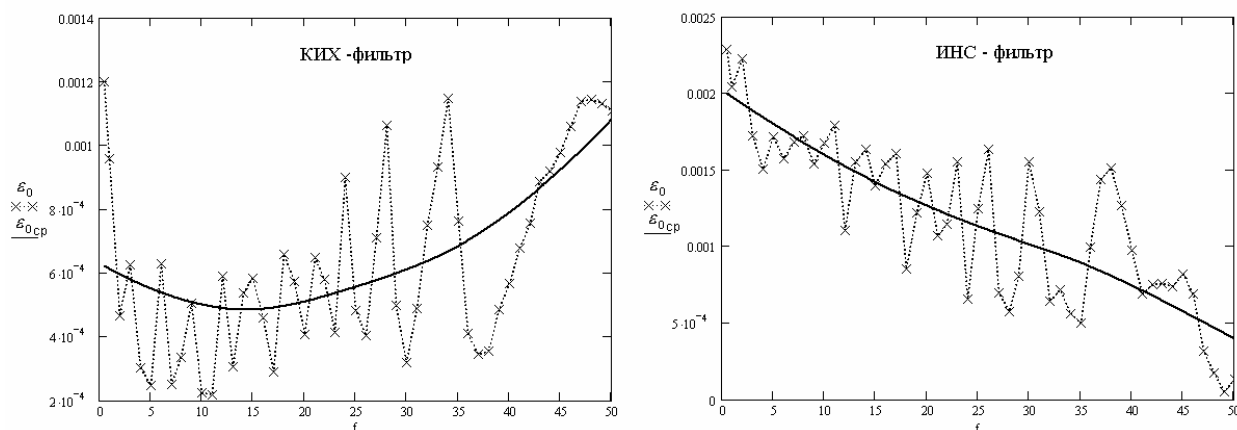


Рис. 3. Ошибка фильтрации КИХ- фильтра а) и нейросетевого фильтра б)

После того, как были выявлены основные особенности обучения и функционирования ИНС, применяемой для фильтрации сигналов, от упрощенной схемы обмотки АД можно перейти к полной модели двигателя в системе векторного управления. Показано, что ИНС, обученная на упрощенной схеме АД, демонстрирует хорошие обобщающие свойства при сглаживании сигналов в полной схеме, однако ошибка фильтрации



превышает заданное значение. Таким образом, был сделан вывод о том, что обучать ИНС необходимо на сигналах той системы, где предполагается ее функционирование.

Пользуясь результатами, полученными на упрощенной схеме АД, была составлена обучающая выборка для ИНС, предназначенной для работы в качестве отдельного модуля системы векторного управления. Обученная ИНС показывает хорошие результаты при выделении гладкой составляющей токового сигнала, поэтому безусловно может быть использована в электроприводе переменного тока.

### 3. Нейросетевой наблюдатель потокосцепления ротора

После того, как получена модель нейросетевого фильтра, можно перейти к синтезу модели нейросетевого наблюдателя потокосцепления ротора в системе векторного управления асинхронного электропривода типа «*TRANSVEKTOR*». Будем сравнивать работу наблюдателя потокосцепления ротора при его реализации с помощью традиционного *DSP (digital-signal-processor)* и нейросетевого вычислительных устройств. Частота токов ротора  $\omega_2$  напрямую определяется приложенным моментом нагрузки, поэтому именно эту переменную, которая в системе векторного управления формируется на выходе регулятора скорости, целесообразно использовать в качестве входной величины ИНС. Таким образом, в качестве входных сигналов используются сигналы фаз  $i_a$ ,  $i_b$ , а также сигнал частоты токов ротора  $\omega_2$ , выходными сигналами являются проекции потокосцепления ротора в неподвижной системе координат  $\psi_{2\alpha}$ ,  $\psi_{2\beta}$ , позволяющие в каждый момент времени вычислить значение модуля  $\underline{\psi}_2$  и его пространственный угол  $\vartheta$ .

Изменение частоты токов ротора  $\omega_2$  в системе векторного управления АД с ориентацией системы координат по вектору потокосцепления ротора вызывает изменение как амплитуды, так и частоты токов статора. Чтобы не проводить многочисленных исследований при составлении выборки (как это делалось в случае с нейросетевым фильтром) для нейросетевого наблюдателя потокосцепления ротора предлагается создать в системе такое изменение частоты токов ротора  $\omega_2$ , которое бы соответствовало всему диапазону работы двигателя, а это, прежде всего:

- изменение скорости вращения вала от нуля до скорости холостого хода  $\Omega_0$
- изменение электромагнитного момента двигателя  $m$  от  $-1.2 \cdot m_{ном}$  до  $1.2 \cdot m_{ном}$

Обучающую выборку предлагается составлять в схеме, представляющей собой систему «*TRANSVEKTOR*» с разомкнутыми обратными связями в канале скорости и потокосцепления (рис. 1) При этом входным сигналом канала потокосцепления является номинальное значение потокосцепления ротора, а на вход канала частоты подается линейно изменяющееся задание  $\omega_2$ , которое соответствует изменению электромагнитного момента  $m$  от  $-1.2 \cdot m_{ном}$  до  $1.2 \cdot m_{ном}$ . Скорость нарастания сигнала  $\omega_2$  выбирается такой, чтобы скорость вращения вала  $\Omega$  успела бы нарасти до скорости холостого хода  $\Omega_0$ .

Рассмотрение сетей с различным числом слоев, различным числом нейронов в скрытых слоях, а также различных функций активации нейронов показало, что требуемая ошибка обучения достигается с помощью ИНС со следующими характеристиками: два скрытых слоя с логическими (сигмоидальными) функциями преобразования и линейными функциями активации нейронов выходного слоя, в первом и втором скрытых слоях соответственно 7 и 8 нейронов. Наилучшую сходимость при обучении ИНС, как и в случае нейросетевого фильтра, показал алгоритм Левенберга-Марквардта.

Для оценки эффективности использования нейросетевого наблюдателя было выполнено сравнительное моделирование по схеме 4, а. Ошибка наблюдателей рассчиты-

валась как геометрическая сумма погрешностей  $\varepsilon' = \sqrt{(\varepsilon'_{\psi_{2\alpha}})^2 + (\varepsilon'_{\psi_{2\beta}})^2}$  (рис. 4 б). Здесь  $\varepsilon'_{\psi_{2\alpha}}$ ,  $\varepsilon'_{\psi_{2\beta}}$  – средние ошибки при вычислении соответственно  $\psi_{2\alpha}$ ,  $\psi_{2\beta}$ .

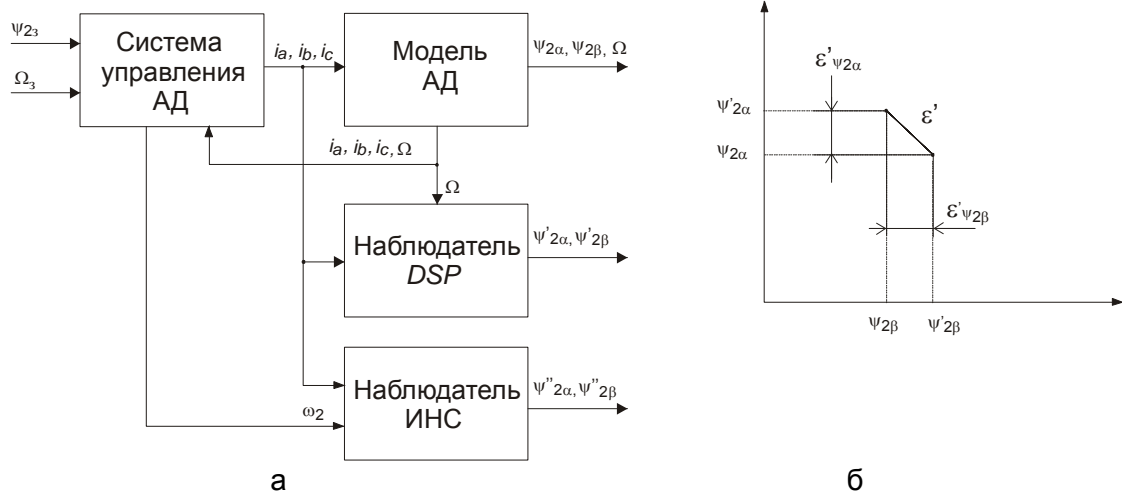
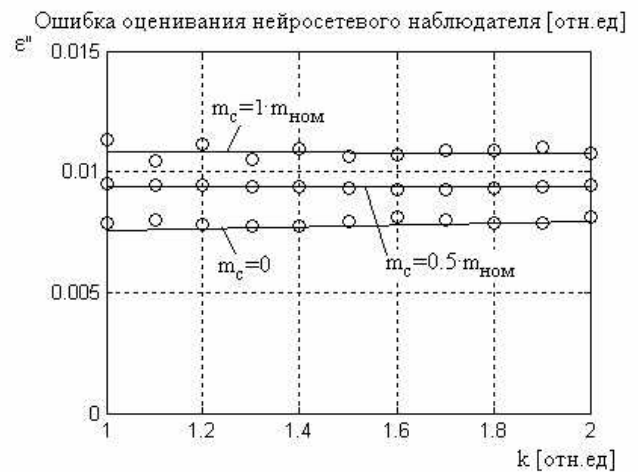
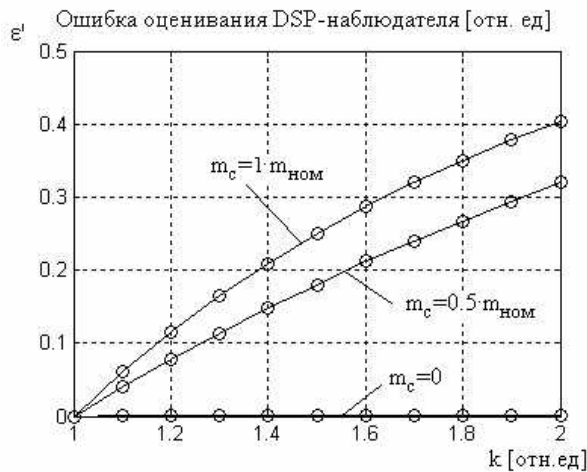


Рис. 4. Структура исследовательской программы (а) и нахождение суммарной погрешности работы наблюдателей (б)

Тест А



Тест Б

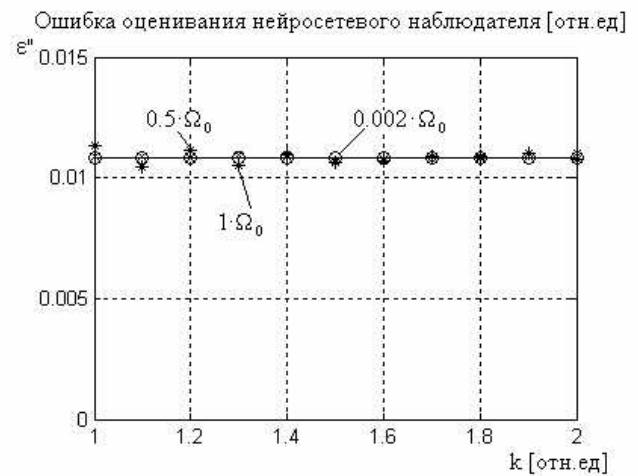
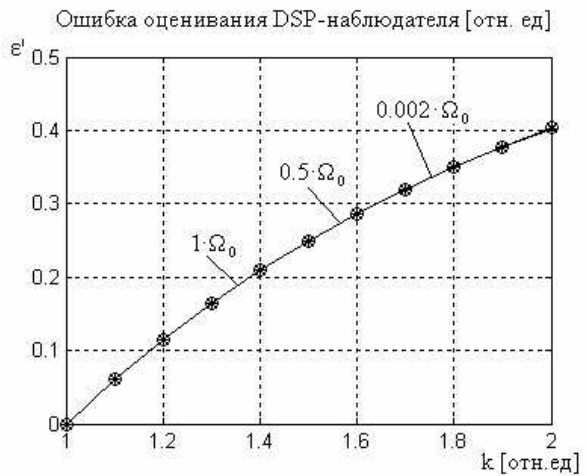


Рис. 5 Зависимость средней ошибки наблюдателей от изменения активного сопротивления ротора

Исследование наблюдателей проводилось на двух тестах. Тест А: задается вариация активного сопротивления ротора (относительное сопротивление ротора  $k = \frac{R_2}{R_{2ном}}$  изменяется от 1 до 2), двигатель разгоняется до скорости  $\Omega_0$ , к валу прикладывается заданный момент нагрузки (0, 0.5,  $1 \cdot m_{ном}$ ); после завершения переходного процесса снимается ошибка оценивания потокосцепления ротора. Тест Б: задается вариация активного сопротивления ротора, двигатель разгоняется до заданной скорости ( $0.002 \cdot \Omega_0$ ,  $0.5 \cdot \Omega_0$ ,  $1 \cdot \Omega_0$ ), после чего к валу прикладывается номинальный момент нагрузки; после завершения переходного процесса снимается величина ошибки оценивания. Графики, полученные по результатам тестов, приводятся на рис. 5

Таким образом, в результате исследования было установлено, что искусственная нейронная сеть, обученная для задачи наблюдения за потокосцеплением ротора, адекватно работает во всем диапазоне скоростей и моментов, а также проявляет свойство толерантности к вариациям активного сопротивления ротора.

### Выводы

При использовании ИНС в автоматизированном электроприводе целесообразно применять гибридный подход: общую структуру системы управления предлагается строить по классическим методикам, а ее отдельные элементы реализовывать нейронными сетями в качестве отдельных модулей. Можно отметить следующие преимущества такого подхода:

- разработанность процедуры построения функциональной схемы системы управления;
- снижение размерности обучающих выборок и приемлемое время обучения;
- снижение размерности сетей;
- практическая реализуемость таких сетей;

Эффективность применения ИНС характеризуется быстродействием за счет параллельной обработки информации, устойчивостью к изменению параметров среды и объекта управления, надежностью вследствие избыточности элементов системы, возможностью использования скрытой информации об объекте управления. Результаты работы разработанных нейросетевых устройств для векторного управления асинхронного электропривода подтвердили целесообразность использования ИНС в различных системах управления.

### Литература

1. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 136 с.
2. Лукичев Д.В. Выбор оптимальной структуры нейросетевого предсказывающего фильтра // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 11. С. 38–42.
3. Назаров А.В., Лоскутов А.И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. СПб.: Наука и техника, 2003. 384 с.: ил.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.: ил.

# АВТОМАТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

А.А. Шалыто

Излагаются основные положения новой технологии программирования, названной автором "автоматно-ориентированное программирование". При использовании предложенной технологии графы переходов конечных автоматов применяются при спецификации, реализации, отладке и документировании поведения программ.

## Что такое автоматно-ориентированное программирование?

В последние годы большое внимание уделяется разработке технологий программирования для встроенных систем и систем реального времени, к которым предъявляются высокие требования по качеству программного обеспечения. Одним из наиболее известных подходов в этом направлении является синхронное программирование [1].

Параллельно с развитием в Европе синхронного программирования, в России создается подход к разработке программного обеспечения, названный «автоматно-ориентированное программирование (автоматное программирование)» [2–4], который можно рассматривать в качестве разновидности синхронного программирования.

В настоящей работе описываются основные положения «автоматно-ориентированного программирования». Оно поддерживает проектирование, реализацию, отладку и документирование программ в части обеспечения корректности их поведения.

Если в традиционном программировании в последнее время все шире используется понятие «событие», то предлагаемый стиль программирования базируется на понятии «состояние». Добавляя к нему понятие «входное воздействие», которое может быть входной переменной или событием, вводится термин «автомат без выхода». Добавляя к последнему понятие «выходное воздействие», вводится термин «автомат» (конечный, детерминированный). Поэтому область программирования, базирующаяся на понятии «автомат», в работе [4] была названа «автоматное программирование», а процесс создания таких программ – «автоматное проектирование программ».

Особенность рассматриваемого подхода состоит в том, что при его использовании автоматы задаются графами переходов. Для различения однотипных вершин вводится понятие «кодирование состояний». При выборе «многозначного кодирования» с помощью одной переменной можно различить состояния, число которых совпадает с числом возможных значений выбранной переменной. Это позволило ввести в программирование такие понятия, как «наблюдаемость» и «управляемость» программ, широко используемые в теории управления.

В рамках предлагаемого подхода программирование выполняется «через состояния», а не «через переменные» (флаги), что позволяет лучше понять и специфицировать задачу и ее составные части.

При этом необходимо отметить, что в автоматно-ориентированном программировании проектирование, реализация и отладка проводятся в терминах автоматов.

В силу того, что в рамках предлагаемого подхода от графа переходов к тексту программы предлагается переходить формально и изоморфно, в работе [4] было предложено реализовывать автоматы на языках программирования высокого уровня с помощью оператора `switch` языка *C*, либо его аналогов в других языках программирования. Поэтому предложенная технология была также названа «Switch-технология». Ниже будет показано, что для объектно-ориентированного программирования могут быть использованы и другие подходы к реализации автоматов.

В настоящее время эта технология разрабатывается в нескольких вариантах, различающихся как классом решаемых задач, так и типом вычислительных устройств, на которых осуществляется программирование.

## Логическое управление

В 1996 г. Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках издательского проекта № 96-01-14066 поддержал издание работы [4], в которой предлагаемая технология была изложена применительно к системам логического управления, в которых события отсутствуют, выходные воздействия являются двоичными переменными, а операционная система работает в режиме сканирования. Системы этого класса реализуются обычно на программируемых логических контроллерах, которые имеют относительно небольшой объем памяти, а их программирование выполняется на таких специфических языках, как, например, язык функциональных блоков [5]. В работе [4] предложены методы формального написания программ для таких языков при задании спецификации для разрабатываемого проекта системой взаимосвязанных графов переходов. Показаны преимущества использования языка графов переходов по сравнению с языком «Графсет».

### Программирование с явным выделением состояний

В дальнейшем автоматный подход был распространен на событийные системы, которые называются также «реактивными» или «событийными» [6]. В них указанные выше ограничения сняты. Как следует из названия этих систем, в них среди входных воздействий используются события, в качестве выходных воздействий применяются произвольные процедуры.

Для программирования событийных систем с применением автоматов был использован процедурный подход. Поэтому в работе [7] такое программирование было названо «программирование с явным выделением состояний». При этом выходные воздействия «привязаны» к дугам, петлям или вершинам графов переходов (применяются смешанные автоматы – автоматы Мура-Мили). Это позволяет в компактном виде представлять последовательности действий, которые являются реакциями на соответствующие входные воздействия.

Особенность предлагаемого подхода к программированию этого класса систем состоит в том, что в них повышается централизация логики за счет переноса ее из обработчиков событий и формирования системы взаимосвязанных автоматов, которые вызываются из обработчиков [8]. Автоматы между собой могут взаимодействовать по вложенности, вызываемости и за счет обмена номерами состояний. Последний вид взаимодействия рассматривался также в работе [9], в которой утверждается, что «указанное взаимодействие может оказаться мощным средством при проверке программ».

Система взаимосвязанных автоматов образует системонезависимую часть программы, а функции входных и выходных воздействий, обработчиков событий и т.д. зависят от используемой аппаратно-программной платформы (системы).

Другая важная особенность описываемого подхода состоит в том, что при его применении автоматы используются триедино: при спецификации, при программировании (сохраняются в программном коде) и при отладке. Отладка автоматных программ может выполняться как в графическом режиме (при наличии соответствующих инструментальных средств), так и по протоколам. Отметим, что протоколирование выполняется автоматически по построенной программе и может использоваться для задач большой размерности при сложной логике программы.

При этом каждый построенный протокол может рассматриваться в качестве соответствующего сценария. Отметим, что для "больших" задач невозможно применение диаграмм последовательностей и диаграмм кооперации, входящих в состав языка *UML* [10], так как при использовании этого языка указанные диаграммы предлагается стро-

ить вручную на этапе проектирования, в то время как в автоматном программировании протоколы строятся автоматически при выполнении программы.

Протоколы позволяют наблюдать за ходом выполнения программы и демонстрируют тот факт, что автоматы являются не «картинками», а реально действующими сущностями.

Автоматный подход предлагается применять не только при создании системы управления, но и при моделировании объектов управления.

Этот подход был апробирован при разработке ряда систем управления ответственными объектами, в том числе судовыми дизель-генераторами [11]. Система была специфицирована более чем тридцатью взаимодействующими автоматами. Для описания модели дизеля также использовались автоматы. При проектировании на каждый автомат выпускалось четыре документа: словесное описание («декларация о намерениях»), схема связей (задает интерфейс автомата, в том числе, поясняя на русском языке символы входных и выходных воздействий), граф переходов (с символьными обозначениями входных и выходных воздействий), текст программного модуля, который формально и изоморфно реализует граф переходов (также без использования смысловых идентификаторов и комментариев). Эти документы заменяют самодокументирующиеся программы, содержащие смысловые идентификаторы и комментарии, так как эти средства при сложной логике программы не обеспечивают должного понимания программ и их пригодности для дальнейшей модификации [12]. Эту проблему при сложной логике не решают и самодокументирующиеся графы переходов [10].

Опыт проектирования с применением автоматного подхода подтвердил целесообразность использования протоколов для проверки корректности взаимодействия большого количества автоматов и каждого из них в отдельности.

### **Объектно-ориентированное программирование с явным выделением состояний**

Для решения широкого круга задач весьма эффективен подход, основанный на совместном использовании объектной и автоматной парадигм, который в работе [13] был назван «объектно-ориентированное программирование с явным выделением состояний». Особенности этого подхода состоят в следующем. Также, как и в машине Тьюринга [14], явно выделены управляющие (автоматные) состояния объекта, число которых значительно меньше числа остальных состояний, например, «вычислительных».

Как и при использовании любого другого подхода, применение предлагаемого связано с множеством эвристик, возвратов назад, уточнений и параллельно выполняемых работ. Однако после завершения создания программы предлагаемый подход может быть сформулирован (по крайней мере, для ее документирования) как «идеальная» технология, фиксирующая принятые решения [15].

1. На основе анализа предметной области выделяются классы и строится диаграмма классов.

2. Для каждого класса разрабатывается словесное описание, по крайней мере, в форме перечня решаемых задач.

3. Для каждого класса создается структурная схема, отражающая его интерфейс и структуру. При этом атрибуты и методы разделены на автоматные и остальные.

4. При наличии в классе нескольких автоматов строится схема их взаимодействия.

5. Для каждого автомата разрабатываются словесное описание, схема связей, граф переходов.

6. Каждый класс реализуется соответствующим модулем программы. Его структура должна быть изоморфна структуре класса, а методы, соответствующие автоматам, реализованы по шаблону, например, приведенному в работе [8].

7. Производится отладка полученной системы, например, путем построения протоколов выполнения, в которых функционирование объектов, содержащих автоматы, описывается в терминах состояний, переходов, событий, входных и выходных воздействий.

8. Выпускается проектная документация, составной частью которой является программная документация.

Описанный подход был использован при создании системы управления «танком» для игры «Robocode» [15]. В отличие от систем управления сотнями других «танков», на этот «танк» выпущена подробная проектная документация, содержащая, в частности, графы переходов и схемы связей автоматов, реализующих функциональность «танка». Детальные протоколы поведения «танка» позволяют проследить все течение боя. Метод построения протоколов, возможно, является основой для новой концепции построения «черных ящиков».

В описанной технологии автоматы применялись как методы классов. В рамках этой технологии могут быть использованы и другие подходы к объектной реализации автоматов, изложенные, например, в работах [16–18]. Автоматы могут выступать, в частности, как объекты-наследники определенного класса, реализующего базовую функциональность автоматов, обусловленную семантикой Switch-технологии. Возможно также использование классов, реализующих понятия «состояние» или «группа состояний». При проектировании автоматных программ может быть использован паттерн «State» или, например, его модификация «StateMachine» [19].

Особенности автоматной реализации параллельных процессов на основе механизма обмена сообщениями рассмотрены в работе [20]. Еще один подход к автоматной реализации параллельных процессов описан в работе [21].

Наличие качественной проектной документации резко упрощает осуществление рефакторинга программы (изменение ее структуры при сохранении функциональности). Последнее подтверждается рефакторингом упомянутой выше системы управления танком, выполненным с целью повышения «объектности» программы [22].

Разработано инструментальное средство *UniMod*, которое обеспечивает разработку и выполнение автоматически-ориентированных программ. Этот пакет позволяет использовать *UML*-нотацию при построении диаграмм в рамках Switch-технологии. При этом схемы связей, определяющие интерфейс автоматов, строятся в нотации диаграмм классов языка *UML*, а графы переходов — в *UML*-нотации диаграмм состояний. В состав пакета *UniMod* входит встраиваемый модуль (*plug-in*) для платформы *Eclipse* (<http://www.eclipse.org>), позволяющий создавать и редактировать *UML*-диаграммы классов и состояний, которые соответствуют схеме связей и графу переходов [23].

## Вычислительные алгоритмы

Автоматный подход используется в настоящее время и при реализации вычислительных алгоритмов [24–27]. Так, в частности, показано, что произвольный итеративный алгоритм может быть реализован конструкцией, эквивалентной циклу *do-while*, телом которого является оператор *switch*.

На основе автоматов предложен новый подход к построению визуализаторов алгоритмов, используемых на кафедре «Компьютерные технологии» СПбГУ ИТМО при обучении программированию и дискретной математике [28, 29]. Подход позволяет представить логику работы визуализаторов системой взаимосвязанных конечных автоматов. Система состоит из пар автоматов, каждая из которых содержит «прямой» и «обратный» автоматы, обеспечивающие пошаговое выполнение алгоритма вперед и назад соответственно.

На сайте <http://is.ifmo.ru> введен раздел «Визуализаторы», в котором публикуются визуализаторы, выполняемые в рамках «Движения за открытую проектную документацию».

### Движение за открытую проектную документацию

27 ноября 2002 г. на открытии полуфинальных соревнований командного чемпионата мира по программированию *ACM* (Association for Computing Machinery) в Северо-восточном Европейском регионе было объявлено об организации «Движения за открытую проектную документацию» [30]. В рамках этого движения на сайте <http://is.ifmo.ru> создан раздел «Проекты», в котором размещено более 60 проектов разработки программного обеспечения на основе автоматного подхода. Перечислим некоторые из них:

- автоматная реализация интерактивных сценариев образовательной анимации с использованием *Macromedia Flash*;
- совместное использование теории построения компиляторов и Switch-технологии;
- скелетная анимация;
- управление различными технологическими процессами и объектами (упрощенная модель цеха холодной прокатки, дизель-генератор, турникет, кодовый замок, световый фар, кофеварка, телефон, банкомат, лифт, система безопасности банка и т.д.);
- игры («Terrarium», «Robocode», «CodeRally», «Lines», «Bomber», «Однорукий бандит», «Завалинка» и т.д.);
- управление роботами «LEGO Mindstorms»;
- XML-формат для описания внешнего вида видеопроигрывателя ([www.crystalplayer.com](http://www.crystalplayer.com));
- примеры клиент-серверных приложений;
- построение пользовательских интерфейсов;
- реализация сетевого протокола *SMTP*.

Коллекция проектов пополняется и будет пополняться в дальнейшем.

### Заключение

Одна из целей настоящей работы состоит в том, чтобы показать, что автоматы в программировании служат не только «для распознавания цепочек символов» [31] и управления стиральными машинами. Кроме того, в работе показано, что автоматы являются не просто одной из математических моделей дискретной математики, а могут применяться при реализации любых программ, обладающих сложным поведением.

Использование автоматов упрощает формализацию спецификации программы, определяющей ее поведение и играющей «ключевую роль в вопросе сдерживания программных ошибок» [32].

Предлагаемая технология должна ответить на вопрос, поставленный в [33]: «теорию конечных автоматов мы проходили, но, причем здесь программирование?»

Отметим также, что при решении задач логического управления используется стиль программирования «от состояний» по классификации, предложенной в работе [34], а в работе [35] он был переименован в «автоматное программирование» со ссылкой на сайт <http://is.ifmo.ru>.

Предлагаемая технология является развитием классической теории автоматов [31] и подхода Д. Харела [6, 36], основанного на диаграммах *Statechart*.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках научно-исследовательской работа по теме «Разработка технологии



создания программного обеспечения систем управления на основе автоматного подхода» <http://is.ifmo.ru/science/1/>.

## Литература

1. Benveniste A., Caspi P., Edwards S. et al. The Synchronous Languages 12 Years Later // Proceedings of the IEEE. Vol. 91. 2003. № 1. P. 28-35.
2. Шалыто А.А. Алгоритмизация и программирование для систем логического управления и "реактивных" систем. Обзор //Автоматика и телемеханика. 2001. № 1. С. 3–39. <http://is.ifmo.ru>
3. Шалыто А.А. Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. СПб.: Наука, 2000. 780 с.
4. Шалыто А.А. Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. СПб.: Наука, 1998. 628 с.
5. Шалыто А.А. Реализация алгоритмов логического управления программами на языке функциональных блоков //Промышленные АСУ и контроллеры. 2000. № 4. С. 45–50. <http://is.ifmo.ru>
6. Harel D., Politi M. Modeling Reactive Systems with Statecharts. NY: McGraw-Hill, 1998. 260 p.
7. Шалыто А., Туккель Н. Программирование с явным выделением состояний //Мир ПК. 2001. № 8. С. 116–121; № 9. с. 132–138. <http://is.ifmo.ru>
8. Шалыто А.А., Туккель Н.И. SWITCH-технология – автоматный подход к созданию программного обеспечения "реактивных" систем // Программирование. 2001. № 5. С. 45–62. <http://is.ifmo.ru>
9. Дейкстра Э. Взаимодействие последовательных процессов // Языки программирования. М.: Мир, 1972. С. 9–86.
10. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя. М.: ДМК, 2000. 429 с.
11. Шалыто А.А., Туккель Н.И. Проектирование программного обеспечения системы управления дизель - генераторами на основе автоматного подхода // Системы управления и обработки информации. СПб.: ФГУП "НПО "Аврора", 2003, вып. 5, с. 66-82. <http://is.ifmo.ru>
12. Безруков Н. Повторный взгляд на «собор» и «базар» // ВУТЕ/Россия. 2000. № 8. С. 60–78.
13. Шалыто А.А., Туккель Н.И. Объектно-ориентированное программирование с явным выделением состояний // Материалы международной научно-технической конференции «Искусственный интеллект – 2002». Т.1. Таганрог - Донецк: ТГРУ – ДИПИИ, 2002. С. 198–202.
14. Шалыто А., Туккель Н. От тьюрингова программирования к автоматному //Мир ПК. 2002. № 2. С. 144-149. <http://is.ifmo.ru>
15. Шалыто А.А., Туккель Н.И. Танки и автоматы // ВУТЕ/Россия. 2003. № 2. С. 69–73. <http://is.ifmo.ru>
16. Гуров В.С., Нарвский А.С., Шалыто А.А. Автоматизация проектирования событийных объектно-ориентированных программ с явным выделением состояний // Труды X Всероссийской научно-методической конференции «Телематика–2003». Т.1. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. с. 282–283. <http://tm.ifmo.ru>.
17. Шопырин Д.Г., Шалыто А.А. Применение класса "STATE" в объектно-ориентированном программировании с явным выделением состояний // Труды X Всероссийской научно-методической конференции «Телематика–2003». Т.1. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. С. 284–285. <http://tm.ifmo.ru>.

18. Корнеев Г.А., Шалыто А.А. Реализация конечных автоматов с использованием объектно-ориентированного программирования // Труды X Всероссийской научно-методической конференции «Телематика–2003». Т.2. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2003. С. 377–378. <http://tm.ifmo.ru>.
19. Шамгунов Н.Н., Корнеев Г.А., Шалыто А.А. State Machine – новый паттерн объектно-ориентированного проектирования. // Информационно-управляющие системы. 2004. № 5. С. 13–25. <http://is.ifmo.ru>.
20. Гуисов М.И., Кузнецов А.Б., Шалыто А.А. Интеграция механизма обмена сообщениями в Switch-технологии // Проектная документация. <http://is.ifmo.ru>.
21. Любченко В. О бильярде с Microsoft Visual C++ 5.0 // Мир ПК 1998. № 1. <http://www.osp.ru/pcworld/1998/01/202.htm>.
22. Кузнецов Д., Шалыто А. Система управления танком для игры «Robocode». // Проектная документация. <http://is.ifmo.ru>.
23. Гуров В.С., Мазин М.А., Нарвский А.С., Шалыто А.А. UML. SWITCH-технология. Eclipse. // Информационно-управляющие системы. 2004. № 6. С.12–17.
24. Корнеев Г.А., Шамгунов Н.Н., Шалыто А.А. Обход деревьев на основе автоматного подхода. // Компьютерные инструменты в образовании. 2004. № 3. с. 32–37. <http://is.ifmo.ru>.
25. Шалыто А., Туккель Н., Шамгунов Н. Задача о ходе коня. // Мир ПК. 2003. № 1. С. 152–155. <http://is.ifmo.ru>
26. Шалыто А.А., Туккель Н.И. Преобразование итеративных алгоритмов в автоматные. // Программирование. 2002. № 5. С. 12–26. <http://is.ifmo.ru>
27. Туккель Н.И., Шалыто А.А., Шамгунов Н.Н. Реализация рекурсивных алгоритмов на основе автоматного подхода. // Телекоммуникации и информатизация образования. 2002. № 5. С. 72–99.
28. Корнеев Г.А., Казаков М.А., Шалыто А.А. Построение логики работы визуализаторов алгоритмов на основе автоматного подхода. // Труды X Всероссийской научно-методической конференции «Телематика-2003». Т.2. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2003. <http://tm.ifmo.ru>.
29. Казаков М.А., Шалыто А.А. Использование автоматного программирования для реализации визуализаторов. // Компьютерные инструменты в образовании. 2004. № 2. С. 19–33.
30. Шалыто А.А. Новая инициатива в программировании – «Движение за открытую проектную документацию». // Мир ПК. 2003. № 9. С. 52–56. <http://is.ifmo.ru>
31. Хопкрофт Д., Мотвани Р., Ульман Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: Вильямс, 2002. 528 с.
32. Аллен Э. Типичные ошибки проектирования. СПб.: Питер, 2003. 224 с.
33. Чижов А. [chizh@irk.ru](mailto:chizh@irk.ru).
34. Непейвода Н.Н., Скопин И.Н. Основания программирования. Ижевск: Научно-издат. центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. 868 с. <http://ulm.udsu.ru/~nnn/index.html>
35. Непейвода Н.Н. Стили и методы программирования. М.: Интернет-университет информационных технологий – ИНТУИТ.РУ, 2005. 320 с.
36. Harel D. Statecharts: A visual formalism for complex systems // Science of Computer Programming. 1987. Vol. 8. P. 231–274.

# ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТАЦИИ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

А.А. Бобцов, В.О. Никифоров

В статье рассматриваются подходы адаптивного управления с эталонной моделью линейным объектом по выходу в условиях внешних возмущений. Предложены две альтернативные схемы управления, базирующиеся на алгоритмах адаптации высокого порядка А. Морза и, позволяющие решать задачу слежения за командным сигналом с заданной точностью.

## Введение

Адаптивное управление с эталонной моделью линейным стационарным объектом по выходу (т.е. без измерения производных регулируемой переменной или вектора переменных состояния) является крайне актуальной задачей как в теории, так и в практике современных систем. Мотивация синтеза алгоритмов управления по выходу обусловлена тем, что при управлении по выходу не требуется применение датчиков для измерения производных регулируемой переменной, что в свою очередь, влечет экономию затрат на использование и разработку сенсорной техники, а также увеличение точности слежения.

Решению задачи адаптивного управления с эталонной моделью по выходу посвящена обширная литература (см., например, обзор [1]). Один из подходов к решению данной проблемы предусматривает использование алгоритмов адаптации высокого порядка, предложенных в 1992 г. А. Морзом в работе [2]. Несмотря на то, что данный подход имеет ряд преимуществ (см., например, сравнительный анализ, представленный в монографии [3]), необходимо выделить его недостатки по сравнению с широко известными методами адаптивного управления по выходу. Использование алгоритмов адаптации высокого порядка не предусматривает наличия внешних возмущений, действующих на систему управления.

В данной работе, базируясь на алгоритмах адаптации высокого порядка, будут рассмотрены два альтернативных подхода, позволяющих не только гарантировать устойчивую работу системы в условиях внешних возмущений, но и обеспечивающие заданную разработчиком системы управления точность слежения выхода объекта за эталонным сигналом.

## Математическая формулировка задачи управления по выходу

Рассматриваемая задача заключается в управлении линейным стационарным объектом, описываемым уравнением вида

$$y = k \frac{\beta(p)}{\alpha(p)} u + \frac{d(p)}{\alpha(p)} f, \quad (1)$$

где  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования;  $\beta(p) = p^m + \beta_{m-1}p^{m-1} + \dots + \beta_1p + \beta_0$ ,  $\alpha(p) = p^n + \alpha_{n-1}p^{n-1} + \dots + \alpha_2p^2 + \alpha_1p + \alpha_0$  и  $d(p) = p^r + d_{r-1}p^{r-1} + \dots + d_2p^2 + d_1p + d_0$  нормированные полиномы переменной  $p$  с неизвестными коэффициентами, соответственно, размерности  $n$ ,  $m < n$  и  $\mu < n$ ;  $u(t)$  – сигнал управления;  $f(t)$  – внешнее неизвестное ограниченное возмущение.

Примем следующее допущение, являющиеся стандартными в большинстве задач адаптивного управления.

*Допущение.* Модель (1) удовлетворяет требованиям:

а) известен знак коэффициента  $k$  (для определенности будем полагать, что  $k > 0$ );

б) полином  $\beta(p)$  является гурвицевым;

в) известны степени полиномов  $\beta(p)$ ,  $\alpha(p)$  и относительная степень  $\rho = n - m \geq 1$ .

Пусть желаемое поведение регулируемой переменной  $y(t)$  задается эталонной моделью вида

$$y^* = \frac{k^*}{\alpha^*(p)} g^*, \quad (2)$$

где  $y^*$  – эталонный выход;  $g^*$  – сигнал задания (ограниченная, кусочно-непрерывная функция времени);  $\alpha^*(p)$  – гурвицев полином степени  $\rho = n - m$ ;  $k^* > 0$  – известный постоянный коэффициент.

Будем полагать, что у объекта управления доступной для измерения является выходная переменная  $y(t)$ , но не ее производные. Требуется найти такой закон управления  $u(t)$ , чтобы при любых начальных условиях выполнялось целевое условие

$$|e(t)| \leq \varepsilon_0, \quad (3)$$

где  $e(t) = y(t) - y^*(t)$  и  $\varepsilon_0$  – задаваемая разработчиком системы точность слежения.

### **Параметризация модели ошибок объекта управления. Алгоритм адаптации высокого порядка**

В качестве первого шага решения сформулированной задачи адаптивного управления получим удобную параметризованную модель объекта управления (1). А именно – представим параметрические неопределенности модели в виде аддитивных возмущений, линейных по неизвестным параметрам. Используя результаты работ [1–3], получаем параметризованную модель ошибок вида

$$e(t) = \frac{k}{\alpha^*(p)} [\omega(t)^T \theta + u(t) + f'(t)] + \delta(t), \quad (4)$$

где  $\omega(t) = \frac{1}{\chi(p)} [u, \dot{u}, \dots, u^{(n-2)}, y, \dot{y}, \dots, y^{(n-2)}, \chi(p)y, \chi(p)y^*]$  – известный регрессор ( $\chi(p)$  – любой гурвицев полином степени  $n - 1$ );  $\theta$  – вектор неизвестных постоянных параметров;  $f'(t) = \frac{S(p)\beta(p)}{\chi(p)}$  – неизвестное ограниченное возмущение (здесь полиномы  $S(p)$  степени  $n - m - 1$  и  $R(p)$  степени  $n - 1$  выбраны таким образом, что  $\chi(p)\alpha^*(p) = \alpha(p)S(p) + R(p)$ ); вызванная ненулевыми начальными условиями функция  $\delta(t)$  экспоненциально затухает.

Следуя результатам статьи [2], преобразуем модель (4) следующим образом:

$$e(t) = \frac{k}{p + \lambda} [\bar{\omega}(t)^T \theta + \bar{u}(t) + \bar{f}(t)] + \bar{\delta}(t), \quad (5)$$

где число  $\lambda > 0$ ; новый регрессор  $\bar{\omega}(t) = \frac{1}{\alpha^*(p)} \omega(t)$ ; управление  $\bar{u}(t) = \frac{1}{\alpha^*(p)} u(t)$ ; возмущение  $\bar{f}(t) = \frac{1}{\alpha^*(p)} f'(t)$  – ограниченная функция; функция  $\bar{\delta}(t)$  экспоненциально затухает.

Хорошо известно (см., например, работу [3]), что, если относительная степень находится в пределах  $1 \leq \rho \leq 2$ , то алгоритм адаптации можно выбрать в виде

$$u = -\alpha^*(p) [\bar{\omega}(t)^T \hat{\theta}], \quad (6)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma \bar{\omega}(t) e(t), \quad (7)$$

где вектор  $\hat{\theta}(t)$  является текущей оценкой вектора неизвестных параметров  $\theta$ ;  $\gamma$  – любое положительное число.

Известно (см., например, [2, 3]), что алгоритм адаптации вида (6), (7) обеспечивает в случае нулевого возмущающего воздействия  $\bar{f}(t)$  нулевую установившуюся ошибку  $e(t) = y(t) - y^*(t)$ . Если же относительная степень  $\rho > 2$ , то алгоритм адаптации вида (6), (7) не может быть использован, так как для его реализации требуется дифференцирование сигнала  $e(t) = y(t) - y^*(t)$ , что по условиям задачи является невозможным. Для решения задачи синтеза алгоритма адаптации для случая  $\rho > 2$  можно воспользоваться алгоритмом адаптации высокого порядка, опубликованным в работе [2]. Алгоритм адаптации высокого порядка имеет следующую структуру:

$$\begin{aligned} u &= -\alpha^*(p)[\bar{\omega}(t)^T \hat{\theta}], \\ \dot{\hat{\psi}}_i &= \bar{\omega}_i e, \\ \dot{\eta}_i &= (1 + \nu \bar{\omega}^T \bar{\omega})(\bar{A} \eta_i + \bar{b} \hat{\psi}_i), \\ \hat{\theta}_i &= \bar{c}^T \eta_i, \end{aligned}$$

где  $i = 1, 2, \dots, 2n$ ; тройка матриц  $(c, A, b)$  является минимальной реализацией передаточной функции  $\bar{\alpha}(0)/\bar{\alpha}(p)$  ( $\bar{\alpha}(p)$  – гурвицев полином степени  $\rho - 2$ );  $\nu > 0$  – постоянный коэффициент.

Данный алгоритм обеспечивает нулевую установившуюся ошибку  $e(t) = y(t) - y^*(t)$ , если число  $\nu > 0$  выбрано таким образом, что

$$\nu > \frac{3n}{\lambda} \left( \bar{k} |\bar{c}| + |P \bar{A}^{-1} \bar{b}| \right)^2,$$

где  $\bar{k}$  – верхняя оценка  $k$ , а симметрическая положительно определенная матрица  $P$  является решением уравнения Ляпунова

$$A^T P + P A = -2I.$$

Данный алгоритм позволяет избежать дифференцирования сигнала  $e(t) = y(t) - y^*(t)$ , однако имеет ряд недостатков. В качестве основных недостатков алгоритма адаптации высокого порядка [2] можно указать следующее:

- это использование алгоритмов настройки «чисто интегрального» типа, которые, как известно (см., например, монографию [3]), не являются робастными по отношению к внешним возмущениям.
- алгоритмы адаптации высокого порядка обладают достаточно высоким динамическим порядком (размерность регулятора А. Морза  $2n(2\rho - 1) - 2$ ).
- алгоритмы адаптации высокого порядка не предоставляют возможности уменьшать ошибку  $e(t)$  в условиях действия возмущения  $f(t)$ .

Таким образом, проблема развития алгоритмов адаптации высокого порядка на случай функционирования системы в условиях внешних возмущений является актуальной задачей. В следующем разделе на базе алгоритмов адаптации высокого порядка будут предложены два подхода, устраняющие представленные выше недостатки.

### **Модификация и применение алгоритмов адаптации высокого порядка в условиях внешних возмущений**

В данном разделе рассмотрим две альтернативных схемы адаптивного управления, построенные с использованием идей А. Морза [2].

Схема №1. Выберем закон управления в соответствии с выражением (6)

$$u = -\alpha^*(p)[\bar{w}(t)^T \hat{\theta}],$$

Здесь вектор  $\hat{\theta}(t)$  настраивается следующим образом:

$$\dot{\eta} = \nu(1 + \bar{w}^T \bar{w})(A\eta + be), \quad (8)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma(\bar{w}c^T \eta - \sigma \hat{\theta}), \quad (9)$$

где тройка матриц  $(c, A, b)$  – минимальная реализация передаточной функции  $\bar{\alpha}(0)/\bar{\alpha}(p)$  ( $\bar{\alpha}(p)$  – гурвицев полином степени  $\rho - 2$ ); параметр  $\nu \geq \nu_1 + \nu^*$ :

$$\nu_1 = \max \left\{ \frac{1}{4\lambda_1} \lambda^2 |PA^{-1}b|^2, \frac{1}{4\sigma_1} \bar{k} (|c| + |PA^{-1}b|^2) \right\}, \quad (10)$$

где любое число  $\nu^* > 0$ ;  $\bar{k}$  – верхняя оценка  $k$ ; любые числа  $0 < \lambda_1 < \lambda$  и  $0 < \sigma_1 < \sigma$ ; матрица  $P = P^T > 0$  является решением уравнения Ляпунова

$$A^T P + PA = -2I. \quad (11)$$

*Утверждение 1.* Алгоритм адаптации (8)–(10) с увеличением значений параметра  $\gamma$  обеспечивает увеличение точности слежения, т.е. чем больше параметр  $\gamma$ , тем меньше область  $\varepsilon_0$ .

Выделим достоинства алгоритма адаптации (8)–(10).

- Размерность алгоритма адаптации  $2n(\rho + 1) + \rho - 4$ , что на  $(2n - 1)(\rho - 2)$  меньше, чем у алгоритма адаптации высокого порядка А. Морза.
- Алгоритм адаптации (8)–(11), в отличие от алгоритма адаптации высокого порядка А. Морза, дает возможность уменьшать ошибку  $e(t)$  в условиях действия возмущения  $f(t)$ .

Однако данный алгоритм имеет свои недостатки, в том числе схема адаптации (8)–(10) предусматривает знание верхней оценки коэффициента  $k$ .

Схема №2. Выберем закон управления в соответствии с выражением

$$\bar{u} = -\xi_1, \quad (12)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \mathcal{G} \bar{\sigma} \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \mathcal{G} \bar{\sigma} \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi} = \mathcal{G} \bar{\sigma} (-k_2 \xi_2 - \dots - k_\rho \xi_\rho + k_1 \lambda e) - \mathcal{G} \dot{\bar{\sigma}} k_1 e, \end{cases} \quad (13)$$

$$\dot{\xi}_\rho = \zeta + \mathcal{G} \bar{\sigma} k_1 e, \quad (14)$$

где функция  $\bar{\sigma} = C_0 + |\dot{\bar{w}}|^2 = C_0 + \dot{\bar{w}}^T \dot{\bar{w}}$  и число  $C_0 > 0$ ; параметр  $\mathcal{G} > 0$ ; коэффициенты

$$k_i \text{ выбираются таким образом, что матрица } \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & -k_\rho \end{bmatrix} \text{ гурвицева.}$$

*Утверждение 2.* Алгоритм адаптации (12)–(14) с увеличением значений параметра  $\mathcal{G}$  обеспечивает увеличение точности слежения, т.е. чем больше параметр  $\mathcal{G}$ , тем меньше область  $\varepsilon_0$ .

Выделим достоинства алгоритма адаптации (12)–(14):

- Размерность алгоритма адаптации  $(2n+1)\rho-1$ , что на  $2n(\rho-1)-\rho-1$  меньше, чем у алгоритма адаптации высокого порядка А. Морза, и на  $2n-3$  меньше, чем у *схемы 1*.
- Алгоритм адаптации (12) – (14), как и *схема 1*, дает возможность уменьшать ошибку  $e(t)$  в условиях действия возмущения  $f(t)$ .

К недостаткам данной схемы адаптивного управления следует отнести то, что коэффициент  $k=1$ .

### Заключение

В работе на основе использования алгоритма адаптации высокого порядка предложены два альтернативных подхода вида (6), (8)–(10) и (12)–(14), гарантирующие устойчивую работу системы в условиях внешних возмущений и обеспечивающие заданную точность слежения выхода объекта за эталонным сигналом.

Работа выполнена в рамках тематического плана СПбГУ ИТМО № 10110.

### Литература

1. Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Схемы адаптивного управления с расширенной ошибкой: обзор // Автоматика и телемеханика. 1994. №9. С.3–22.
2. Morse A.S. High-order parameter tuners for adaptive control of nonlinear systems. Isidori A., Tarn T.J. (eds.) Systems, Models and Feedback: Theory and Applications. Birkhauser, 1992.
3. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ИОННЫХ НАРУШЕНИЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСЕНСОРНОЙ ТЕХНИКИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

В.Л. Ткалич, Ю.Ю. Гатчина, М.А. Коробейникова, Д.Н. Копорская

## Введение

В настоящее время в развитии техники наблюдается тенденция использования функциональных объектов малых размеров. Примером может служить электронная техника, в которой микроминиатюризация приборов уже сейчас требует применения элементов, размеры которых менее нескольких микрон. Уникальность свойств таких объектов (микро- и наноструктур) во многом определяется атомными и электронными процессами, протекающими как в объеме, так и на границах раздела слоев [1–3]. Процессы в таких структурах имеют уже квантовый характер. Задача анализа этих объектов осложняется еще и тем, что наноструктуры являются достаточно неравновесными системами. Поэтому дальнейшее развитие микроэлектроники ставит задачу разработки новых методов исследования тонких пленок, с помощью которых можно получать информацию о чистоте поверхности и концентрации дефектов, а также обнаруживать структурные неоднородности на границе раздела фаз подложка – пленка и пленка – окружающая среда. Это можно делать на базе методов эллипсометрии, которые позволяют одновременно определять коэффициенты поглощения  $k$  и преломления  $n$ , являющиеся фундаментальными константами материала, дающие представление о его чистоте, а также толщину пленки  $d$ .

Отсюда следует, что задача разработки неразрушающих бесконтактных методов на базе эллипсометрии для исследования стереометрии и внутренних структурных дефектов элементной базы микроэлектроники и микросенсорной техники является актуальной, что полностью соответствует позиции «Информационно-телекоммуникационные технологии и электроника» перечня «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники Российской Федерации», а также позиции «Микросистемная техника» из «Перечня критических технологий Российской Федерации».

Кроме того, сокращение продолжительности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при создании современной элементной базы микроэлектроники и микросенсорной техники делает актуальной разработку математических и программных средств автоматизации процессов контроля дефектообразования и дефектоскопии этих объектов.

Методология использования эллипсометрии для анализа дефектов элементной базы микроэлектроники и микросенсорной техники может быть применена для широкого класса технических объектов с учетом их специфики, например в нанoeлектронике. Использование разработанной методологии позволит существенно повысить точность диагностики и функционального контроля тонких пленок.

## Исследование влияния слоя окисла на оптические характеристики переходных металлов эллипсометрическим методом

На точность измерений таких эллипсометрических параметров, как  $\Delta$  (сдвиг фаз между  $p$  и  $s$  компонентами электрического вектора отраженной от металла световой волны) и  $\psi$  (азимут восстановленной линейной поляризации), большое влияние оказывает окисный слой, который практически всегда присутствует на зеркальной отражающей поверхности металла [1]. Кроме этого, данный слой влияет на определение эффек-



тивных оптических постоянных:  $n$  – показателя преломления и  $\chi$  – показателя поглощения. Эти постоянные определяются на основании  $\Delta$  и  $\psi$  и непосредственно связаны с основными характеристиками как свободных, так и связанных электронов. Поэтому информация об электронной структуре, полученная оптическим методом, искажается. Но в некоторых случаях влияние окисного слоя на эллипсометрические параметры, а значит, и на оптические характеристики можно учесть, что позволяет и получить более достоверную информацию об электронной структуре металла. Это возможно благодаря взаимосвязи эллипсометрических параметров  $\Delta$  и  $\psi$  для окисленного и для неокисленного металла ( $\Delta'$  и  $\psi'$ ) [1,2].

В общем случае эти зависимости очень сложны. Однако они значительно упрощаются при толщинах слоя  $l$ , намного меньших длины волны  $\lambda$ . До толщин  $l = 5$  нм можно применять соотношения Друде [6]:

$$\Delta - \Delta' = \frac{4\pi \cos \varphi \sin^2 \varphi (\cos^2 \varphi - \alpha)}{\lambda (\cos^2 \varphi - \alpha)^2 + \beta^2} \left(1 - \frac{1}{n_0^2}\right) l;$$

$$\psi - \psi' = \frac{2\pi \sin^2 \varphi}{\lambda} \rho \frac{\cos \varphi \sin^2 \varphi (1 - n_0^2 \cos^2 \varphi) \beta}{(\cos^2 \varphi - \alpha)^2 + \beta^2} \left(1 - \frac{1}{n_0^2}\right) l,$$

где  $\varphi$  – угол падения света на образец,  $n_0$  – средний показатель преломления окисного слоя,  $\alpha = (n^2 - \chi^2) / (n^2 + \chi^2)^2$ ,  $\beta = 2n\chi / (n^2 + \chi^2)^2$ .

Эти соотношения используются для изучения кинетики окисления и для получения в широкой области спектра оптических характеристик неокисленного металла. Для решения других задач, наряду с измеренными в широкой области спектра эллипсометрическими параметрами металла, необходимо знать величины  $n$  и  $\chi$  для неокисленного металла хотя бы для двух волн этого интервала. Таким путем получены оптические константы ряда благородных и непереходных металлов и исследовано влияние окисного слоя на их оптические свойства.

### **Методы исследования структуры фундаментальной полосы поглощения никеля и его сплава с марганцем**

Природа фундаментальной полосы поглощения (ФПП) никеля в области 4.7 эВ не до конца изучена. Для проверки гипотезы о том, что ФПП является сложной и состоит из двух одинаковых перекрывающихся подполос, максимумы которых смещены друг относительно друга по шкале энергии на некоторую величину, прямо пропорциональную спонтанной намагниченности. На базе лабораторий СПбГУ ИТМО и института им. Иоффе проводились экспериментальные исследования оптических характеристик никеля и его сплава с марганцем ( $\text{Ni}_{0.91}\text{Mn}_{0.09}$ ) в ближней УФ области спектра. Исследования проводились с малым шагом дискретности по длинам волн в широком диапазоне температур (80–760 К) при помощи эллипсометрического метода Битти [1, 2].

По измеренным оптическим постоянным  $n$  и  $\chi$  были вычислены величины  $\sigma = n\chi\nu$  и  $\varepsilon$ , где  $\nu$  – частота света,  $\varepsilon = n^2 - \chi^2$ .

Оказалось, что ФПП Ni в ближней УФ области спектра отчетливо проявляется в виде максимума на его дисперсионной кривой проводимости  $\sigma(\hbar\omega)$ . В контуре ФПП заметна асимметрия, связанная, вероятно, с наличием перекрывающихся пиков. Для их разделения применен метод, основанный на использовании аналитических свойств комплексной диэлектрической проницаемости, которая непосредственно связана с межзонными переходами [1, 2, 7].

Судя по всему, асимметрия в контуре ФПП Ni возникает за счет наличия двух подполос, обусловленных переходами в системе электронов с противоположными спи-

нами в окрестности  $L$ -точки зоны Бриллюэна со дна  $d$ -зоны проводимости в состоянии вблизи  $E_F$  (уровень Ферми).

В связи с этим следует отметить, что вычисления световой проводимости Ni на основе расчетов его энергетических зон [8] всегда дает широкую полосу в ближней УФ части спектра, смещенную в область более высоких энергий. Лишь введение для Ni скорректированной собственной энергии зонных состояний

$$\tilde{E}_n(\vec{k}) = E_n(\vec{k}) + \lambda_0[E_n - E_F],$$

включающей эмпирический параметр  $\lambda_0 = -0.12$  [9], приводит в согласие данные расчетов световой проводимости и эксперимента. Но при этом происходит сужение  $d$ -зоны приблизительно на 10% по сравнению с зонными вычислениями. Ясно, что вслед за этим уменьшится и энергетический зазор между дном  $d$ -зоны и  $E_F$  вблизи  $L$ -точки. Такая ситуация может оказаться реальной, поскольку имеется расчет электронной структуры никеля [13], подтверждаемой рядом экспериментальных фактов, где соответствующий энергетический зазор составляет 4.6–4.7 эВ. При этом важно то, что плотность состояний на уровне Ферми в системе электронов со спином ( $\downarrow$ ) выше, чем в системе со спином ( $\uparrow$ ). Тогда при условии равенства матричных элементов обоих переходов большей будет и интенсивность максимума в длинноволновой подполосе по сравнению с коротковолновой. Вследствие этого полоса поглощения, являющаяся суммой двух неодинаковых по интенсивности и сдвинутых друг относительно друга по шкале энергии подполос, обнаруживает асимметрию [11] и похожа на экспериментально наблюдаемую. В той мере, насколько электронные переходы между зонными состояниями в системах с противоположной ориентацией спинов вблизи  $L$ -точки ответственны за возникновение двух подполос, ясно, что по разности энергий  $\Delta E = E_2 - E_1 = 0.27$  эВ можно непосредственно оценить величину  $\Delta E_d$  обменного и спин-орбитального расщепления зон. Полученное значение хорошо согласуется с данными экспериментального определения обменного расщепления энергетических зон для ферромагнитных  $3d$ -переходных металлов из измерений фотоэмиссии [12], дающих, в частности, для Ni величину  $\Delta E_d = 0.3$  эВ.

В спектре световой проводимости  $\sigma(\hbar\omega)$  сплава  $\text{Ni}_{0.91}\text{Mn}_{0.09}$  при 80 и 300 K° также отчетливо видна асимметрия в форме полосы поглощения в ближней УФ области, причем, в отличие от чистого Ni, в сплаве максимум длинноволновой подполосы ниже, чем максимум коротковолновой. Такое изменение в соотношении максимумов подполос при переходе от никеля к сплаву понятно, если по-прежнему исходить из предположения, что подполосы формируются переходами в системе электронов со спинами ( $\downarrow$ ) и ( $\uparrow$ ) со дна  $d$ -зоны на уровень Ферми.

Из сделанных расчетов кривых плотности состояний для подзон со спинами ( $\downarrow$ ) и ( $\uparrow$ ) сплава  $\text{Ni}_s\text{Mn}_{1-s}$ , проведенных в приближении когерентного потенциала, следует, что для всех концентраций Mn, вплоть до  $s = 0.10$ , плотность состояний в сплаве для подзоны со спином ( $\uparrow$ ) уменьшается на уровне Ферми по сравнению с плотностью состояний чистого Ni. Поэтому в сплаве  $\text{Ni}_{0.91}\text{Mn}_{0.09}$  при условии равенства вероятностей переходов в обеих подполосах интенсивность поглощения для перехода, формирующегося в подзоне со спином ( $\downarrow$ ) –  $L'_1\downarrow - L'_3\downarrow$ , должна уменьшиться в соответствии с соотношением Берглунда – Спайсера [10]. Вследствие этого длинноволновая подполоса поглощения будет выражена в максимуме дисперсионной кривой световой проводимости сплава слабее, чем соседняя коротковолновая подполоса, связанная с переходами электронов в подзоне со спином ( $\uparrow$ ) –  $L'_1\uparrow - L'_3\uparrow$ .

При повышении температуры взаимное смещение подполос поглощения должно уменьшиться и практически исчезнуть при достижении температуры Кюри ( $T_K$ ). Поэтому, очевидно, и отсутствует асимметрия в контуре основной полосы поглощения сплава при 760 K°, поскольку для него  $T_K = 500$  K°.

Таким образом, результаты, полученные при изучении межзонного поглощения Ni и сплава  $\text{Ni}_{0,91}\text{Mn}_{0,09}$  в ближней УФ области спектра, наряду с существующими расчетами их электронной структуры дают основание считать, что это поглощение связано с прямыми межзонными переходами со дна  $d$  – зоны в состояния, тесно примыкающие к уровню Ферми.

### Методы исследования механических и ионных нарушений в арсениде галлия

В технологическом цикле изготовления интегральных схем (ИС) пластина арсенида галлия подвергается операциям ионного легирования и обработки в плазме. Эти операции создают на пластинах дефектные слои, которые должны быть устранены последующими операциями термического отжига и химического травления. Кроме того, нарушенные слои имеются и на исходных пластинах. Они должны быть удалены начальной полирующей обработкой. Методом эллипсометрии с послойным травлением можно получить профили нарушений после ионной имплантации и после отжига. При этом величиной, характеризующей степень разупорядоченности материала, является либо угол  $\psi$ , либо значение поглощения  $\chi$ , полученное из приближения эффективной подложки.

Чтобы определить неразрушающим методом более двух параметров отражающей системы, необходимо варьировать условия измерения – угол падения или коэффициент преломления внешней среды. Так, измерения в  $m$  средах дают  $m$  пар значений  $\psi$  и  $\chi$ , что позволяет трактовать нарушенный слой как  $m$ -слойную систему, задав толщины слоев и подобрав  $m$  пар значений  $\psi_m$  и  $\chi_m$ .

Для  $m = 2$  и  $m = 3$  подходят задачи отработки режимов ионного легирования и отжига, поскольку форму профиля и глубину залегания максимума после ионного легирования можно оценить заранее, зная дозу и энергию ионов. В случае двух измерений, если поверх нарушенного слоя имеется прозрачная пленка, двухслойная модель позволяет учесть глубину залегания максимума после легирования, измерив заранее толщину пленки и коэффициент преломления. Практически это означает, что можно учесть влияние естественного оксида, или, что еще более ценно, обрабатывать режимы термического отжига под защитой слоя  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , не удаляя защитный слой.

Были исследованы следующие типы образцов: исходные пластины арсенида галлия марки АГП-1: после имплантации ионами фтора, серы, протонами в диапазоне энергий 50 – 150 кэВ дозами 0.1 – 10 мкКл/см<sup>2</sup>; после термического отжига под защитой  $\text{SiO}_2$  в течение 15 минут при температуре 850°C; после удаления 300 Å материала методом анодного окисления. Коэффициенты преломления иммерсионных жидкостей (воды и этилового спирта) измерялись на рефрактометре ИРФ-5 в свете гелий-неонового лазера. Эллипсометрические измерения проводились на автоматическом эллипсометре Auto E1 III фирмы Rudolph Research при угле падения 70° в стеклянной кювете с гранями, перпендикулярными падающему свету.

Наблюдаемое согласие расчетных данных с экспериментом позволяет очертить круг технологических проблем, для которых полезна данная методика: отработка режимов высокотемпературного отжига ионных нарушений под защитным слоем или импульсного отжига; выбор состава травителя и режимов начальной полирующей операции для удаления исходного нарушенного слоя, оставшегося после резки и шлифовки пластин; определение допустимого времени контакта поверхности материала с ионами плазмы при операциях плазменной очистки и плазмо-химического травления.

## Заключение

Таким образом, в ходе работы:

- было исследовано влияние слоя окисла на оптические характеристики переходных металлов эллипсометрическим методом;
- разработаны методы исследования структуры фундаментальной полосы поглощения никеля и сплава;
- разработана иммерсионная эллипсометрическая методика, которая может быть использована для исследования внутренних структурных дефектов элементной базы микроэлектроники и микропроцессорной техники.

## Литература

1. Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов. Сборник научных статей / Под ред. д.т.н., проф. Ю.А. Гатчина и д.т.н., проф. В.Л. Ткалич.. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2004. 235 с.
2. Оптические методы исследования дефектов и дефектообразования элементной базы микроэлектроники и микросенсорной техники. Сборник научных статей под ред. д.т.н., проф. Ю.А. Гатчина и д.т.н., проф. В.Л.Ткалич. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 147 с.
3. Ткалич В.Л. Надежность магнитоуправляемых контактов в системах управления. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. 98 с.
4. Основы эллипсометрии / Под ред. А.В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 1979. 422 с.
5. Азам Р., Башари Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 582 с.
6. Агеев Л.А., Шкляревский И.Н. Исследование кинетики роста окисной пленки на поверхности индия. // ФТТ. 1967. Т. 9. С. 2958–2962.
7. Маш И.Д., Мотулевич Г.П., Шубин А.А. Определение энергетических щелей в металлах оптическим методом. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т.27. № 2. С. 84–87.
8. Wang C.S., Callaway J. Band structure of nickel: Spin – orbit coupling, the Fermi surface and the optical conductivity. // Phys. Rev. B. 1974. V. 9. № 11. P.4897–4907.
9. Laurent D.G., Callaway J., Wang C.S. Optical conductivities of iron and Nickel. // Phys. Rev. B. 1970. V. 1. № 1, P.244–263.
10. Marshall E., Bross H. Ferrimagnetic Nickel: Self- Consistent Calculation of Energy Bands. // Phys. Stat. Sol. (b). 1978. V. 90. № 1. P.241–250.
11. Костышин М.Т., Индутный И.З. О разрешении структуры полос поглощения с помощью действительной части комплексной диэлектрической постоянной. // Оптика и спектроскопия. 1977. Т.43. № 3. С. 453–457.
12. Eastman D.E., Himpsel F.J., Knapp J.A. Experimental exchange – split energy – band dispersions for Fe, Co, and Ni. // Phys. Rev. Left. 1980. V. 44. № 2. P.95–98.
13. Berglund C. N., Spicer W.E. Photoemission studies of Copper and Silver: Experiment. // Phys. Rev. 1964. 136A. № 4. P.1044–1064.

# ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВАНИИ

Е.Б. Яковлев, В.П. Вейко

Отмечены экспериментально обнаруженные особенности плавления металлов при лазерном нагревании, которые не находят убедительного объяснения в рамках тепловой модели взаимодействия лазерного излучения с веществом. Приведено объяснение этих особенностей на основе модифицированной вакансионной модели плавления.

## Введение

Тепловая модель взаимодействия лазерного излучения с веществом, разработанная почти одновременно с появлением лазеров, требовала экспериментального подтверждения. Поэтому, начиная едва ли не с первых экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с веществом, пытались измерить температуру материала в области лазерного воздействия и ее изменение во время действия импульса лазерного излучения. Задача это совсем не простая, ввиду быстрого изменения температуры и малых областей воздействия. В связи с этим первые эксперименты были основаны на измерении параметров металлов, зависящих от температуры, измерение которых проще, чем измерение самой температуры. Наиболее удобным параметром для измерений оказалась отражательная способность материалов  $R$ . Ее можно измерить для многих металлов вплоть до температур порядка несколько тысяч градусов Кельвина. Уже первые измерения показали особенности поведения температуры при лазерном нагревании металлов, которые было сложно объяснить в рамках тепловой модели [1].

## Особенности поведения температуры поверхности металлов при лазерном плавлении

Отражательная способность чистых металлов при увеличении температуры падает, при температуре плавления металла она испытывает резкий скачок, затем продолжает уменьшаться, но уже гораздо медленнее, чем до плавления. Такое поведение отражательной способности позволяет связать ее изменение во время лазерного импульса с изменением температуры.

Типичный вид зависимости отражательной способности металла при лазерном нагревании импульсом длительностью порядка одной микросекунды приведен на рис. 1. (В эксперименте использованы отдельные пички лазерного излучения в режиме свободной генерации [1]).

Как видно из зависимости  $R(t)$  на рис. 1, величина  $R$  уменьшается по мере увеличения мгновенного значения плотности мощности излучения и достигает минимума в момент времени, совпадающий с максимумом импульса или непосредственно следующий за ним. На графике  $R(t)$  наблюдается точка перегиба. С увеличением плотности энергии  $Q$  изменения в величине  $R$  наступают раньше, а возрастание отражения во второй части импульса излучения замедляется; при этом общий вид зависимости  $R(t)$  остается неизменным [1].

Область быстрого изменения отражательной способности (левее точки  $b$  на рис. 1) предшествует характерному для всех металлов горизонтальному участку на графике  $R(t)$ , который связывают, естественно, с процессами начального нагревания, а затем плавления поверхностного слоя металла. Постоянство отражательной способности, после того как слой металла, участвующий в поглощении и отражении света, переходит в жидкое состояние (участок  $bc$  на рис. 1), свидетельствует о постоянстве температуры расплавленного слоя.

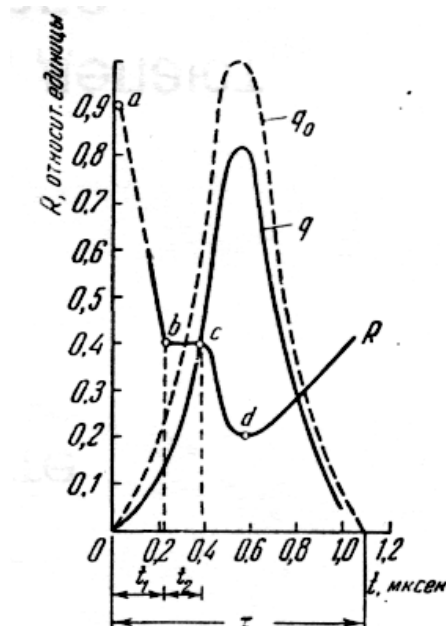


Рис. 1. Изменение отражательной способности серебра при лазерном воздействии. Пунктиром показана форма импульса.  $Q = 7.5 \text{ кДж/см}^2$ .  $q_{0,\text{max}} = 7 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ .  $q$  – поглощенный поток лазерного излучения ( $q(t) = (1-R)q_0(t)$ ).

Это объясняют тем, что вся подводимая в это время энергия излучения тратится на прохождение фронта плавления в глубину тела. С возрастанием толщины слоя расплавленного металла его тепловое сопротивление увеличивается, вследствие чего уменьшается количество энергии, подводимой к границе плавления, и температура поверхности снова начинает возрастать. При этом наблюдается дальнейшее падение отражательной способности (участок  $cd$  на рис. 1). Возрастание отражательной способности правее точки  $d$  обусловлено уменьшением температуры при падении плотности потока излучения в импульсе.

В рамках понятий теплопроводности такое поведение температуры на поверхности расплава (участок  $bc$  на рис. 1) объяснить довольно трудно. Для существования теплового потока к границе фронта плавления необходим градиент температуры в расплаве. При постоянстве температуры поверхности и продвижении границы плавления в глубину градиент температуры должен уменьшаться. Поэтому при достижении на поверхности температуры плавления, даже если весь падающий поток излучения расходуется в этот момент на плавление, по мере продвижения фронта поверхности вглубь, с поверхности должен отводиться все меньший поток, т.е. температура поверхности должна продолжать расти, чтобы фронт плавления продолжал продвигаться вглубь.

Авторы [1] для оценки время  $t_2$ , в течение которого подводимое к металлу тепло расходуется практически только на фазовый переход, использовали предположение о том, что возрастание температуры поверхности не будет происходить до тех пор, пока волна плавления не догонит волну прогрева. Считая, что средняя скорость первой волны  $v \sim \bar{q}(L_m + \rho c T_m)^{-1}$ , а второй  $\sim \sqrt{a/t}$ , можно оценить время  $t_2$  следующим образом:

$$t_2 \approx \frac{(L_m + \rho c T_m)}{a \bar{q}},$$

где  $L_m$  — удельная теплота плавления,  $\rho$  — плотность,  $c$  — теплоемкость металла,  $a$  — его температуропроводность и  $\bar{q}$  — средняя плотность потока в течение времени  $t_2$ , при  $\bar{q} = 1,3 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$  и  $L_m + \rho c T_m = 3,4 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3$ , время  $t_2 \approx 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ сек}$ , что хорошо согласуется с длительностью участка  $bc$  на рис. 1.

Полученные оценки хорошо совпадают с экспериментальными данными (см. рис. 1). Тем не менее, вопрос о механизме переноса энергии к фронту плавления при постоянной температуре поверхности расплава остался открытым.

В [2] для объяснения постоянства температуры поверхности расплава во время плавления при лазерном воздействии использован другой подход.

По мнению авторов [2], увеличение глубины проплавления, как следует из анализа уравнения теплопроводности, снижает подвод теплоты к фронту фазового перехода и уменьшает скорость его перемещения. В свою очередь, это вызывает перегрев поверхностных слоев расплава, что приводит к усилению конвективных потоков в расплаве. Интенсивность движения расплава оценена по критерию Грасгофа

$$Gr = g\beta_1\Delta T l_0 / \nu^3$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\beta_1$  – коэффициент объемного расширения;  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $l_0$  – глубина проплавления.

Оценки, выполненные в [2] для типичных значений параметров металлов, малых перегревов и сравнительно небольших глубин проплавления ( $\Delta T < 50$  К,  $l_0 \geq 5 \cdot 10^{-4}$  м), показали, что  $Gr \gg 1$ , т.е. в расплаве происходит его конвективное перемешивание. При этих условиях температура ванны расплава выравнивается, приближаясь к температуре плавления, и перенос теплоты к границе фазового перехода интенсифицируется ( $a \rightarrow \infty$ ). В результате скорость плавления быстро возрастает, а глубина расплава будет стремиться к предельному для данной плотности потока значению. Для этого случая должно наблюдаться повышение температуры поверхности с последующим ее снижением. Приблизительно подобное поведение температуры удалось наблюдать только в работе [3], но скачок наблюдается при температурах больших температуры плавления (см. рис. 2).

### **Анализ изменения температуры при лазерном плавлении на основе вакансионной модели плавления**

Используя результаты, полученные в работе [4], можно однозначно объяснить постоянство температуры поверхности при лазерном плавлении и наличие потока энергии к фронту плавления без градиента температуры в расплавленном слое.

Согласно модели ЖДVK (жидкость – деформированный вакансиями кристалл) [4], вакансионное плавление происходит при увеличении концентрации вакансий до значений  $n_2$ , определяемых минимумом свободной энергии кристалла при температуре плавления  $T_m$ . Затраты энергии на плавление определяются затратами на генерацию и растворение этих вакансий. Продвижение границы резкого изменения концентрации вакансий (фронта плавления) возможно за счет потока вакансий через расплав при отсутствии в нем градиента концентрации вакансий и градиента температуры. Такой режим возможен до тех пор, пока плотность потока мощности на поверхности не превысит некоторого критического значения, определяемого скоростью генерации вакансий на поверхности расплава и величиной диффузионного потока вакансий, определяемого градиентом концентрации вакансий на фронте плавления. Поэтому глубина проплавления будет определяться величиной плотности потока лазерного излучения и свойствами материала.

Максимальный тепловой поток, не вызывающий нагрева поверхности расплава при плавлении, можно оценить следующим образом:

$$q_m \sim \frac{LN^{2/3}}{\tau(n_2^0 - n_1^0)} \exp\left(-\frac{E - \alpha + E_d}{kT_m}\right)$$

где  $\tau$  – время порядка обратной частоты Дебая,  $E_d$  – энергия активации диффузии вакансий,  $N$  – концентрация узлов кристаллической решетки,  $E$  – энергия образования

единичной вакансии,  $\alpha$  – изменение энергии образования вакансии при их взаимодействии,  $n_1^0$  – концентрация вакансий в твердом теле при температуре плавления.

Считая  $\tau \sim 10^{-13}$  с,  $N \sim 10^{30}$  м<sup>-3</sup>,  $L \sim 10^8$  Дж/м<sup>3</sup>,  $n_2^0 = 10^{28}$  м<sup>-3</sup>,  $\exp[-(E - \alpha + E_d)/kT] \sim 10^{-3} \div 10^{-4}$ ,  $n_2^0 \gg n_1^0$ , получим оценку:  $q_m \sim 10^9 \div 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>, т.е. уже с потоков  $\sim 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup> при плавлении становится возможным повышение температуры поверхности расплава.

Зависимости измеренной температуры от времени при облучении поверхности Nb излучением Nd-YAG-лазера с различными плотностями мощности, взятые из [3], приведены на рис. 2. Изменение плотности мощности излучения обеспечено изменением длительности импульса при постоянной энергии в импульсе. Характерной особенностью изменения температуры при нагревании является отсутствие горизонтального участка на графике  $T(t)$  при температуре плавления  $T_m$ , который обычно связывают с плавлением поверхностного слоя металла. Такой участок существует, но при температуре большей, чем температура плавления, причем эта температура связана с плотностью мощности лазерного излучения. Между тем при остывании такой горизонтальный участок при  $T_m$  существует (см. рис. 2).

Результаты эксперимента, приведенного в [3], также можно объяснить с позиций модели ЖДВК. Согласно этой модели, при больших скоростях нагревания возможен перегрев металла выше температуры плавления без приобретения им текучести, т.е. без плавления [4].

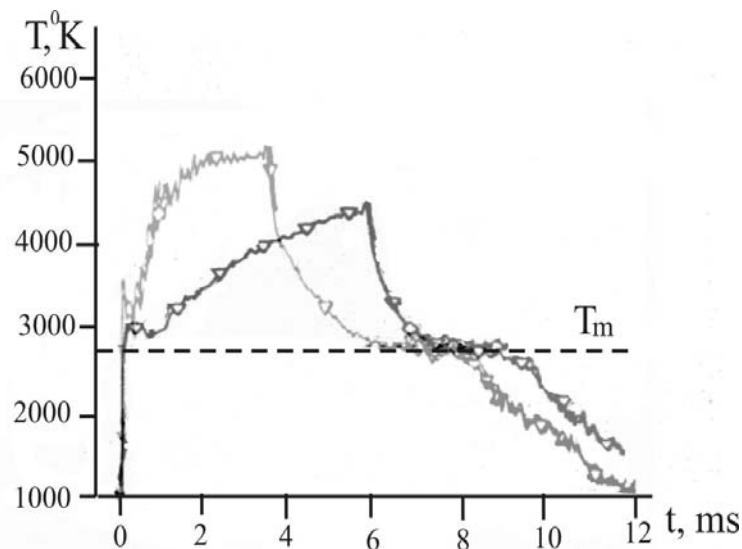


Рис. 2. Зависимость реальной температуры поверхности Nb при действии прямоугольного импульса Nd-YAG-лазера. Энергия в импульсе 27 Дж. 1 – длительность импульса 3,5 мс, плотность мощности  $4,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>; 2 – длительность импульса 6 мс, плотность мощности  $2,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> [3]

Связь величины теплового потока с температурой поверхности расплава при  $T > T_m$  можно определить из [4]:

$$q \sim \frac{LN^{2/3}}{\tau(n_2^0 - n_1^0)} \exp\left(-\frac{E - \alpha + E_d}{kT}\right).$$

Оценим изменение температуры поверхности расплава при изменении плотности мощности излучения от  $2,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> до  $4,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Считая изменение температуры поверхности малым, для  $\Delta T/T$  получим



$$\frac{\Delta T}{T} \approx \frac{kT}{E - \alpha + E_d} \ln \frac{q_2}{q_1}$$

При  $\exp[-(E - \alpha + E_d)/kT] \approx 10^{-3}$  ( $kT/(E - \alpha + E_d) \approx 1/6$ ) получим оценку  $\Delta T/T \approx 1/6 \cdot \ln(4,5/2,5) \approx 0,098$ , которая хорошо совпадает со значениями  $\Delta T/T = 0,1$  при  $T \approx 3000$ ,  $\Delta T \approx 300$ , определенными из эксперимента (см. рис. 2).

### Заключение

В результате проведенного анализа показано, что, используя вакансионную модель плавления и модель ЖДВК для описания расплава, можно непротиворечиво объяснить основные особенности плавления металлов при лазерном нагревании.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ № НШ-1370.2003.8.

### Литература

1. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов, Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970.272 с.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
3. Smurov I. Pyrometry applications in laser machining // Proc. of SPIE. 2001. V.4157. P. 55–66.
4. Яковлев Е.Б. Перегрев твердых тел при плавлении. // Известия АН СССР. Сер. физическая. 1989. Т.53. В. 3. С.591–594.

# ЛАЗЕРНАЯ АМОРФИЗАЦИЯ СТЕКЛОКЕРАМИК: ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.П. Вейко, К.К. Киеу, Е.Б. Яковлев

Проведено исследование лазерной аморфизации стеклокерамик с помощью оптической пирометрии и видеозаписи. Выявлен механизм локальной лазерной аморфизации как структурно-фазового перехода, определяемого температурной кинетикой в зоне лазерного воздействия. Определены диапазоны плотности мощности и времени воздействия  $\text{CO}_2$ -лазерного излучения для аморфизации типичной стеклокерамики – ситалла, состав которого  $\alpha\text{-TiO}_2 \cdot 2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ . Показано, что, применяя лазерную аморфизацию стеклокерамик, можно изготовить ряд миниатюрных оптических элементов, такие как линзы, матрицы линз, волноводы, и. т. д.

## Введение

Под действием излучения  $\text{CO}_2$ -лазера в стеклах и стеклокерамиках происходят разнообразные физические процессы, которые приводят к образованию локальных зон с измененными оптическими параметрами [1].

Большинство этих процессов стимулируются нагреванием. Локальный характер нагревания вместе с высокими скоростями нагревания и охлаждения приводят к появлению новой кинетики структурных изменений и новых возможностей для формирования микрооптических элементов, а иногда и неизвестных оптических материалов [1].

Одним из самых ярких примеров лазерного воздействия на стекловидные материалы является лазерная аморфизация стеклокерамик. К стеклокерамикам\*) относят широкий класс материалов, имеющих плотную микрокристаллическую структуру, характеризующуюся весьма малыми размерами беспорядочно ориентированных кристаллов и отсутствием пористости. Из-за этой микрокристаллической структуры и сильного рассеяния света стеклокерамики непрозрачны в видимом диапазоне, несмотря на слабое поглощение. В среднем (5–10 мкм) ИК-диапазоне эти материалы сильно поглощают свет (коэффициент поглощения в этом диапазоне составляет  $\alpha = 10^3\text{--}10^4 \text{ см}^{-1}$ ).

Локальное лазерное нагревание стеклокерамик приводит к существенному уменьшению рассеяния света видимого диапазона в результате плавления микрокристаллов и дальнейшего «замораживания» (затвердевания) аморфной фазы (рис. 1, а).

Эта гипотеза была подтверждена путем наблюдения дифракции рентгеновских лучей на исходной структуре и на вторичных лазерно-индуцированных структурах (рис. 1, б). Из рис. 1 видно, что в основном микрокристаллическая структура стеклокерамики сменяется аморфной фазой, которая, в свою очередь, может быть переведена в кристаллическую.

Таким способом можно сформировать прозрачное окно в зоне лазерного воздействия в непрозрачном исходном материале. К тому же, первоначальная микрокристаллическая фаза более плотно упакована, чем аморфная фаза, сформированная лазером, в результате чего увеличивается объем материала в зоне облучения, что в свою очередь, приводит к образованию линзообразной формы зоны воздействия.

Изучение процессов лазерной аморфизации стеклокерамик интенсивно проводилось группой П.А. Скибы [2]. Однако остается еще много вопросов, на которые надо найти ответы:

- каковы ограничения для темпов нагревания и охлаждения при аморфизации и обратной кристаллизации (повторном облучении)?

---

\*) В русскоязычной литературе для обозначения тех же материалов часто используется термин «ситаллы».

- играет ли какую-нибудь роль удельная теплота плавления, соответственно, имеется ли время задержки при движении температурного фронта в процессе структурной трансформации? и т. д.
- почему скорость структурных изменений при лазерном воздействии намного больше этой величины при обычных методах нагревания?

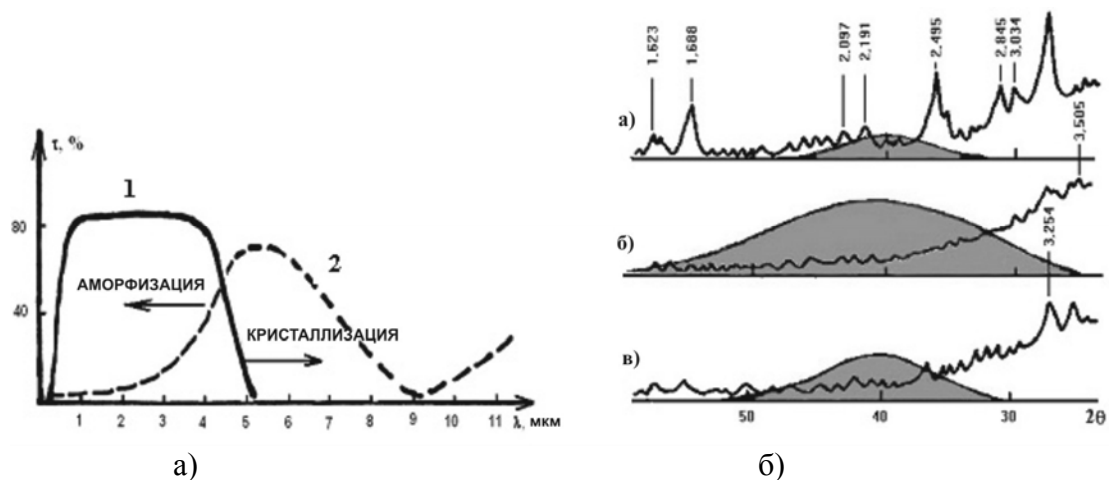


Рис. 1: (а) Спектр пропускания ситалла СТ-50-1 до (2) и после (1) лазерной аморфизации. (б) Рентгеновские дифрактограммы: а) исходный материал (ситалл СТ-50-1); б) после лазерного облучения (лазерной аморфизации); в) после повторного облучения (частичной кристаллизации). Пики 1.688 Å и 2.495 Å относятся к рутилу ( $\alpha$ -TiO<sub>2</sub>); 3,505 Å к твердому раствору SiO<sub>2</sub> – типичная аморфная фаза; остальные пики принадлежат кордиериту ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ )

В настоящей статье сделана попытка ответить на некоторые из этих вопросов, исследуя кинетику лазерной аморфизации. Параллельно с этим хотелось бы показать практические возможности применения лазерной аморфизации и кристаллизации стеклокерамик для изготовления миниатюрных оптических элементов и новых оптических материалов.

### Кинетика лазерной фазово-структурной трансформации стеклокерамик. Экспериментальные методы

Самыми информативными параметрами при лазерном структурном изменении являются:

- температурная кинетика – скорости нагрева и охлаждения, которые определяют формирование конечной фазы и ее стабильность;
- движение фронта аморфизации, которое отождествлялось с движением фронта прозрачности.

В экспериментах использован ситалл СТ-50-1 (типичная стеклокерамика), который имеет следующий состав: 60.5% SiO<sub>2</sub>, 13.5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8.5%CaO, 7.5% MgO, 10% TiO<sub>2</sub>, где микрокристаллы рутила ( $\alpha$ -TiO<sub>2</sub>) и кордиерита ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ) являются основными. Образцы в виде пластинок толщиной от 0.3 мм до 1 мм облучались стабилизированным непрерывным CO<sub>2</sub>-лазером с полной мощностью 50 Вт. Размеры зоны лазерного облучения изменялись в диапазоне 0.5–2 мм, при этом плотность мощности лазерного излучения достигала  $6 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>.

Температурная кинетика исследована с помощью инфракрасного цифрового микропирометра со следующими параметрами:

- спектральный диапазон – 5.7–8.7 мкм;
- диапазон температурных измерений – 200–2000°C;
- диаметр измеряемой области – 0.5–5 мм;
- время срабатывания – 0.1 с;
- точность измерения температуры  $\pm 10$  С [3].

Движение фронта аморфизации идентифицировано по движению фронта прозрачности, поэтому оно исследовалось с помощью оптических методов: оптической микроскопии сечений образцов, видеозаписи через микроскоп (после того как фронт аморфизации (прозрачности) достигал нижней поверхности образцов).

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

Пучок He-Ne лазера совмещен с пучком CO<sub>2</sub>-лазера для нацеливания последнего. Фокусировка пучка CO<sub>2</sub>-лазера осуществляется с помощью ZnSe линзы с фокусным расстоянием 12 см. Облученная зона освещается волоконной подсветкой так, чтобы ее можно было наблюдать через микроскоп. Температура поверхности образца измерялась с помощью цифрового пирометра, кинетика аморфизации (движение фронта прозрачности) регистрировалась видеокамерой через другой микроскоп.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

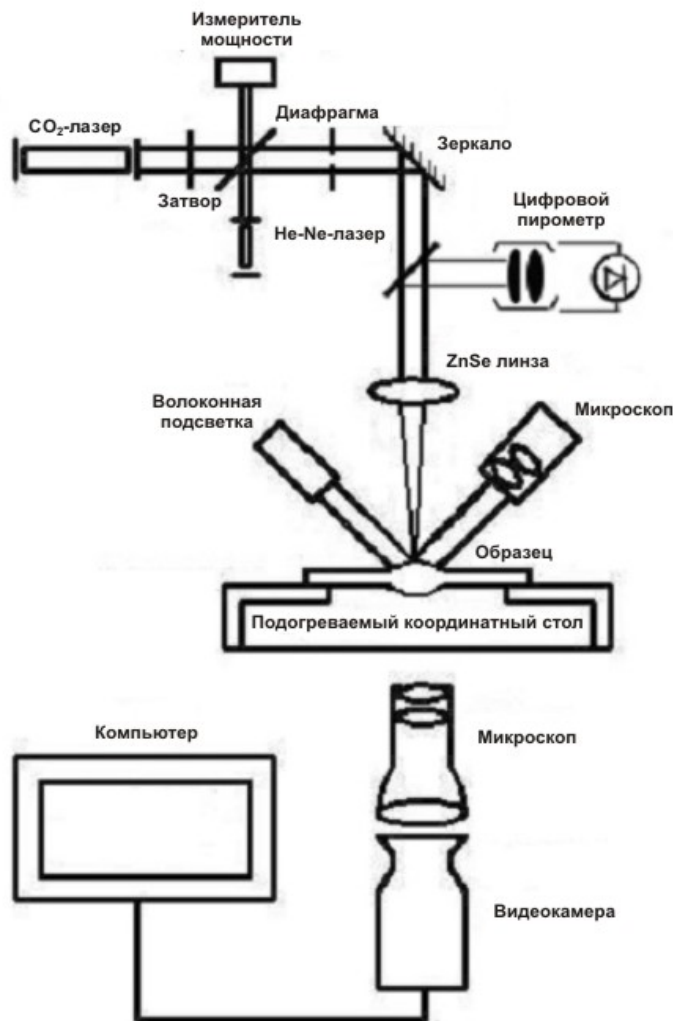


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Типичный вид кривых изменения температуры поверхности образца для одного цикла нагревания-охлаждения при действии CO<sub>2</sub>-лазерного излучения с различными

плотностями мощности представлен на рис. 3. Во всех случаях лазерное нагревание должно обеспечить температуру поверхности образца порядка 1500 К (температуры стеклования  $T_{стек} = 1033$  К и плавления  $T_{пл} = 1473$  К должны лежать в области температур достигаемых при лазерном нагревании).

В первом случае (рис. 3, а) эта температура достигалась без дополнительного нагрева образцов, плотность мощности лазера составила  $(3-5) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. При этих условиях наблюдалось образование трещин на поверхности образцов в зоне облучения в течение или чаще всего после лазерного воздействия (рис. 3, б).

При меньших плотностях мощности лазерного излучения в диапазоне  $(1-3) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> при условии предварительного подогрева до температуры  $T_0 = 600-900$  К (рис. 3, в) наблюдались аморфизация СК в зоне облучения и соответствующие изменения прозрачности, причем трещины не образовались (рис. 3, г).

При дальнейшем уменьшении плотности мощности лазера до  $q \leq 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> и при предварительном нагреве образцов до температуры  $T_0 = 800-1000$  К наблюдается обратная кристаллизация облученных (аморфных) образцов при повторном воздействии лазерного излучения (рис. 3, е).

Предварительный нагрев образцов необходим для предотвращения появления значительных термонапряжений, образования трещин и разрушения образцов. Термические напряжения всегда возникают при локальном лазерном нагреве, особенно при облучении стеклокерамик, которые обладают достаточно низкой теплопроводностью и значительным коэффициентом теплового расширения. Локальное лазерное нагревание приводит к относительно высоким температурным градиентам, которые тем больше, чем выше температура нагревания.

Для того чтобы избежать разрушения стеклокерамических образцов при воздействии лазерного излучения, должны выполняться два условия:

1) скорости изменения температуры (при нагревании и охлаждении) должны быть меньше критической  $V_T^{крит}$  (критической скоростью изменения температуры образца при лазерном нагревании и последующем охлаждении будем называть ту скорость, при которой трещины уже образуются, т.е. возникающие термонапряжения не превышают разрушающих для материала образца значений [1];

2) температура образца не должна превышать температуру испарения  $T_{исп}$

Если скорость изменения температуры выше критической  $V_T \geq V_T^{крит}$ , образование трещин является неизбежным (режим растрескивания). При обработке в этом режиме особенно трудно избежать образования трещин из-за остаточных напряжений, как показано на рис. 3,б: трещина стала заметной через 40 с после окончания лазерного действия. Этот режим соответствует температурной кинетике в диапазоне скоростей:  $V_{Нагр} \sim 200-50$  К/с и  $V_{Охл} \sim 400-100$  К/с.

При меньших темпах изменений температуры:  $V_{Нагр} \sim 30-80$  К/с и  $V_{Охл} \sim 50-100$  К/с, можно осуществить лазерную аморфизацию образцов. В этом случае температура поверхности образцов достигает температуры плавления ( $T_{пл}$ ), а темп охлаждения достаточно высок для замораживания сформированной аморфной фазы. Плавление материала образца в зоне облучения происходит после короткого времени воздействия лазерного излучения ( $\tau_{пл}$ ), которое необходимо для нагревания образца до  $T_{пл}$ :

$$\tau_{пл} = \frac{\pi \cdot k^2 (T_{пл} - T_0)^2}{4q^2 a}. \text{ Здесь } k = 1.45 \text{ Вт/м} \cdot \text{К, коэффициент теплопроводности, } T_0 = 800$$

К и  $q = 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\tau_{пл} \sim 1$  с (эта величина может быть намного меньше если увеличить плотность мощности лазерного излучения). Фронт плавления достигает нижней поверхности образца после некоторого времени  $\tau_h$ , при толщине образцов  $h = 0.6$  мм,  $\tau_h \approx 0.6-6$  с. С этого момента можно наблюдать движение фронта прозрачности (аморфиза-

ции) на мониторе компьютера (рис. 2). После действия лазерного излучения расплав, благодаря высокому темпу охлаждения, охлаждается без кристаллизации, и образуется аморфная структура.

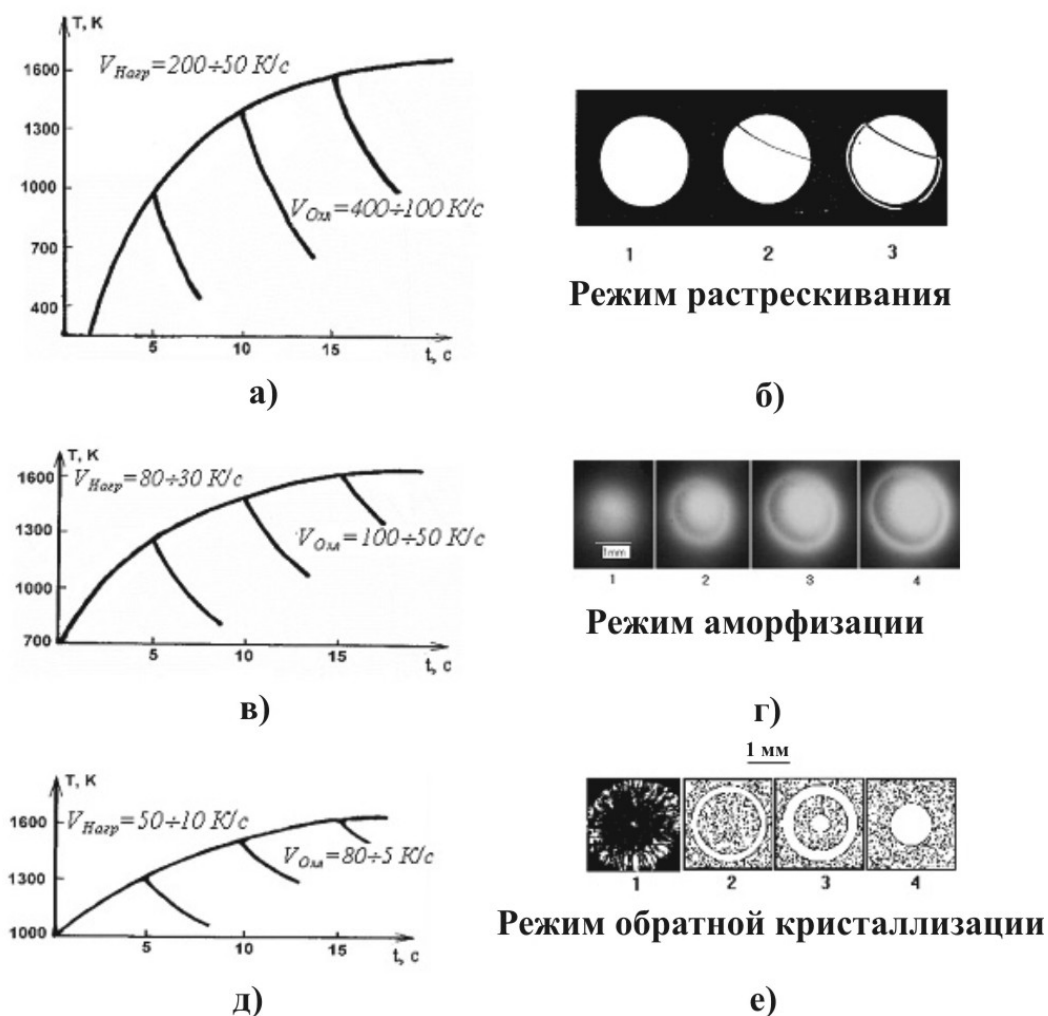


Рис. 3. Температурная кинетика при лазерном облучении образцов СТ-50-1: темпы нагрева–охлаждения (а, в, г) и соответствующие визуально–наблюдаемые структурные изменения (б, д, е) — толщина образцов  $h = 0.6 \text{ мм}$ ; диаметр лазерного пятна  $d = 2 \text{ мм}$ ; (а, б): мощность лазера  $P = 10\text{--}15 \text{ Вт}$ , плотность мощности  $q \geq 5 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ , начальная температура  $T_0 = 300 \text{ К}$ ; (в, д): мощность лазера  $P = 1\text{--}3 \text{ Вт}$ , плотность мощности  $q = 3 \cdot 10^5\text{--}1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ , начальная температура  $T_0 = 700 \text{ К}$ ; (г, е): мощность лазера  $P \leq 0.3 \text{ Вт}$ , плотность мощности  $q \leq 10^5 \text{ Вт/м}^2$ , начальная температура  $T_0 = 1000 \text{ К}$ ; б) образование трещин на поверхности образца после лазерного действия через: 10 с (1), 40 с (2) и 90 с (3); д) развитие зоны аморфизации при лазерном действии на образец: 6 с (1), 6.5 с (2), 7 с (3) и 8 с (4); е) обратная кристаллизация образца при повторном облучении

Так как исходная микрокристаллическая структура обладает более высокой плотностью по сравнению с аморфной структурой, то после лазерного воздействия зона аморфизации имеет линзообразный вид из-за увеличения объема материала.

Таким образом, лазерное нагревание позволяет реализовать огромные темпы изменения температуры (иногда до  $10^6 \text{ К/с}$ ) по сравнению с традиционными методами нагревания (например, скорость нагревания в печи достигает только нескольких градусов в секунду). Это открывает новые возможности при лазерной аморфизации стеклокерамик, что дает новый метод для изготовления микрооптических элементов и возможность создания новых материалов.

## Микрооптические элементы, изготовленные на основе лазерной аморфизации стеклокерамик

Применяя локальную лазерную аморфизацию / кристаллизацию стеклокерамик, можно изготовить целый ряд микрооптических элементов. Параметрами этих элементов можно с достаточной легкостью управлять, например:

- размерами элементов – через плотность мощности излучения, время воздействия и температуру предварительного подогрева;
- формой элементов – путем сканирования лазерного пучка или с помощью проекционных масок;
- оптической силой (апертурой) – через толщину образца или с помощью дополнительной навески;
- оптическими свойствами (пропусканием, дисперсией) – через выбор состава исходного материала.

Приведем примеры основных типов оптических элементов, изготовленных нами и другими авторами [2].

**Планарные оптические волноводы.** Сканируя лазерное пятно на поверхности образца, можно получить оптические планарные волноводы, геометрические параметры которых определяются скоростью сканирования и плотностью мощности лазера. Общий вид таких планарных волноводов показан на рис. 4, а, фотография поперечного сечения – на рис. 4, б и зависимости высоты ( $h_k$ ), глубины ( $h_d$ ) и ширины ( $d$ ) волноводов от времени лазерного воздействия – на рис. 4, в. Более подробные сведения о свойствах планарных волноводов представлены в книге [2].



Рис. 4. Общий вид (а), поперечное сечение (б) оптического волновода и кинетика формирования (начальная стадия аморфизации): зависимости высоты ( $h_k$ ), глубины ( $h_d$ ) и ширины ( $d$ ) волновода от времени лазерного воздействия ( $d_0 = 1.5$  мм,  $q = 0.5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\tau = d_0/V_{ск}$ ,  $T_0 \approx 800$  К).

**Линзы и матрицы линз.** Линзы являются базовыми элементами в прикладной оптике, которые находят свое применение в большинстве оптических приборов. Традиционные технологии изготовления оптических линз хорошо разработаны, но они практически не применимы для миниатюрных линз с размерами  $\leq 1$  мм [2]. Лазерная аморфизация стеклокерамик представляет собой новый альтернативный метод изготовления миниатюрных линз, с помощью которого можно получить линзы различного диаметра (от сотен микрометров до несколько миллиметров). Диапазон возможных фокусных расстояний тоже широк (от несколько сантиметров до одного миллиметра и менее), причем возможно также получение высокоапертурных линз ( $A = 0.6$ ). Кроме этого, все процессы при изготовлении являются легко контролируруемыми и поддаются автоматизации.

Апертура таких линз составляет величину порядка 0.05–0.06, для того чтобы увеличить апертуру, мы использовали дополнительную навеску (из того же или из другого материала), добавленную в зону облучения. В процессе лазерного воздействия навеска

расплавляется и перемешивается с материалом образца, образуя общую ванну расплава, при остывании которой формируются линзы с большими радиусами кривизны верхней и нижней поверхности, т.е. с большей апертурой. При применении этой техники апертура линз увеличивается до 0.1–0.6 и даже больше.

Можно также получить линзы с различной конфигурацией зрачка – эллиптические, квадратные, и т.д., используя соответствующие маски [2].

**Геодезические линзы.** Геодезические или планарные линзы являются популярными элементами в интегральной оптике. Такие линзы используются для фокусировки света в поверхности перпендикулярной к их оптической оси. Изображение одной из таких линз показано на рис. 6, а, на рис. 6, б, в представлена фокусировка света, распространяющегося в планарном волноводе, с помощью геодезической линзы.

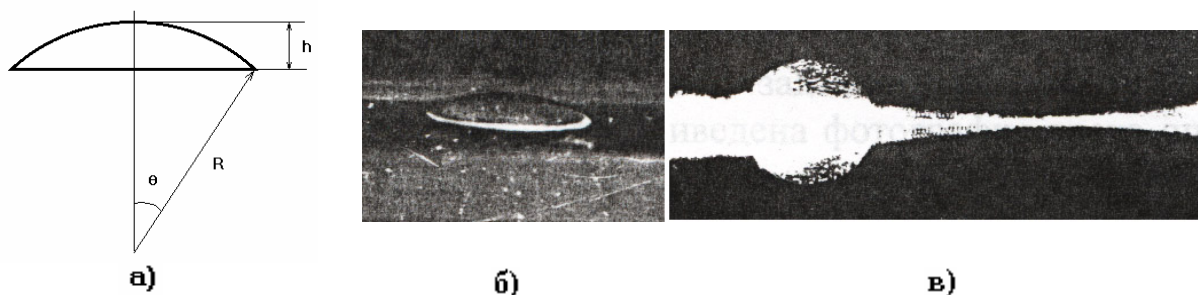


Рис. 6. Оптическое схематическое изображение геодезической линзы (а), фотография профиля (б) и фотография видом сверху при фокусировке света из планарного волновода (в).

**Другие оптические элементы.** Можно изготовить много других оптических элементов, применяя метод ЛАСК. Комбинируя лазерную аморфизацию с последующей частичной кристаллизацией той же зоны, но при других размерах пучка дает еще одну новую возможность, таким способом изготавливаются различные интегральные диафрагмы (включая аподизированные) и дифракционные оптические элементы. Процессы лазерной аморфизации / кристаллизации тонких стеклокерамических пленок находят применение в оптической записи и хранении информации.

### Заключение

1. При плотности мощности  $\text{CO}_2$ -лазера порядка  $5 \cdot 10^5$ – $10^6$  Вт/м<sup>2</sup> и предварительном нагреве образцов до температуры порядка 700–900 К (для СТ–50–1) может быть осуществлен режим аморфизации СК (СТ–50–1). При этом кинетика лазерной аморфизации с помощью непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера определяется температурной кинетикой, т.е. движением изотермы  $T = T_{nl}$  вглубь зоны облучения.

2. Пороговая плотность мощности лазерного излучения лежит в диапазоне  $10^5$ – $10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, время, необходимое для нагревания образца до  $T_{nl}$  ( $\tau_{nl}$ ), и время, через которое фронт расплавления достигает нижней поверхности образца ( $\tau_n$ ), составляют 0.1–1 с и 1–10 с соответственно. Эти величины сильно зависят от предварительного подгрева образцов.

3. После того, как температура поверхности образца стеклокерамики достигает температуры расплавления, рассеяние видимого света материалом в зоне облучения сильно уменьшается (по сравнению с первоначальным) в результате исчезновения границ между микрокристаллами по мере их расплавления. Таким образом, формируется фронт прозрачности, который проникает внутрь материала в соответствии с температурной кинетикой.

4. В режиме аморфизации после действия лазерного излучения сформированная высокотемпературная структура замораживается, благодаря быстрому темпу охлажде-



ния  $V_{\text{охлаж}} > 50\text{--}100$  К/с, который реализуется механизмами теплопроводности в самой стеклокерамике. Полученная аморфная фаза может обратно кристаллизироваться при повторном облучении лазером (при меньших скоростях охлаждения  $V_{\text{охлаж}} < 10\text{--}20$  К/с).

5. Облученная аморфная зона обладает всеми свойствами оптических линз – оптической прозрачностью в широком диапазоне длин волн, включая видимый (от 0.3 мкм до 4.5 мкм для СТ–50–1); оптической силой благодаря выпуклости верхней и нижней поверхностей, широким диапазоном возможных апертур (от 0.001 до 0.6) и т.д. Оптическими параметрами полученных линз – апертурой, фокусным расстоянием, диаметром, формой зрачка и т.д. можно легко управлять с помощью таких параметров, как плотность мощности лазерного излучения, время воздействия, размер лазерного пятна, конфигурация диафрагмы и дополнительная навеска.

6. Применяя метод лазерной аморфизации / кристаллизации, можно изготовить ряд миниатюрных оптических элементов, включая планарные волноводы, матрицы микролинз, асферические и геодезические (планарные) линзы, интегральные диафрагмы и т.д.

Дальнейшее исследование в этой области, несомненно, даст новые интересные материалы и перспективные устройства, такие как оптические системы записи и хранения информации, фотонные кристаллы и т.д.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ на ведущую научную школу «Фундаментальные основы лазерных микротехнологий» и гранта РФФИ №04–02–16611.

### Литература

1. Veiko V.P., Yakovlev E.B. Physical fundamentals of laser forming of microoptical components. // Optical Engineering. 1994. V.33. №11. P.3567–3571.
2. Скиба П.А. Лазерная модификация стекловидных материалов. Минск, БГУ, 1999. 132 с.
3. Veiko V.P., Frolov V.V., Chuiko V.A., Kromin A.K., Abbakumov M.O., Shakola A.T., Fomichev P.A., Yakovlev E.B. Laser heating end evaporation of glass borning materials and its application for creating MOC.// Proceedings of SPIE. 1991. V.1544. P.152-163

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ И БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

А.В. Беликов, В.Б. Карасев, В.В. Назаров, А.В. Скрипник, А.А. Солунин,  
К.В. Приходько, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов

В статье приведены результаты исследования флуоресцентных свойств подкожной жировой ткани человека, влияния химической обработки эмали зуба человека на порог лазерного разрушения эмали и эффективность лазерного удаления интактной и химически модифицированной эмали, а также результаты исследования пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения для случая плоскопараллельного и неустойчивого резонатора моноимпульсного лазера с динамическим градиентным отражателем (ДГО), построенным на основе модифицированного интерференционного отражателя с НПВО-модулятором.

## Введение

Для дальнейшего развития систем лазерной косметологии, в частности, систем диагностики кожи и подкожных тканей, требуется обеспечить всестороннее изучение оптических свойств этих тканей. С целью расширения знаний в указанной области в данной работе проведено исследование флуоресцентных свойств подкожной жировой ткани человека.

Актуальным представляется также исследование новых способов прецизионной лазерной обработки композиционных материалов, в частности, твердых тканей человека. Уникальные физико-механические и химические свойства композитных материалов зачастую требуют специальных способов обработки, а непрерывно возрастающие требования к точности, скорости и эффективности их обработки диктуют необходимость разработки новых обрабатывающих технологий. Если выбор способа обработки композиционных материалов искусственного происхождения обусловлен только техническими требованиями к конечному продукту обработки, то обработка биологических композитных материалов, особенно в медицине, практически всегда сопряжена с дополнительным риском и ограничениями. В настоящей работе впервые предпринята попытка увеличения эффективности разрушения эмали зуба человека излучением Er:YAG лазера за счет химической обработки эмали. Химическая обработка в данном случае предполагает использование водного раствора пищевой кислоты с оптимальными кислотностью и температурой для ослабления связей между элементами композита (эмали), а именно для разрушения межпризменных пространств (матрицы) с частичной деградацией эмалевых призм. В работе исследовано влияние глубины химически модифицированного слоя эмали на порог лазерного разрушения эмали, проведено сравнительное исследование эффективности лазерного удаления интактной и химически модифицированной эмали.

При создании твердотельных лазеров с высокими яркостными характеристиками генерируемого излучения широкое распространение получили градиентные зеркала [1–3]. Использование градиентных зеркал в резонаторах твердотельных лазеров позволяет увеличить яркость генерируемого излучения за счет существенного уменьшения расходимости при незначительном снижении выходной энергии генерации [4]. Одним из возможных вариантов увеличения коэффициента заполнения активной среды при условии сохранения высоких пространственных характеристик генерируемого излучения, может быть применение в резонаторе лазера динамического градиентного отражателя (ДГО), у которого пространственное распределение оптических характеристик изменяется в течение импульса генерации [5].

## Флуоресценция жировой ткани

В ходе исследований взаимодействия лазерного излучения с жировой тканью было обнаружено, что данная ткань обладает способностью флуоресцировать. Липиды из подкожной клетчатки человека *in vitro* люминесцируют в видимой области спектра. Спектр флуоресценции представлен на рис. 1. Самый большой максимум флуоресценции наблюдался на длине волны 510 нм. Другие максимумы наблюдались на длинах волн: 460 нм, 540 нм и 590 нм. Флуоресценция жировой тканей в видимой области спектра вызвана наличием в клетках окисленной формы флавопротеинов НАДФН с максимумом в области 530 нм и восстановленной формы пиридиннуклеотидов НАДН с максимумом в области 455 нм.

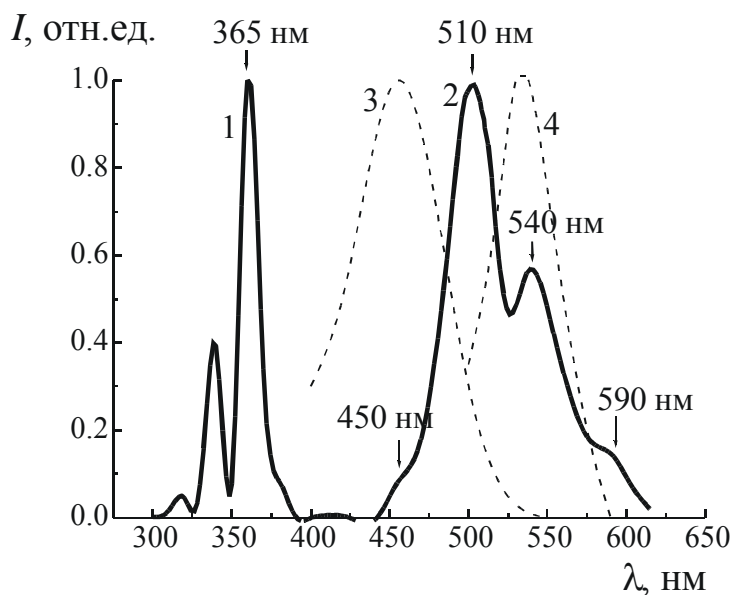


Рис. 1. Спектр флуоресценции жировой ткани при температуре 4°C.  
1 – спектр возбуждения, 2 – спектр флуоресценции жировой ткани, 3 – НАДН, 4 – НАДФН

Исследования проводили на жировой ткани, взятой из подкожной брюшной полости людей (возраст 40–50 лет). Жировая ткань транспортировалась к экспериментальной установке в физиологическом растворе в термосе при температуре 36°C. Из образца жировой ткани скальпелем отделялся фрагмент толщиной около 1 мм и диаметром 5 мм: первый раз исследование проводилось на образце через 15±1 мин от момента его изъятия из организма, второй раз – через два часа от момента изъятия, третий раз – через пять часов от момента изъятия и четвертый – через 24 часа. В зависимости от этого параметра жировая ткань обозначалась как тип I, тип II, тип III и тип IV, соответственно. Все время от начала до конца эксперимента жировая ткань, от которой отделялись исследуемые фрагменты, хранилась в физиологическом растворе в термосе при температуре 36°C. Фрагмент жировой ткани помещался в стеклянную кювету, которая устанавливалась перед объективом люминесцентного микроскопа (ЛЮМАМ Р8, ЛОМО и ФМЭЛ-1У42). Увеличение объектива 10×. Источником света служила ртутная лампа (ДРШ 250-3,  $\lambda_{\text{возб}} = 365$  нм). Образцы можно было охлаждать от 36°C до 3°C или нагревать до 60°C с постоянной скоростью (1°C/мин). Температура жировой ткани во время эксперимента измерялась посредством термодпары, помещенной непосредственно внутрь образца в наблюдаемой области.

На рис. 2. показана зависимость интенсивности флуоресценции жировой ткани человека *in vitro* на длине волны 510 нм от времени с момента извлечения из организма. Было обнаружено, что способность флуоресцировать уменьшается со временем хранения образца. За два часа хранения интенсивность флуоресценции снизилась на 25% от момента изъятия жировой ткани из организма (при 4°C), через 5 часов – на 60%, через 24 часа – на 60%. Это явление, возможно, связано либо с изменением вязкости, либо с тем, что в течение хранения жировой ткани *in vitro* в ней замедляются метаболические процессы.

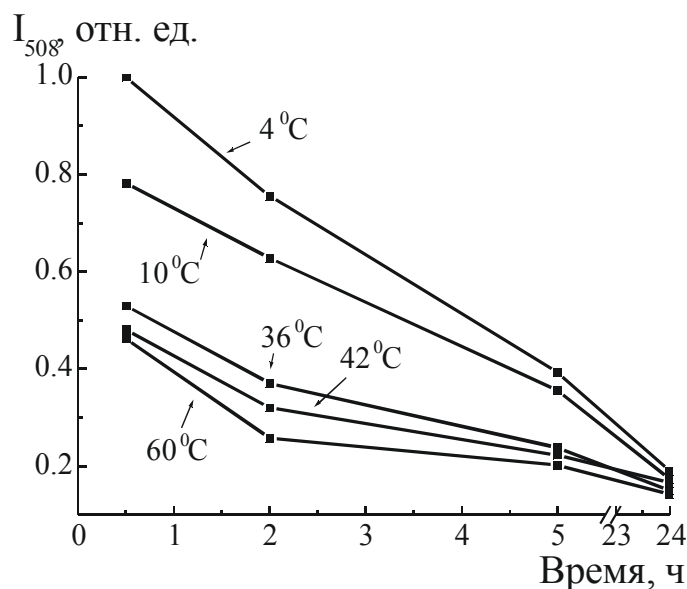


Рис. 2. Зависимость интенсивности флуоресценции жировой ткани от времени с момента извлечения из организма

Также в ходе экспериментов было обнаружено, что способность жировой ткани флуоресцировать связана с температурой (рис. 3). При охлаждении образца от 36°C до 4°C интенсивность флуоресценции повышается на 40% (I тип), на 30% (II тип), на 10% (III тип) и на 2% (IV тип). Это объясняется тем, что с увеличением температуры энергия возбуждения, расходуемая на процесс диссоциации молекул или их переход в другую модификацию, растрачивается безызлучательным путем, что вызывает температурное тушение флуоресценции.

В экспериментах был обнаружен интересный факт: при последующем повышении температуры от 4°C до 60°C интенсивность флуоресценции монотонно уменьшается, но уже на меньшем уровне, чем при предварительном снижении температуры. Величина уменьшения интенсивности флуоресценции при достижении температуры 36°C показана в табл. 1. Температурный гистерезис может быть связан с фазовыми переходами жировой ткани. При фазовых переходах жировая ткань обладает способностью кристаллизоваться. При охлаждении образуются кристаллы, которые располагаются так, что образуют параллельно расположенные ряды пар их молекул. Такие ряды расположены как в горизонтальной плоскости, так и по вертикали. Они удлиняются и принимают форму кристаллических пластинок или игл, вследствие чего может произойти разрыв мембраны жировой клетки. Количество люминесцирующих жировых клеток уменьшается. С этим связано снижение интенсивности люминесценции.

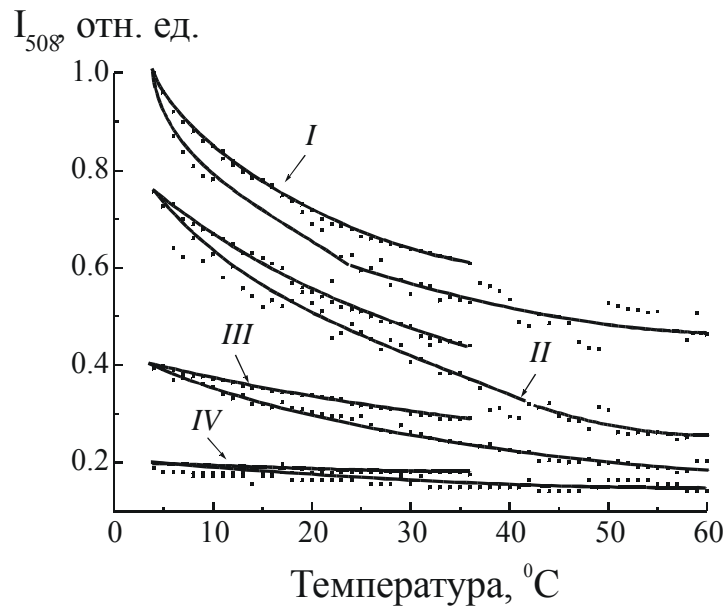


Рис. 3. Зависимость интенсивности флуоресценции жировой ткани человека in vitro от температуры и от времени с момента извлечения из организма.

Тип жировой ткани	Изменение интенсивности флуоресценции
I тип	15%
II тип	18%
III тип	16%
IV тип	13%

Таблица 1. Величина уменьшения интенсивности флуоресценции жировой ткани при температуре 36°C в начале эксперимента и после прохождения цикла 36°C – 4°C – 36°C

### Новый метод лазерно-химической обработки композитных материалов

Ярким примером природного композитного материала является эмаль зуба человека. Эмаль – наиболее твердая ткань человеческого организма. Основным структурным элементом эмали являются эмалевые призмы (армирующий элемент), направляющиеся от дентина корня к поверхности коронки зуба. Эмалевые призмы имеют жесткую кристаллическую структуру. Органические вещества и вода составляют лишь небольшую часть эмали: около (5,0–5,5)%. Между эмалевыми призмами находятся межпризменные пространства, заполненные неупорядоченными кристаллами гидроксилатапата (матрица) [6].

Современные технологии обработки зуба прежде всего сталкиваются с проблемой эффективного и безболезненного разрушения эмали, защищающей все прочие структуры зуба от внешнего воздействия.

В настоящее время чрезвычайно перспективной является лазерная технология обработки эмали зуба. Наиболее часто используются две лазерные технологии обработки эмали и дентина зуба человека, отличающиеся друг от друга воздействием на тот или иной компонент твердых тканей зуба. Идея первой технологии обработки эмали и дентина зуба заключается в воздействии лазерного излучения на белковые органические компоненты зуба, пик поглощения которых лежит ультрафиолетовой и синей областях оптического диапазона длин волн [7]. Однако в эмали присутствует лишь небольшое количество этого биологического материала. Поэтому для воздействия на эмаль зуба

подобная технология лазерной обработки малоэффективна. Второй способ обработки заключается в воздействии лазерным излучением на другие компоненты зуба – гидроксилapatит  $\text{Ca}_{12}[\text{PO}_4]_3(\text{OH})_2$  и воду. Гидроксилapatит – основной компонент в эмали и дентине, пики поглощения которого лежат в диапазоне (2-10) мкм [8], поэтому для его эффективного удаления подходит излучение туллиевого ( $\lambda=1.96$  мкм), гольмиевого ( $\lambda=2.12$  мкм) и эрбиевого ( $\lambda=2.94$  мкм) лазеров, которое эффективно воздействует на OH-группу гидроксилapatита и воду, а излучение  $\text{CO}_2$ -лазера ( $\lambda=(9-11)$  мкм) эффективно поглощается PO-группами гидроксилapatита и водой, что также позволяет с успехом использовать его для лазерной обработки твердых тканей зуба [9]. Наибольшие успехи в сверлении эмали и дентина достигнуты при использовании Er:YAG лазера ( $\lambda=2.94$  мкм) из-за очень высокого поглощения водой и гидроксилapatитом его излучения [10]. Однако, несмотря на положительный в целом эффект применения лазеров в стоматологии, эффективность удаления эмали практически в два раза уступает эффективности ее удаления традиционным механическим инструментом. В этой связи поиск новых путей, позволяющих увеличить эффективность удаления эмали лазерным излучением, достаточно актуален.

В рамках настоящей работы авторы впервые предприняли попытку увеличения эффективности разрушения эмали зуба человека излучением Er:YAG лазера за счет предварительной или одновременной химической обработки эмали. Химическая обработка в данном случае предполагает использование водного раствора пищевой кислоты с оптимальными кислотностью и температурой для ослабления связей между элементами композита (эмали), а именно для разрушения межпризмных пространств (матрицы) с частичной деградацией эмалевых призм. Показано, что лазер-кислотный способ позволяет более чем в три раза повысить эффективность удаления эмали субмиллисекундными импульсами Er:YAG лазера по сравнению с только лазерной обработкой при аналогичных характеристиках.

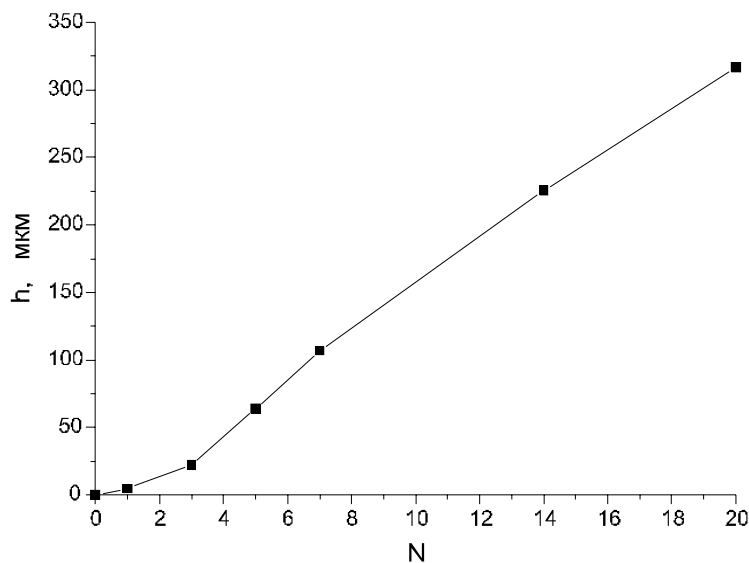
В качестве химического реагента мы использовали водный раствор пищевой лимонной кислоты с  $\text{pH}=1.5$  при комнатной температуре. Для оценки глубины химической модификации эмали мы помещали коронку зуба в водный раствор кислоты и по истечении некоторого времени проводили поперечный распил коронки по направлению от “арех” к “convex” и далее с использованием оптического микроскопа измеряли глубину модифицированного слоя.

Типичные зависимости глубины химически модифицированного слоя и скорости химической модификации от продолжительности воздействия химического реагента на эмаль зуба представлены на рис. 4. Видно, что с течением времени водный раствор кислоты все глубже и глубже внедряется под поверхность эмали. При этом на начальном этапе (до трех суток) скорость модификации ниже (в полтора-два раза), чем при более долгих сроках воздействия. Этот факт может быть связан с тем, что вначале действию кислоты подвергался наиболее прочный наружный слой эмали, содержащий фтор (типичная толщина порядка 10 мкм). После его видоизменения кислота начинала воздействовать на менее прочные глубинные слои эмали, и скорость модификации возрастала, причем, достигнув определенного значения, далее практически не менялась.

В экспериментах по измерению порога лазерного разрушения были использованы свежеекстрагированные интактные зубы человека. Поверхностный слой эмали на половине интактной коронки был химически модифицирован под действием водного раствора лимонной кислоты с  $\text{pH}=1.5$  при температуре  $50^\circ\text{C}$ . Далее был измерен порог лазерного разрушения как минимальная плотность энергии излучения Er:YAG лазера, под действием которой на поверхности зубной ткани начинали происходить видимые изменения. Взаимосвязь между порогом лазерного разрушения эмали и временем кислотного воздействия представлена на рис. 5. Видно, что в определенном диапазоне глубин (времен) модификации величина порога лазерного разрушения ниже порога лазерного

разрушения интактной эмали. Максимальное снижение порога лазерного разрушения эмали наблюдается при глубине модифицированного слоя порядка 25 мкм.

а)



б)

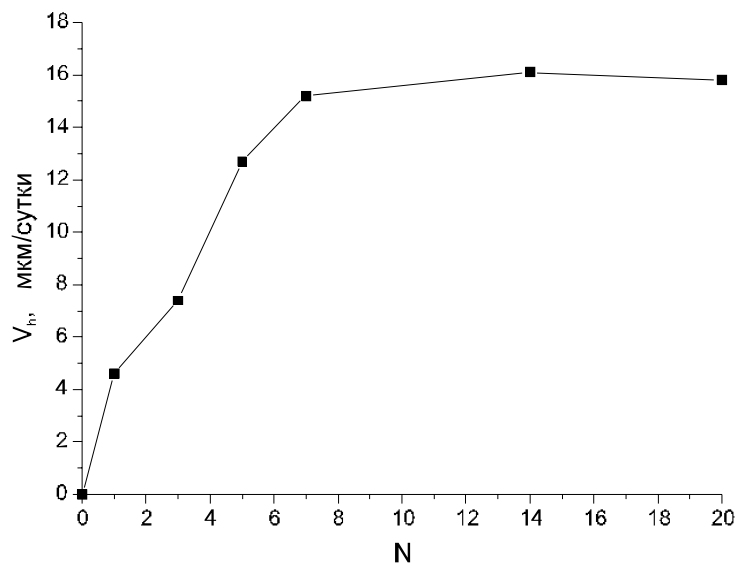


Рис. 4. Зависимость глубины химически модифицированного слоя (а) и скорости химической модификации (б) от продолжительности воздействия химического реагента на эмаль зуба (водный раствор кислоты  $pH=1.5$ )

В экспериментах по исследованию эффективности удаления эмали также были использованы свежеекстрагированные интактные зубы человека. Поверхностный слой эмали на половине интактной коронки был химически модифицирован под действием водного раствора лимонной кислоты на глубину порядка 300 мкм. После модификации образцы помещались в дистиллированную воду и хранились в темном месте при температуре  $+4^{\circ}C$  вплоть до экспериментов, но не более четырех суток. В экспериментах модифицированные образцы подразделялись на две группы. В первой группе модифицированный образец до лазерной обработки в течение суток хранился на открытом воздухе. Во второй группе модифицированный образец извлекался из дистиллированной воды непосредственно перед лазерным воздействием. Таким образом, к моменту лазер-

ного облучения образцы первой группы содержали в пористом модифицированном слое предположительно меньшее количество воды, чем образцы второй группы. Эффективность удаления эмали определялась как отношение удаленного объема эмали к величине затраченной на это лазерной энергии. Лазерная обработка происходила при следующих параметрах излучения:  $\lambda=2.94$  мкм,  $\tau=200\pm 20$  мкс по полувысоте,  $F=1$  Гц, неконтактный режим, энергия лазерного импульса непосредственно на объекте - 0.05 Дж, диаметр светового пятна на поверхности объекта -  $515\pm 60$  мкм (по уровню 0.9 интенсивности). Результаты экспериментального исследования эффективности удаления интактной и модифицированной эмали излучением субмиллисекундного Er:YAG лазера представлены на рис. 6.

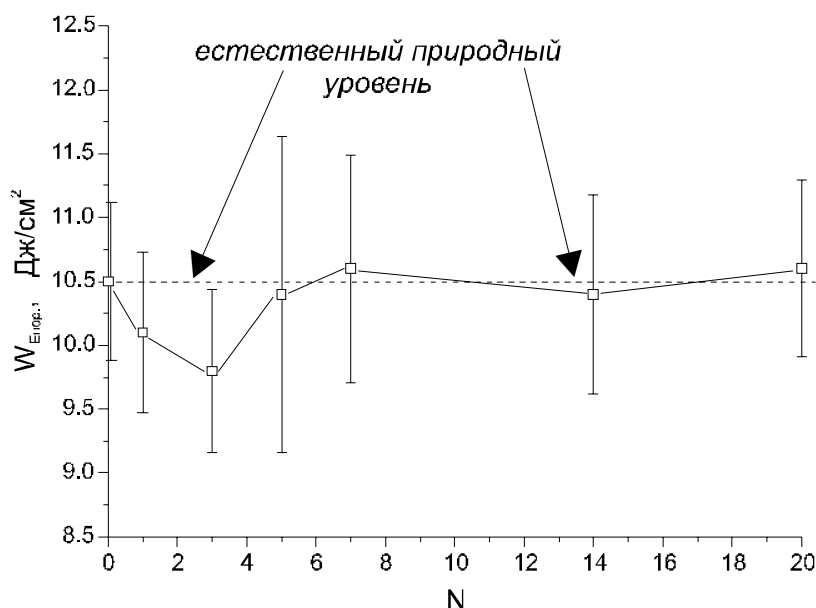


Рис. 5. Зависимость порога лазерного разрушения эмали от времени кислотного воздействия на эмаль водного раствора лимонной кислоты с pH=1.5

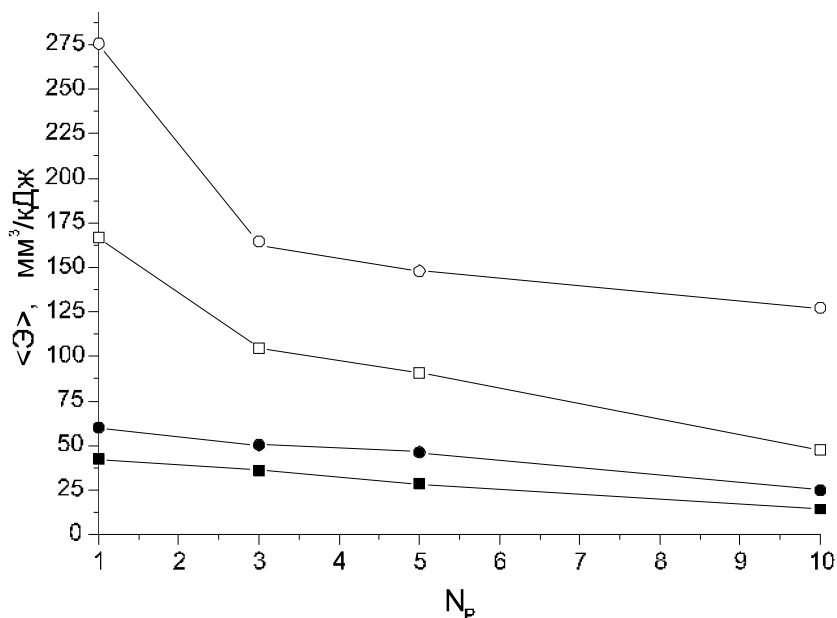


Рис. 6. Зависимость эффективности лазерного разрушения эмали от времени кислотного воздействия на эмаль водного раствора лимонной кислоты с pH=1.5: ■ - "подсушенная" интактная эмаль, □ - "подсушенная" видоизмененная эмаль, ● - "увлажненная" интактная эмаль, ○ - "увлажненная" видоизмененная эмаль



Видно, что для первого лазерного импульса эффективность удаления модифицированного водным раствором лимонной кислоты слоя эмали выше эффективности удаления интактной эмали практически в три раза. Стало очевидно влияние на эффективность удаления содержания в модифицированном слое воды. Так, эффективность удаления эмали для образцов второй группы (облучаемых сразу после их извлечения из емкости с дистиллированной водой) в 1.5 раза выше эффективности удаления эмали для образцов первой группы. С ростом числа импульсов эффективность удаления падает для всех образцов, что может быть связано с увеличением глубины кратера при практически постоянном его диаметре. Рост глубины кратера приводит к снижению плотности энергии на дне кратера за счет смещения плоскости дна кратера относительно плоскости фокусировки лазерного пятна.

Таким образом, показано, что эффективность удаления эмали зуба человека, предварительно модифицированной посредством воздействия водного раствора пищевой лимонной кислоты с  $\text{pH}=1.5$  при температуре порядка  $50^\circ\text{C}$ , излучением субмиллисекундного Er:YAG лазера в три раза превышает эффективность удаления интактной эмали излучением того же лазера. Полученный результат позволяет с оптимизмом констатировать перспективность применения нового метода лазер-кислотного разрушения (предполагающего предварительную или одновременную с лазерным воздействием обработку материала водным раствором пищевой кислоты) композитных материалов (в том числе твердых тканей зуба) в приборостроении и медицине.

### **Применение динамического градиентного отражателя в плоском и неустойчивом резонаторах твердотельного моноимпульсного лазера**

*Пространственно-временные характеристики динамического градиентного отражателя.* Возможность применения ДГО в плоском и неустойчивом резонаторах твердотельных лазеров основана на использовании пространственно-временной зависимости коэффициента пропускания НПВО-модулятора, входящего в состав конструкции ДГО. Известно, что в процессе переключения у этих модуляторов величина зазора между рабочими поверхностями является функцией не только времени, но и координат [11].

Представляет интерес рассмотреть применение ДГО в качестве полностью отражающего зеркала в резонаторе твердотельного лазера. Схема резонатора с ДГО изображена на рис. 7. Похожая схема отражателя предлагалась ранее в качестве устройства, сочетающего свойства модулятора и полностью отражающего зеркала, обеспечивающего неразъюстируемость резонатора [12].

Нетрудно показать, что эффективный коэффициент отражения  $R_{\text{eff}}$ , связывающий интенсивности падающей на отражатель  $I_{\text{in}}$  и отраженной обратно в резонатор  $I_{\text{out}}$  волн, зависит от коэффициента пропускания модулятора  $T$  следующим образом [5]:

$$R_{\text{eff}}=I_{\text{in}}/I_{\text{out}}=4T(1-T).$$

Из данного выражения следует, что максимальное значение  $R_{\text{eff}}=1$  достигается при коэффициенте пропускания модулятора  $T=0.5$ .

На рис. 8 представлены зависимости  $R_{\text{eff}}$  от радиальной координаты  $r$  для различных моментов времени включения модулятора  $t/t_{\text{sw}}$ . Из рисунка видно, что в процессе переключения модулятора радиальная зависимость коэффициента отражения изменяется от квазигауссовой до зависимости, имеющей минимум коэффициента отражения в центре апертуры. В моменты времени 3–4 профиль коэффициента отражения близок к супергауссовому, абсолютное значение коэффициента отражения при этом равно единице.

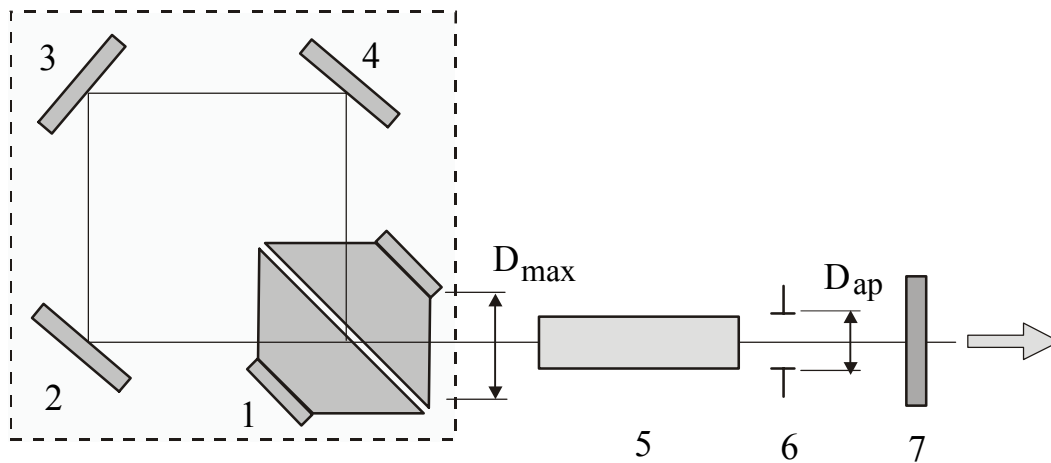


Рис. 7. Схема плоского резонатора с ДГО  
 1 – НПВО-модулятор, 2, 3, 4 – поворотные 100% зеркала, 5 – активный элемент,  
 6 – диафрагма, 7 – выходное зеркало;  $F_{ap} = \frac{D_{ap}}{D_{max}}$  – апертурный фактор.

**Результаты численного моделирования плоского и неустойчивого резонаторов с ДГО.** Для исследования влияния характеристик интерференционного отражателя с НПВО-модулятором на пространственно-энергетические характеристики лазерного излучения была создана модель твердотельного моноимпульсного лазера с ДГО, учитывающая процессы усиления излучения в активной среде, а также процессы дифракции при распространении излучения в резонаторе лазера. Ранее похожая методика использовалась нами при моделировании лазерных резонаторов с градиентными элементами [4, 13].

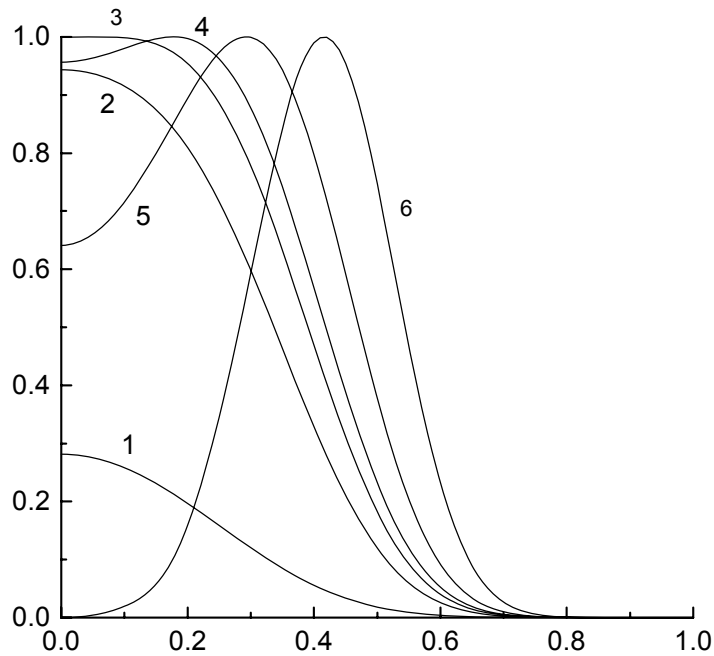


Рис. 8. Зависимости эффективного коэффициента отражения  $R_{eff}$  динамического градиентного отражателя (ДГО) от радиальной координаты, для различных моментов времени переключения ДГО  $t/t_{sw}=0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1.0$  (кривые 1–6 соответственно),  $t_{sw}$  – время полного переключения ДГО,  $r_{max}$  – радиус апертуры

На основе разработанной математической модели резонатора с ДГО проведено численное исследование пространственно-энергетических характеристик излучения моноимпульсной генерации, полученной в плоском и неустойчивом резонаторах при различных значениях коэффициента усиления в активном элементе. Значения энергии генерации, расходимости, диаметра пучка излучения на выходе лазера были получены при изменении числа Френеля  $F_n$  в диапазоне от 2 до 16 и при значениях апертурного фактора  $F_{ap}=0.4, 0.6, 0.8$ , который мы определили как  $F_{ap}=D_{ap}/D_{max}$ , ( $D_{max}$  – диаметр апертуры модулятора,  $D_{ap}$  – радиус апертуры активного элемента). На основании полученных данных было проведено сравнение яркости излучения моноимпульса, полученного в плоском резонаторе и неустойчивом резонаторе с коэффициентами увеличения  $M=1.2$  и  $M=1.5$ . Анализ полученных результатов показал, что яркость излучения генерации существенным образом зависит как от числа Френеля  $F_n$ , которое определялось апертурой активного элемента, установленного в резонаторе, так и от значения апертурного фактора  $F_{ap}$ .

На рис. 9 приведены рассчитанные значения яркости излучения моноимпульса, полученного в резонаторах различных типов при значении  $g_0=10$ . В качестве единицы измерения выбрано максимальное значение яркости излучения  $B_{0m}$ , полученное в плоском резонаторе при  $F_{ap}=0.4$  и  $F_n=2.5$ . При  $g_0=7$  с увеличением  $M=1.2$  яркость излучения резонатора уменьшается по сравнению с плоским резонатором на 10–15 % при  $F_{ap}=0.6, 0.8$  и на 30 % при  $F_{ap}=0.4$ . Для  $M=1.5$  уменьшение яркости составляет 30–40 % для  $F_{ap}=0.8, 0.6$  и более чем 50 % для  $F_{ap}=0.4$ , что можно объяснить как снижением энергии генерации, так и увеличением расходимости.

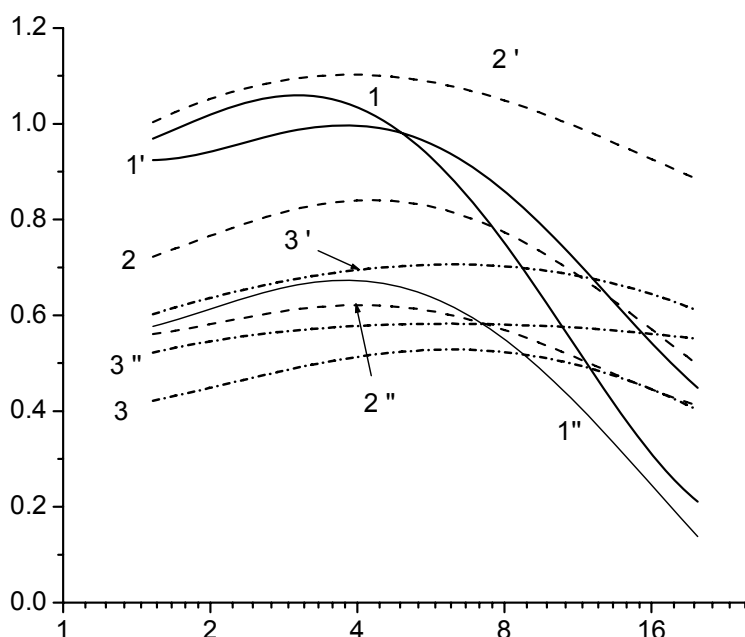


Рис. 9. Зависимость яркости пучка излучения  $B$  от числа Френеля  $F_n$  при коэффициенте усиления активной среды  $g_0=10$  для плоского резонатора (сплошная линия), неустойчивого резонатора с коэффициентами увеличения  $M=1.2$  (штриховая линия) и  $M=1.5$  (штрих-пунктир) и значениях апертурного фактора  $F_{ap}=0.4$  (кривые 1,2,3), 0.6 (кривые 1',2',3'), 0.8 (кривые 1'',2'',3'')

При увеличении коэффициента усиления до 10 наблюдается 10%-ное увеличение максимального значения яркости для  $M=1.2$ . Яркость, полученная при  $M=1.5$ , уменьшается на 50 % для  $F_{ap}=0.4$  и на 30 % для  $F_{ap}=0.6$ . При увеличении  $g_0$  до 14 яркость излучения в плоском резонаторе снижается на 15 %, а в резонаторах с  $M=1.2$  и  $M=1.5$  – более чем на 20 %.

## Заключение

В данной работе впервые предпринята попытка увеличения эффективности разрушения эмали зуба человека излучением Er:YAG лазера за счет предварительной или одновременной химической обработки эмали. Показано, что наличие модифицированного слоя снижает порог лазерного разрушения эмали. Лазер-кислотный способ позволяет более чем в три раза повысить эффективность удаления эмали субмиллисекундными импульсами Er:YAG лазера по сравнению с обычной лазерной обработкой при аналогичных характеристиках. Полученный результат позволяет с оптимизмом констатировать перспективность применения нового метода лазер-кислотного разрушения композитных материалов (в том числе твердых тканей зуба) в приборостроении и медицине.

Также разработана численная модель резонаторов моноимпульсного лазера с динамическим градиентным отражателем (ДГО), построенным на основе модифицированного интерференционного отражателя, в конструкции которого использован НПВО-модулятор. Показано, что яркость излучения генерации моноимпульса существенным образом зависит как от числа Френеля  $F_n$ , которое определялось апертурой активного элемента, установленного в резонаторе, так и от значений апертурного фактора  $F_{ap}$ , равного отношению диаметра апертуры активного элемента к диаметру апертуры модулятора. Наибольшее абсолютное значение яркости достигается в резонаторе с коэффициентом увеличения  $M=1.2$  при коэффициенте усиления активной среды 10 и значении апертурного фактора 0.6.

## Литература

1. De Silvestri S., Laporta P., Magni V., Svelto O. // Opt. Commun. 1988. V.67. №3. P.229–232.
2. De Silvestri S., Magni V., Taccheo S., Valentini G. // Opt. Lett. 1991. V. 16. №9. P. 642–644.
3. Bostanjoglo G., Weber H. // Laser und Optoelektronik. 1996. V. 28. №4. P. 51–61.
4. Аладов А.В., Беззубик В.В, Белашенков Н.Р и др. // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. №3. Т.41. С.53–57.
5. Назаров В.В., Парахуда С.Е., Храмов В.Ю. Особенности использования динамического градиентного отражателя в резонаторе твердотельного моноимпульсного лазера // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т.48. №1. С.49–53
6. Грошиков М.И. Профилактика и лечение кариеса зубов. М.: Медицина, 1980.
7. Goldaman L., Gray JA, Goldman J., Goldman B., Meyer R., Effects of laser impact on teeth. // JADA 1965;70:601-606.
8. HansJ. Koort, Matthias Frentzen, YAG-lasers in Restorative Dentistry. A histological investigation.// SPIE. Vol. 1643. P.403-405.
9. Keller U, Lasers in dentistry. Future trends in biomedical applications of lasers. // Proc.SPIE. 1991; 1424: 127-133.
10. Walsh JT, Deutsch TF., Er:YAG laser ablation of tissue: measurement of ablation rates. // Lasers Surg Med. 1989; 9; 327-337.
11. Харрик М. Спектроскопия внутреннего отражения, М.: Мир, 1970. 336 с.
12. Парахуда С.Е., Корчагин А.А. Устройство для модуляции добротности резонатора. / Патент на полезную модель № 11630 от 16.10.99.
13. Vyacheslav B. Karasev, Vyacheslav V. Nazarov, Eduard S. Putilin, Pavel N. Fimin, and Valery Yu. Khramov // Proceedings of SPIE. 2001. V.4353. P.51–58.

## ПУТИ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ В РЕАЛЬНОМ РЕЖИМЕ ВРЕМЕНИ

В.М. Мусалимов, Ю.В. Лисицын, М.М. Трухин

Представлены результаты идентификации динамики процесса циклического трибологического взаимодействия двух плоских предварительно обработанных поверхностей. Наблюдаемые входные и выходные данные получены на оригинальной трибометрической системе, работающей в реальном режиме времени и оснащенной компьютером со всеми необходимыми пакетами прикладных программ. Показано, что динамические системы последовательно эволюционируют по соответствующим фазам: аperiodическое звено – колебательное звено с демпфированием – консервативное звено. Установлено, что при эволюционировании динамической системы изменяются коэффициенты демпфирования и собственные частоты, в результате чего оказалось естественным ввести управляющий параметр динамической системы, следуя за изменениями которого, мы обнаруживаем бифуркацию Хопфа. Установлена корреляция между эволюцией качества поверхности и эволюцией динамической системы трущихся поверхностей.

Цель работы состояла в проведении серии экспериментов по исследованию эволюции трибологического взаимодействия трибопар в режиме трения скольжения; в проведении анализа взаимодействия на протяжении всего цикла экспериментальных работ с использованием компьютерных технологий, предоставляемых пакетом Identification Matlab; в осуществлении синтеза нелинейной динамической системы, соответствующей исследуемому процессу. В качестве экспериментальной базы была задействована трибометрическая система «Трибал» [1], которая включает в себя нижнюю платформу с закрепленным на ней образцом трибопары. Входом динамической системы трущихся поверхностей являются циклические возвратно-поступательные перемещения нижней платформы. Выходом является динамическая составляющая силы трения, которая регистрируется при фрикционном движении контробразца, закрепленного на верхней платформе. Для обеспечения физической реализуемости системы и ее идентификации было принято, что на каждом из интервалов времени система может быть представлена моделями линейных систем управления, т.е. проводится так называемое модельное сшивание пространства состояний (МСПС). Далее также было принято, что эволюция динамической системы определяется эволюцией качества трущихся поверхностей. В процессе испытаний систематически проводились оценки динамических моделей, соответствующих процессу трения-изнашивания; на каждом из этапов идентифицировались две системные характеристики: импульсная переходная и единичная переходная функции.

Систематизированные результаты исследований, проведенных с образцами трибопар с характеристиками: сплав CuAl10Ni, плотность  $\rho = 7600 \text{ N/M}^3$ , твердость по Бринеллю HB=200 – представлены на рис. 1. Здесь в строке «переходные процессы фаз» приведены характерные единичные переходные функции, которые идентифицированы моделями в пространстве состояний

$$dx/dt = Ax + Bu,$$

$$y = Cx + Du,$$

где  $x$  – вектор состояния;  $u$  – вектор входа;  $y$  – вектор выхода;  $A, B, C, D$  – четверка матриц.

Во второй строке рисунка представлены соответствующие динамические модели. Отметим, что каждой из фаз соответствуют свои значения коэффициентов демпфирования и собственных частот колебаний. На рис. 2, а показаны зависимости коэффициентов демпфирования  $n$  (кривая 1) и частот собственных колебаний  $k$  (кривая 1), т.е. параметров сопротивления, от реализации фазы процесса. По завершении каждой из фаз в базовых областях поверхности трибопар снимались профилограммы с целью определения качества поверхности. При этом использовались ППП Wavelet (Matlab).

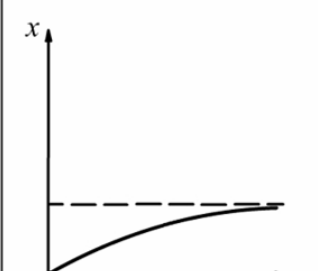
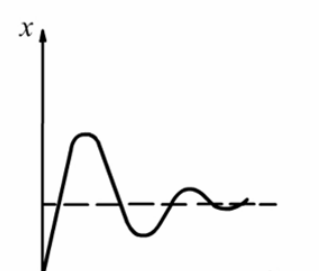
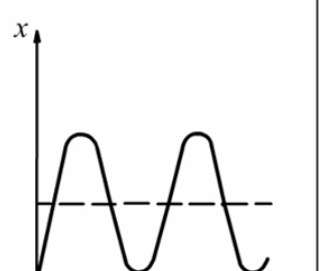
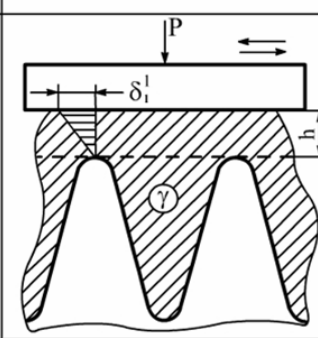
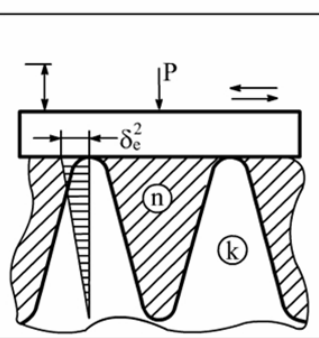
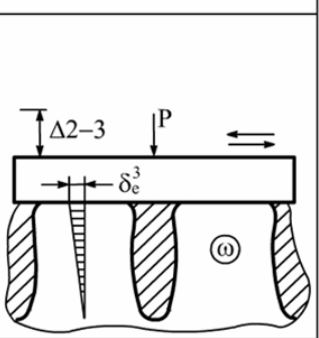


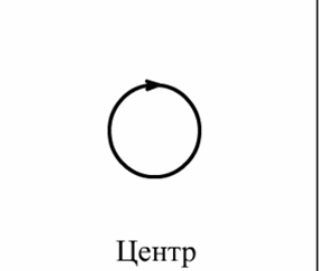
Переходные процессы фаз	 Начальная фаза (1)	 Промежуточная фаза (2)	 Заключительная фаза (3)
Модели фаз	$\dot{x} + \gamma x = g(t)$	$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2x = g(t)$	$\ddot{x} + \omega^2x = g(t)$
Физика фаз			
Особые точки фаз	 Устойчивый узел	 Устойчивый фокус	 Центр
Эволюция матриц линейных систем	$\begin{pmatrix} -\gamma & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k^2 & -2n \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{pmatrix}$

Рис. 1. Эволюция динамических характеристик объекта «трущиеся поверхности»

Анализ экспериментальных данных позволил следующим образом объяснить «физику фаз» (третья строка рис. 1). В начальной фазе в контакт включены наружные поверхностные слои, состоящие из загрязнений, адсорбированных газов и окислов. Здесь трибологическая характеристика определяется в основном коэффициентом демпфирования слоя  $\gamma$  (заштрихованная область), а сам слой имеет толщину  $H$ . Кроме того, его продукты заполняют впадины между высотами профиля поверхности, а упругость материала профиля в этой фазе играет минимальную роль. При переходе ко второй фазе, когда от наружных поверхностных слоев осталась функционировать только ее часть между впадинами, включается в сопротивление упругая составляющая материала профиля поверхности (собственная частота колебаний  $k$ ), а вязкое сопротивление характеризуется изменившимся коэффициентом демпфирования  $n < \gamma$ . Наконец, в за-

ключительной фазе профили поверхности становятся сдеформированными с упрочнением, а остатки поверхностного слоя не оказывают демпфирующего действия, и все сопротивление определится изменившейся упругой составляющей упрочненного материала профиля поверхности  $\omega > k$ . Каждой из фаз сопоставляется определенная динамическая система, которая характеризуется особыми точками (предпоследняя строка рис. 1); здесь же (последняя строка рис. 1) представлена эволюция матриц динамических систем.

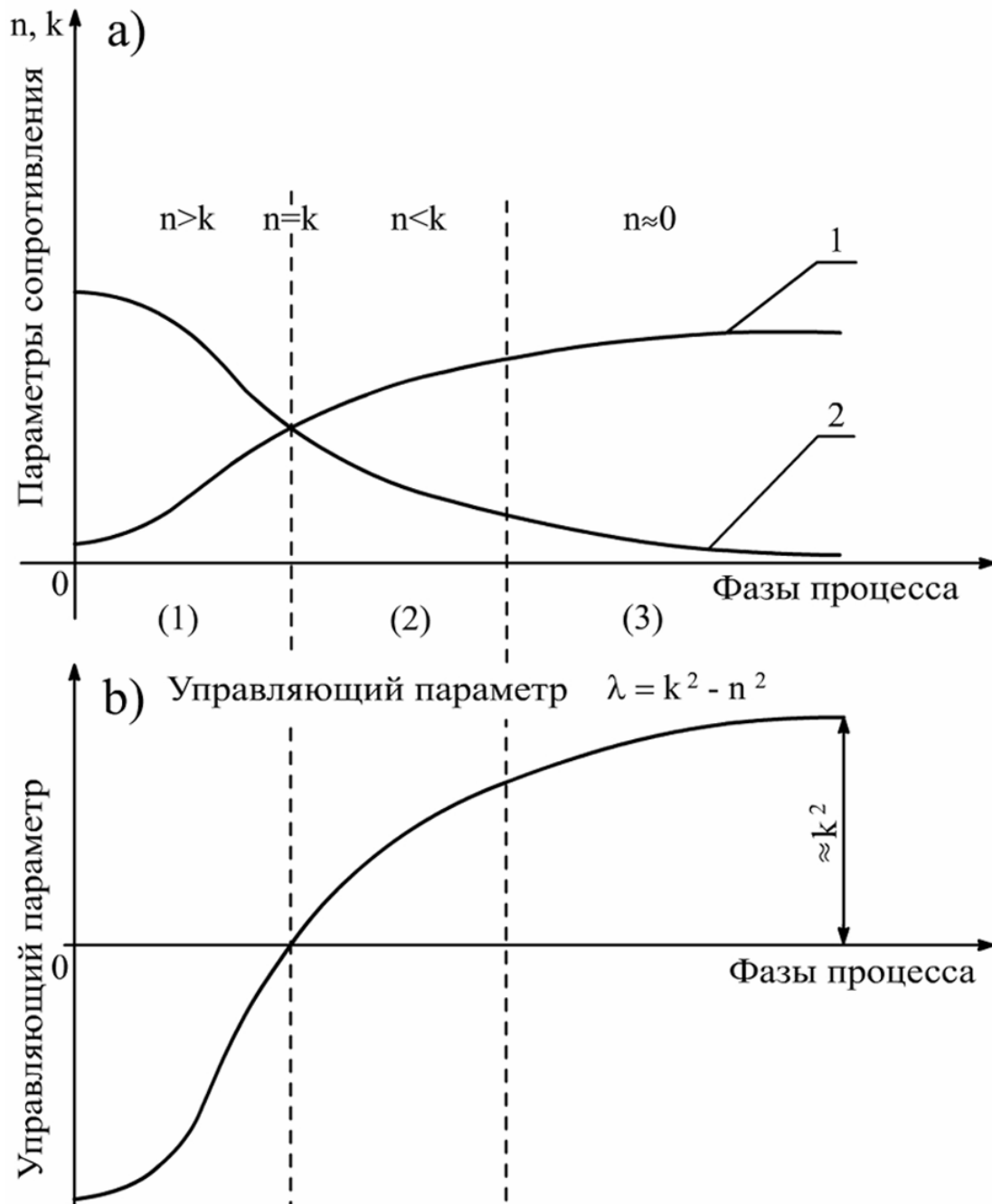


Рис. 2. Зависимости коэффициентов демпфирования и частот собственных колебаний объекта «трущиеся поверхности» от реализации фазы процесса

Введем естественный параметр  $\lambda = k^2 - n^2$  (рис.2, b). Сопоставим значения параметра с особыми точками фаз: при  $\lambda < 0$  мы обнаруживаем точку притяжения (в линейных системах управления это апериодическое звено); далее, на границе 1-ой и 2-ой фаз  $n = k$  – это точка бифуркации Хопфа; затем следует устойчивый фокус при  $\lambda > 0$  (в ли-

нейных системах управления это колебательное звено); наконец, по завершении 3-ей фазы процесса наблюдается центр (консервативное звено). Таким образом, на основе МСПС мы приходим к нелинейной динамической системе

$$dr/dt = \lambda r - r^3 \Leftrightarrow dr/dt = -d/dt(V(r; \lambda)),$$

что соответствует катастрофе сборки [2]:

$$V(r; \lambda) = \lambda r^2/2 + r^4/4.$$

В свою очередь, потенциальная функция связана с не зависящей от времени вероятностной функцией распределения:

$$P(r; \lambda) = N \exp(-V(r; \lambda)/D),$$

где  $N$  – константа нормализации;  $D$  – коэффициент диффузии.

Теперь можно синтезировать силу трения:

$$F_H = \Omega [(x - y)^2 - \lambda](dx/dt - dy/dt).$$

Здесь нижний индекс показывает, что трение имеет бифуркационный характер, а его «адрес» – бифуркация Хопфа;  $\Omega$  – коэффициент сопротивления. Таким образом, изложенный подход позволил показать, как возникают внутренние степени свободы, когда ставшие неустойчивыми фокусы выпускают круговые притягивающие орбиты (дополнительное измерение) с радиусом  $\sqrt{\lambda}$  – это масштаб явления, позволяющий учитывать внутренние вращения частиц граничных слоев трибопар.

Модельная система дифференциальных уравнений [3], таким образом, определяется наличием массы контртел  $m_1$  и  $m_2$ , жесткостью пружин  $c_1$  и  $c_2$ , координатами  $x$  и  $y$ , кинематическим возбуждением  $x_0 \sin(pt)$ , силой трения  $F_H$ :

$$m_1 d^2x/dt^2 = -F_H + c_1(x_0 \sin(pt) - x);$$

$$m_2 d^2y/dt^2 = -F_H - c_2y.$$

Эта система уравнений для заданных амплитуд  $x_0$  и частот возбуждения  $p$  реализована в ППП Matlab-Simulink и отразила все фазы эволюции.

### Заключение

Установлено, что процессы трибологического взаимодействия трущихся поверхностей описываются моделями нелинейных динамических систем. Установленная корреляция между эволюцией динамической системы и эволюцией качества трущихся поверхностей является базой автоматизации контроля качества трущихся поверхностей процесса [3]. Функция плотности вероятности дает возможность оценивать вероятность перехода от процесса трения к процессу изнашивания.

### Литература

1. Мусалимов В.М., Ларичкин М.П., Аникеенко А. Д. Трибометрическая система идентификации динамики процесса циклического изнашивания. / Труды шестой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем». Ч.2. ИПМаш РАН. СПб, 2003. С.52–59.
2. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Кн.1. М.: Мир, 1984. 350с.
3. V.M.Musalimov, Y.V.Lisitin, S.V.Orlov. Dynamic characteristics and quality surveillance of rubbing surfaces. // Proceedings ICTAM04, Waschawa, 2004, s.150-153.



# ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОГО РЕЛЬЕФНОГО МОДУЛЯТОРА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

А.Л. Дмитриев

Описан лабораторный макет рельефного модулятора, управляемого оптическими сигналами, регистрируемыми решеткой фотоприемников. Сформулированы основные технические проблемы разработки рельефного модулятора для использования в медицине – в сенсорном устройстве восприятия оптического изображения слепыми, а также в терапии

Рельефный оптический модулятор (РМ) представляет собой отражающую свет поверхность, форма которой изменяется под действием внешнего электрического управляющего сигнала. Такие устройства обычно применяются в адаптивной оптике при создании деформируемых отражателей (адаптивных зеркал) [1]. Число дискретных элементов в таких РМ достигает нескольких десятков – сотен, а амплитуда деформации обычно не превышает 1 мкм. Электрически и оптически управляемые РМ находят применение и в системах оптической обработки информации – в устройствах ввода информации в оптический процессор и в преобразователях некогерентного оптического изображения в когерентное [2, 3]. Эти РМ являются разновидностью пространственно-временных модуляторов света с размерами элементарной отражающей свет ячейки около 30–50 мкм и амплитудой деформации поверхности величиной до 0.3–0.5 мкм.

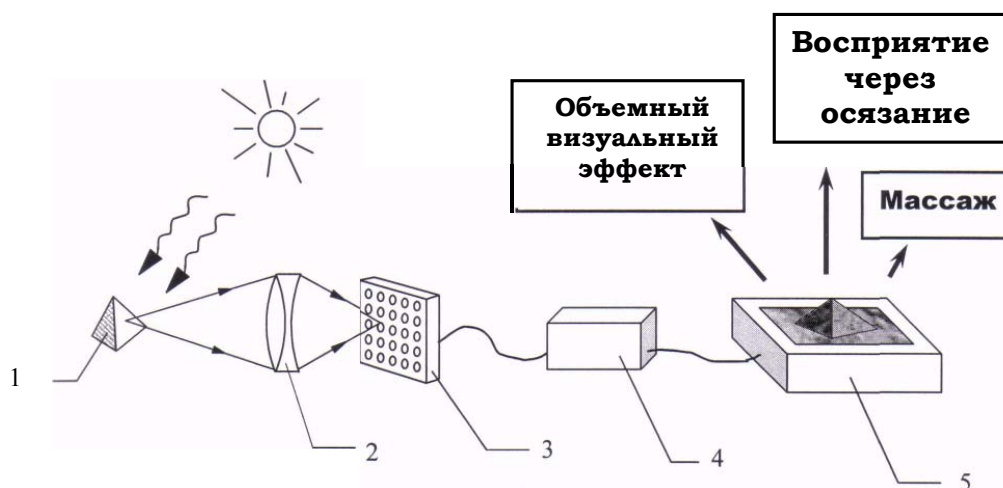


Рис. 1. Принцип действия оптически управляемого РМ. 1 – объект, 2 – оптическая система, 3 – решетка фотоприемников, 4 - усилитель и преобразователь сигналов, 5 – рельефный модулятор

Одной из актуальных современных технических проблем приборостроения является разработка рельефных модуляторов для медицинского применения – в устройствах восприятия изображений слепыми и людьми с пониженным зрением. Действие таких сенсорных систем основано на восприятии информации об объекте посредством осязания – функции организма, по своей информативности занимающей третье место после зрения и слуха [4]. Принцип использования РМ в таких системах восприятия поясняется на рис. 1. Оптическое изображение объекта 1 преобразуется в пространственный рельеф рабочей поверхности РМ 5. Прямой контакт РМ с участком кожи человека, например ладони, при соответствующем обучении обеспечивает восприятие достаточно большого объема видеоинформации об объекте. При этом высота рельефа (амплитуда деформации участка поверхности РМ) пропорциональна яркости соответствующего участка двумерного изображения объекта.

К рельефным модуляторам медицинского назначения предъявляются следующие требования:

- амплитуда деформации поверхности до 500–1000 мкм,
- поперечные размеры элементарной ячейки около 1–2 мм,
- число элементарных ячеек – несколько сотен – тысяч,
- размеры рабочей поверхности РМ в пределах 80–150 мм,
- время срабатывания приводов РМ не более 1 с.

На кафедре ТТОЭ СПбГУИТМО выполнена экспериментальная разработка лабораторного РМ медицинского назначения и изготовлен действующий макет семиканального РМ, управляемого светом, с большой амплитудой деформации рабочей поверхности [5].

Анализ различных физических способов создания деформируемых поверхностей – акустического, электро- и магнитооптического, пьезоэлектрического, термического – показал, что большие, величиной порядка десятков–сотен мкм, амплитуды деформации практически может обеспечить РМ в виде решетки электромагнитных приводов. Электрический управляющий сигнал на приводы РМ поступает с выхода решетки фотоприемников, на которую проецируется оптическое изображение объекта. Блок-схема включения таких фотоприемников показана на рис. 2.

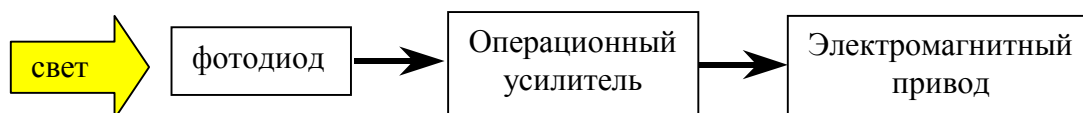


Рис. 2. Блок-схема цепи управления приводом

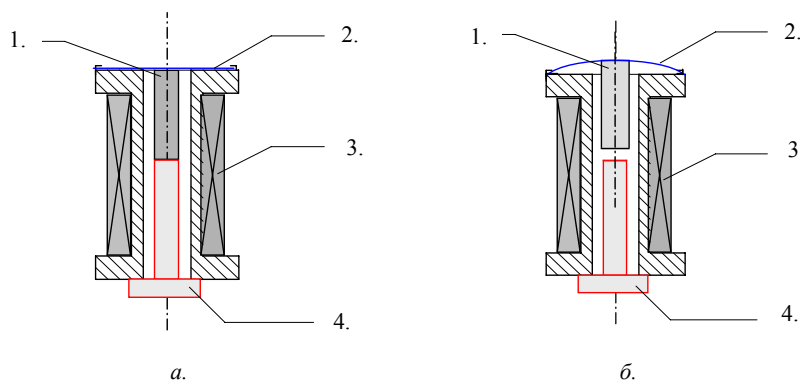


Рис. 3. Устройство и действие электромагнитного привода РМ: 1 – намагниченный сердечник (феррит), 2 – эластичная мембрана, 3 – катушка электромагнита, 4 – юстировочный винт. а – без сигнала, б – при подаче сигнала.

Устройство и работа электромагнитного привода показаны на рис. 3. Намагниченный сердечник из феррита в неоднородном магнитном поле, создаваемом электромагнитом, смещается и деформирует участок эластичной мембраны, образующей рабочую поверхность РМ. В эксперименте использованы семь приводов с параллельно действующими оптоэлектронными каналами управления (рис. 2), связанными с решеткой фотодиодов типа ФД-256. Спротивлением нагрузки электронных усилителей величиной 22 Ом являлись катушки электромагнитов приводов, содержащие 800 витков провода. При максимальном токе через катушку 200 мА величина локального прогиба участка мембраны, изготовленной из полимерной пленки (лавсан), достигала 40 мкм. Диаметр сердечника 2 мм, длина 8 мм, постоянная времени срабатывания привода 0,2 мс. Деформации мембраны соответствовали яркости выборочных участков изображения, проектируемого на матрицу фотоприемников, расположенных геометрически подобно приводам РМ. Внешний вид макета оптически управляемого РМ показан на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид макета оптически управляемого РМ

В результате выполнения комплекса экспериментов на макете установлено, что создание практического РМ медицинского назначения требует решения двух наиболее важных технических задач. Во-первых, необходима разработка электромагнитного привода РМ, действующего по принципу вентильного механизма, связанного с внешним источником энергии, например, пневматического либо гидравлического типов. При этом энергопотребление электромагнитного привода минимально, и при количестве элементов РМ порядка нескольких сотен – тысяч общая потребляемая мощность устройства останется в разумных пределах. Во-вторых, описанная параллельная оптоэлектронная система управления приводами целесообразна лишь при сравнительно небольшом, порядка нескольких десятков, числе элементов РМ. Для создания РМ, используемого в практических высокоинформативных системах восприятия изображений, необходимо разработать устройство преобразования сигналов с выхода обычной компактной видеокамеры (например, на основе ПЗС), сигнал которого будет управлять соответствующим приводом многоэлементного РМ. Эти задачи при современном уровне техники и технологии вполне разрешимы и в перспективе должны обеспечить разработку рельефного модулятора медицинского применения, который найдет использование не только в системах восприятия изображений, но и в терапии (точечный массаж и др.).

### Литература

1. Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика, М. Радио и связь, 1990
2. Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В. Пространственные модуляторы света, М.: Радио и связь, 1987
3. Информационная оптика. / Под ред. Евтихеева Н.Н. М.: Изд. МЭИ, 2000
4. Ананьев Б.Г., Веккер Л.М., Ломов Б.Ф. Осознание в процессах познания и труда. М.: АПН РСФСР, 1959
5. Казакевич М.С., Дмитриев А.Л. Макет оптически управляемого рельефного пространственного оптического модулятора. // Оптический журнал. 2003. Том 70. № 11. С. 52–54.

# РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТАХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

Э.Д. Панков, Л.Ф. Порфирьев, И.А. Коняхин, А.Н. Тимофеев, К.Н. Чиков

В статье рассматриваются итоги выполнения НИР «Исследование адекватности моделей оптико-физических явлений в природных и антропогенных объектах и информационных оптико-электронных системах спектрального мониторинга», выполняемой в 2004 году по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации.

Оптическое излучение имеет большое количество собственных параметров (амплитуда, частота, фаза излучения, степень поляризации, положение плоскости поляризации и т.д.), которые несут практически исчерпывающий объем информации о свойствах исследуемых объектов. Поэтому для комплексного контроля состояния различных объектов в промышленности, транспорте и связи широко используются оптико-электронные системы. Однако в настоящее время не существует детально разработанной теории связи состояния объекта с параметрами оптического излучения, а также обоснованной методологии рационального выбора измеряемых параметров и необходимого объема их измерений. Для создания такой теории и методологии необходимо иметь физические и математические модели как всей системы в целом, так и ее элементов, в достаточной степени адекватные реальности. Проведение фундаментальных исследований в области оптимизации моделей различных систем, а также критериев адекватности моделей реальным объектам контроля является актуальной проблемой, имеющей приложение в метрологии и других отраслях науки и техники (МКИ: G01B, ГРНТИ: 29.31.41, 59.14.23).

Целью работы является создание адекватных моделей оптико-физических явлений для разработки принципов построения и методов расчета информационно-измерительных оптико-электронных систем, средств спектрального мониторинга, приборных комплексов для измерения и контроля параметров и пространственной ориентации объектов наблюдения или исследования. Предлагаемые фундаментальные исследования находятся в русле перспективных направлений развития науки и техники, например, прогнозирования экологического состояния окружающей среды, предотвращения аварийных ситуаций на потенциально опасных объектах и т.д. В последние годы исследования проводились по нескольким направлениям:

- анализ адекватности моделей в видеоспектрометрических системах при спектральном мониторинге [1];
- анализ адекватности моделей в оптико-электронных системах обнаружения крупногабаритных объектов при их спектральной импульсной оптической локации [2];
- анализ адекватности моделей систем позиционирования с оптическим пучком в виде композиции пространственных ступенчатых функций и матричной организацией фотоприема [3];
- анализ адекватности моделей оптико-электронных приборов и систем при математическом моделировании на ЭВМ;
- рассмотрение предпосылок формирования теории инвариантности оптико-электронных приборов и систем [4].

## Результаты анализа обобщенных моделей видеоспектрометрических систем при спектральном мониторинге

Современные методы моделирования оптических систем спектральных приборов при их проектировании и расчете позволяют в полной мере удовлетворить требованиям

адекватности измерительного процесса и измеряемых оптико-физических явлений. Следовательно, с точки зрения проектирования и расчета приборов, создающих изображение, использующиеся методы проектирования и расчета позволяют за счет аппаратных и программных средств ввести все необходимые коррективы.

Однако для введения необходимых коррективов в реальной работе по объекту нужно иметь некоторую априорную информацию об исследуемом объекте и пропускании тракта «прибор - объект» [5]. Свойства исследуемого объекта обычно известны априори и могут быть учтены заранее, тогда как свойства атмосферы чрезвычайно изменчивы как во времени, так и по пространству, поэтому моделирование атмосферы как передающего тракта имеет огромное значение при желании получить практически воспроизводимые результаты дистанционного мониторинга, адекватные происходящим на объекте оптико-физическим процессам.

Необходимо выявить основные факторы, влияющие на получение адекватного состоянию объекта его коэффициента спектральной яркости, и разработать методы их учета. Поскольку результаты мониторинга в количественном отношении будут сильно зависеть от состояния атмосферы, ее состава, количества аэрозолей и высоты Солнца даже при точно проведенной калибровке по длинам волн и ее стабильности во времени, то устанавливается информативный параметр, включающий в себя наибольшее количество переменных обобщенной модели.

Единственным комплексным информативным параметром, который включает в себя все видимые к настоящему моменту переменные, является суммарный измеряемый поток, попадающий на входное отверстие спектрального прибора. Поэтому учет вариаций параметров попадающего на фотообразователь потока – главное условие получения приборной базы и программного обеспечения, адекватных происходящим оптико-физическим явлениям.

В области применения информационных оптико-электронных систем спектрального мониторинга особое значение занимают системы в УФ области спектра [6, 7], функционирующего без спигового вращения носителя. Причем решение ряда фундаментальных задач космического природоведения можно обеспечить только с использованием бортовых информационных оптико-электронных систем спектрального мониторинга. Поэтому для разработки бортовых оптико-электронных приборов спектрального мониторинга в оптическом диапазоне [6] необходимо создание общей теории моделирования, исходящей из физической природы подобных явлений и их инвариантности. Также очевидна необходимость построения обобщенной модели, изучение которой и перенос полученных сведений на моделируемый объект являются достаточно серьезными задачами.

### **Результаты анализа оптико-электронной системы обнаружения крупногабаритных объектов при их спектральной импульсной оптической локализации в условиях инерционного приема с квазиоптимальной фильтрацией отраженных сигналов**

Инерционный прием сигналов характерен для импульсных оптико-электронных систем (ИОЭС), использующих фотоприемники с инерционным фотоприемным контуром, образованным емкостями фотоприемника, монтажа, первого каскада предварительного усилителя и сопротивлением нагрузки фотоприемника. Для решения задачи обнаружения сигналов в условиях инерционного приема система обнаружения может быть построена с использованием оптимальных фильтров [8].

В связи со сложностью практической реализации оптимальных фильтров на обобщенной модели исследуется возможность использования квазиоптимальных фильтров, обеспечивающих заданные характеристики обнаружения отраженных от крупногабаритных объектов сигналов. Кроме того, на обобщенной модели проводится

оптимизация параметров излучения в оптико-электронных системах обнаружения крупногабаритных объектов при их спектрально-импульсной оптической локализации при применении фотоприемников с инерционным фотоприемным контуром и квазиоптимальных фильтров отраженных сигналов. Проводится также анализ методических погрешностей, неизбежно присущих выбранной математической модели и применяемым преобразованиям, приборных погрешностей, определяемых как несовершенством аппаратных средств, так и влиянием внешних факторов.

Преимуществом инерционного приема отраженных от крупногабаритных объектов сигналов является относительно слабое влияние фоновой засветки на величину требуемой энергии источника оптического излучения.

В оптико-электронных системах обнаружения крупногабаритных объектов при их спектрально-импульсной оптической локализации применение фотоприемников с инерционным фотоприемным контуром и квазиоптимальных фильтров отраженных сигналов приводит к проигрышу по энергетическому критерию.

Для уменьшения величины требуемой энергии источника оптического излучения при инерционном приеме с квазиоптимальной фильтрацией отраженных сложных сигналов предпочтительным является использование более длительных зондирующих импульсов оптического излучения [2].

При разработке и проектировании измерительных оптико-электронных систем обнаружения крупногабаритных объектов (КГО) возникает необходимость в знании амплитудно-временной структуры отраженных от КГО сигналов. Структура отраженных сигналов зависит от большого количества параметров, и ее определение в общем случае представляет собой довольно сложную задачу.

В результате исследований получены критерии выбора формы представления реальных объектов, определены связи импульсных характеристик плоских поверхностей с импульсными характеристиками КГО в целом при различных ракурсах облучения и предложена методика использования этих характеристик для определения амплитудно-временной структуры сигналов, отраженных от КГО при облучении импульсами различной формы и длительности.

Доказано, что при определении амплитудно-временной структуры сигналов, отраженных от КГО при их спектрально-импульсной оптической локализации представление реальных объектов в виде совокупности прямоугольников значительно упрощает получение математических моделей для расчета импульсных характеристик рассматриваемых объектов, причем полученные выражения для импульсных характеристик плоских поверхностей позволяют рассчитать импульсные характеристики этих объектов в целом при различных ракурсах облучения.

Получена связь между импульсными характеристиками объектов и амплитудно-временной структурой сигналов, отраженных от КГО при облучении импульсами различной формы и длительности.

### **Основные результаты исследования адекватности модели системы с оптическим пучком в виде композиции пространственных ступенчатых функций и матричной организацией фотоприема**

Частный случай спектрально-импульсного мониторинга – это мониторинг положения крупногабаритных объектов и его частей. Предложен простой и эффективный способ структуризации оптического пучка на основе использования распределений оптической энергии, описываемых в пространстве предметов оптической системы композицией пространственных ступенчатых функций Хевисайда, и рассмотрено образование равносигнальных поверхностей, линий и точек [9]. Предложен базовый метод извлечения измерительной информации, заключающийся в отображении векторов наблюдения на пространство  $F$  непрерывных аппроксимирующих функций, определенных на про-

пространстве  $X \in X$  координат контрольного элемента, с последующим решением уравнения относительно  $X$  с целью определения точечной оценки  $\xi_0$  координаты в пространстве  $X$ . Реализация базового метода предложена на основе аппроксимации по методу наименьших квадратов в форме оценки коэффициентов линейной комбинации элементов пространства  $F$ . Нахождение интервальной оценки  $[X_{\min}; X_{\max}]$  предложено выполнять методом вариации значений коэффициентов линейной комбинации в пределах, определенных для них при заданной вероятности доверительных интервалов.

При сравнении степени влияния факторов, определяющих погрешность контроля смещений в обобщенной модели системы с оптическим пучком в виде композиции пространственных ступенчатых функций и матричной организацией фотоприема, целесообразно разделить вероятных результатов воздействия как с позиции смещения точечной оценки, так и с точки зрения расширения доверительного интервала.

На модели системы с оптическим пучком в виде композиции пространственных ступенчатых функций и матричной организацией фотоприема показано, что применение метода хроматической разности с оптической или электронной компенсацией позволит полностью исключить в реализованных приборах влияние рефракции для среды с постоянными градиентами температуры по дистанции или ослабить ее влияние для реальной среды [3, 10].

Методика экспериментального исследования метрологических характеристик физических моделей в новом поколении систем с оптическим пучком в виде композиции пространственных ступенчатых функций позволяет эффективно оценивать составляющие суммарной погрешности, последовательно увеличивая порядок модели.

Предложенный унифицированный математический аппарат для исследования метрологических характеристик физических моделей систем с оптическим пучком в виде композиции пространственных ступенчатых функций удобен при программировании на языках, допускающих блочную структуру исходного модуля, и предоставляет возможность решения задачи на транспьютерной сети.

### **Результаты исследования оптико-электронных приборов и систем математическим моделированием на ЭВМ**

На практике часто аналитическое решение той или иной задачи исследования невозможно либо сопряжено со значительными математическими трудностями. В то же время организация достоверных физических экспериментов зачастую требует существенных материальных и временных затрат.

Методы математического цифрового моделирования изучаемых явлений занимают промежуточное положение между чисто аналитическими и экспериментальными методами научных исследований. Математическое моделирование на ЭВМ, хотя и не заменяет физический эксперимент, обладает, тем не менее, рядом известных достоинств: универсальное, гибкое, экономичное и весьма эффективное средство воспроизведения сложных явлений, а также алгоритмов обработки информации в оптико-электронных приборах и системах.

Особенность входных воздействий и процессов, протекающих в ОЭПиС, – их случайный, вероятностный характер. Поэтому одна из характерных задач математического моделирования заключается в формировании различного рода случайных процессов  $n(t)$  или случайных полей  $h(x,y,t)$ , адекватных реальным временным, пространственным или пространственно-временным сигналам и помехам.

Другая задача - моделирование композиции сигнала и помехи  $\{S(x,y,t); h(x,y,t)\}$  импульсных  $g(x,y,t)$  и передаточных  $W(j\omega_x, j\omega_y, j\omega)$  характеристик отдельных звеньев ОЭП, а также рабочих алгоритмов обработки сигналов.

Доказана возможность компьютерного синтеза нормальных случайных одномерных процессов по их корреляционной функции с использованием разработанных эффективных алгоритмов с требуемой достоверностью.

При синтезе процесса методом разложения в ряд Фурье с установленной погрешностью возможно использование только случайного распределения фазы составляющих гармоник при их детерминированных амплитудах.

Разработана методика синтеза двумерных случайных процессов по их корреляционной функции с использованием гипотезы о разделимости ее переменных.

Проанализирована адекватность синтезированного поля и получены закономерности распределения по полю методической погрешности моделирования.

Доказано, что использование модели с периодической повторяемостью области реализации по пространству позволяет уменьшить погрешность синтеза двумерного случайного процесса, хотя не позволяет произвольно расширять область моделирования в процессе синтеза процесса.

### **Об инвариантности в оптико-электронных приборах и системах**

Современные ОЭПиС являются сложными системами, в которых сигналы постоянно претерпевают преобразование, связанное с обработкой информации. При этом сначала, как правило, выполняется преобразование оптических сигналов в электрические, а затем их обработка в форме, удобной для выделения интересующей информации. При этом в процессе работы часто происходят и обратные преобразования электрических сигналов в оптические или биологические.

В целях развития общей теории ОЭПиС предложено использовать понятие общей инвариантности, заключающейся в отсутствии информационных потерь в процессе преобразования входных информативных параметров в выходные при изменяющихся физических условиях и параметрах систем для определенных типов ОЭПиС.

Важность понятия инвариантности обусловлена тем, что с его помощью можно выделить величины, не зависящие от выбора системы отсчета, структуры и пр. и характеризующие только внутренние свойства исследуемой системы.

Собственно инвариантность постоянно присутствует при преобразованиях сигналов в различных звеньях ОЭПиС.

В геометрической схеме ОЭПиС позиционирования рассматривается инвариантность в математическом смысле – неизменность информативного параметра по отношению к некоторым преобразованиям, например, движение контролируемой точки, реализованной контрольным элементом [11], в двух системах координат, повернутых одна относительно другой на некоторые углы.

В оптической части ОЭПиС происходят преобразования оптических сигналов в соответствии с инвариантами Лагранжа, Штраубеля и т.д. [12]. В общем виде инвариант Штраубеля устанавливает, что геометрический фактор остается инвариантным при распространении лучевой трубки через любую последовательность различных сред.

Инвариантность в оптической системе ОЭПиС, т.е. нерасстраиваемость [13] дальномеров и геодезических приборов, предполагает независимость взаимного положения изображений от смещений элементов оптических систем.

При числовой обработке сигналов в ОЭПиС с помощью цифровых ЭВМ используются числовые, геометрические, дифференциальные и топологические инварианты при интерактивном компьютерном представлении математических образов [14].

Инвариантность в системах автоматического регулирования предполагает независимость какой-либо системы от приложенных к ней внешних воздействий. Независимость одной из регулируемых координат системы от всех внешних воздействий или независимость всех координат от одного какого-либо воздействия определяется как полиинвариантность [15]. Идеи инвариантности в ОЭПиС применяют в системах управ-



ления летательными аппаратами, судами, для управления химическими процессами при построении следящих систем и, особенно, комбинированных систем, в которых одновременно используются принципы регулирования по отклонению и по возмущению.

Часто условия инвариантности не могут быть выполнены точно; в этом случае в автоматике говорят об инвариантности с точностью до некоторой наперед заданной величины [15].

Прежде чем приступить к рассмотрению отдельных преобразований и их совокупности, необходимо определить инварианты – величины, неизменные для всех условий и явлений.

Результатом любого преобразования в ОЭПиС являются соотношения между физическими величинами. В зависимости от того, какие из этих величин являются или приняты постоянными, независимыми инвариантами, остальные величины, которые связаны с первыми соотношениями, полученными в процессе преобразования сигналов в приборе, оказываются переменными. В некоторых случаях выводы из подобных соотношений оказываются столь важными, что оказывают существенное воздействие на развитие ОЭПиС.

Очевидно, что на роль общих инвариантов могут претендовать лишь такие величины, которые присущи абсолютно всем преобразованиям и, так или иначе, проявляются существенным образом в любых формах строения системы на любом ее уровне. Эти величины должны присутствовать на всех уровнях преобразований. Это требование необходимо, так как основой каждого процесса является соответствующий процесс, обуславливающий собой закономерности макропроцесса.

В ОЭПиС с вероятностным описанием процессов таким параметром можно считать потерю информации при преобразованиях. В этом случае [16] количество информации  $I$  определяется как разность энтропий:

$$I = H(X) - H(X/X_n),$$

где  $H(X)$  – энтропия (мера неопределенности) преобразуемой величины до ее измерения,  $H(X/X_n)$  – энтропия  $X$  при условии  $X_n$ , или энтропия действительного значения  $x$  преобразуемой величины (мера интервала неопределенности) вокруг полученного после преобразования  $X_n$ , т.е. энтропия погрешности преобразования.

Впервые в оптико-электронных системах понятие инвариантности появилось при обработке изображений в системах распознавания, при которых, например, реализуется инвариантность корреляционной функции к масштабу и повороту входного сигнала [17]. В широком смысле слова инвариантность оптико-электронных приборов предполагает независимость параметров выходной информации от воздействия внешних и внутренних условий. Например, исследование путей реализации инвариантных оптико-электронных систем для контроля смещений предполагает компенсацию физических явлений, возникших в оптической системе и при преобразовании параметров из приборной в измерительную систему координат.

Выбор инвариантов в ОЭПиС требует четких критериев с учетом ограничений и приближений, использованных при описании инварианта. В связи с этим необходима разработка методологических основ данного вопроса. В свою очередь, разработка общей теории инвариантности в ОЭП существенно упростит анализ и синтез исследуемых и разрабатываемых систем.

Основываясь на проделанной работе, целесообразно провести дополнительные фундаментальные исследования по формированию основ общей теории инвариантности информационных оптико-электронных систем как наиболее общей теорией ОЭПиС [4].

Изложенные материалы отражают основные результаты выполнения НИР «Исследование адекватности моделей оптико-физических явлений в природных и антропогенных объектах и информационных оптико-электронных системах спектрального

мониторинга (№10003)», выполняемых в 2002–2004 году по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации.

### Литература

1. Панков Э.Д., Порфирьев Л.Ф., Чиков К.Н. Обобщенный анализ адекватности моделей оптико-физических явлений в природных и антропогенных объектах и информационных оптико-электронных системах спектрозонального мониторинга // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Т.16. Результаты научно-исследовательских работ. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. 280 с.

2. Тимофеев О.П. Анализ оптико-электронной системы обнаружения крупногабаритных объектов при их спектрозональной импульсной оптической локации в условиях инерционного приема с квазиоптимальной фильтрацией отраженных сигналов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Т.16. Результаты научно-исследовательских работ. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. 280 с.

3. Мусьяков В.Л., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н. Теоретическая оценка воздействия воздушного тракта на измерительную базу в виде полихроматической оптической равносигнальной зоны при геодезических измерениях // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Т.15. Теория и практика современных технологий. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. 396 с.

4. Коняхин И.А., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н. Об инвариантности в оптико-электронных приборах и системах. // VI Международная конференция «Прикладная оптика» 18-21 октября 2004 г, С.Пб, Россия. Сборник трудов. Том.1. Оптическое приборостроение. СПб, 2004. С. 46–48.

5. Порфирьев Л.Ф., Комарова И.Э., Кузнецов Г.М. Некоторые перспективы применения оптико-электронных приборов для оперативного дистанционного мониторинга экосистем // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45. № 2. С. 5–11.

6. Особенности построения бортовых оптико-электронных систем спектрозонального мониторинга / К.Н. Чиков, Э.Д. Панков, Л.Ф. Порфирьев, В.В. Гуд, В.М. Красавцев, А.Н. Тимофеев // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т.47. №9. С.61–68.

7. Чиков К.Н., Красавцев В.М., Гуд В.В. Видеоспектральные комплексы для прикладных исследований со спутниковых и подспутниковых высот в УФ-диапазоне. //VI Международная конференция “Прикладная оптика” 18-21 октября 2004 г, С.Пб, Россия. Сборник трудов. Том.1 "Оптическое приборостроение". СПб, 2004. С. 349–350.

8. Лебедько Е.Г., Тимофеев О.П. Оценка влияния инерционности фотоприемников на условия обнаружения сложных сигналов. // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1978. Т.21. № 5. С. 110.

9. Кирчин Ю.Г. Разработка и исследование оптико-электронных систем для контроля смещений: Дис.канд. техн. наук.: 05.11.07. СПб., 1993. 193 с.

10. Витол Э.А., Мусьяков В.Л., Коняхин И.А., Тимофеев А.Н. Реализация дисперсионного метода в оптико-электронных системах с оптической равносигнальной зоной. //VI Международная конференция «Прикладная оптика» 18–21 октября 2004 г, Санкт-Петербург. Сборник трудов. Том.1. Оптическое приборостроение. СПб, 2004. С. 37–40.

11. Панков Э.Д., Коняхин И.А. Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры: Справочник. М.: Недра, 1991. 234 с.

12. Тудоровский А.И. Теория оптических приборов. М.-Л. Изд-во АН СССР, 1938.

13. Сухопаров С.А. Пространственно-инвариантные схемы оптических приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 1982. №11. С. 58–66.

14. Панков П.С., Табылды кызы Ж., Краснобородкина Т.В. Инварианты как основа интерактивного компьютерного представления математических объектов // Асимптотические, топологические и компьютерные методы в математике: Труды Международной научной конференции. Бишкек: КГНУ, 2001 / Вестник Кыргызского государст-

венного национального университета: Сер. 3. Естественно-технические науки. Вып. 6. Математические науки. Информатика и информационные технологии. С. 37-40.

15. Современные методы проектирования систем автоматического управления /под. ред. проф. Б.Н. Петрова, В.В. Солодовникова, Ю.И. Топчеева, М.: Машиностроение, 1967. С. 704.

16. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешности результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.

17. Ауслендер А.Л., Левин Г.Г. Инвариантность к масштабу и повороту входного сигнала в голографических устройствах распознавания. // Материалы школ по голографии. М., 2002.

# УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ АТОМА В ЛОВУШКЕ С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Г.П. Мирошниченко

В 80-х гг. 20-го века актуальной становится задача удержания (изолирования от внешней среды) отдельной частицы или небольшой группы частиц. Для заряженных частиц эту проблему можно решить, используя соответствующую конфигурацию электрических и магнитных полей (статических и переменных) в ловушках Пеннинга или Пауля. В.С. Летохов показал [1], что нейтральные частицы можно удерживать в лазерном луче, используя эффект лазерного охлаждения трансляционных степеней свободы. Первый эксперимент был выполнен в 1986 г. [2] и дал основание новому направлению – технологии оптических ловушек для нейтральных атомов. Теория ловушек и экспериментальные результаты представлены в работах [3, 4–10].

В работе [7] показано, что в присутствии классической бегущей или стоячей волны возникает эффективное взаимодействие координаты центра масс иона, захваченного параболическим потенциалом ловушки, с его внутренними степенями свободы. Такое взаимодействие при определенных условиях (предел Лемба-Дике) описывается в приближении гамильтониана Тависа-Каммингса (ТК) [11]. Здесь роль бозонной переменной играет координата центра масс, и поэтому квантовые эффекты, известные ранее для полевой моды (для которой гамильтониан ТК и был написан), в этой связи приобретают новый смысл. Так, были предсказаны и обнаружены в экспериментах с ловушками такие неклассические состояния движения центра масс иона, как фоковские, «шредингеровские cat» [12], четные и нечетные когерентные и другие (ссылки можно найти в работах [9, 10, 4, 5]).

Модель ТК, в гамильтониан которой включено внешнее классическое поле, нашла свое применение и в других задачах. Так, предметом нового направления, названного в [13] инженерией квантовых состояний и основанного на обобщениях модели ТК, является разработка схем генерации и контроля новых неклассических состояний поля и атомов с заданными свойствами. В работах [14, 15] в качестве регулирующего устройства в модель ТК включено классическое поле, параметры которого – длительность и форма серии импульсов в [14], форма и скорость изменения амплитуды в [15] – подбираются должным образом для получения требуемого для выбранной инженерии эффекта.

В работах [16, 17–20] предложено еще одно обобщение модели ТК, основанное на включении в гамильтониан классического квазимонохроматического поля, несущая частота которого близка к резонансу с частотой атомного перехода. При определенном выборе периодически изменяющейся огибающей оператор квазиэнергии модели ТК (в первом приближении теории возмущений) имеет вид обобщенного гамильтониана ТК, который отличается от обычного (записанного в представлении взаимодействия) добавлением противорвращающих слагаемых с измененной константой взаимодействия. Такой оператор имеет ряд необычных свойств, в частности, полевая часть его собственных векторов представляет собой сжатые состояния [21], степень сжатия которых определяется амплитудой и частотой модуляции классического поля. Если в качестве бозонной переменной иметь в виду координату центра масс иона в параболической ловушке, то сжатие одной квадратуры будет означать «локализацию» иона по координате, а для второй квадратуры – по импульсу.

Таким образом, на основе работ [17–20] можно обобщить известную в теории ионных ловушек модель Блокли, Воллса, Рискена [7], включив в гамильтониан ТК квазимонохроматическое классическое (двухмодовое) поле. В данной работе показано, что при определенном выборе частоты и напряженности двухмодового поля можно возбудить колебательную моду в сжатое состояние по координате, а при определенном вы-

боре фазы поля – по импульсу. Такие состояния отвечают локализации атома в ловушке, либо вылету атома из ловушки с определенным импульсом.

Согласно [7], гамильтониан атома в параболической ловушке имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{\mathbb{H}}(t) = & \hbar \omega_A \hat{\mathbb{S}}_3 + \left( g(t) \exp(-i(\omega_E t - k_E y)) \hat{\mathbb{S}}_+ + \text{э.с.} \right) + \hbar \omega \hat{\mathbb{K}}^\dagger \hat{\mathbb{K}} + \\ & + \left( \varepsilon \cdot \exp(-i\omega_T t) \cdot \cos\left(\zeta (\hat{\mathbb{K}}^\dagger + \hat{\mathbb{K}}) + \delta_T\right) \cdot \hat{\mathbb{S}}_+ + \text{э.с.} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\hat{\mathbb{S}}_3, \hat{\mathbb{S}}_+, \hat{\mathbb{S}}_-$  – атомные операторы алгебры  $\text{su}(2)$ ;  $\omega_A, \omega_E, \omega_T, \omega$  – частоты перехода, несущей квазимонохроматического поля, стоячей волны в ловушке, колебаний атома;  $x = \sqrt{\hbar/(2M\omega)} (\hat{\mathbb{K}}^\dagger + \hat{\mathbb{K}})$ ,  $y$  – координаты центра масс атома;  $k_E, k_T$  – волновые векторы управляющей и стоячей волны;  $\delta_T$  – фаза; э.с. – операция эрмитового сопряжения;  $g(t)$  – комплексная «медленная» огибающая взаимодействия атома с классическим (управляющим) полем;  $\varepsilon$  – константа взаимодействия атома со стоячей волной;  $\hat{\mathbb{K}}, \hat{\mathbb{K}}^\dagger$  – операторы квантованной колебательной степени свободы (центра масс). Далее  $g(t)$  предполагается периодичной функцией времени:  $g(t) = g(t + T)$ . Предполагается, что вдоль оси  $x$  для стоячей волны выполнен предел Лемба-Дике (амплитуда колебаний меньше длины волны)

$$\zeta = \sqrt{\frac{(\hbar k_T)^2}{2M}} \cdot \frac{1}{\hbar \omega} \approx \frac{\Delta x}{\lambda_T} < 1.$$

Ограничимся линейным приближением по параметру  $\zeta$  и пренебрежем взаимодействием «электронной» степени свободы с  $y$  – координатой центра масс (малость амплитуды колебаний по оси  $y$ ), центр потенциала ловушки по оси  $x$  поместим в узел стоячей волны. Гамильтониан (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \hat{\mathbb{H}}(t) = & \hbar \omega_A \hat{\mathbb{S}}_3 + \left( g(t) \exp(-i\omega_E t) \cdot \hat{\mathbb{S}}_+ + \text{э.с.} \right) + \\ & + \left( \kappa \cdot \exp(-i\omega_T t) \cdot \hat{\mathbb{K}} \cdot \hat{\mathbb{S}}_+ + \text{э.с.} \right) + \hbar \omega \hat{\mathbb{K}}^\dagger \hat{\mathbb{K}}. \end{aligned}$$

Оператор развития  $U_T(t)$  удовлетворяет уравнению

$$\hat{\mathbb{H}}(t) U_T(t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} U_T(t), \quad U_T(0) = I.$$

Перейдем в резонансное представление с помощью унитарного преобразования

$$U_T(t) = \exp(-i\hat{\mathbb{S}}_3 \omega_T t) U_S(t).$$

Для  $U_S(t)$  получаем уравнение

$$\hat{\mathbb{H}}_S(t) U_S(t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} U_S(t), \quad U_S(0) = I.$$

Здесь  $I$  – единичный оператор. Гамильтониан приобретает вид гамильтониана ТК, возмущенного классическим электромагнитным полем

$$\hat{\mathbb{H}}_S(t) = \hbar \omega_0 \hat{\mathbb{S}}_3 + \left( g(t) \exp(-i\omega_c t) \cdot \hat{\mathbb{S}}_+ + \text{э.с.} \right) + \kappa \left( \hat{\mathbb{S}}_+ \hat{\mathbb{K}} + \hat{\mathbb{S}} \hat{\mathbb{K}}^\dagger \right) + \hbar \omega \hat{\mathbb{K}}^\dagger \hat{\mathbb{K}}. \quad (2)$$

Здесь  $\omega_0 = \omega_A - \omega_T$ ,  $\omega_c = \omega_E - \omega_T$ . Именно этот гамильтониан изучен в работах [17 - 20]. Приведем здесь некоторые результаты. Подробно изучен случай бигармонического классического поля  $g(t) = \hbar F \cdot \cos(\Omega \cdot t)$ . Еще одно преобразование

$$U_S(t) = \exp\left(-i\left(\mathfrak{E}_3 + \mathfrak{E}^\dagger \mathfrak{E}\right)\omega_c t\right)U(t), \quad U(0) = I$$

переводит (2) в периодичный по времени гамильтониан  $\mathfrak{H}_p(t)$  (рассмотрен случай  $\omega_0 = \omega_c = \omega$ )

$$\mathfrak{H}_p(t) = \left(\hbar F \cos(\Omega \cdot t)\mathfrak{E}_+ + \text{э.с.}\right) + \kappa\left(\mathfrak{E}_+ \mathfrak{E} + \mathfrak{E}_- \mathfrak{E}^\dagger\right), \quad (3)$$

что позволяет для поиска оператора развития  $U(t)$  во вращающейся системе применить метод квазиэнергий [17]. В работах [17–20] найден оператор квазиэнергии и периодический оператор для гамильтониана (3) по теории возмущений по параметру  $\delta = \kappa/(\hbar\Omega)$ . Ниже приводятся результаты первого порядка:

$$\mathfrak{Q}_0 = 0, \quad u_0(t) = \exp\left\{-i\sigma\mathfrak{E}_x \sin\Omega t\right\},$$

$$\mathfrak{Q}_1 = \kappa\left(\left(\mathfrak{E} + \mathfrak{E}^\dagger\right)\mathfrak{E}_x + i\left(\mathfrak{E} - \mathfrak{E}^\dagger\right)\mathfrak{E}_y J_0(\sigma)\right).$$

Оператор  $\mathfrak{Q}_1$  диагонализирован с помощью преобразования сжатия

$$G = \exp\left\{-\xi \frac{\mathfrak{E}\mathfrak{E} - \mathfrak{E}^\dagger \mathfrak{E}^\dagger}{2}\right\}, \quad \mathfrak{Q}'_1 = G^\dagger \mathfrak{Q}_1 G,$$

$$\mathfrak{Q}'_1 = \kappa\sqrt{J_0(\sigma)}\left(\mathfrak{E}^\dagger \mathfrak{E}_- + \mathfrak{E} \mathfrak{E}_+\right), \quad \xi = \ln\sqrt{J_0(\sigma)}.$$

Здесь  $J_0(\sigma)$  – функция Бесселя. Обсуждается особая точка оператора  $\mathfrak{Q}'_1$ , где его спектр становится сплошным:  $\sigma = 2.4048\dots$  – ноль функции Бесселя. Собственные функции  $|\Psi_{\xi, \pm n}\rangle$  и числа  $Q_{\pm n}$  оператора  $\mathfrak{Q}'_1$  имеют вид

$$|\Psi_{\xi, \pm n}\rangle = \left(|\xi, n\rangle|-1/2\rangle \pm |\xi, n-1\rangle|1/2\rangle\right)/\sqrt{2},$$

$$Q_{\pm n} = \pm\kappa\sqrt{J_0(\sigma)}\sqrt{n}, \quad \sigma = 2F/\Omega.$$

Здесь  $|\xi, n\rangle = G|n\rangle$  – сжатые фоковские состояния моды. Квантовая мода моделирует колебательную степень свободы центра тяжести атома, захваченного в ловушку. Как следует из полученных результатов, движением атома можно эффективно управлять, изменяя параметры двух приложенных классических мод. Возможна дополнительная локализация атома в ловушке. Результаты следует рассматривать как теорию атомной ловушки нового типа.

Временная динамика параметрического процесса изучена в работе [19]. Допустим, что бигармоническое поле имеет медленно изменяющуюся (в интервале времени  $T = 2\pi/\Omega$ ) частоту Раби  $F = F(t)$ . Получаем условие на скорость включения импульса для адиабатического следования по квазитермам оператора

$$F'(t) \ll \frac{\kappa \cdot \Omega J_0(2F(t)/\Omega)^{3/2}}{\hbar J_1(2F(t)/\Omega)}.$$

При выполнении этого условия оператор неадиабатичности мал, квантовая система следует по своим квазитермам. Но, согласно [19 20], полевая часть собственного вектора оператора квазиэнергии – это сжатые состояния квантованной моды, степень сжатия которых определяются параметром  $\xi$ . Таким образом, с помощью медленного включения бигармонического поля можно дополнительно локализовать центр масс колеблющегося в ловушке иона.

### Литература

1. Летохов В.С. // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т.7. №9. С.348.
2. Chu S., Bjorkholm J, Ashkin A., Cable A. // Phys.Rev.Lett. 1986. V.57. №3. P.314–317.
3. Физика за рубежом 1988: Серия А (исследования): Ф-50 Сборник статей. Пер.с англ., франц. М.: Мир, 1988. 216с.
4. J.A. Sauer, K.M. Fortier, M.S. Chang, C.D. Hamley, and M.S. Chapman. // Phys. Rev. A, 2004. V.69. P.051804(R) (4 pages).
5. N.G. de Almeida, R.M. Serra, C.J. Villas-Bôas, and M.H.Y. Moussa. // Phys. Rev. A. 2004. V.69. P.035802 (4 pages).
6. J. Ye, D.W. Vernooy, and H.J. Kimble. // Phys. Rev. Lett. 1999. V.83. №24. P.4987–4990.
7. C.A. Blockley and D.F. Walls. // Phys. Rev. A. 1993. V.47. №3. P.2115–2127.
8. V. Buzek, G. Drobný, M.S. Kim, G. Adam, and P.L. Knight. // Phys. Rev. A. 1997. V.56. №3. 2352–2360.
9. Shi-Biao Zheng. // Phys Lett.A. 1998. V.245. P.11–13.
10. Xueli Luo, Xiwen Zhu, Ying Wu. // Phys.Lett.A. 1998. V.237. P.354–358.
11. M. Tavis and F.W. Cummings. // Phys. Rev. 1968. V.170. P.379–384.
12. G. S. Agarwal, R. R. Puri, and R. P. Singh. // Phys. Rev. A. 1997. V.56. №3. 2249–2254.
13. K. Vogel, V.M. Akulin, W.P. Schleich. // Phys. Rev. Lett. 1993. V.71. №12. P.1816–1819.
14. C.K. Law, J.H. Eberly. // Phys. Rev. Lett. 1996. V.76. №7. P.1055–1058.
15. A.S. Parkins, P. Marte, P. Zoller. // Phys. Rev. A. 1995. V.51. №2. P.1578–1596.
16. M.Z. Smirnov. // Phys. Rev. A. 1995. V.52. №3. P. 2195–2208.
17. Г.П.Мирошниченко, М.З.Смирнов. // ЖЭТФ. 2001. Т.119. №3. С.442 – 451.
18. G.P. Miroshnichenko, M.Z. Smirnov. // Phys. Rev. A. 2001. V.64. 053801 (9 pages).
19. Мирошниченко Г.П., Смирнов М.З.. //Изв.АН, Сер. физ. 2001. Т.65. №6. С.859–864.
20. G.P. Miroshnichenko, M.Z. Smirnov. // Opt.Communic. 2000. V.182. №4–6. P.393–401.
21. H.P.Yuen. // Phys. Rev. A. 1976. V.13. №6. P.2226–2243.

# ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

**В.Н. Васильев, А.В. Павлов**

Дан обзор работ, выполненных в ГОИ им. С.И.Вавилова, по применению голографических информационных технологий в рамках фундаментальной проблемы искусственного интеллекта.

## Введение

Наличие ряда глубоких аналогий между свойствами человеческого интеллекта и оптической голографии было отмечено еще на первых этапах развития голографии основателями этого направления Д. Габором и Ю.Н. Денисюком. Признание актуальности этих аналогий специалистами по искусственному интеллекту (ИИ) и когнитивным наукам нашло свое отражение в формировании «голографической парадигмы» в рамках этих научных направлений [1–4]. Следует отметить, что предпосылки для формирования голографической парадигмы в когнитивной психологии были заложены еще в 1906 г. Д. Гольдшейдером [4], сформулировавшим описание восприятия и памяти как резонансного взаимодействия между волновыми фронтами, которые создаются при поступлении сенсорных потоков в кортикальные области человеческого мозга. Позже, познакомившись с голографией, американский психолог Карл Прибрам выдвинул гипотезу о голографическом устройстве мозга, которая объединяет логическое и психическое начала интеллекта. Согласно голографической метафоре, актуально переживаемую психическую реальность можно рассматривать как стоячую волну, возникающую в результате функционирования организма как целостной системы, объединяющей сенсоры, процессоры и исполнительные органы.

К сожалению, в последнее время сам термин «голографический» в восприятии многих специалистов оказался сильно скомпрометирован тем валом публикаций о «голографическом мозге», «голографической Вселенной» и т.п., что недавно прокатился в околонучных изданиях и Интернете.

Следует отметить, что, в отличие от многочисленных в последнее время рассуждений о «голографическом мозге», «голографической Вселенной» и т.п., основанных лишь на поверхностном знакомстве с внешними эффектами изобразительной голографии, сам Прибрам подчеркивал: «... должно, однако, учитываться предостережение о том, что речь идет о математике голографии и функции мозга, по которой она должна сравниваться и проверяться, а не об оптических голограммах или компьютерной реализации голографии» [4]. Между тем, с «физической» точки зрения голографическая память актуальна, в первую очередь, в силу наличия аналогий не на уровне внешних эффектов, а на уровне фундаментальных явлений, определяющих механизмы работы как голограммы, так и мозга. Исходя из принципа физической обоснованности математических моделей, актуального также и для мозга как материального носителя интеллекта, представляется, что эти две позиции не противоречат друг другу, но скорее взаимно дополняют.

На сегодняшний день в наибольшей степени теоретически и технически разработана голографическая реализация такого атрибута интеллекта, как ассоциативность мышления в форме автоассоциативной памяти (ААП), восстанавливающей эталон по его искаженной или дефектной версии [5]. Большинство голографических реализаций ААП основано на архитектуре оптической нейросети (ОНС) «4f-схема фурье-голографии с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости» [6]. Очевидно, что принцип ассоциативности мышления отнюдь не исчерпывается моделью



ААП и для задачи создания ИИ актуальна реализация более сложных видов ассоциативной обработки.

В данной статье мы остановимся на голографических реализациях двух феноменов – лингвистического моделирования и предсказания.

### Логико-лингвистическое моделирование

Логико-лингвистическое моделирование (ЛМ) как направление в рамках ИИ отражает такую особенность человеческого мышления, как работа на лингвистических шкалах (ЛШ) [7], относящихся к классу порядковых шкал. ЛМ применяется преимущественно в ситуациях, когда необходимо передать системе ИИ (обучить) неформализуемые знания, накопленные человеком и выраженные им на естественном для человека языке. Задача обучения системы ИИ как задача формирования человеко-машинного интерфейса – градуировка метрической шкалы, используемой техническим устройством, во взаимно однозначном соответствии с лингвистической шкалой, интуитивно градуированной человеком.

Одно из направлений развития ЛМ, опирающееся на аппарат теории нечетких множеств, основано на предложенной Л. Заде концепции лингвистической переменной (ЛП) [8]. В рамках этого подхода смысл (значение) ЛП представляется нечетким подмножеством, как правило – нечетким числом (НЧ), определяемым как унимодальное, нормальное и выпуклое подмножество числовой оси. Смысл всего высказывания вычисляется по правилам арифметики НЧ [9]. Этот подход был успешно применен при решении ряда практических задач, например, для предсказания загрузки узлов телекоммуникационных сетей [10], управления в реальном времени работой сложных радиотехнических комплексов [11], медицинской диагностики [12] и ряда других.

Представление смысла ЛП нечетким подмножеством предъявляет повышенные требования к вычислительной мощности процессора, что имеет следствием использование по преимуществу «удобных» с точки зрения вычислительной процедуры моделей, например, треугольных НЧ и, как результат, ограничение гибкости и применимости реализуемой модели. Более того, рассматривая задачу реализации ЛМ не изолированно, а в рамках комплексной проблемы выбора парадигмы создания ИИ, должно иметь в виду необходимость реализации в системе ИИ таких атрибутов человеческого интеллекта, как

- обучаемость;
- образность мышления;
- ассоциативность мышления.

Перечисленные атрибуты, вкупе с работой на ЛШ, относятся в первую очередь к «правополушарным информационным процессам», реализация которых вызывает наибольшие трудности в рамках классического (компьютерного) подхода к проблеме ИИ в силу принципиальной невербализуемости и неалгоритмизуемости таких процессов [2]. В частности, многие исследователи обращают внимание на наличие сильнейшего внутреннего противоречия, скрытого в понятии «моделирование образов». Между тем, общепризнанно, что именно правополушарные информационные процессы в значительной степени определяют интеллектуальные способности индивида.

Поэтому был разработан «биологически мотивированный» метод реализации ЛМ в 4f-схеме Фурье-голографии (рис.1), заключающийся в обработке не НЧ, но паттернов внутренней репрезентации, связанных с НЧ через модуль Фурье-спектра [13, 14].

В качестве паттерна, представляющего совокупность значений набора входных ЛП на соответствующих шкалах (внутренняя репрезентация воспринимаемой информации), используется реализация двумерного фрактального броуновского движения.

Удельный вес каждой ЛП в общем массиве воспринимаемой информации определяется относительный размер фрагмента паттерна, модулируемого этой ЛП;

Нечеткие числа (НЧ), представляющие текущие значения каждой ЛП на соответствующей ЛШ, связаны с характеристиками соответствующего фрагмента паттерна следующим образом:

$$\text{Re}(F(\text{Im}_i)) = \text{Re}(F(N_i)),$$

где  $\text{Im}_i$  – фрагмент паттерна, используемый для репрезентации  $i$ -ой ЛП,  $N_i$  – НЧ, описывающее значение  $i$ -ой ЛП на  $i$ -ой ЛШ.

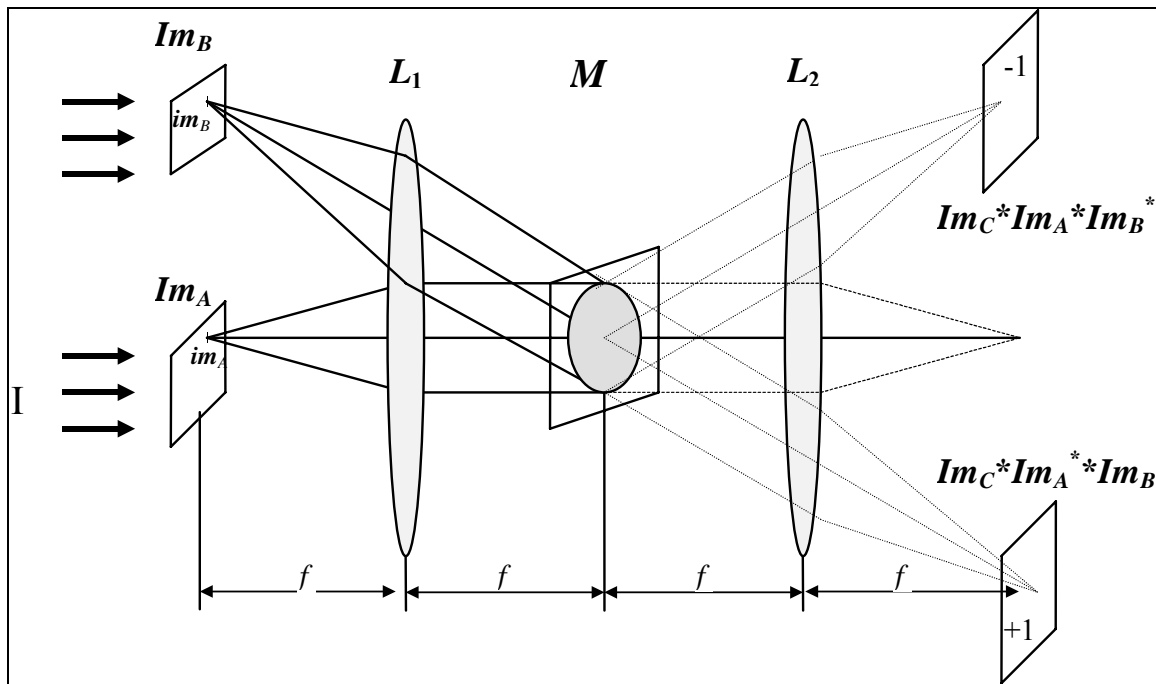


Рис.1. 4-f схема Фурье-голографии.  $I$  – освещающий плоский волновой фронт, реализующий универсум,  $\text{Im}_A$  и  $\text{Im}_B$  – изображения в сигнальном и опорном пучках, соответственно,  $L_1$  и  $L_2$  – Фурье-преобразующие линзы с фокусными расстояниями  $f$ ,  $M$  – голографический согласованный фильтр,  $+1$  и  $-1$  – порядки дифракции.

Этот подход был применен для экспериментальной реализации правила логического вывода типа «Обобщенный Modus Ponens», связывающего несколько входных ЛП и одну выходную ЛП. Была показана возможность реализации принципа субъективности мышления и селективной настройки чувствительности на различные участки ЛШ.

### Задача предсказания

Другой атрибут интеллекта, неразрывно связанный с ассоциативностью мышления – способность к предвидению дальнейшего развития событий. Важность этого атрибута сложно переоценить, поскольку именно от развитости способности предвидения в значительной мере зависит как выживаемость индивида, так и его успешность в достижении жизненных целей. Эта задача имеет также и сугубо прикладной аспект, например, при эксплуатации телекоммуникационных и инженерных сетей.

В работах [15–20] показано, что «4-f-схема Фурье-голографии с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости» реализует модель множественной линейной регрессии, сохраняя такие атрибуты нейросетей, как обучаемость, ассоциативность отклика и отсутствие формализованного описания обрабатываемой информации. Схема

строит наилучшую в смысле среднего квадрата ошибки линейную оценку при использовании на этапе обратного прохождения света голограммы с инверсной передаточной характеристикой. В случае, если обрабатываемое изображение может трактоваться как реализация стационарного в широком смысле случайного поля, то схема строит корректное предсказание для данной реализации. Если обрабатываемое изображение не удовлетворяет критерию стационарности, а большая часть реальной информации свойством стационарности не обладает, то возникает еще одна аналогия с биологическими прототипами ИИ, которые также в большинстве случаев строят внутреннюю модель окружающего мира исходя из примата устойчивости модели по отношению к адекватности [2]. На рис.2. приведена экспериментальная реализация на примере аэрофотоизображения лесного массива – Черная кривая – предсказание, белая кривая – фотометрический профиль реального изображения.

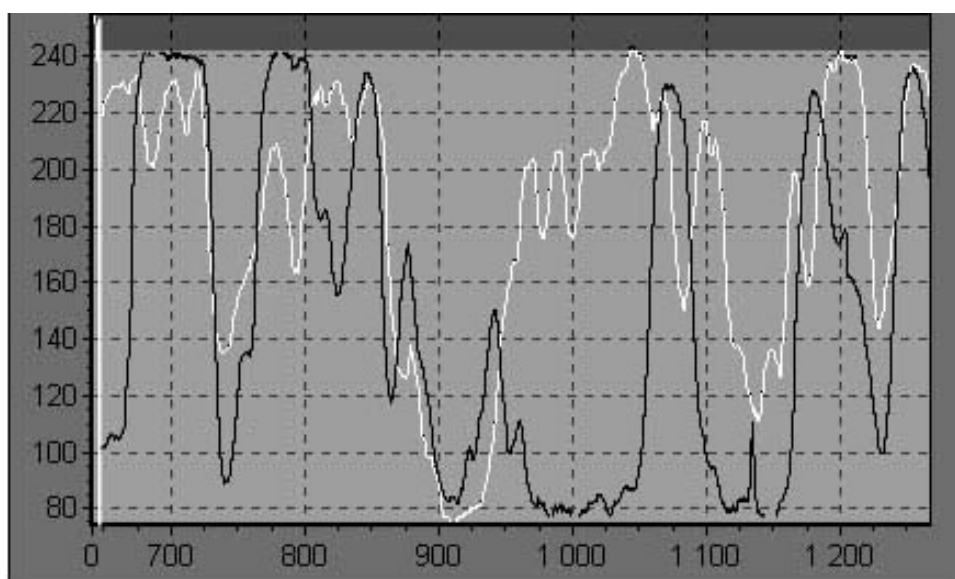


Рис.2. Экспериментальное предсказание для аэрофотоизображения леса.

В свете современных тенденций развития оптических информационных систем необходимо отметить существенное требование к физической реализации модели – фурье-голограмма должна быть тонкой по критерию угловой инвариантности. Это требование вступает в противоречие со стремлением к увеличению объема памяти и энергетической эффективности устройства ИИ, поскольку как максимальный объем памяти, так и максимальная дифракционная эффективность достигаются при использовании объемных голограмм, принципиально не обладающих свойством угловой инвариантности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 03-01-00825а и Программы грантов Минобразования России в области естественных и технических наук, грант E02-2.0-61

### Литература

1. Кольер Р., Беркхарт Л., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686с.
2. Кузнецов О.П. Неклассические парадигмы в искусственном интеллекте // Известия АН. Сер. Теория и системы управления. 1995. №5. С.3–23.
3. Судаков К.В. Голографический принцип системной организации процессов жизнедеятельности. // Успехи физиологических наук. 1997. 28. С.3–32.

4. Прибрам К. Нелокальность и локализация: голографическая гипотеза о функционировании мозга в процессе восприятия и памяти / В сб. Синергетика и психология. Вып.1. Методологические вопросы. Изд-во МГСУ "Союз", 1997.
5. Owechko Y. Nonlinear holographic associative memories. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1989. V.25. №3. P.619–634.
6. D.C.Wunsh II et.al. Photorefractive adaptive resonance neural network // Applied Optics. 1993. V.32. №8. P.1399–1407.
7. Белов С.В. Шкалы в системах мягких измерений // Труды II Межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям. СПб, 25-28 мая 1999. Т.1.. С.81–84.
8. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений // Математика. Новое в зарубежной науке. Вып.3. 1976.
9. D. Dubois, H. Prade, Fuzzy numbers: an overview. / Ed. by J.C. Bezdek, Analysis of Fuzzy Information, Boca Raton, FL, 1987. V.1. P.3–39.
10. W. Pedricz, A. Vasilakos, Linguistic Models and Linguistic Modeling. // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. Part B. 1999. V.29. 6. P.745–759.
11. Мальцев Г.Н., Ветринский Ю.А. Логико-лингвистическое описание функционирования сложных радиотехнических систем с элементами искусственного интеллекта в управляющих вычислительных комплексах // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т.42. В.3-4. С.3–7.
12. Кокушкин Ю.А., Усов В.М., Богомолов А.В., Автоматизированное оценивание риска нарушений состояния здоровья человека с помощью компьютерных вопросников на основе нечеткой логики // Информационные технологии. 2002. №10. С. 44–49..
13. Павлов А.В. Реализация логико-лингвистических моделей методом Фурье-голографии // Изв.Академии Наук. Теория и системы управления. 2003. 2. С.118–125.
14. Павлов А.В., Шевченко Я.Ю.Реализация логического вывода на лингвистических шкалах методом Фурье-голографии. // Оптический журнал. 2004. Т.71. №7. С.44–51.
15. Павлов А.В. Реализация модели линейного предсказателя методом Фурье-голографии. // Оптический журнал. 2005. Т.72. №2. С.43–47.
16. Павлов А.В. Реализация регрессионных моделей методом Фурье-голографии, Девятая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, 28 сентября – 2 октября 2004, Тверь, Труды конференции. М.: Физматлит, 2004. С.1164–1172.
17. Alexander V. Pavlov, Holographic Technique for Linguistic Modeling, Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference on Speech and Computer SPECOM'04, 20-22 Sept. 2004, St.Petersburg, pp.645-649.
18. Павлов А.В. Голографический предсказатель случайных процессов / Международные научно-технические конференции IEEE AIS'04 CAD-2004, 3-10 сентября, Дивноморское, Россия. Труды. Т.1. М.: Физматлит, 2004. С. 542–548.
19. Павлов А.В. О применимости модели линейной регрессии к описанию Фурье-голографии // Оптика и спектроскопия. 2005. Т.98. №5.
20. Павлов А.В. Реализация регрессионных моделей обработки информации методом фурье-голографии // Изв. АН. Сер. Теория и сист. управления. 2005. №2. С.26–33.

# ИМПУЛЬСНАЯ ЗАПИСЬ ГОЛОГРАММ НА ФОТОПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ

О.В. Бандюк, Д.А. Козловский, В.Н. Михайлов

Представлены результаты исследования импульсной записи голограмм с использованием светочувствительной композиции на основе поливинилового спирта с акриламидом. Показана возможность практического использования импульсных лазеров для записи голограмм различного типа.

## Введение

Фотополимерная светочувствительная композиция на основе поливинилового спирта с акриламидом известна достаточно давно [1] и зарекомендовала себя как вполне пригодная для записи пропускающих голограмм среда [2, 3]. Однако до настоящего времени использование для записи голограмм импульсных лазеров было продемонстрировано при их работе в частотном режиме [4], фактически приближая результат последовательности большого числа импульсов к режиму непрерывной засветки. Представляет интерес использование одиночных или относительно небольшого числа лазерных импульсов для записи голограмм на фотополимерном материале. С этой точки зрения необходимо исследовать динамику записи импульсных голограмм при использовании сверхкоротких импульсов излучения, длительность которых существенно меньше характерных времен диффузии, известных по результатам работ, проведенных ранее с использованием непрерывного излучения [5]. В данной работе исследована запись импульсных голограмм с использованием фотополимерной композиции (ФПК), в состав которой входила несущая полимерная матрица и светочувствительная композиция [6, 7].

## Экспериментальная установка и материалы

Светочувствительная композиция состояла из следующих компонентов: акриламида (А), бис-акриламида (БА), триэтанолamina (ТЭА) и красителя-сенситизатора (КС). В качестве несущей матрицы использовали полимер на основе поливинилового спирта (ПВС). Толщина готовой плёнки ФПК зависела от размера стеклянной подложки и количества наносимого на неё раствора ФПК и в наших экспериментах составляла от 20 до 40 микрон. Красители-сенситизаторы (эритрозин или эозин) обеспечивали чувствительность к зеленой области спектра. В качестве источника лазерного излучения использовали вторую гармонику импульсного неодимового лазера (532 нм) с длительностью импульса 10 нс или непрерывный лазер на той же длине волны, направление излучения которого точно совпадало с излучением импульсного лазера. На выходе лазера был расположен телескоп, обеспечивающий уширение пучка до диаметра в 1 см. Соотношение параллельных пучков при записи голограмм составляло 1:3, а угол между пучками  $2\theta$  был равен 19 град. Исследуемый фотополимер устанавливали в держатель на поворотном столе таким образом, чтобы фотополимерная плёнка была направлена в сторону падающего излучения. Одновременно с записью голограмм производилось их считывание с использованием непрерывного He-Ne лазера, излучение которого попадало на ФПК под углом Брэгга для данной длины волны (633 нм). Дифрагированный пучок попадал на регистрирующую систему, состоящую из фотоэлемента ФД1 и осциллографа. Запуск регистрирующей системы был синхронизован при помощи фотоэлемента ФД2, который срабатывал при прохождении лазерного импульса.

Предварительные эксперименты [7] показали, что данная ФПК позволяет получить достаточно высокие значения дифракционной эффективности (ДЭ) и светочувствительности. Так, при записи голограмм с использованием непрерывного лазера (532

нм) ДЭ достигала максимума (~75%) при плотности энергии опорного пучка  $\epsilon \sim 100$  мДж/см<sup>2</sup> и соотношении пучков 1:1 и лишь незначительно снижалась при увеличении  $\epsilon$  до 0.5 Дж/см<sup>2</sup>. В данной работе исследована запись голограмм при экспонировании как одиночными, так и серией импульсов с длительностью  $t=10$  нс с плотностью энергии каждого импульса в диапазоне  $\epsilon=5-140$  мДж/см<sup>2</sup>.

### Экспериментальные результаты

На рис.1 представлена типичная зависимость ДЭ от времени  $t$  сразу после записи импульсной голограммы. Как видно из рис.1, ДЭ нарастала практически без индукционного периода и достигала своего максимума при  $t=500-750$  мсек. Максимальное значение ДЭ при воздействии одиночным импульсом составляло 0,02–0,05% и зависело от предыстории образца, однако стационарное (не изменяющееся во времени) значение ДЭ было в 3–4 раза меньше максимального.

Для сравнения в этой же оптической схеме нами была осуществлена запись голограмм излучением непрерывного лазера с различной плотностью мощности. На рис.2 представлены временные зависимости ДЭ для голограмм, записанных при различных плотностях мощности непрерывного лазера в диапазоне от 1,5 до 70 мВт/см<sup>2</sup>.

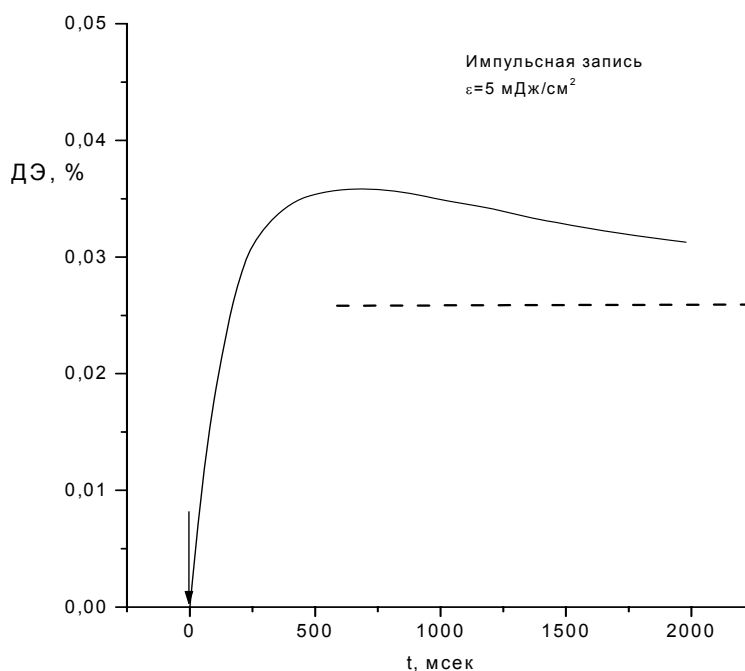


Рис.1. Зависимость дифракционной эффективности ДЭ от времени  $t$  по окончании лазерного импульса длительностью  $10^{-8}$  сек (указано стрелкой). Пунктиром показано стационарное значение ДЭ.

Из данных рис.2 видно, что индукционный период записи голограмм составлял около 300 мс при плотности мощности 1,5 мВт/см<sup>2</sup> и снижался до ~30 мс при 70 мВт/см<sup>2</sup>. На этом же рис.2 для сравнения приведена временная зависимость ДЭ, полученная при однократной импульсной засветке (~6 мДж/см<sup>2</sup>).

В дальнейшем нами была предпринята попытка записи голограмм серией из нескольких импульсов. В связи с тем, что максимальное значение ДЭ при одиночной засветке достигалось за времена 500–750 мсек, временная задержка между импульсами в серии составляла 1 с, т.е. значение ДЭ было близко к максимальному. На рис. 3 представлен результат измерений ДЭ при воздействии серией из 4 одинаковых по энергии

( $\sim 6 \text{ мДж/см}^2$ ) импульсов с частотой 1 Гц. Как видно из данных рис.3, ДЭ возрастала с каждым последующим импульсом нелинейно таким образом, что результирующее значение максимальной ДЭ составляло 0,7% вместо ожидаемых 0,12% ( $0,03\% \times 4$ ). Следует отметить, что максимально наблюдаемый за один импульс рост ДЭ составлял около 0,3% и сохранялся в течение нескольких последующих импульсов. Как и следовало ожидать, при увеличении числа импульсов до 20–30 прирост ДЭ за один импульс заметно снижался и составлял около 0,10–0,15% за один импульс.

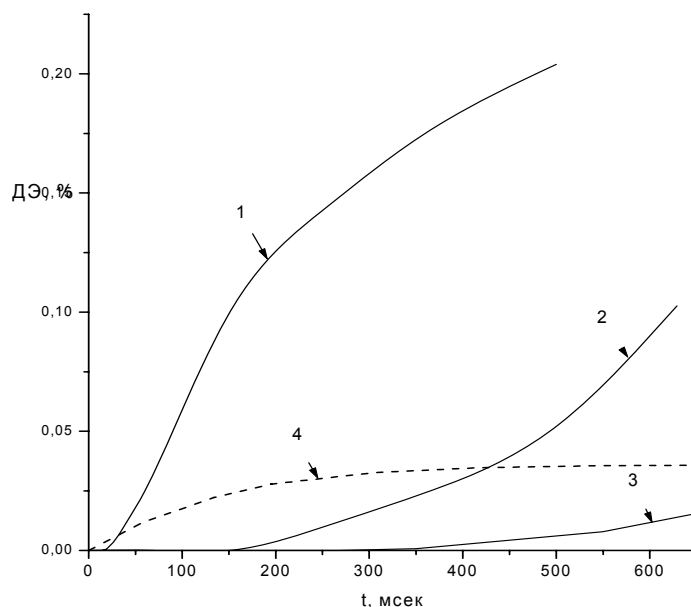


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности ДЭ от времени  $t$  для непрерывной (1-3) и импульсной (4) записи голограмм с различной интенсивностью лазерного излучения: 1 – непрерывная засветка  $70 \text{ мВт/см}^2$ , 2 – непрерывная засветка  $7 \text{ мВт/см}^2$ , 3 – непрерывная засветка  $1.5 \text{ мВт/см}^2$ , 4 – импульсная засветка  $6 \text{ мДж/см}^2$

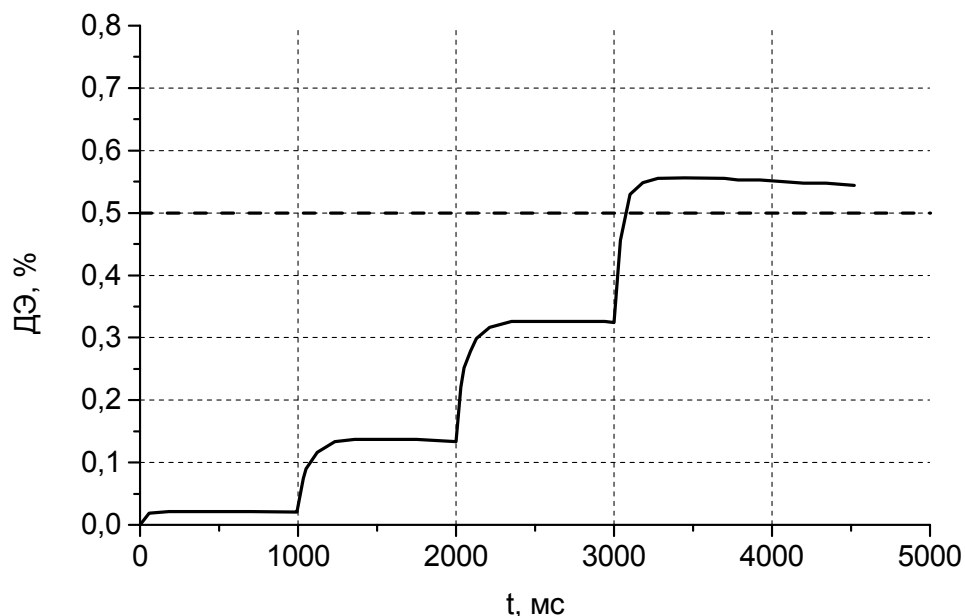


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности ДЭ от времени  $t$  при последовательной записи четырёх голограмм серией импульсов с частотой 1 Гц. Пунктиром показано стационарное значение ДЭ.

Для дальнейшей демонстрации возможности записи импульсных голограмм в исследуемой ФПК мы использовали многократную запись наложенных голограмм, отличающихся тем, что после однократной записи каждой из них осуществлялся поворот ФПК на угол 3 град. Выбор угла поворота в 3 град был обусловлен угловой селективностью записанных голограмм, составляющей примерно 3 град (при измерении по полуширине), а количество записанных голограмм (5 голограмм) ограничивалось углом между объектным и опорным пучками (19 град). Дифракционная эффективность каждой из голограмм регистрировалась в реальном времени и составляла в среднем 0,5%, причем для записи одной голограммы использовали серию из 4–5 импульсов на частоте 1 Гц. В последующем были последовательно измерены стационарные значения ДЭ каждой из голограмм при повороте ФПК на соответствующий данной голограмме угол (с точностью не хуже 1'). На рис.4 представлены результаты записи пяти наложенных голограмм. Как видно из данных рис.4, результирующая ДЭ каждой из голограмм снижалась не более чем на 12% по сравнению с исходной (рис.4а), при этом каждая из голограмм восстанавливала только одно, соответствующее записи, изображение (рис.4б).

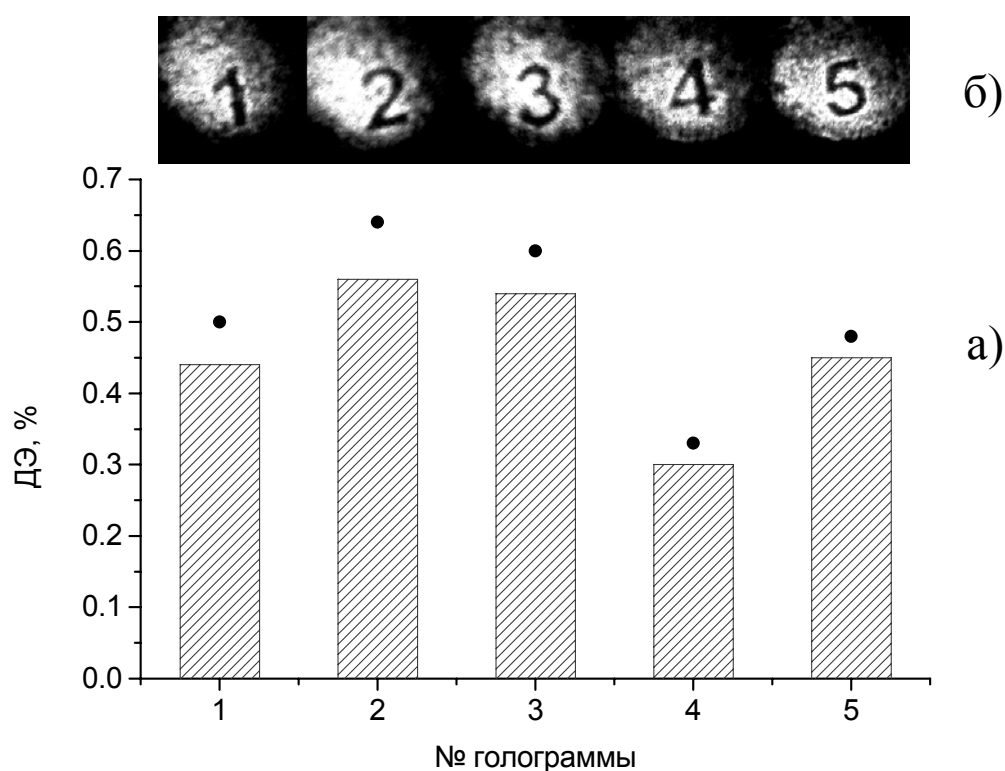


Рис.4. а) Значения дифракционной эффективности ДЭ каждой из 5 импульсных наложенных голограмм во время записи (точки,  $\lambda_{\text{зап}}=532$  нм) и стационарное (столбики) значение, измеренное после записи. Измерение ДЭ проводилось с использованием He-Ne лазера ( $\lambda_{\text{чит}}=633$  нм). б) Изображения объектов, восстановленные каждой из 5 наложенных голограмм при считывании излучением непрерывного лазера ( $\lambda_{\text{чит}}=532$  нм).

### Обсуждение результатов

Полученные в работе результаты показали существенные отличия динамики записи голограмм при использовании сверхкоротких лазерных импульсов по сравнению с действием непрерывной засветки. Основными отличиями являются:

1) практическое отсутствие характерного для непрерывной засветки индукционного периода;



2) зависимость чувствительности к импульсной засветке от наличия или отсутствия предварительной засветки.

Как показали дополнительные исследования, предварительная импульсная засветка может быть заменена на равнозначную ей непрерывную засветку, другими словами, независимо от способа предварительной засветки, ДЭ импульсной голограммы существенно повышалась по сравнению со случаем отсутствия предварительной засветки. Показано, что при использовании серии импульсов возможна эффективная запись наложенных голограмм, каждая из которых находится за пределами угловой селективности данного ФПК.

Работа выполнена при поддержке гранта ТО2-02.5-1441 Министерства образования России.

### Литература

1. M.J. Jeudy, J.J. Robillard, "Spectral sensitization of a variable index material for recording phase holograms with high efficiency", *Opt. Commun.* v.13, n.1, pp.25-28, (1975).
2. J.R.Lawrence, F.T.O'Neill, J.T.Sheridan, "Photopolymer holographic recording material", *Optik*, n.10, pp.449-463, (2001).
3. S.Blava, L. Carretero, A. Fimia, R. Mallavia, M.T. Garzon, R.F. Madrigal, I. Pascual, A. Belendez, R. Sastre, F. Amat-Guerri, "Optimal composition of holographic recording material", *SPIE Proc.*, V.3294, pp.71-77, (1998).
4. C. Garcia, I. Pascual, A. Costela, I. Garcia-Moreno, A. Fimia, R. Rastre, "Experimental study of the acrylamide photopolymer with a pulsed laser", *Opt. Commun.*, n.188, pp.163-166, (2001).
5. J.H. Kwon, H.C. Hwang, K.C. Woo, "Analysis of temporal behavior of beams diffracted by volume gratings formed in photopolymers", *JOSA B*, v.16, n.10, pp.1651-1657, (1999).
6. C.A. Feely, S. Martin, V. Toal, "Optimization of an acrylamide-based dry photopolymer holographic recording material", *SPIE Proc.*, v.2688, pp.22-33, (1996).
7. V.N. Mikhailov, O.V. Bandyuk, "Photopolymeric composition for holography", *SPIE Proc. of International Conference "Optical Holography and its Applications"*, 24-27 May 2004, Kiev, Ukraine

# ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА СТОКСОВОЙ КОМПОНЕНТЫ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

С.А. Лобанов

Путем численного моделирования исследованы различные пространственно-временные характеристики непрерывного и импульсного излучения первой стоксовой компоненты при нестационарном и квазистационарном ВКР в однородных и гетерогенных средах.

## Введение

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), возникающее при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с молекулярными колебаниями среды, относится к числу наиболее важных в нелинейной оптике и представляет значительный интерес с точки зрения преобразования частоты лазеров, одновременной генерации излучения на нескольких длинах волн, создания источников излучения, дискретно перестраиваемых в широком диапазоне длин волн [1–2], а также при построении распределенных оптоволоконных усилителей [3].

Несмотря на то, что на данный момент построена достаточно общая теория ВКР, а также найдены аналитические решения уравнений ВКР для большинства важных с точки зрения практического применения случаев, ряд проблем, связанных с ВКР, оставались неисследованными вследствие сложности нахождения общего аналитического или численного решения. К таким задачам можно отнести задачи динамики генерации стоксового излучения в нестационарном режиме, а также учет дифракции взаимодействующих волн. Вследствие значительного прогресса вычислительной техники в последнее десятилетие эти задачи теперь могут быть решены при использовании численного моделирования.

В ходе нашего исследования решались следующие задачи: исследование начального этапа процесса генерации непрерывного стоксового излучения в резонаторе, генерации различных стоксовых компонентов в смеси газов при длительностях импульсов, сравнимых со временем дефазировки компонентов смеси, а также изучение динамики различных пространственно-временных характеристик взаимодействующих волн при нестационарном и квазистационарном ВКР. Первая задача представляет несомненный интерес при построении генераторов непрерывного стоксового излучения [1]. Вторая задача важна с точки зрения создания дискретно перестраиваемых по частоте источников импульсного лазерного излучения [2]. Детальное же исследование пространственной динамики амплитуд и фаз взаимодействующих волн, когерентности генерируемого излучения является актуальным как с точки зрения расширения представлений о физических процессах комбинационного рассеяния, так и создания источников высококогерентных импульсов [4–5].

## Уравнения ВКР

При описании процессов нестационарного ВКР в газах мы пренебрегали дисперсией групповых скоростей, процессами генерации высших стоксовых и антистоксовых компонент, а также изменением населенности активного перехода в процессе рассеяния. Импульсы накачки и Стокса предполагались осесимметричными. Тогда ВКР может быть описано следующей системой нелинейных параболических дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
\left[ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} + \frac{i}{2k_n} \Delta_{\perp} \right] E_n &= -g \frac{\omega_n}{\omega_c} \frac{E_c E_{\phi}}{2}; \\
\left[ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} + \frac{i}{2k_c} \Delta_{\perp} \right] E_c &= g \frac{E_n E_{\phi}^*}{2}; \\
\left[ \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{T_2} \right] E_{\phi} &= \frac{E_n E_c^* + N}{T_2},
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $|E_{n,c}|^2 = I_{n,c}$  – интенсивность волн накачки и Стокса,  $E_{\phi}(\vec{r}, t)$  – амплитуда фоновой волны,  $g$  – коэффициент усиления,  $T_2$  – время дефазировки,  $\omega_{n,c}$  – центральные частоты накачки и Стокса,  $k_{n,c}$  – волновые числа накачки и Стокса,  $\Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$ , а  $N$  – шумовой источник поляризации, свойства которого были заданы в соответствии с [15].

Условие, при котором режим ВКР становится нестационарным, описывается следующим выражением:

$$T_n^{ex} < T_2 M, \tag{2}$$

где  $T_n^{ex}$  – продолжительность входного импульса накачки, а  $M$  – инкремент усиления (на пороге ВКР генерации  $M \approx 23$ ) [6].

### Результаты численного моделирования

В первую очередь мы приводим результаты численного моделирования резонаторного ВКР, являющимся одним из способов генерации непрерывного стоксового излучения. Наши результаты расчетов показали, что типичный сценарий генерации стоксового излучения таков: на первом участке происходит рост накачки за счет внешнего источника, на втором – быстрый рост стоксовой компоненты от уровня шумов. Далее значения амплитуд полей становятся постоянными – система переходит в стационарный режим.

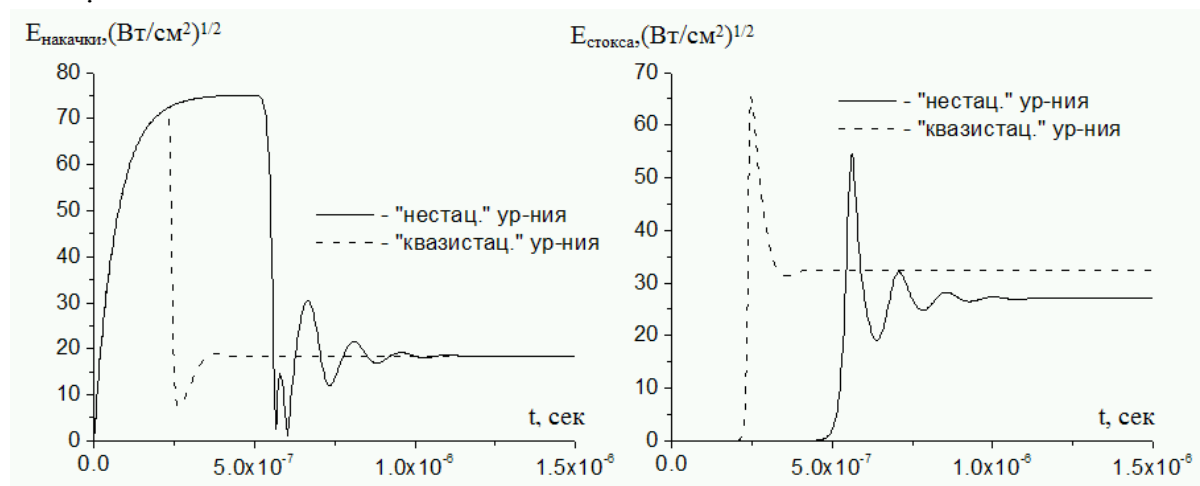


Рис. 1. Наличие релаксационных осцилляций перед переходом системы в стационарное состояние

Произведя серию вычислений, при которых мы варьировали различные параметры среды и резонатора, нам удалось показать следующее: при условии, что для промежутка времени, за который система переходит в стационарное состояние, выполняется условие (2), процесс генерации стоксового излучения становится нестационарным, и

перед переходом в стационарное состояние наблюдаются релаксационные осцилляции, обусловленные исключительно нестационарностью ВКР. Так, на рис. 1 приведены результаты расчета временной зависимости амплитуды стокового излучения для кристаллического водорода ( $g = 56$  см/ГВт,  $T_2 = 30$  нс.,  $L=2$  мм.,  $R=0.99984$ ,  $A=78 \cdot 10^{-9}$ ,  $I_n=2$  Вт/см<sup>2</sup>). Сплошной линией показано решение полной системы (1), а пунктирной линией изображены результаты расчетов, выполненных в предположении квазистационарности режима ВКР

Вторая часть статьи посвящена задаче нестационарной ВКР-генерации в двухкомпонентной смеси газов. Целью нашего исследования было получение зависимости эффективности преобразования энергии накачки в комбинационный стоков компонент от парциальных давлений компонентов смеси и объяснение условия эффективной генерации этого компонента. Нами были произведены численные расчеты для двух смесей газов:  $H_2$ - $D_2$  и  $H_2$ - $CH_4$ . На рис. 2 продемонстрированы зависимости эффективности преобразования энергии накачки в комбинационный стоков компонент от давления водорода (общее давление смеси оставалось равным 50 атм.) для различных значений максимального значения эффективности преобразования.

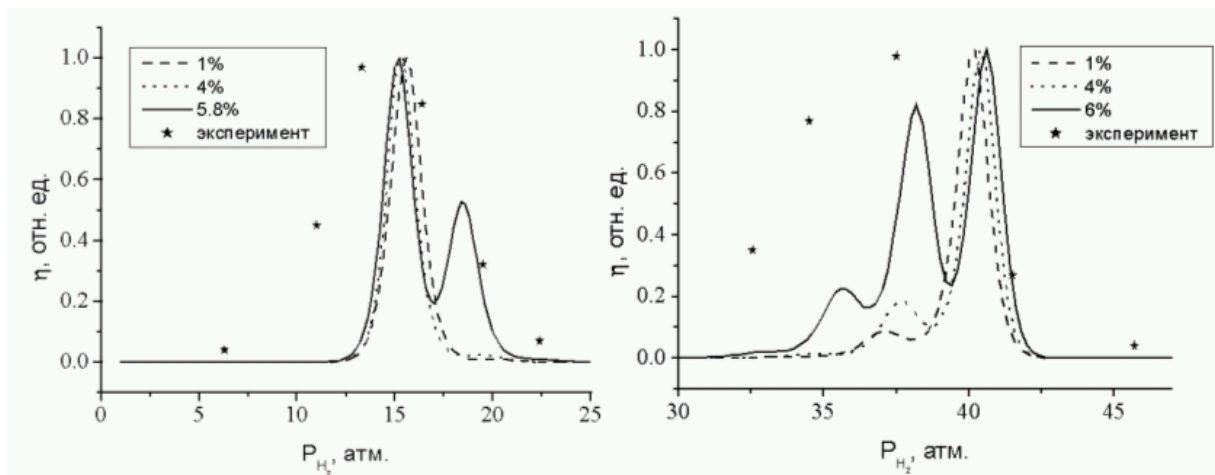


Рис. 2 Зависимость эффективности преобразования энергии накачки в комбинационный Сток от давления водорода для смеси  $H_2$ - $D_2$  (левый) и  $H_2$ - $CH_4$  (правый) для различных значений максимальной эффективности, экспериментальные данные и результаты численных расчетов

Для различных значений максимальной эффективности преобразования абсолютный максимум эффективности преобразования достигается приблизительно при одном и том же значении давления водорода, соответствующему следующему соотношению для параметров компонентов смеси:

$$\frac{g_1}{T_2^{\phi_1}} = \frac{g_2}{T_2^{\phi_2}}, \quad (3)$$

где  $g_{1,2}$  – коэффициенты усиления стационарного ВКР для первого и второго газов, соответственно,  $T_2^{\phi_i}$  – времена дефазировки для компонентов смеси.

Можно показать, что соотношение (3) эквивалентно следующему выражению для парциальных давлений компонентов смеси  $p_1$  и  $p_2$ :

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{F_1 \lambda_{c1}^3 \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} \right)_1}{F_2 \lambda_{c2}^3 \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} \right)_2},$$

где  $F_i$  – фактор Больцмана,  $\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega}\right)_i$  и  $\lambda_{ci}$  – дифференциальные сечения рассеяния и длины стоксовых волн.

Далее приведены результаты моделирования процессов нестационарного ВКР с учетом дифракции. Показано, что для нестационарного режима значение модуля когерентности больше, чем для квазистационарного (рис. 3), что качественно и количественно совпадает с результатами экспериментов [4]. Этот факт можно объяснить тем, что, согласно результатам наших расчетов, при квазистационарном режиме изменение абсолютного значения фазы больше, чем при нестационарном режиме, что и приводит к снижению когерентности стоксового излучения.

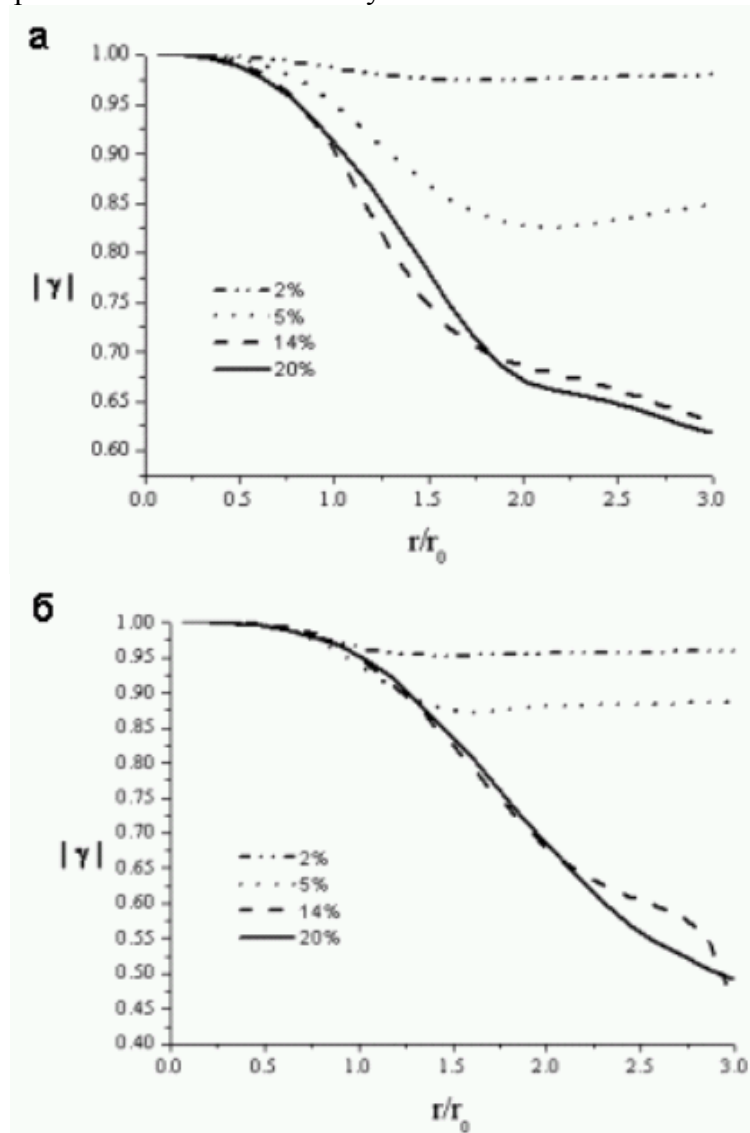


Рис. 3. Графики зависимости модуля функции когерентности стоксовой волны на выходе из среды от отношения поперечной координаты к радиусу входного импульса накачки для различных значений  $k$ , нестационарный (а) и квазистационарный (б) режимы.

Процессы неравномерной по сечению пучка генерации совместно с дифракцией ведут к динамическому изменению кривизны волнового фронта стоксового излучения и снижению степени пространственной когерентности по сечению пучка. Для наглядной иллюстрации динамики эволюции стоксового импульса нами были получены диаграммы распределения интенсивности по комбинационно-активной среде в различные моменты времени. Были изучены траектории перемещения перетяжек стоксового им-

пульса (области импульса с наибольшей интенсивностью). Хотя этот аспект ВКР и изучался экспериментально [5], однако полного описания данного процесса до настоящего времени не проводилось. Как для квазистационарного, так и для нестационарного режима характерно то, что пучок волны Стокса «фокусируется» на своем заднем фронте (рис. 4). В квазистационарном режиме генерации в начальные моменты времени перетяжка перемещается к передней границе среды, а при временах, больших половины длительности накачки, – к задней. При нестационарном ВКР стоксов импульс распадается на несколько частей, причем процесс эволюции каждой из частей происходит независимо.

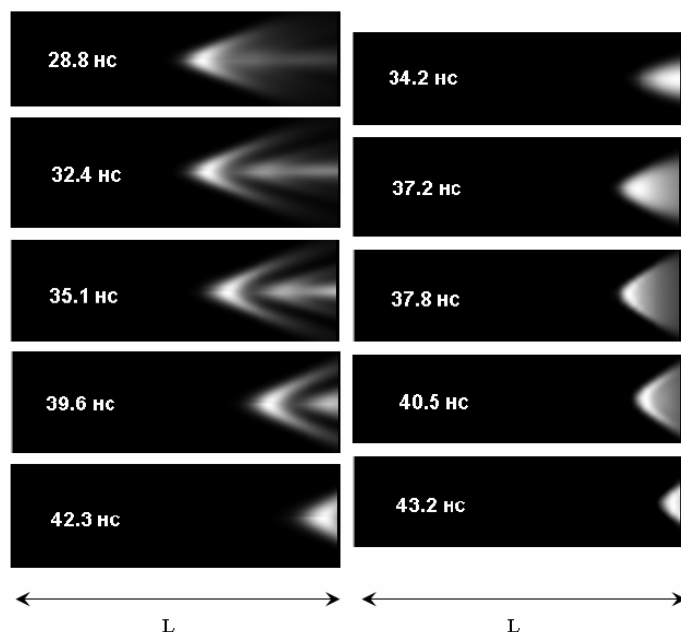


Рис. 4. Диаграммы распределения интенсивности стоксовой волны по комбинационно-активной среде для различных моментов времени (время прохождения импульсом среды составляет 90 нс.), нестационарный (слева) и квазистационарный (справа) режимы.

### Заключение

Предсказано, что при определенном сочетании параметров среды и резонатора начальный процесс генерации непрерывного стоксового излучения становится нестационарным и наблюдаются релаксационные осцилляции перед выходом системы в стационарное состояние.

Получено и объяснено условие эффективной генерации комбинационного стоксового компонента излучения при генерации ВКР в двухкомпонентной смеси газов. Показано, что оптимальное соотношение парциальных давлений компонентов смеси при нестационарной ВКР генерации комбинационного компонента обратно пропорционально отношению сечений комбинационного рассеяния данных газов.

Изучены различные пространственные характеристики излучения, генерируемого при нестационарном и квазистационарном ВКР. Продемонстрировано, что при квазистационарном режиме фаза волны стоксового излучения за время длительности импульса накачки изменяется в большем интервале, что приводит к снижению степени когерентности до более низких значений по сравнению с нестационарным режимом.

Исследована пространственная динамика эволюции стоксового импульса при нестационарном и квазистационарном режимах. Показано, что перемещение перетяжек стоксового импульса обусловлено конкуренцией двух процессов – неравномерного по сечению пучка усиления и дифракции, приводящей к динамическому изменению кри-

визны волнового фронта стоксового излучения и снижению степени когерентности по сечению пучка.

### Литература

1. Brasseur J.K., Repasky K. S., Carlsten J.L. Continuous-wave Raman laser in H<sub>2</sub>. // *Opt. Lett.* 1998. V. 23. P. 367–369.
2. Krylov V., Ollikainen O., Wild U., Rebane A., Bepalov V.G., Staselko D.I. Femtosecond stimulated Raman scattering in pressurized gases in the ultraviolet and visible spectral ranges. // *JOSA B*. 1998. V 1. 15.. No. 12. P. 2910–2916.
3. Agrawal G.P. Nonlinear fibre optics. New York: Academic Press Inc., 1989. / Русский перевод: Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: / Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 323 с.
4. Беспалов В.Г., Стаселько Д.И. Влияние вынужденного комбинационного рассеяния на когерентность излучения накачки в режиме насыщения. // *Опт. и спектр.* 1986. Т. 61. № 1. С. 153–158.
5. Беспалов В.Г., Стаселько Д.И. Связь тонкой структуры спектров ВКР в сжатом водороде с пространственной когерентностью стоксового излучения. // *Опт. и спектр.* 1988. Т. 65. № 4. С. 861–867.
6. Raymer M.G., Mostowski J. Stimulated Raman scattering: Unified treatment of spontaneous initiation and spatial propagation. // *Phys. Rev. A*. 1981. V. 24. №. 4. P. 1980–1993.

# ВЛИЯНИЕ МАЛОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА ОТРАЖАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Э.С.Путилин, С.Ф.Старовойтов

Наличие малого поглощения в диэлектрических оптических материалах и пленкообразующих веществах оптических покрытий могут приводить к значительному увеличению отражательной способности оптических деталей.

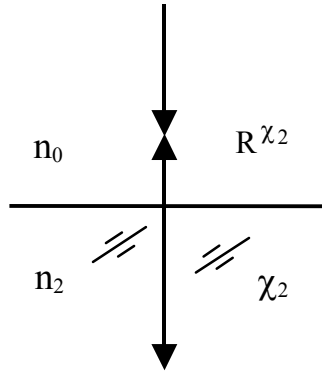


Рис.1. Идеальная (без учета шероховатости) граница раздела воздуха ( $n_0$ ) и поглощающего материала ( $n_2$ ) с главным показателем поглощения ( $\chi_2$ )

Так, для одной идеальной (без учета шероховатости) границы раздела воздуха ( $n_0$ ) и поглощающего материала ( $n_2$ ) с главным показателем поглощения ( $\chi_2$ ) коэффициент отражения при падении излучения по нормали (рис.1) будет определяться по формуле:

$$R_{\chi_2} = \frac{(n_0 - n_2)^2 + \chi_2^2}{(n_0 + n_2)^2 + \chi_2^2} = R_{\chi_2=0} + \frac{4n_0n_2\chi_2^2}{(n_0 + n_2)^4} = R_{\chi_2=0} + \frac{T_{\chi_2=0}}{(n_0 + n_2)^2} \chi_2^2 \quad (1)$$

В этом случае отражение будет увеличиваться по сравнению с непоглощающей средой ( $R_{\chi_2=0}$ ) пропорционально квадрату главного показателя поглощения.

Если представить реальную границу раздела с трещиноватым поглощающим слоем с  $n_1 = n_{об} + \chi_1$ , где  $n_{об}$  – показатель преломления объема материала (рис. 2), то коэффициент отражения ( $R_{max}$ ) можно вычислить по формулам

$$R_{max} = \left( \frac{\hat{n}_1^2 - n_0 n_{об}}{\hat{n}_1^2 + n_0 n_{об}} \right)^2 = \left[ \frac{(n_{об} + \chi)^2 - n_0 n_{об}}{(n_{об} + \chi)^2 + n_0 n_{об}} \right]^2 = \dots = R_{об} \left( 1 + \frac{8\chi n_0}{n_{об}^2 - n_0^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{R_{max}}{R_{об}} = 1 + \frac{8\chi n_0}{n_{об}^2 - n_0^2} \cong 1 + 6\chi$$

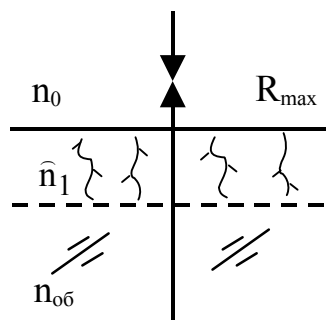


Рис. 2. Реальная граница раздела с трещиноватым поглощающим слоем



При  $n_0=1$ ,  $n_{об}=1,5$ ,  $\chi=10^{-3}$  отражение увеличивается на 0,6%. При  $\chi=10^{-2}$  отражательная способность увеличивается на порядок, до 6%, что составляет значительную величину.

Но особый интерес представляет небольшое число частных случаев, в которых можно получить аналитические выражения для расчета потерь. Такая возможность есть, например, для многослойных зеркал, состоящих из четвертьволновых слоев двух чередующихся диэлектриков с комплексными показателями преломления  $\hat{n}_H = n_H - iX_H$  и  $\hat{n}_L = n_L - iX_L$ ,  $n_H > n_L$ ,  $X_H, X_L \ll 1$ . [1]

При большом числе  $N$  слоев коэффициент поглощения таких зеркал при нормальном падении света равен

$$A^Q = \frac{2\pi n_a}{n_H^2 - n_L^2} (x_H + x_L)$$

При наклонном падении излучения без ограничения на величину угла падения коэффициент равен:

$$A^Q = \frac{2\pi u_H^2 u_L^2}{u_a (u_H^2 - u_L^2)} \left( \frac{X_L}{u_L n_L \cos^2 \theta_L} + \frac{X_H}{u_H n_H \cos^2 \theta_H} \right)$$

где  $u_{H,L} = n_{H,L} \cos \theta_{H,L}$ ,  $u_a = n_a \cos \theta_a$  (S-поляризация) или  $u_{H,L} / \cos \theta_{H,L}$ ,  $u_a = n_a / \cos \theta_a$  (P-поляризация)  $\theta_{H,L} = \arcsin(n_a^2 \sin^2 \theta / n_{H,L}^2)$ ,

$$A^Q = \frac{2\pi u_a}{u_H^2 - u_L^2} \left( \frac{u_L x_L}{n_L \cos^2 \theta_L} + \frac{u_H x_H}{n_H \cos^2 \theta_H} \right)$$

Эти формулы могут быть полезными для оценки потерь в зеркалах лазеров, светоделителях, некоторых видах тонкопленочных поляризаторов, интерференционных светофильтрах для наклонного падения и т.п. Формулы могут использоваться для пересчета потерь, измеренных при наклонном падении, к случаю нормального падения, и наоборот. Измерения, сделанные при разных углах падения, дают некоторый материал для определения локализации потерь, разделения объемного и пограничного вклада и т.п.

Выясним условия, при которых энергетические характеристики многослойных диэлектрических систем – коэффициент отражения и пропускания – могут служить контролирующими параметрами для определения энергетических потерь излучения на поглощение.

В табл. 1 представлены значения энергетических коэффициентов отражения, пропускания и поглощения многослойных четвертьволновых зеркал на длине волны их эксплуатации (генерации лазера)  $\lambda_0 = 1,06$  мкм, в зависимости от числа слоев и главного показателя поглощения в слоях при попадании излучения на покрытие по нормали.

Главный показатель поглощения принимается одинаковым в слоях с высоким и низким показателем преломления относительно показателя преломления подложки.

С ростом числа слоев при фиксированных  $\chi$ , коэффициент поглощения практически остается постоянным. При фиксированном числе слоев в зеркале с уменьшением  $\chi$  в слоях на порядок коэффициент поглощения также уменьшается практически на порядок (с точностью  $\pm 2\%$ ), что показывает коэффициент  $C$ .

Погрешность контроля коэффициента поглощения определяется только погрешностью измерения коэффициента отражения, так как

$$A_{\chi=10^{-3}} - A_{\chi=10^{-4}} = R_{\chi=10^{-3}} - R_{\chi=10^{-4}} = 0,38 \%$$

для зеркал с разным числом слоев.

Числослоев	$\chi$	$R, \%$	$T, \%$	$A, \%$	$C$
9	$10^{-2}$	93,106	2,800	4,094	9,771 9,976
	$10^{-3}$	96,650	2,931	0,419	
	$10^{-4}$	97,013	2,945	0,042	
	0	97,050	2,950	0	
11	$10^{-3}$	98,412	1,164	0,424	10,095
	$10^{-4}$	98,789	1,169	0,042	
13	$10^{-3}$	99,114	0,460	0,426	10,143 -
	$10^{-4}$	99,496	0,462	0,042	
	0	99,534	0,466	0	
13*	$10^{-2}$	93,331	0,436	6,233	-
	$10^{-4}$	99,473	0,463	0,064	
17	$10^{-3}$	99,502	0,071	0,427	10,167
	$10^{-4}$	99,886	0,072	0,042	
19	$10^{-3}$	99,545	0,028	0,427	9,930
	$10^{-4}$	99,929	0,028	0,043	
25	$10^{-3}$	99,571	0,002	0,427	9,930
	$10^{-4}$	99,955	0,002	0,043	
39	$10^{-3}$	99,573	0	0,427	9,930
	$10^{-4}$	99,957	0	0,043	

\* - падение излучения со стороны подложки

Таблица 1. Энергетические характеристики четвертьволновых диэлектрических зеркал ( $\lambda_0 = 1,06$  мкм)

Поэтому для оценки энергетических потерь на поглощение на длине волны эксплуатации зеркала необходимо, как и в случае однослойных покрытий, выбрать оптические характеристики, наиболее чувствительные и удобные для измерения, полностью отвечающие за поглощение в контролируемой зоне покрытия.

Для исследований выберем побочные экстремумы, расположенные в коротковолновой или длинноволновой областях спектра относительно основного (1-го порядка) максимума отражения (четвертьволновые зеркала) или пропускания (просветляющие системы). Число этих экстремумов для зеркал на единицу меньше, чем число слоев в системе. В табл. 2 представлены значения относительных сдвигов побочных коротковолновых экстремумов отражения и пропускания четвертьволновых ( $\lambda_0=1,06$  мкм) диэлектрических зеркал. Анализ данных табл. 2 показывает: относительный сдвиг экстремумов  $R$  и  $T$  имеет при одинаковом поглощении не только разную абсолютную величину (а именно, линейно увеличивается с ростом числа слоев зеркала), но и разный знак (положительный для нечетных и отрицательный для четных экстремумов).

Наибольший сдвиг наблюдается для первого коротковолнового экстремума, так как нечетные экстремумы являются аналогом просветляющей системы. Измеряя относительный сдвиг экстремумов  $R$  и  $T$  в оптимальных по чувствительности к поглощению областях спектра и, выбирая определенные экстремумы, можно отличать участки диэлектрического зеркала с энергетическими потерями на поглощение по  $\chi > 5 \times 10^{-3}$  ( $600 \text{ см}^{-1}$ ).

Энергетический коэффициент отражения однослойного и, тем более, многослойного покрытия есть функция многих переменных  $R = f(n_0, n_s, n, \chi, nt...)$ . Поэтому, раскладывая в ряд Тейлора, получим:

$$R = R(n^0, 0) + \sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial R}{\partial \chi_j} \right)_{\chi_j=0} \Delta \chi_j + \frac{\partial R}{\partial (n_j t_j)_{n_j t_j = \frac{\lambda_0}{4}}} \Delta n_j t_j + \left( \frac{\partial R}{\partial n_j} \right)_{n_j=n^0} \Delta n_j + \dots \quad (4)$$

Если  $n_j = const, n_j t_j = \frac{\lambda_0}{4}$ , а поглощение в слоях примерно одинаково, то область максимальной чувствительности измерения поглощения есть:

$$\frac{\Delta R}{R(n^0, 0)} = \frac{1}{R(n^0, 0)} \left( \frac{\partial R}{\partial \chi_j} \right)_{\chi_j=0} \Delta \chi_j + \frac{1}{R(n^0, 0)} \frac{\partial R}{\partial (n_j t_j)_{n_j t_j = \frac{\lambda_0}{4}}} \Delta n_j t_j \quad (5)$$

Данная формула справедлива и для многослойных систем, если принять, что толщина слоя меняется одновременно. Оптическая толщина слоя не обязательно должна быть равна  $\frac{\lambda_0}{4}$ , а может принять любое фиксированное значение.

В побочных экстремумах отражения  $\left| \frac{\partial R}{\partial (n_j t_j)} \right| \rightarrow 0$ , а  $\left| \frac{\partial R}{\partial \chi} / R \right|$  достигает максимума,

причем наибольшую величину имеют нечетные (особенно первый) экстремумы. Важно, что именно в этих спектральных зонах фазовая толщина системы кратна  $\pi$ . Следовательно, формулу (5) можно переписать в виде:

$$\frac{\Delta R}{R(n^0, 0)} = \frac{1}{R(n^0, 0)} \left( \frac{\partial R}{\partial \chi} \right) \Delta \chi \quad (6)$$

Тогда областями максимальной чувствительности измерения энергетических потерь излучения на поглощение являются области побочных экстремумов отражения.

Проведенный анализ спектральных зависимостей показал, что оптимальной по чувствительности к поглощению метод контроля многослойной диэлектрической системы необходимо выбирать по соотношению относительного изменения коэффициентов отражения и пропускания. Так, например, для зеркальных систем – это области побочных минимумов отражения, где  $\left| \frac{\partial R}{\partial \chi} / R \right| > \left| \frac{\partial T}{\partial \chi} / T \right|$ , а для просветляющих систем, наоборот, – области максимумов R, где  $\left| \frac{\partial R}{\partial \chi} / R \right| < \left| \frac{\partial T}{\partial \chi} / T \right|$ .

В табл. 3 представлены энергетические коэффициенты отражения и поглощения в коротковолновых нечетных экстремумах (минимумах) отражения четвертьволновых зеркал. При изменении главного показателя поглощения  $\chi$  от  $10^{-3}$  до  $10^{-4}$  коэффициент поглощения  $A_{\lambda_1}^{\min}$  уменьшается практически на порядок (с точностью до 5%) так же как энергетический коэффициент поглощения (см. табл. 3) на длине волны эксплуатации зеркала (коэффициенты  $C_1$  и  $C_3$ ). При числе слоев в зеркале больше 13 необходимо пользоваться вторым минимумом отражения (см. коэффициент  $C_3$ ). В диапазоне изменений  $5 \times 10^{-4} < \chi < 5 \times 10^{-3}$   $R_1^{\min}$  изменяется в зависимости от числа слоев от десятых долей до десяти и более процентов.

Таким образом, в результате проведенных исследований показано влияние малого поглощения оптических деталей на энергетические характеристики отраженного и прошедшего излучения и определены оптимальные спектральные области для его контроля.

## Литература

1. Троицкий Ю.В. // Оптика и спектроскопия. 1992. Т. 72. В 3. С 791–795
2. Комраков Б.М., Шапочкин Б.А. Измерение параметров оптических покрытий. М: Машиностроение, 1986.

Таблица 2

Относительные сдвиги коротковолновых экстремумов отражения и пропускания четвертьволновых диэлектрических зеркал (относительно  $\lambda_0 = 1,06$  мкм)

Число слоев	$\chi$	$\lambda_{R1}^{\min}, A$	$\lambda_{T1}^{\max}, A$	$\delta\lambda_1, A$	$\lambda_{R2}^{\max}, A^0$	$\lambda_{T2}^{\min}, A^0$	$\delta\lambda_2, A^0$	$\lambda_{R3}^{\min}, A^0$	$\lambda_{T3}^{\max}, A^0$	$\delta\lambda_3, A^0$	$\lambda_{R4}^{\max}, A^0$	$\lambda_{T4}^{\min}, A^0$	$\delta\lambda_4, A^0$
9	$10^{-2}$	8530	8500	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$10^{-3}$	8535	8530	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$10^{-4}$	8535	8535	<5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	$10^{-2}$	8815	8780	35	8495	8510	-15	-	-	-	-	-	-
	$10^{-3}$	8820	8820	5	8495	8495	-5	-	-	-	-	-	-
	$10^{-4}$	8820	8820	<5	8495	8495	<5	-	-	-	-	-	-
	0	8830	8830	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	$10^{-2}$	9005	8965	40	8810	8835	-25	8515	8495	20	-	-	-
	$10^{-3}$	9010	9010	5	8810	8815	-5	8520	8515	5	-	-	-
	$10^{-4}$	9010	9010	<5	8812	8815	-3	8520	8520	<5	-	-	-
25	$10^{-2}$	9090	9045	45	8970	9005	-35	8755	8730	25	8570	8585	-15
	$10^{-3}$	9100	9095	5	8965	8965	-5	8760	8755	5	8570	8570	<5
	$10^{-4}$	9100	9100	<5	8965	8965	<5	8760	8760	<5	8570	8570	<5

Таблица 3

Энергетические коэффициенты отражения и поглощения в коротковолновых ( $\lambda_0 = 1,06$  мкм) относительно  $\lambda_0$  экстремумах (минимумах) отражения четвертьволновых диэлектрических зеркал

Число слоев	$\chi$	$R_1^{\min}$ %	$A\lambda_1^{\min}$ %	$C_1$	$R_3^{\min}$ %	$A\lambda_3^{\min}$ %	$C_3$
9	$10^{-2}$	4,32	27,37		-	-	-
	$10^{-3}$	1,33	3,51	7,81	-	-	-
	$10^{-4}$	1,09	0,36	9,74	-	-	-
	0	1,07	0		-	-	-
13	$10^{-2}$	8,12	41,04		-	-	-
	$10^{-3}$	1,34	6,56	6,26	-	-	-
	$10^{-4}$	0,85	0,69	9,47	-	-	-
	0	0,84	0		-	-	-
13*	$10^{-2}$	2,91	45,72	-	0,56	36,69	-
	$10^{-4}$	1,91	0,78	-	3,11	0,50	-
19	$10^{-2}$	18,73	53,77		7,33	45,21	
	$10^{-3}$	2,04	13,44	4,00	1,60	6,99	6,47
	$10^{-4}$	0,80	1,52	8,81	1,13	0,72	9,77
25	$10^{-2}$	31,98	54,89		12,24	55,36	
	$10^{-3}$	3,86	23,06	2,38	1,81	10,94	5,06
	$10^{-4}$	0,96	2,95	7,81	0,96	1,14	9,56

Примечание: 1)\* - падение излучения со стороны подложки

$$2) C = \frac{A_{\lambda}^{\min}(\chi_i)}{A_{\lambda}^{\min}(\chi_j)} \text{ при } \chi_i = 10\chi_j$$

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАНКА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЖЕСТКИХ КОНТАКТНЫХ ЛИНЗ

Ю.А. Калабаева, Я.В. Рудин

В статье рассматривается система, позволяющая получить точные параметры станка, необходимые для производства жесткой контактной линзы с определенной геометрией, задаваемой заказчиком.

## Введение

Проблема снижения зрения у населения нашей страны стала весьма актуальной в последнее время. В деятельности людей широко используются различные источники представления визуальной информации, и многие уже не представляют свою жизнь без видеотерминалов, таких как компьютер или телевизор. Повышение нагрузки на зрительный аппарат человека привело к резкому снижению зрения. В последнее время процент обращающихся к офтальмологам и оптометристам вырос. Однако врачи зачастую не справляются с возникающими проблемами.

На рынке представлено огромное количество методов коррекции зрения (очки, контактные линзы и хирургические методы). Одним из методов оптической коррекции, обеспечивающим высокую остроту зрения, являются жесткие контактные линзы. Отметим, что на данном этапе развития медицинской науки и техники процесс зрения до конца не изучен, и подбор оптимального средства коррекции зрения во многом является эмпирическим процессом. Для жестких контактных линз проблема выбора осложняется еще и высокой стоимостью заготовки.

В последние 25 лет произошел качественный скачок в развитии контрольно-диагностического измерительного оборудования, применяемого в отрасли. Появились автоматизированные устройства, облегчающие процесс измерения зрительных функций. Появление кератотопографов позволило получать расширенные данные о роговице пациента и, соответственно, с высокой точностью рассчитать требуемую линзу. Современное оборудование предоставляет огромное количество вариантов режимов обработки, но программное обеспечение, позволяя задавать конкретные режимы, не дает рекомендаций по их использованию, и выбор конкретного режима обработки ложится на конечного пользователя. Выбор оптимального режима экспериментальным путем приводит к значительным экономическим и временным затратам. В связи с этим обоснована попытка создать систему, позволяющую получить при задании определенных параметров требуемой линзы точные режимы резания станка.

## Выбор параметров требуемой контактной линзы

Для правильного подбора жестких линз необходимо, чтобы врач точно определил форму роговицы. Много лет это делали с помощью кератометра, который давал кривизну центральной части роговицы в миллиметрах (мм) или диоптриях оптической силы ( $D$ ). Но при этом измерялась только центральная часть роговицы размером 2–3 мм. С появлением видеокератоскопов концепция о трех зонах роговицы (центральной, промежуточной и периферической) стала ошибочной. Известно, что кривизна роговицы не остается постоянной, радиус ее кривизны все время изменяется [4]. В последнее время для получения данных о точной форме роговицы широко используются кератотопографы.

Ниже перечислены параметры, которые необходимо определять в ходе подбора линзы.

1. Базовая кривизна. Базовая кривизна (задней поверхности линзы) должна соответствовать роговице пациента.
2. Диаметр роговицы/размер зрачка/глазная щель. Эти параметры важны для определения диаметра оптической зоны линзы.
3. Диаметр оптической зоны. Оптическая зона (ОЗ) составляет 65–80% площади линзы. Если диаметр оптической зоны слишком мал, то у пациента могут возникнуть дефекты зрения типа хроматических аберраций (например, окрашивания изображения в красный цвет или гало), возникающих в результате отражения света от края линз.
4. Радиусы кривизны периферической зоны. Периферическая зона более плоская, чем центральная, что отражает изменение кривизны в области периферии роговицы. Обычно, кроме базовой кривизны (оптическая зона), линза характеризуется вторичной кривизной по периферии и периферической кривизной у самого края (т.е. линза имеет три радиуса кривизны).
5. Диаметр линзы. Полный диаметр линзы может быть примерно на 2,0 мм меньше диаметра роговицы.
6. Кривизна переходной зоны. Переходная зона необходима, чтобы избежать острых краев, возникающих в местах стыковки областей с различной кривизной поверхности. Такие зоны существуют между оптической зоной и зоной вторичной кривизны, а также между зоной вторичной кривизны и периферийной зоной. Дополнительные переходные зоны наносятся на линзу в лаборатории на специальном оборудовании.
7. Края. Качество обработки края линзы и его дизайн определяют комфортность ношения линзы. Дизайн определяется характером воздействия линзы на веко и требуемым положением линзы на глазу. Во всех случаях края линзы должны иметь четкий контур, быть гладкими и максимально хорошо отполированными для обеспечения максимального комфорта.
8. Толщина линзы. Толщина линзы играет важную роль в обеспечении необходимого уровня снабжения роговицы кислородом, достаточной гибкости линзы, удобства ее подгонки и максимальной комфортности ношения. Толщина определяется материалом и оптической силой линзы. Толщина линзы (в центре) определяется в лаборатории по оптической силе (с помощью справочных таблиц для каждого материала).
9. Оптическая сила. [2]

Несовпадение формы роговицы с изготовленной линзой приводит к искажению параметров требуемой коррекции, неудобству ношения такой линзы. Подобные несовпадения показаны на рис. 1.

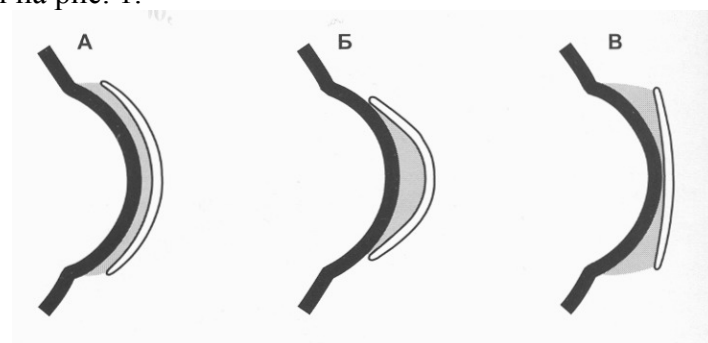


Рис. 1. Несовпадение формы роговицы с изготовленной линзой

Слезная жидкость образует «плюс» линзу, если ее задняя поверхность повторяет форму роговицы (А). Слезная жидкость образует плюсовую линзу, если линза «круче» роговицы. Слезная жидкость образует «минусовую» линзу, если линза «плоче» роговицы. Наличие подобной слезной линзы приводит к искажению оптических параметров изготовленной линзы.

При небольших отклонениях изготовленной линзы от рассчитанных параметров жесткую контактную линзу можно модифицировать в лаборатории:

- подправить оптическую силу на 0,5Д;
- отполировать царапины;
- смягчить переходную или стыковочную зоны;
- подправить кривизну периферической зоны;
- уменьшить кривизну промежуточной зоны;
- уменьшить диаметр оптической зоны;
- уменьшить полный диаметр линзы, сделав слишком тугую посадку более свободной;
- отполировать и обработать края линзы [2].

Выше перечислены те характеристики глаза пациента, которые имеют значение при выборе дизайна и расчете соответствующей жесткой контактной линзы.

### **Производство жестких контактных линз**

Имеется 3 различных технологии, используемых при изготовлении ЖГП контактных линз:

- технология с обработкой принудительно деформированной заготовки;
- токарные станки для обработки торической поверхности;
- метод шлифования с последующим полированием

Технология с обработкой принудительно деформированной заготовки – это относительно дешевый способ производства торической поверхности с относительно низкими финансовыми издержками. Станки, способные обрабатывать торические поверхности, дороги, но требуют от работника меньшего мастерства. Современные станки с компьютерным управлением изготавливают прекрасные торические линзы. Полученные линзы трудно полировать, и полировка может изменить кривизну поверхности. От ручной доводки сейчас практически полностью отказались (она требует обязательного технического контроля, и после нее часто возникают проблема плохой смачиваемости поверхности линзы) [5].

Мы рассмотрим наиболее часто используемый у нас способ обработки оптической детали из прозрачных полимерных материалов на прецизионном сферотокарном станке.

Линзы, произведенные в лаборатории, должны обладать, кроме полного соответствия требуемым параметрам, следующими качествами:

- гибкостью
- оптимальной толщиной
- хорошей смачиваемостью (зависит от свойств материала и от шероховатости обработанной поверхности).

Эти параметры, в свою очередь, зависят от:

- материала линзы (смачиваемость, гибкость).
- дизайна линзы (толщина, соответствие заданным оптическим параметрам).
- точных параметров установки станка

Для определения точных параметров станка необходимо знать следующие параметры линзы.

1. Данные кератометра (К-значения). По ним определяются радиусы кривизны периферических зон.
2. Видимый диаметр роговицы по горизонтали (ВДРГ). По ним определяется полный диаметр линзы.
3. Оптическая сила.



4. Диаметр зрачка при нормальном освещении. Таким образом определяется диаметр оптической зоны линзы.

При наличии в лаборатории ограниченного ассортимента материалов для производства жестких контактных линз врач-офтальмолог может задать параметры линзы, которые в этих условиях невозможно реализовать. Это приведет к увеличению времени выполнения заказа, а также к увеличению стоимости линзы, так как в лаборатории будут вынуждены опытным путем искать линзу с параметрами, наиболее близкими к расчетным. Для помощи в решении подобных проблем и предназначена данная система. Блок-схема работы системы представлена на рис. 2.

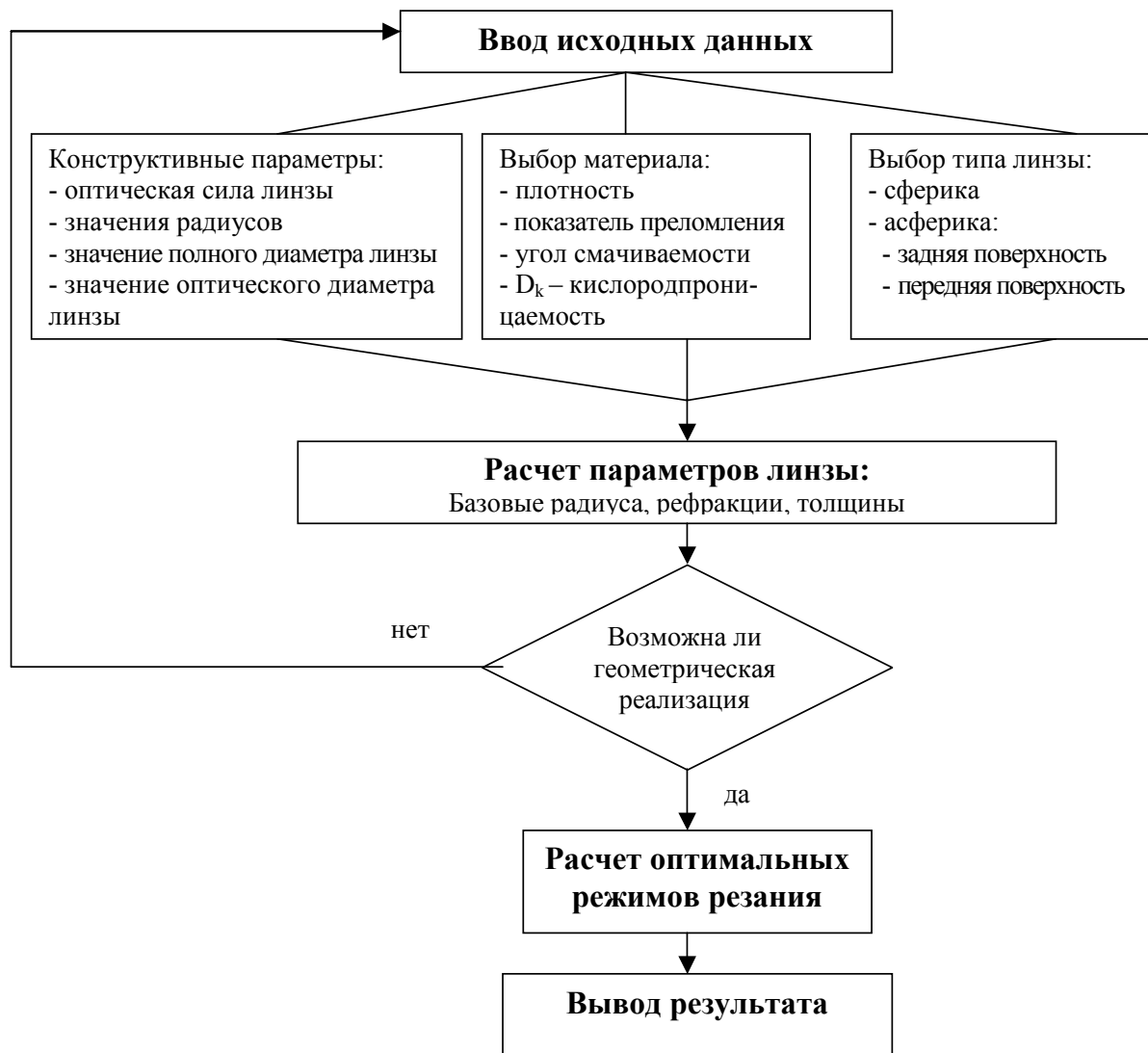


Рис. 2. Блок-схема системы выбора оптимальных параметров станка

### Заключение

Предлагаемая система окажется полезной для организации труда и производства лаборатории жестких контактных линз. Она позволит сократить время выбора материала и, соответственно, время изготовления и стоимости каждой линзы. В процессе работы была уточнена модель обработки жесткой контактной линзы из газопроницаемых материалов на сферотокарном станке [1].

## Литература

1. Рудин Я.В. Технология офтальмологических элементов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2000.
2. Минаев Ю.Л. Жесткие контактные линзы. // Глаз. 2000. №3. С 25–35.
3. Минаев Ю.Л. Жесткие контактные линзы. // Глаз. 2000. №4. С 30–35.
4. Уокер Дж. Новые материалы и дизайны жестких контактных линз // Вестник оптометрии. 2001. №5. С 20–28.
5. Растон Д. Подбор жестких газопроницаемых торических линз. // Вестник оптометрии. 2002 №1. С. 30–36

# СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ГАРМОНИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

К.В. Каряев, Э.С. Путилин

Рассмотрена возможность синтеза неоднородных покрытий с гармонической модуляцией показателя преломления и заданными спектральными характеристиками методом сопряженных градиентов. В качестве параметров использовались толщина неоднородного слоя, период модуляции и величина начального сдвига гармонической функции. Рассмотрен синтез покрытий, состоящих из одного или двух таких слоев. Предложено усовершенствование метода сопряженных градиентов за счет построения адаптивной сетки.

## 1. Введение

Многослойные оптические системы находят широкое применение в науке и технике [1]. Одной из важнейших проблем прикладной оптики остается синтез подобных многослойных систем, удовлетворяющих определенным критериям. В роли таких критериев могут выступать, например, спектральные и фазовые характеристики, лучевые свойства, критерии практической реализуемости покрытия.

Одним из наиболее перспективных численных методов синтеза без начального приближения остается метод игольчатых вариаций, предложенный для решения задач синтеза многослойных оптических систем А.Н. Тихонравовым [2]. Этот метод отлично зарекомендовал себя при синтезе покрытий, образованных слоями с чередующимися показателями преломления, и при синтезе покрытий, образованных материалами с тремя различными показателями преломления, для работы при наклонном падении излучения.

Задача синтеза неоднородных покрытий в настоящее время решается преимущественно Фурье-методами. Однако Фурье-методы, как правило, порождают системы с крайне сложным профилем показателя преломления, что предъявляет высокие требования к технологическому процессу, подчас не позволяя получить конструкцию системы, легко воспроизводимой на практике.

В данной работе предлагается подход к синтезу многослойных неоднородных покрытий на основе использования стандартных профилей показателя преломления с вариацией параметров неоднородности. Этот подход является естественным развитием формализации систем, образованных однородными слоями, что позволяет использовать разработанные методы многомерной оптимизации в ограниченной области и допускает применение метода игольчатых вариаций (с введением дополнительных условий на границах между слоями). С другой стороны, полученные конструкции покрытий, будучи описаны элементарными функциями, снижают требования к технологическому процессу при практическом изготовлении покрытий.

## 2. Математическая модель

### 2.1. Представление неоднородного слоя

В классической модели многослойного покрытия [1] показатель преломления каждого слоя считается постоянным (см. рис. 1):

$$n_i(z) = n_i \quad (1)$$

Мы рассмотрели неоднородные покрытия со слоями, показатели преломления которых меняются по гармоническому закону (см. рис. 2):

$$n_i(z'_i) = \frac{n_{iL} + n_{iH}}{2} + \frac{n_{iH} - n_{iL}}{2} \sin \frac{2\pi(z'_i - z_i^{(0)})}{\Delta z_i} \quad (2)$$

$$z'_i = z - z_i$$

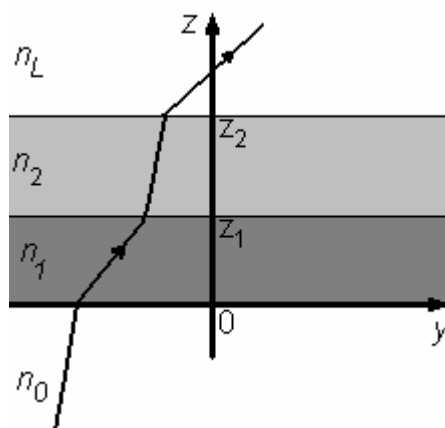


Рис. 1: Многослойная оптическая система

При совмещении нескольких таких слоев показатель преломления покрытия может оказаться как непрерывной, так и кусочно-непрерывной функцией. В данной работе мы не накладывали ограничения непрерывности показателя преломления на границах между слоями.

## 2.2. Описание распространения света в покрытии

Для описания распространения света внутри покрытий использовался формализм характеристических матриц [1], причем характеристическая матрица каждого неоднородного слоя вычислялась как произведение характеристических матриц достаточно тонких (0.25–2 нм) подслоев, каждый из которых считался однородным.

Согласно [1], амплитудные коэффициенты отражения и пропускания могут быть выражены через элементы характеристической матрицы покрытия следующим образом:

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} p_L) p_1 - (m_{21} + m_{22} p_L)}{(m_{11} + m_{12} p_L) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_L)} \quad (3)$$

$$t = \frac{2 p_1}{(m_{11} + m_{12} p_L) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_L)}$$

Энергетические коэффициенты отражения и пропускания (отражательная и пропускательная способности) вычисляются по следующим формулам:

$$R = |r|^2$$

$$T = \frac{p_1}{p_L} |t|^2 \quad (4)$$

$$A = 1 - T - R$$

Отметим, что везде далее слои нумеруются от внешней среды (а не от подложки), а коэффициенты отражения и пропускания выражаются в относительных долях, а не процентах.

## 2.3. Метод синтеза

Для оценки качества покрытия, для которого задана целевая спектральная характеристика энергетического коэффициента отражения  $\bar{R}(\lambda)$ , использовался целевой функционал в следующей форме:

$$F(n(z)) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w_k \left[ R(n(z), \lambda_k) - \bar{R}(\lambda_k) \right]^2 \quad (5)$$

В рамках поставленной задачи мы считали для каждого слоя показатели преломления  $n_{IH}$  и  $n_{IL}$  заданными. Тогда, с учетом выражения (2), для  $N$ -слоистого покрытия с гармонической модуляцией показателя преломления в слоях формула (5) переписывается в виде

$$F(d_1, z_1^{(0)}, \Delta z_1, \dots, d_N, z_N^{(0)}, \Delta z_N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w_k \left[ R(d_1, z_1^{(0)}, \Delta z_1, \dots, d_N, z_N^{(0)}, \Delta z_N, \lambda_k) - \bar{R}(\lambda_k) \right]^2 \quad (6)$$

где  $d_1$  – геометрическая толщина слоя;  $z_1^{(0)}, \Delta z_1$  – параметры слоя в соответствии с (2).

В силу специфики структуры рассматриваемого класса покрытий прежде всего интересен вопрос применимости методов многомерной оптимизации [3], например, класса методов типа спуска. Нами для оптимизации характеристик покрытия использовался метод сопряженных градиентов.

Градиент целевой функции (6) вычислялся по приближенным формулам

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial d_i} &= \frac{F(\dots, \bar{d}_i, z_i^{(0)}, \Delta z_i, \dots) - F(d_1, z_1^{(0)}, \Delta z_1, \dots, d_N, z_N^{(0)}, \Delta z_N)}{\bar{d}_i - d_i} \\ \frac{\partial F}{\partial z_i^{(0)}} &= \frac{F(\dots, d_i, \bar{z}_i^{(0)}, \Delta z_i, \dots) - F(d_1, z_1^{(0)}, \Delta z_1, \dots, d_N, z_N^{(0)}, \Delta z_N)}{\bar{z}_i^{(0)} - z_i^{(0)}} \\ \frac{\partial F}{\partial \Delta z_i} &= \frac{F(\dots, d_i, z_i^{(0)}, \bar{\Delta z}_i, \dots) - F(d_1, z_1^{(0)}, \Delta z_1, \dots, d_N, z_N^{(0)}, \Delta z_N)}{\bar{\Delta z}_i - \Delta z_i} \end{aligned} \quad (7)$$

Как известно, эти методы требовательны к выбору начального приближения. Нами рассматривались два класса задач: синтез просветляющих покрытий и синтез зеркал. Соответственно, были выбраны два различных начальных приближения:

- для просветляющих покрытий – слой, составляющий один период гармонической функции,
- для зеркал – слой, состоящий из нескольких (порядка 10) полупериодов гармонической функции.

Естественными условиями для задачи многомерной оптимизации являются условия вида:

$$d_i > 0. \quad (8)$$

Учет этих условий производился на каждом шаге алгоритма оптимизации путем удаления всех слоев покрытия, для которых оно не выполнялось.

Выражения (4)–(6) позволяют применять метод сопряженных градиентов (или любой иной метод типа спуска) для оптимизации покрытий указанной структуры. Отметим, однако, что в общем случае методы типа спуска обеспечивают нахождение только локального минимума.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Неоднородные просветляющие покрытия

Для иллюстрации возможностей синтеза неоднородных просветляющих покрытий была поставлена задача просветления границы воздуха с оптически плотным материалом ( $n_0 = 1, n_L = 1.96$ ) в диапазоне 400–700 нм. Для формализации условий была задана сетка с шагом 10 нм в диапазоне 380–710 нм. В каждом узле сетки требовалось

полное просветление ( $R=0$ ). В качестве начального приближения было выбрано покрытие толщиной 360 нм со следующим распределением показателя преломления (см. рис. 2):

$$n(z) = 1.67 + 0.29 \sin \frac{2\pi(z - 90)}{360}. \quad (9)$$

Спектральная характеристика коэффициента отражения для данного покрытия приведена на рис. 3. Фактически – это покрытие, обеспечивающее максимумы отражения (величиной 0,10–0,11) на длинах волн 400 нм и 600 нм. Целевая функция составляет для него  $5.75 \cdot 10^{-3}$ , а среднеквадратичное отклонение спектральной характеристики отражательной способности от требуемой (являющееся среднеквадратичным коэффициентом отражения) – 0.076.

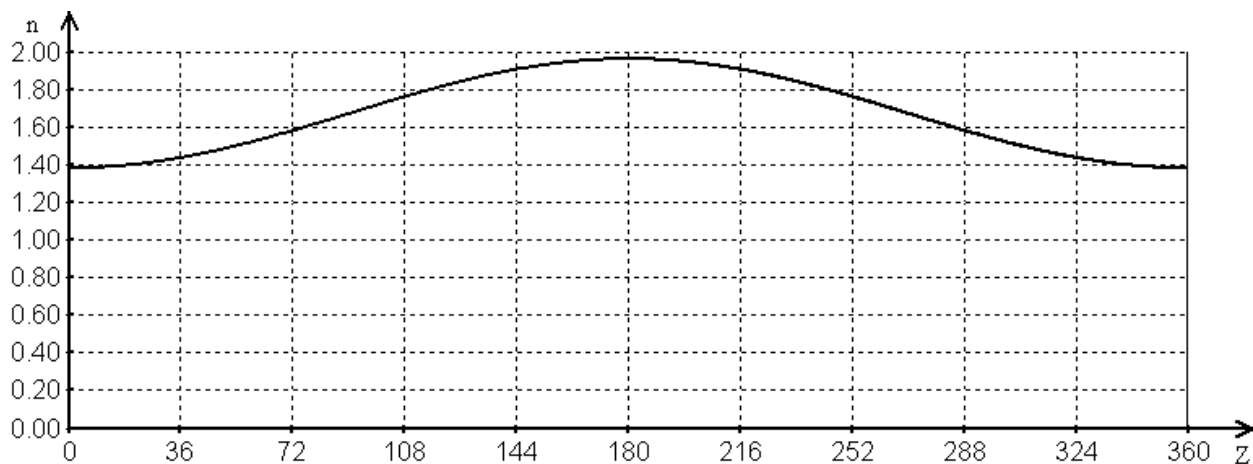


Рис. 2. Профиль показателя преломления исходного покрытия для задачи просветления.

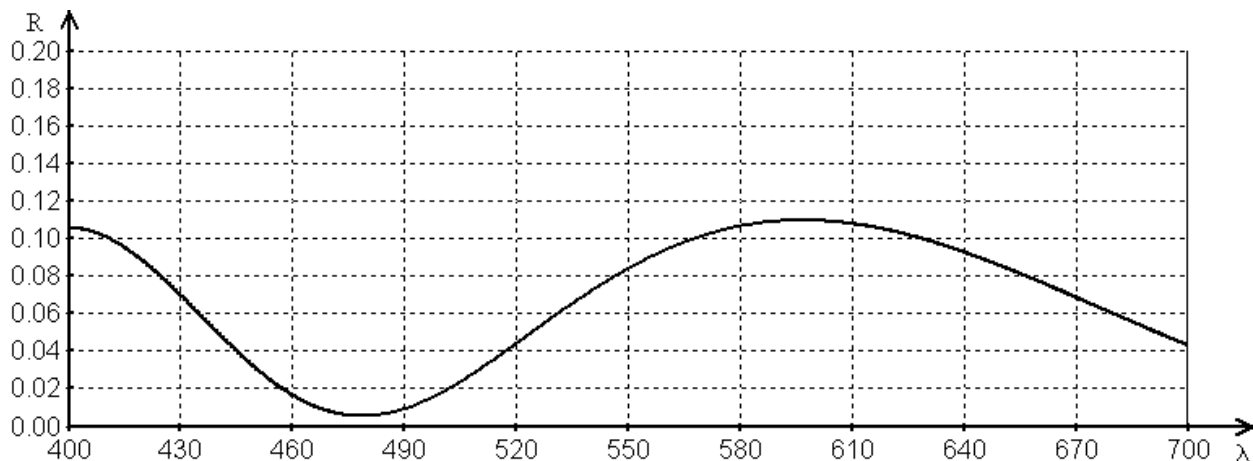


Рис. 3. Коэффициент отражения исходного покрытия (рис. 2) для задачи просветления в диапазоне 400–700 нм.

В соответствии с (6), мы имеем трехмерное пространство параметров оптимизации. В результате оптимизации методом сопряженных градиентов было получено покрытие толщиной 145.5 нм со следующим распределением показателя преломления (см. рис. 4):

$$n(z) = 1.67 + 0.29 \sin \frac{2\pi(z + 88.33)}{229.31} \quad (10)$$

Спектральная характеристика синтезированного покрытия приведена на рис. 5. Видно, что коэффициент отражения во всей области не превышает 0,02 и имеет мини-

мум около 530 нм. Целевая функция составляет для него чуть более  $1 \cdot 10^{-4}$ , а среднеквадратичный коэффициент отражения – чуть более 0.01.

Заметим, что толщина покрытия уменьшилась почти в два с половиной раза, а период – более чем в полтора раза. Начальная фаза синусоиды, как и следовало ожидать, изменилась на почти противоположную.

При попытке использовать в качестве начального приближения слой, состоящий из нескольких периодов гармонической функции, данное оптимальное решение не было достигнуто. Применение метода сопряжены градиентов приводило к попаданию в локальный минимум, соответствующий заданному количеству периодов гармонической функции, а среднеквадратичный коэффициент отражения, как и следовало ожидать, был выше оптимального.

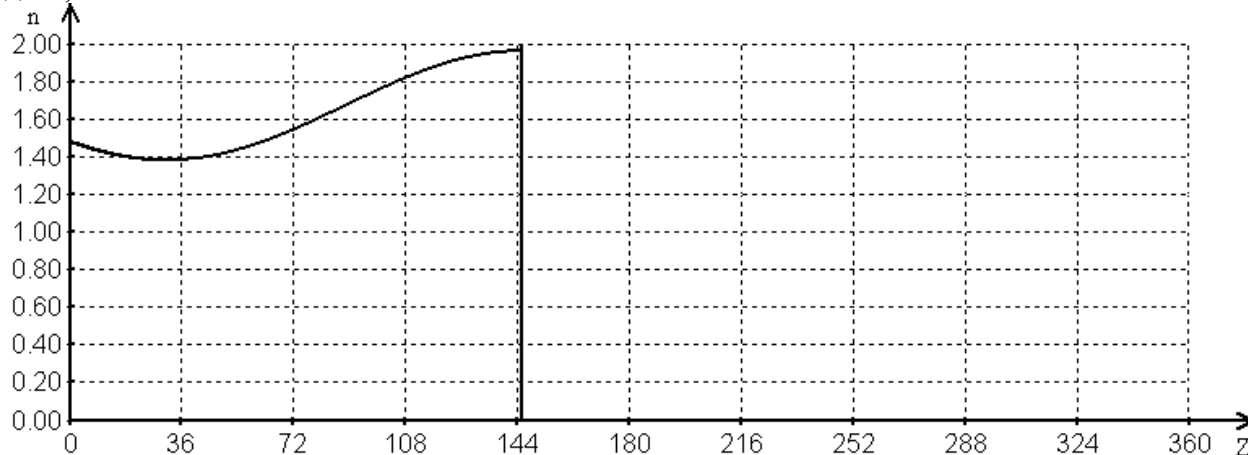


Рис. 4. Профиль показателя преломления полученного покрытия для задачи просветления

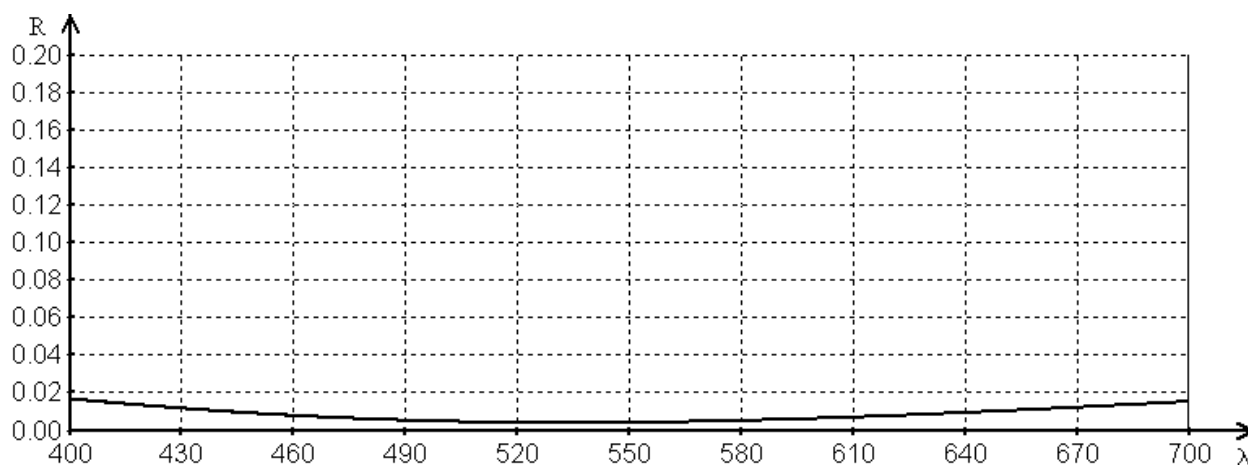


Рис. 5. Коэффициент отражения полученного покрытия (рис. 4) для задачи просветления в диапазоне 400–700нм

Таким образом, синтез методом сопряженных градиентов позволяет получать просветляющие покрытия при использовании в качестве начального приближения неоднородного слоя, составляющего один период гармонической функции. Важно, что начальное приближение может и не удовлетворять условиям просветления для данной области. Отметим, что полученное покрытие обладает лучшими характеристиками, чем хорошо известный класс неоднородных просветляющих покрытий, образованных полупериодом синусоиды [4].

### 3.2. Неоднородные зеркальные покрытия

Для неоднородных зеркальных покрытий были попытки решить два класса задач: расширение зоны высокого отражения и сдвиг зоны высокого отражения. Вообще говоря, обе задачи имеют практическое значение как для реоптимизации конструкций, полученных аналитическими методами, так и для восстановления истинной структуры покрытия с учетом погрешностей, внесенных при изготовлении покрытия (например, методами вакуумного напыления).

**Расширение зоны высокого отражения неоднородных зеркальных покрытий.** Для иллюстрации возможностей расширения зоны высокого отражения неоднородных зеркальных покрытий была поставлена задача расширения зоны высокого отражения зеркального покрытия на подложке из кварцевого стекла ( $n_0 = 1, n_L = 1.52$ ).

Исходное покрытие состояло из одного неоднородного слоя толщиной 4144 нм, составлявшего 14 периодов гармонической функции (неоднородный аналог 28-слойного зеркала с однородными слоями равной геометрической толщины [5]) с центральной длиной волны 1060 нм (см. рис. 6). В диапазоне 950–1200 нм это покрытие имеет коэффициент отражения более 0.9 (см. рис. 7). Задача состояла в расширении зоны высокого отражения до диапазона 900–1200 нм с получением наибольшего отражения в данном диапазоне.

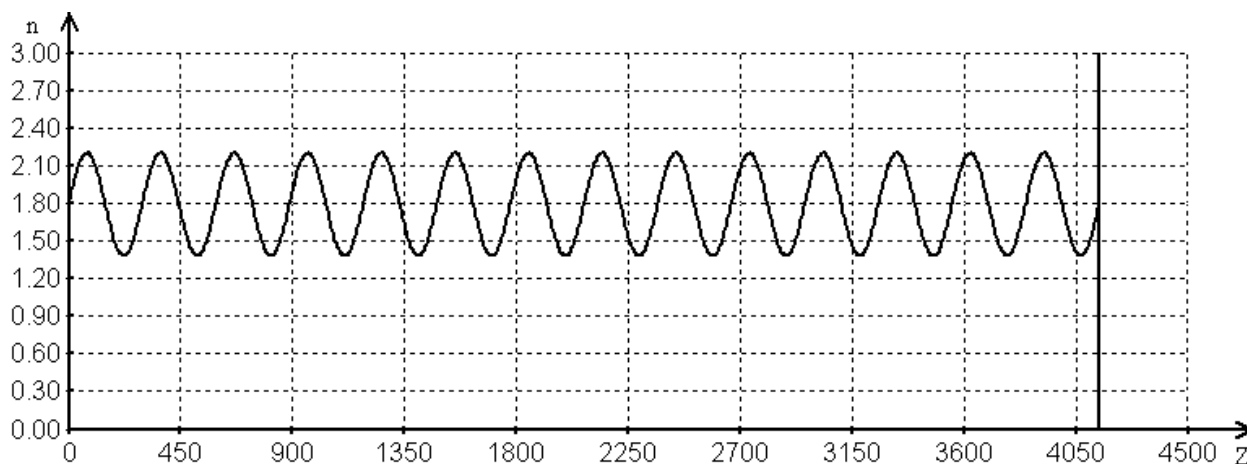


Рис. 6. Профиль показателя преломления исходного покрытия для задачи расширения зоны высокого отражения

Для формализации условий была задана сетка с шагом 20 нм в диапазоне 880–1220 нм. В каждом узле сетки требовалось полное отражение ( $R=1$ ). Исходный неоднородный слой был разбит на два логических слоя по 7 периодов:

$$\begin{aligned} n_1(z) &= 1.79 + 0.41 \sin \frac{2\pi z}{296} \\ n_2(z) &= 1.79 + 0.41 \sin \frac{2\pi z}{296} \end{aligned} \quad (11)$$

Целевая функция составляет для исходного покрытия 0.13, а среднеквадратичное отклонение спектральной характеристики отражательной способности от требуемой (являющееся среднеквадратичным коэффициентом пропускания) – 0.37.

После этого был запущен процесс оптимизации. В соответствии с (6), мы имеем шестимерное пространство параметров оптимизации. В результате оптимизации методом сопряженных градиентов было получено покрытие толщиной 4202 нм (I слой – 2127 нм,

II слой – 2075 нм) со следующим распределением показателя преломления (см. рис. 8):



$$n_1(z) = 1.79 + 0.41 \sin \frac{2\pi(z + 26.61)}{312.37}$$

$$n_2(z) = 1.79 + 0.41 \sin \frac{2\pi(z - 34.91)}{245.04}$$
(12)

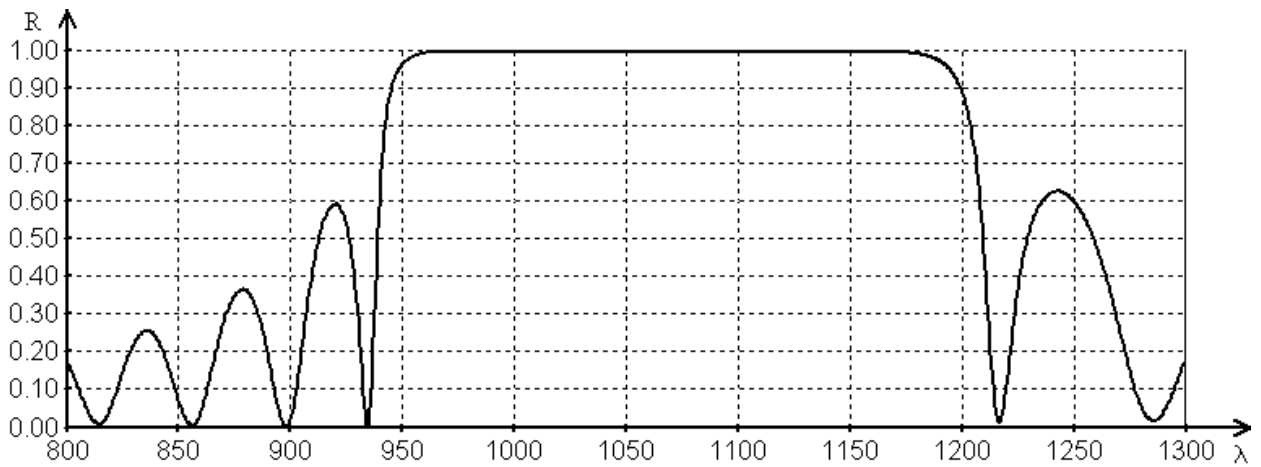


Рис. 7. Коэффициент отражения исходного покрытия (рис. 6) для задачи расширения зоны высокого отражения в диапазоне 800–1300нм.

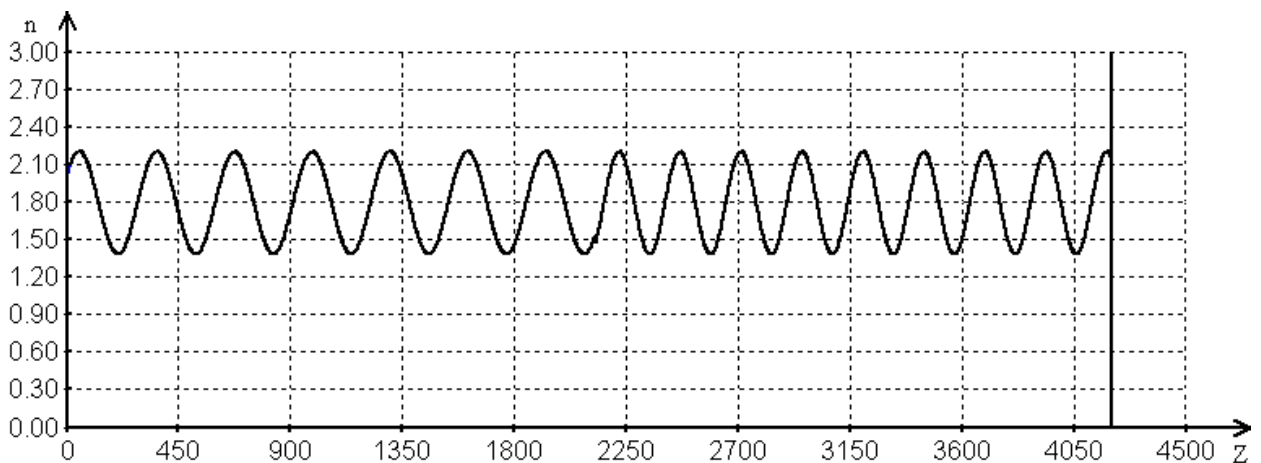


Рис. 8. Профиль показателя преломления полученного покрытия для задачи расширения зоны высокого отражения

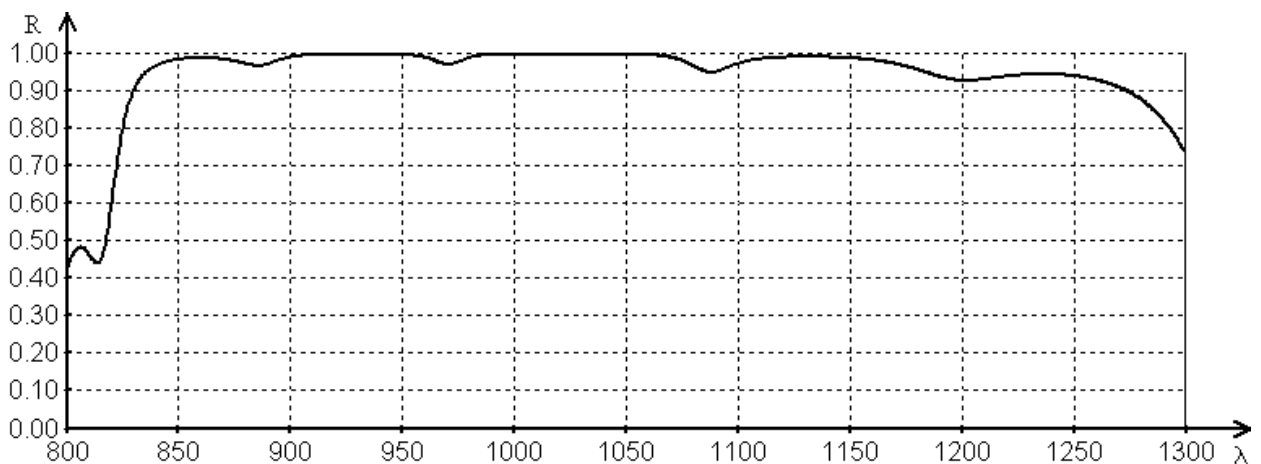


Рис. 9. Коэффициент отражения полученного покрытия (рис. 8) для задачи расширения зоны высокого отражения в диапазоне 800–1300 нм

Спектральная характеристика отражения синтезированного покрытия приведена на рис. 9. Видно, что коэффициент отражения во всей области превышает 0,94. Целевая функция составляет для него чуть более  $6 \cdot 10^{-4}$ , а среднеквадратичный коэффициент пропускания – чуть менее 0,025.

Заметим, что толщина покрытия почти не изменилась (~1,5%), а периоды двух слоев изменились на 5–20%. За счет изменения периодов гармонической функции, определяющей показатель преломления в слоях, очевидно, и произошло расширение зоны высокого отражения зеркала. Особый интерес представляет тот факт, что показатели преломления двух слоев оказались «сшиты» (разница показателей преломления на стыке составила ~0.04). Фактически это означает сохранение свойства непрерывности исходного покрытия.

Другая важная особенность (в отличие от синтеза однослойных покрытий) – изменение числа периодов покрытия: 6.81 периодов для первого слоя и 8.47 периодов для второго слоя. Из этого наблюдения следует важный вывод: расширение зоны высокого отражения возможно только в известных пределах. Эти пределы определяются количеством периодов исходного покрытия и контрастом минимального и максимального показателей преломления. Так, для использованных в данной задаче материалов максимальная зона высокого отражения каждого неоднородного слоя определяется соотношением для относительной ширины:

$\frac{\lambda_u}{\lambda_d} = 1.26$ . С учетом выбранного количества пе-

риодов коэффициент отражения в этой зоне больше 0.9. Зона отражения, для которой  $R > 0.99$ , имеет относительную ширину 1.23. Таким образом, с учетом свойства сохранения числа периодов покрытия, попытка синтезировать покрытие с относительной шириной 1.45 и более (например, для диапазона 800–1200нм) при выбранном начальном приближении обречена на неудачу – скорее всего, в результате получится узкополосный фильтр. Однако при увеличении числа слоев можно создавать покрытия с относительной шириной, достигающей 1.58 и более при использовании более чем двух мультипериодических неоднородных слоев.

**Сдвиг зоны высокого отражения неоднородных зеркальных покрытий.** Для иллюстрации возможностей синтеза неоднородных просветляющих покрытий была поставлена задача сдвига зоны высокого отражения зеркального покрытия на подложке из кварцевого стекла ( $n_0 = 1, n_L = 1.52$ ).

В качестве начального приближения было выбрано то же покрытие, что и в предыдущей задаче (см. рис. 6). В диапазоне 950–1200нм это покрытие имеет коэффициент отражения более 0.9 (см. рис. 7). Задача состояла в сдвиге зоны высокого отражения в область 900–1100нм.

Для формализации условий была задана сетка с шагом 20 нм в диапазоне 900–1100 нм. В каждом узле сетки требовалось полное отражение ( $R=1$ ). Исходный неоднородный слой был задан следующей формулой:

$$n(z) = 1.79 + 0.41 \sin \frac{2\pi z}{296}. \quad (13)$$

После этого был запущен процесс оптимизации. В соответствии с (6), мы имеем трехмерное пространство параметров оптимизации. Выяснилось, что в силу наличия у исходного покрытия побочного максимума отражения, отстоящего всего на 100 нм от границы основной зоны отражения, лобовой поиск минимума не позволяет достигнуть требуемого сдвига. Очевидно, что для решения задачи нужно, прежде всего, уменьшить период гармонической функции. График целевой функции вдоль соответствующей координаты приведен на рис. 10. Видно, что наличие побочного максимума отражения создает побочный локальный минимум целевой функции, который, как показывает численный эксперимент, не преодолевается оптимизацией по равномерной сетке.

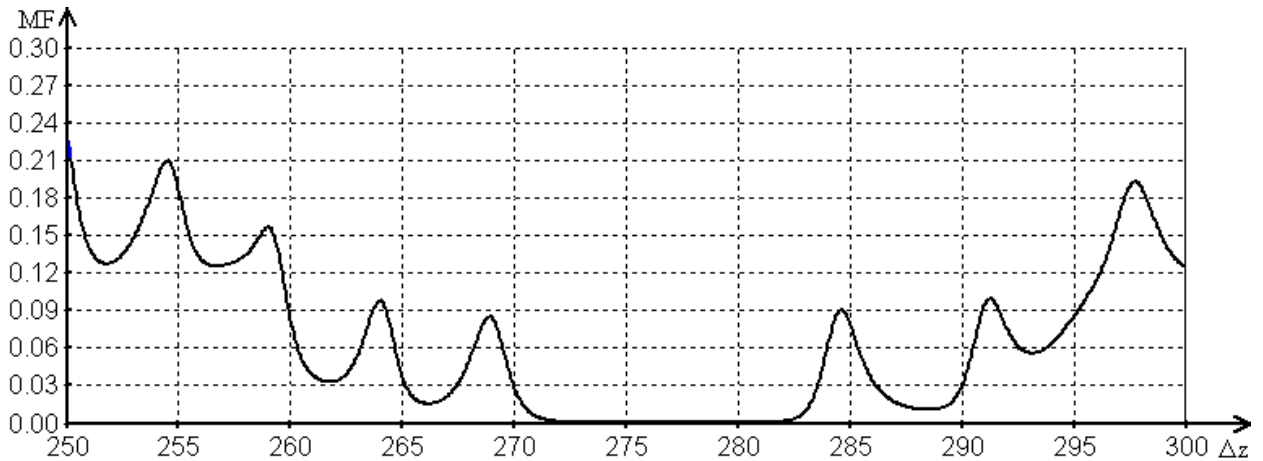


Рис. 10. Зависимость целевой функции от величины периода гармонической функции неоднородного слоя для задачи сдвига зоны высокого отражения. Исходное значение  $\Delta z = 296$

Для решения задачи был использован метод «временных условий». Временные условия используются для равномерного сгущения сетки и вычисляются методом линейной интерполяции по исходной сетке. После этого задается максимальное допустимое отклонение  $\Delta$  коэффициента отражения для всех длин волн  $\lambda_k$ , и часть временных условий, удовлетворяющих неравенству

$$\left| R(d_1, z_1^{(0)}, \Delta z_1, \dots, d_N, z_N^{(0)}, \Delta z_N, \lambda_k) - \bar{R}(\lambda_k) \right| < \Delta, \quad (14)$$

удаляется. Таким образом, оптимизация проводится итерационно в два шага: на первом вычисляется сгущенная сетка, на втором производится нахождение минимума целевой функции на данной сетке. Использование  $\Delta = 0.40$  и пяти «временных» условий на каждом шаге исходной сетке позволили достигнуть требуемого сдвига зоны высокого отражения.

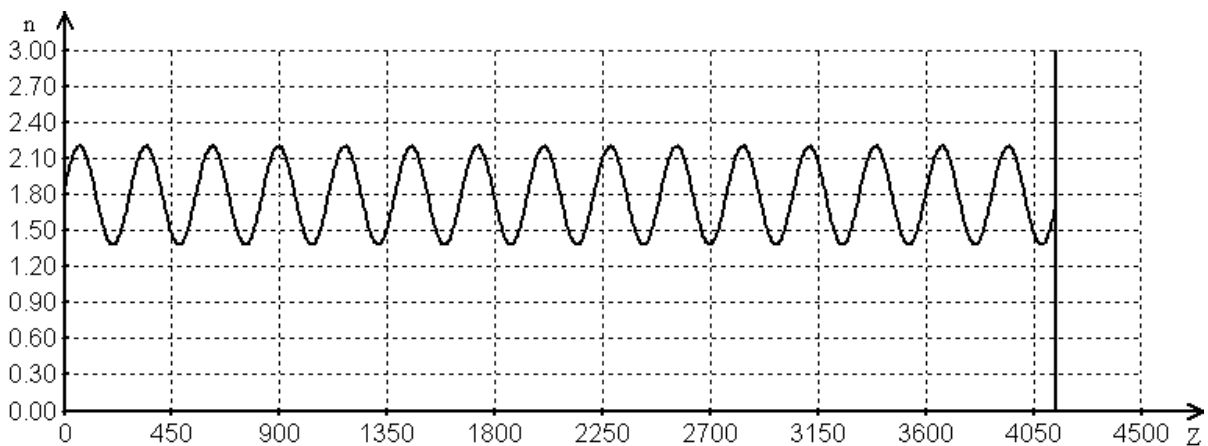


Рис. 11. Профиль показателя преломления полученного покрытия для задачи сдвига зоны высокого отражения

В результате оптимизации данным методом было получено покрытие толщиной 4144 нм со следующим распределением показателя преломления (см. рис. 11):

$$n(z) = 1.79 + 0.41 \sin \frac{2\pi(z + 4.34)}{277.15}. \quad (15)$$

Спектральная характеристика синтезированного покрытия приведена на рис. 12. Видно, что коэффициент отражения во всей области превышает 0,99. Целевая функция

составляет для него чуть более  $5 \cdot 10^{-6}$ , а среднеквадратичный коэффициент пропускания – чуть более 0,002.

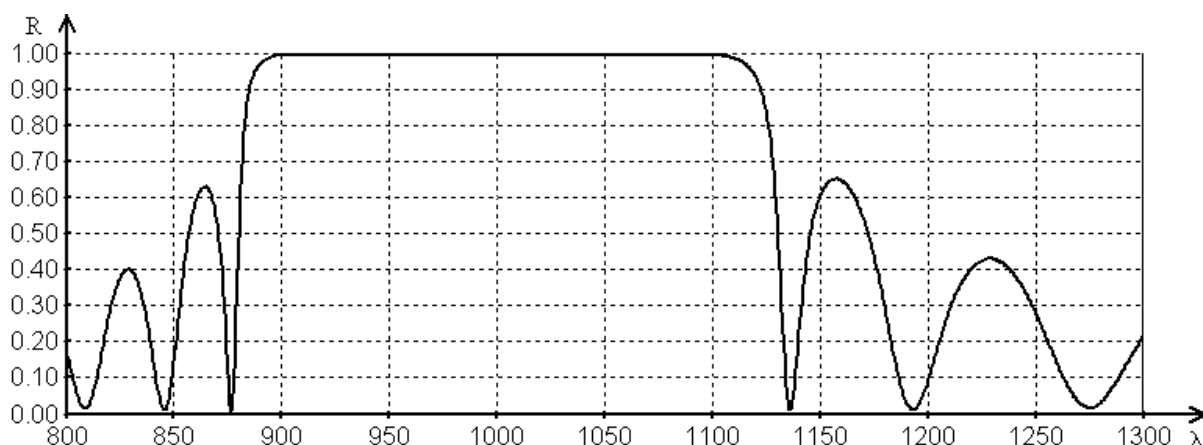


Рис. 12. Коэффициент отражения полученного покрытия (рис. 11) для задачи сдвига зоны высокого отражения в диапазоне 800–1300 нм

Отметим, прежде всего, сохранение геометрической толщины покрытия и требуемое изменение периода гармонической функции. Таким образом, описанное усовершенствование (по существу, введение «адаптивности») метода оптимизации позволило решить требуемую задачу.

Однако при увеличении требуемого сдвига возможно попадание в локальный минимум даже усовершенствованного метода оптимизации, а также его «блуждание» между двумя соседними локальными методами.

### Заключение

В ряде частных случаев возможно использование методов многомерной оптимизации для синтеза покрытий с требуемыми спектральными характеристиками. Основной проблемой остается проблема выбора начального приближения. Другие проблемы, возникающие при решении данной задачи, в целом аналогичны проблемам синтеза неоднородных оптических покрытий: отсутствие методов глобальной оптимизации и невозможность менять количество параметров, определяющих структуру покрытия.

С другой стороны, ряд специфических особенностей позволяет надеяться на возможность создания аналога метода игольчатых вариаций для неоднородных покрытий, что позволит снять проблему выбора начального приближения.

Применение параметризованных неоднородных слоев позволяет в ряде практически важных случаев успешно проводить синтез и реоптимизацию покрытий.

Важным практическим значением обладает тот факт, что синтез неоднородных покрытий с использованием методов многомерной оптимизации является значительно более ресурсоемким по сравнению с синтезом однородных покрытий.

При синтезе просветляющих покрытий с гармонической модуляцией показателя преломления методы многомерной оптимизации позволяют варьировать и период модуляции, и толщину покрытия.

При синтезе зеркал с гармонической модуляцией показателя преломления методы многомерной оптимизации позволяют варьировать период модуляции, но практически не позволяют варьировать общую геометрическую толщину покрытия.

Для задачи сдвига области высокого отражения при синтезе зеркал алгоритмы типа спуска часто попадают в локальные минимумы, связанные с побочными максимумами отражения. Введение «временных» условий и адаптивной неравномерной сетки

позволяет в ряде случаев успешно решать эту проблему. Однако этот подход требует дополнительных вычислительных ресурсов.

### Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Москва, 1970.
2. Sh. Furman and A.V.Tikhonravov. Basics of optics of multilayer systems. Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 1992, 242 p.
3. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. Киев, 1983. 512 с.
4. Майа Х. Неоднородные оптические покрытия (исследование возможностей метода совместного осаждения диэлектрических плёнок при вакуумном испарении), Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, 1999.
5. Karyayev K.V., Putilin E.S. Spatial distribution of electric energy in multilayer and inhomogeneous dielectric mirrors. // Advances in Optical Thin Films. Proc. of SPIE. V.5250

## НАШИ АВТОРЫ

---

- Бандюк Ольга Васильевна** – научный сотрудник ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»
- Беликов Андрей Вячеславович** – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики
- Бобцов Алексей Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления и информатики
- Васильев Владимир Николаевич** – доктор технических наук, профессор, ректор
- Вейко Вадим Павлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения
- Волков Михаил Владимирович** – аспирант кафедры компьютерной фотоники
- Гатчина Юлия Юрьевна** – аспирант кафедры проектирования компьютерных систем
- Гуров Игорь Петрович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерной фотоники
- Дмитриев Александр Леонидович** – доктор технических наук, профессор кафедры твердотельной оптоэлектроники
- Домненко Виталий Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики
- Иванов Андрей Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики
- Ионина Наталья Владимировна** – ведущий инженер ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»
- Калабаева Юлия Анатольевна** – студентка
- Калинин Михаил Алексеевич** – аспирант кафедры прикладной и компьютерной оптики
- Карасев Вячеслав Борисович** – кандидат технических наук, профессор, проректор
- Каряев Константин Викторович** – аспирант кафедры оптических технологий
- Киеу Кхань** – магистрант кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения
- Козловский Денис Александрович** – старший научный сотрудник ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»
- Коняхин Игорь Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры опико-электронных приборов и систем
- Копорская Дарья Николаевна** – студентка
- Коробейникова Марина Анатольевна** – студентка
- Лисицын Юрий Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии оптического приборостроения.
- Лобанов Сергей Александрович** – аспирант кафедры фотоники и оптоинформатики
- Лукичев Дмитрий Вячеславович** – аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем
- Мирошниченко Георгий Петрович** – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики

**Михайлов Виктор Николаевич** – старший научный сотрудник ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

**Мусалимов Виктор Михайлович** – доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники.

**Назаров Вячеслав Валерьевич** – научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

**Никифоров Владимир Олегович** – доктор технических наук, профессор, проректор

**Павлов Александр Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

**Панков Эрнст Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оптико-электронных приборов и систем

**Порфирьев Леонид Федорович** – доктор технических наук, профессор кафедры оптико-электронных приборов и систем

**Приходько Константин Владимирович** – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

**Путилин Эдуард Степанович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оптических технологий.

**Рудин Ярослав Вадимович** – кандидат технических наук, доцент кафедры оптических технологий

**Скрипник Алексей Владимирович** – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

**Солунин Анатолий Александрович** – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

**Старовойтов Сергей Федорович** – кандидат технических наук, доцент кафедры оптических технологий

**Тимофеев Александр Николаевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией кафедры оптико-электронных приборов и систем

**Ткалич Вера Леонидовна** – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования компьютерных систем

**Толмачев Валерий Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем

**Трухин Михаил Михайлович** – аспирант.

**Усольцев Александр Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем

**Хлопонин Леонид Викторович** – старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

**Храмов Валерий Юрьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой электроники и биомедицинской оптики

**Чиков Константин Никитич** – кандидат технических наук, доцент

**Шалыто Анатолий Абрамович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

**Шехонин Александр Александрович** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной и компьютерной оптики

**Яковлев Евгений Борисович** – доктор технических наук, профессор кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения

# СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>ИТОГИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ УНИВЕРСИТЕТА, ПРОВОДИМЫХ ПО ЗАДАНИЮ МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В 2005 ГОДУ .....</b>	<b>5</b>
<b>Гуров И.П.</b> Компьютерная фотоника: принципы, проблемы и перспективы .....	5
<b>Васильев В.Н., Волков М.В., Гуров И.П.</b> Анализ изображений на основе метода двумерной локально-адаптивной фильтрации .....	21
<b>Толмачев В.А., Усольцев А.А., Лукичев Д.В.</b> Использование нейросетевых устройств в системах векторного управления асинхронным электроприводом .....	28
<b>Шалыто А.А.</b> Автоматно-ориентированное программирование .....	35
<b>Бобцов А.А., Никифоров В.О.</b> Применение алгоритмов адаптации высокого порядка в условиях внешних возмущений .....	42
<b>Ткалич В.Л., Гатчина Ю.Ю., Коробейникова М.А., Копорская Д.Н.</b> Исследование механических и ионных нарушений элементной базы микроэлектроники и микросенсорной техники с помощью эллипсометрии .....	47
<b>Вейко В.П., Яковлев Е.Б.</b> Особенности плавления металлов при лазерном нагревании .....	52
<b>Вейко В.П., Яковлев Е.Б., Киеу К.К.</b> Лазерная аморфизация стеклокерамик: основные закономерности и новые возможности изготовления микрооптических элементов .....	57
<b>Беликов А.В., Карасев В.Б., Назаров В.В., Скрипник А.В., Солунин А.А., Приходько К.В., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю.</b> Исследование особенностей взаимодействия оптического излучения с элементами лазерных систем и биологическими объектами .....	65
<b>Мусалимов В.М., Лисицын Ю.В., Трухин М.М.</b> Пути автоматизации контроля качества поверхностей в реальном режиме времени .....	76
<b>Дмитриев А.Л.</b> Проблемы создания оптически управляемого рельефного модулятора для медицинского применения .....	80
<b>Панков Э.Д., Порфирьев Л.Ф., Коняхин И.А., Тимофеев А.Н., Чиков К.Н.</b> Результаты анализа адекватности моделей оптико-физических явлений в природных и антропогенных объектах и информационных оптико-электронных системах спектрального мониторинга .....	83
<b>Мирошниченко Г.П.</b> Управление движением атома в ловушке с помощью внешних электромагнитных полей .....	91
<b>Васильев В.Н., Павлов А.В.</b> Голографические технологии для систем искусственного интеллекта .....	95
<b>Бандюк О.В., Козловский Д.А., Михайлов В.Н., Ионина Н.В.</b> Импульсная запись голограмм на фотополимерном материале .....	100
<b>Лобанов С.А.</b> Пространственно-временная динамика стоковой компоненты вынужденного комбинационного рассеяния света .....	105
<b>Путилин Э.С., Старовойтов С.Ф.</b> Влияние малого поглощения на отражательную способность оптических деталей .....	111



<b>Калабанова Ю.А., Рудин Я.В.</b> Разработка системы выбора оптимальных параметров станка при изготовлении индивидуальных жестких контактных линз .....	117
<b>Каряев К.В., Путилин Э.С.</b> Синтез оптических покрытий с гармонической модуляцией показателя преломления .....	122
<b>Шехонин А.А., Домненко В.М.</b> Исследование и разработка новых методов компьютерного синтеза и оптимизации оптических систем различного назначения .....	133
<b>Иванов А.В., Калинин М.А.</b> Разработка методов и алгоритмов оптимального проектирования многоконфигурационных оптических систем .....	139
<b>НАШИ АВТОРЫ</b> .....	144

**Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО.** Выпуск 21.  
Актуальные проблемы современных оптико-информационных систем и технологий / Главный редактор д.т.н., проф. В.Н. Васильев – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 148 с.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК СПбГУ ИТМО**  
**Выпуск 21**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННЫХ**  
**ОПТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**  
**И ТЕХНОЛОГИЙ**

Главный редактор  
доктор технических наук, профессор  
В.Н. Васильев  
Дизайн обложки М.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 904. Тираж 100 экз.