

УДК 535.317

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЫБОРА ИСХОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕИЗОБРАЖАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Р.В. Анитропов^a, П. Бенитез^b, В.Н. Васильев^a, А.С. Зайцева^a,
М.В. Летуновская^a, И.Л. Лившиц^a, С.К. Стафеев^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Мадридский политехнический университет, Мадрид, 28223, Испания

Адрес для переписки: mletunovskaya@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 09.11.15, принята к печати 22.12.15

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-22-29

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Анитропов Р.В., Бенитез П., Васильев В.Н., Зайцева А.С., Летуновская М.В., Лившиц И.Л., Стафеев С.К. Анализ особенностей выбора исходной оптической схемы для расчета неизображающих оптических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. С. 22–29.

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты исследования и структурного анализа композиции и параметрического синтеза проектируемых изображающих и неизображающих оптических систем. Предпринята попытка применения опыта, накопленного для изображающих систем, при проектировании неизображающих систем в виде адаптации теории композиции для расчета неизображающих систем. Выявлен ряд закономерностей, обеспечивающих более глубокое понимание процесса проектирования неизображающих оптических систем, предложены меры по его оптимизации. **Метод.** Исследована применимость некоторых положений теории композиции и синтеза оптических систем к проектированию неизображающих оптических систем. Основные положения теории композиции базируются на разделении всех существующих оптических элементов на четыре типа в зависимости от их функционального назначения, что соответствует модульному принципу проектирования. Аналогичные элементы выявлены в неизображающих оптических системах, что позволило адаптировать теорию композиции для их проектирования.

Основные результаты. Исследованы общие закономерности проектирования неизображающих и изображающих оптических систем. Произведена классификация систем, элементов, а также технических и обобщенных характеристик изображающих и неизображающих оптических систем, формализованы механизмы поиска исходной оптической схемы посредством структурного и параметрического синтеза неизображающей оптической системы. Выявлены основные элементы, входящие в состав неизображающих систем, проведена их классификация по функциональному назначению: базовые, коррекционные, широкоугольные и светосильные. Определены правила, по которым эти элементы могут формироваться, и их состав: отражающие поверхности, преломляющие, сферические и несферические элементы с полным внутренним отражением. Заложены основы теории композиции неизображающих оптических систем. Проведена апробация предложенной методики на примере расчета осветителя для хирургической комнаты. Получена 3D-модель осветительной оптической системы для хирургической комнаты, состоящая из трех идентичных куполов. Показана высокая энергоэффективность осветителя (92,3%), спроектированного по предлагаемой методике.

Практическая значимость. Результаты работы могут найти применение при разработке неизображающих систем различного назначения, например, осветителей, концентраторов и др., и могут обеспечить импортозамещение аналогичных зарубежных устройств. Результаты работы могут быть полезны инженерам, специализирующимся в сфере разработки и (или) эксплуатации неизображающих оптических систем.

Ключевые слова

композиция, синтез оптических систем, неизображающие оптические системы, осветительные системы, светодиоды, первичная оптика, вторичная оптика, изображающие оптические системы, объектив, аберрации, качество оптической системы, параметрический синтез, индекс цветопередачи

Благодарности

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

SPECIAL ASPECTS OF INITIAL OPTICAL SCHEME SELECTION FOR DESIGN OF NON-IMAGING OPTICAL SYSTEMS

R.V. Anitropov^a, P. Benitez^b, V.N. Vasiliev^a, A.S. Zaitceva^a, I.L. Livshits^a,
M.V. Letunovskaya^a, S.K. Stafeev^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 28223, Spain

Corresponding author: mletunovskaya@gmail.com

Article info

Received 09.11.15, accepted 22.12.15

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-22-29

Article in Russian

For citation: Anitropov R.V., Benitez P., Vasiliev V.N., Zaitceva A.S., Livshits I.L., Letunovskaya M.V., Stafeev S.K. Special aspects of initial optical scheme selection for design of non-imaging optical systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 22–29.

Abstract

Subject of Research. The research results, structural composition analysis and the parametric synthesis of the projected imaging and non-imaging optical systems were presented. We made an attempt to use the gained experience about imaging systems while designing non-imaging systems, by adapting the composition theory for the calculations of non-imaging systems. Several patterns were revealed, which provide a deeper understanding of the design process of non-imaging optical systems; measures of its optimization were proposed. **Method.** We investigated the applicability of the theory of composition and synthesis of non-imaging optical systems. The main provisions of the theory of composition are based on the division of all available optical elements in four types depending on their functionality, which corresponds to a modular design. Similar items were identified in non-imaging optical systems and adaptation of composition theory to their design became possible. **Main Results.** General design patterns of imaging and non-imaging optical systems were studied. Classification of systems, components, as well as technical and generic characteristics of imaging and non-imaging optical systems was determined. Search mechanism of the initial optical system by means of structural and parametric synthesis of non-imaging optical system was formalized. The basic elements were determined included in non-imaging systems and their classification by functionality was done. They were subdivided into basic, corrective, wide angle and high aperture ones. The rules for formation of these elements and their composition were determined: surface reflecting, refracting, spherical and nonspherical elements with total internal reflection. The foundations of composition theory for non-imaging optical systems were laid. The approbation of this method was carried out on the example of the illumination system calculation for surgical room. A 3D model of an illumination optical system for surgical room was obtained, consisting of three identical domes. The illuminator designed with the use of the proposed methodology showed high energy efficiency (92.3%). **Practical Relevance.** The results can find application in optical design of non-imaging systems having various functionality, for example, illuminators, concentrators, etc. and can provide import substitution of similar foreign devices. The results can be useful by engineers specializing in the design and/or operation of non-imaging optical systems.

Keywords

composition, optical system synthesis, non-imaging optical systems, illumination systems, LEDs, primary optics, secondary optics, imaging optical systems, lens, aberration, optical system quality, parametric synthesis, color index

Acknowledgements

This work was financially supported by the Government of the Russian Federation, Grant 074-U01.

Введение

Неизображающие оптические системы (НОС) передают и перераспределяют энергию в пространстве, в отличие от изображающих оптических систем (ИОС), которые формируют изображение объекта. В связи с активным развитием НОС их все чаще выделяют в отдельный класс оптических систем, при этом возможно сочетание НОС и ИОС в одном оптическом приборе.

Функции элементов НОС были впервые выделены в диссертационной работе [1]. Здесь же было предложено при расчете НОС различать две подсистемы – первичную и вторичную. К первичной относятся те оптические компоненты, которые не изменяются в ходе расчета (например, оптические компоненты светодиода, входящего в НОС как самостоятельный элемент), к вторичной – компоненты, являющиеся собственно предметом проектирования. Предметом настоящей работы является проектирование вторичных оптических систем в составе НОС.

Проектирование оптических систем, как изображающих, так и неизображающих, основывается на применении законов физики в решении инженерных задач, моделировании и расчете устройств на их основе. Процесс проектирования выполняется в определенной последовательности и включает в себя, в числе прочих, процедуру выбора исходной оптической схемы оптической системы (ОС).

Существуют различные методы выбора исходной ОС. В предлагаемой работе мы исследовали применимость некоторых положений теории композиции и синтеза оптических систем [2] к проектированию НОС. Таким образом, обеспечивается дальнейшее развитие теории композиции в плане ее распространения для проектирования нового класса ОС, где ранее эта теория не применялась.

Теория композиции ОС является более общим вариативным понятием, чем теория синтеза. Их отличие состоит в том, что композиция допускает перемещение элементов друг относительно друга, а при синтезе их положение не меняется.

Основные положения теории композиции базируются на разделении всех существующих оптических элементов на четыре типа в зависимости от их функционального назначения: базовые, коррекционные, широкоугольные и светосильные, что соответствует модульному принципу проектирования [3, 4]. Поскольку в НОС также удалось выявить аналогичные элементы, адаптация теории композиции для их проектирования стала возможной.

Композиция НОС, по аналогии с ИОС, включает в себя два основных этапа:

- структурный синтез (на этом этапе предварительно определяется количество оптических элементов, их тип и взаимное расположение в схеме);
- параметрический синтез (на этом этапе определяются конструктивные параметры оптических элементов, выбранных на этапе структурного синтеза ОС).

Исходная оптическая схема ОС представляет собой набор оптических элементов, имеющих параметры, необходимые и достаточные для получения характеристик, которые требуется обеспечить по техническому заданию (ТЗ). На первом этапе составляют формулу структурного синтеза, которая представляет собою кодированную запись процедуры структурного синтеза для одного или нескольких вариантов исходной оптической схемы ОС. Затем выполняется ее параметрический синтез.

К настоящему времени накоплен большой опыт проектирования ИОС, который, к сожалению, пока мало используется для НОС. Целью представляемой работы являются исследование анализа особенностей выбора исходной ОС для расчета НОС, развитие теории композиции и ее адаптации к расчету НОС. В работе выявлен ряд закономерностей, обеспечивающих более глубокое понимание процесса проектирования НОС, и предложены меры по его оптимизации.

Общие принципы структурного синтеза оптических систем

При проектировании любых ОС особую роль играют системы их классификации, которые обеспечивают не только понимание всего процесса, но и позволяют его формализовать.

Формализация процедуры структурного синтеза НОС необходима для его последующей алгоритмизации и автоматизации.

На рис. 1 показана общая классификация НОС и ИОС, которая является основой для выбора исходной оптической схемы. Классы условно обозначены как 00, 01, 10, 11, где «0» соответствует бесконечно удаленному расположению, «1» – расположению на конечном расстоянии. Здесь же приведены примеры ОС, характерных для каждого класса.



Рис. 1. Классификация оптических систем по расположению предмета/изображения для изображающих оптических систем и источника/приемника для систем неизображающих

Согласно предлагаемому подходу [1, 3], оптические элементы любой ОС устанавливаются в оптической схеме только в соответствии со своим функциональным назначением (табл. 1). При этом в каждом конкретном случае в зависимости от класса оптической схемы ОС выбирают наиболее подходящие элементы для ее реализации.

С целью эффективного использования теории композиции и синтеза целесообразно составлять базы данных (БД) оптических элементов, различая их по функциональному назначению, например, БД базовых элементов, БД коррекционных элементов и др., что позволит в дальнейшем автоматизировать процесс проектирования.

В работе [3] предложена формула структурного синтеза для ИОС класса 01:

$$Y+C+B+C+T+C \tag{1}$$

Обратим внимание на то, что здесь знак «+» отражает последовательность комбинирования отдельных оптических компонентов в ОС. Другими словами, формула (1) описывает, в каком порядке при проектировании целесообразно ставить элементы различного типа (базовый, коррекционный, и т.д.) друг за другом. При этом элементы ИОС обычно расположены в оптической схеме последовательно по ходу луча слева направо.

В настоящей работе предлагается распространить этот подход на НОС. Формула структурного синтеза в этом случае будет иметь следующий вид [2]:

$$B+T+C+Y. \quad (2)$$

Выделим различия выражений (1) и (2). Во-первых, различен содержательный смысл входящих в них элементов (табл. 1). Во-вторых, важной особенностью проектирования НОС является непоследовательный характер прохождения лучей через ОС (лучи могут проходить несколько раз в различных направлениях). Поэтому при их моделировании необходимо использовать программное обеспечение (ПО), позволяющее рассчитывать как последовательный, так и непоследовательный ход лучей. Примерами таких программ являются SYNOPSIS, OSD, ZEMAX, ASAP.

Наименование и функция оптического элемента		Условное обозначение оптического элемента	Оптический элемент для реализации	
ИОС	НОС		ИОС	НОС
Базовый		<i>B</i>	Положительная линза	Линза свободной формы Ступенчатая линза Линза ПВО*
Определяет принципиальную схему исходной ОС				
Коррекционный		<i>C</i>	Отрицательная линза	Линза Френеля Ступенчатый рассеиватель Текстурные элементы
Коррекция остаточных аберраций	Коррекция направления потока лучей			
Светосильный		<i>T</i>	Положительная линза	Линзы свободной формы
Увеличение числовой апертуры				
Широкоугольный		<i>Y</i>	Отрицательная линза	Линзы свободной формы Линзы Френеля
Увеличение изображаемого поля				

* линза с поверхностью полного внутреннего отражения; основана на том принципе, что отражение света при его падении на границу двух прозрачных сред с показателями преломления n_1 и n_2 из среды с большим показателем преломления ($n_1 > n_2$) под углом $\geq \varphi_{кр}$, для которого $\sin \varphi_{кр} = n_2/n_1 = n_{12}$ [5].

Таблица 1. Элементы изображающих и неизображающих оптических систем

Классификация ОС по техническим и обобщенным характеристикам

В табл. 2 представлены наиболее важные для принятия проектных решений технические характеристики объективов ИОС и НОС и их условные обозначения.

Изображающие ОС		Неизображающие ОС	
Технические характеристики	Условное обозначение	Технические характеристики	Условное обозначение
Светосила, безразмерная величина	<i>J</i>	Сила света, кд	<i>J</i>
Угловое поле, угловые единицы	<i>W</i>	Освещенность, лк	<i>E</i>
Фокусное расстояние, мм	<i>F</i>	Световой поток, лм	<i>Φ</i>
Спектральный диапазон, нм	<i>L</i>	Яркость кд/м ²	<i>L</i>
Качество изображения, части длины волны	<i>Q</i>	Индекс воспроизведения цвета, безразмерная величина	<i>R_a</i>
Задний фокальный отрезок, мм	<i>S</i>	Цветовая температура, К	<i>T_c</i>
Положение апертурной диафрагмы (АД), мм (от первой поверхности)	<i>D</i>	Положение апертурной диафрагмы (АД), мм (от первой поверхности)	<i>D</i>

Таблица 2. Технические характеристики оптических систем

Очевидно, что задача классификации ОС для их качественного анализа и последующего проектирования в этом случае имеет излишне большую размерность. В связи с этим предлагается перейти от технических характеристик ОС к обобщенным характеристикам, измеряемым в интервальных шкалах

(рис. 2). В этом случае каждой технической характеристике присваивается не конкретное ее значение, а некоторое условное число, характеризующее ее рабочий диапазон [4]. А именно, «0» соответствует ОС с таким значением технической характеристики, для реализации которой достаточно самой простой оптической схемы; «2» соответствует ОС со значением технической характеристики объектива, схема которого максимально сложна и имеет наибольшее количество элементов для достижения требуемых высоких значений технических характеристик; «1» характеризует ОС, значением технических характеристик которой занимает промежуточное положение по сложности реализации между «0» и «2» [6]. Например, для характеристики «сила света» J обобщенная характеристика «0» означает, что значение ее технической характеристики равно $J < 30$ кд, «1» – $30 < J < 120$ кд и т.д.

Значения границ интервалов, соответствующих обобщенным характеристикам, могут быть получены на основе экспертных оценок. В частности, связь технических и обобщенных характеристик для НОС приведена в [1].

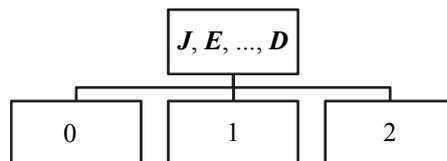


Рис. 2. Обобщенные характеристики неизображающих оптических систем

Переход от технических к обобщенным характеристикам обеспечивает возможность их формализации и введения нового понятия – индекса сложности ОС, под которым понимается алгебраическая сумма обобщенных характеристик каждого компонента объектива:

$$R = J + W + F + L + Q + S + D. \quad (3)$$

Для НОС формула принимает вид

$$R = J + E + \Phi + L + R_a + T_c + D. \quad (4)$$

Обобщенные характеристики ОС, в отличие от технических характеристик, обозначены в (3) и (4) жирным шрифтом. Содержательный смысл характеристик, входящих в (3) и (4), рассмотрен в [1, 3]; дополнительные технические характеристики ИОС и НОС представлены в табл. 3.

Индекс сложности ОС меняется от 0 (простой – однолинзовый объектив) до 14 – (сложная ОС для фотолитографии). Количество классов для ИОС, описываемых данной классификацией, составляет 2187, для НОС – 729. Согласно оценке многих оптиков-экспертов, система считается сложной, когда индекс сложности $R > 7$.

Структурный синтез неизображающих ОС

В отличие от технического исполнения элементов ИОС, в НОС один элемент может, например, одновременно выполнять функции базового и светосильного элементов или объединять функции широкоугольного и корректирующего элемента. Это достигается объединением нескольких элементов в единый блок, что возможно за счет использования новых технологий – создания элементов, одна или несколько поверхностей которых имеют свободную форму и могут быть произвольно расположены в пространстве. Такие поверхности получили название freeform. Общепринятая классификация типов применяемых поверхностей предложена в [7]. Наибольшее распространение в НОС имеют следующие поверхности: R – преломляющая поверхность; X – отражающая поверхность; I – поверхность полного внутреннего отражения (ПВО) [8, 9]. Поверхности, входящие в состав НОС, могут располагаться различным образом относительно апертурной диафрагмы, источника света и приемника.

Процедура структурного синтеза заканчивается составлением формулы синтеза, в которой типы оптических поверхностей, образующие элемент, указываются в скобках. Например, $B(RXI)$ – формула структурного синтеза базового элемента, содержащего преломляющую, отражающую поверхность и поверхность, работающую на полном внутреннем отражении.

Параметрический синтез неизображающих ОС

В соответствии с содержанием этапа параметрического синтеза при его выполнении по заданным техническим характеристикам определяются такие параметры ОС, как радиусы, расстояния между поверхностями, коэффициенты асферичности и др. (табл. 4). Если параметров недостаточно, то удовлетворить требованиям ТЗ не удастся, и потребуется увеличивать число активных параметров. Изменяя их в процессе оптимизации, можно достичь целевых технических характеристик. Такой прием позволяет значительно увеличить количество параметров ОС, которые в дальнейшем могут использоваться для оптимизации, существенно улучшая качество изображения.

В табл. 3 представлены активные параметры для различных типов поверхностей, используемых при расчете осветительных систем.

Название	Обозначение	Параметры
Преломляющая поверхность	R	r, n, d, v, A_n
Отражающая поверхность	X	r
ПВО	I	r, n, d, v, A_n
Плоская поверхность	P	n, d, v
Freeform [3]	Ff	r, n, d, v, A_n

Таблица 3. Параметры поверхностей неизображающей оптики: r – радиус кривизны поверхности; n – показатель преломления среды; d – толщина; v – коэффициент дисперсии; A_n – коэффициент уравнения асферической поверхности, заменяющей простую сферическую поверхность

В табл. 4 представлено допустимое количество активных параметров в схеме НОС.

Тип поверхности		Параметры						Количество параметров
		r	d	n	v	A_1	A_n	
Отражающая поверхность (X)	сферическая	+	–	–	–	–	–	1
	асферическая	+	–	–	–	+	+	3*
Преломляющая поверхность (R)	сферическая	+	+	+	+	–	–	4
	асферическая	+	+	+	+	+	–	5*
Freeform (Ff)		+	+	+	+	+	+	6+*

* минимальное количество параметров; значение 6+ введено в связи с тем, что теория НОС находится в стадии активного развития, и в дальнейшем возможно увеличение количество параметров

Таблица 4. Определение количества параметров

Из табл. 4 видно, что дальнейшее увеличение количества параметров в системе возможно за счет добавления дополнительных оптических элементов, увеличения количества коэффициентов уравнений асферических поверхностей при увеличении их порядка, увеличения количества степеней свободы за счет введения поверхностей типа freeform.

Пример синтеза неизображающей ОС осветителя хирургической комнаты

Рассмотрим типичный пример – синтез НОС осветителя хирургической комнаты. Подобные задачи часто встречаются в практике проектирования и достаточно наглядно иллюстрируют предлагаемый метод. Проектируемая система состоит из первичной оптической системы, представляющей собой чип со светодиодом и световодом с заданными оптическими характеристиками, и вторичной оптической системы, которую необходимо спроектировать.

Исходные данные для проектирования осветителя хирургической комнаты представлены в табл. 5.

Выбор приемника. На основе анализа современного рынка светоизлучающих диодов выявлено, что не существует светодиода со световой температурой 4900 К и одновременно с индексом цветопередачи, равным 95 (согласно ТЗ). Светодиод, наиболее соответствующий требованиям ТЗ, производится в Японии (Nichia NVSL219A-H1), его цветовая температура равна 4500 К, индекс цветопередачи равен 92, световой поток равен 1000 лм (при токе 350 мА и напряжении 3В). Светодиод имеет конформное фосфорное покрытие, обеспечивающее равномерную передачу цвета.

Технические характеристики	Физическая величина	Обобщенное значение
Сила света, кд	40000	$J=1$
Освещенность, лк	160,000	$E=2$
Световой поток, лм	160,000	$\Phi=2$
Яркость, нит	13 184 000	$L=1$
Цветовая температура, К	3500–5000	$R_a=1$
Индекс воспроизведения цвета, %	95 (минимум)	$T_c=1$
Положение АД	На первой поверхности	$D=1$

Таблица 5. Техническое задание на осветитель для хирургической комнаты

Определение индекса сложности. По формуле (4) получаем $R=9$. Система считается сложной.

Составление формулы синтеза. Формулу синтеза можно представить в виде выражения

$$Ls + B(IR) + C(PR) + Lr,$$

где Ls – светодиодный источник; B – базовый и C – коррекционный элементы; IR – поверхность ПВО в сочетании с отражающей; PR – плоская поверхность в сочетании с отражающей; Lr – приемник.

Выбор элементов. В качестве базового и коррекционного элементов выбраны линза ПВО и линза Френеля. Введение светосильных и широкоугольных элементов не требуется.

Моделирование результатов и последующая оптимизация светового потока проводилась в программе Light Tools [10–12]. В программе существует набор стандартных модулей, которые разработчик

НОС модифицирует для решения своей задачи. Для этого в ПО имеются специальные возможности – написание макросов. Расчетная 3D-модель осветительной системы (линза Френеля и линзы ПВО) представлена на рис. 3, а.

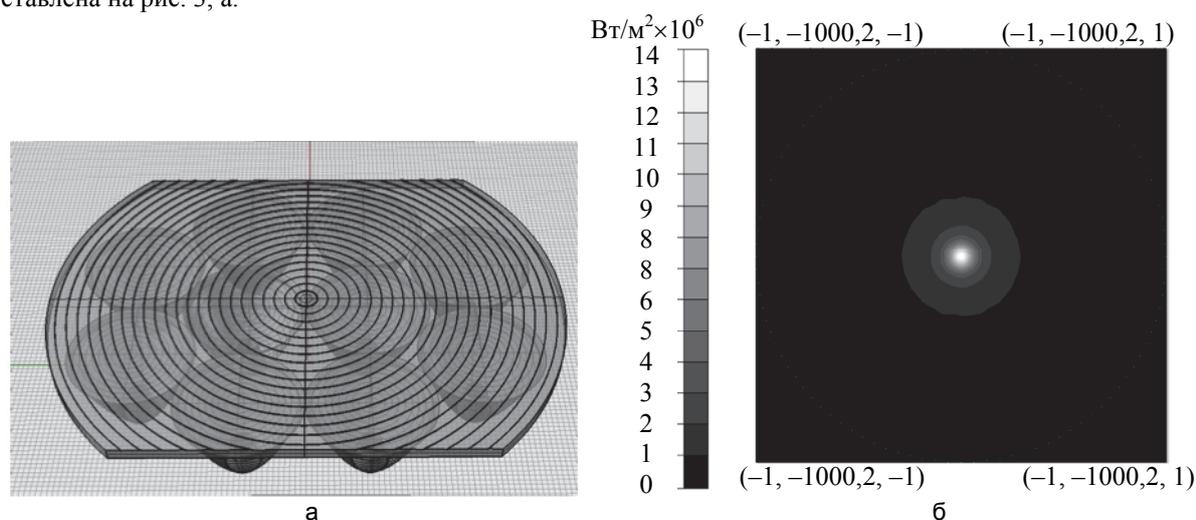


Рис. 3. Расчетная 3D-модель осветительной системы (линза Френеля и линзы ПВО) (а); распределение освещенности диска диаметром 2 мм световым потоком, проходящим через линзу Френеля (б)

В качестве стандартного модуля были использованы линзы Френеля с фокусным расстоянием 1 м. Данная линза размещается впереди линзы ПВО и образует поверхность типа *freeform*, находящуюся перед каждым светодиодом. Количество светодиодов рассчитывается исходя из обеспечения требований технического задания. Подобная конструкция позволяет сделать освещение от каждого светодиода равномерным и избежать наклона вторичной ОС.

На рис. 3, а, показано взаимное расположение элементов одного купола осветителя для хирургической комнаты ILED3. Всего предусматривается три купола, каждый купол содержит 10 светодиодов. Таким образом, все три купола состоят из 30 светодиодов.

Распределение освещенности для диска диаметром 2 мм, расположенного на расстоянии 1 м от параллельного пучка лучей мощностью 1 Вт, проходящих через линзу Френеля, показано на рис. 3, б, и подтверждает соответствие расчета требованиям ТЗ на проектирование осветителя хирургической комнаты [10, 15, 16]. Концентрация световой энергии, которая может использоваться для реализации проекта, составляет 92,3% [4]. Получена достаточно компактная конструкция. Выигрышным решением явилось совмещение функций линзы Френеля и защитного иллюминатора [17].

Заключение

В работе исследованы общие закономерности проектирования неизображающих и изображающих оптических систем. Произведена классификация систем, элементов, а также технических и обобщенных характеристик изображающих оптических систем и неизображающих оптических систем, формализованы механизмы поиска исходной оптической схемы посредством структурного и параметрического синтеза неизображающей оптической системы. Выявлены основные элементы, входящие в состав неизображающих систем, и проведена их классификация по функциональному назначению: базовые, коррекционные, широкоугольные и светосильные. Определены правила, по которым эти элементы могут формироваться, и их состав: поверхности отражающие, преломляющие, сферические и несферические, полного внутреннего отражения. Заложены основы теории композиции неизображающих оптических систем. Проведена апробация методики на примере расчета осветителя для хирургической комнаты. Получена 3D-модель осветительной оптической системы хирургической комнаты, состоящая из трех идентичных куполов осветителя. Расчеты выполнены с применением изложенной в работе методики, т.е. показана ее применимость на практике. Энергетическая эффективность спроектированной осветительной системы составила 92,3%. Результаты работы могут найти применение при разработке неизображающих систем различного назначения, например, осветителей, концентраторов и др., и могут обеспечить импортозамещение аналогичных зарубежных устройств. Результаты работы могут быть полезны инженерам, специализирующимся в сфере разработки и (или) эксплуатации неизображающих оптических систем.

Литература

1. Летуновская М.В. Методы, модели и инструментальные средства проектирования неизображающих оптических систем с применением поверхностей типа «freeform». Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2014. 97 с.

2. Васильев В.Н., Лившиц И.Л., Муромцев Д.И. Основы проектирования экспертных систем компоновки объективов. СПб.: Наука, 2012. 210 с.
3. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
4. Русинов М.М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979. 488 с.
5. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Большая российская энциклопедия, 1988. Т. 2. 700 с.
6. Лившиц И.Л., Сальников А.В., Cho U. Выбор исходной системы для расчета объективов // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 11. С. 74–78.
7. Minano J.C., Gonzalez J.C., Benitez P. A high-gain, compact, nonimaging concentrator – RXI // Applied Optics. 1995. V. 34. P. 7850–7856.
8. Cvetkovic A., Dross O., Chaves J., Benitez P., Minano J.C., Mohedano R. Etendue-preserving collimators for LED colour mixing // Proceedings of SPIE. 2012. V. 8550. Art. 85502W. doi: 10.1117/12.981211
9. Light Tools. Introductory Tutorial. Optical Research Associates, 2010.
10. Light Tools. Modeling Sources in Light Tools. Optical Research Associates, 2010.
11. Light Tools. Optimization Tutorial. Optical Research Associates, 2010.
12. Benitez P., Minano J.C. Ultrahigh numerical aperture imaging concentrator // Journal of the Optical Society of America A. 1997. V. 14. N 8. P. 1988–1997. doi: 10.1364/JOSAA.14.001988
13. Benitez P., Minano J.C., Blen J., Mohedano R., Chaves J., Dross P., Hernandez M., Falicoff W. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions // Optical Engineering. 2004. V. 43. N 7. P. 1489–1502. doi: 10.1117/1.1752918
14. Optical Software, Engineering, and Training by Breault Research (BRO). Breault research ASAP [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.breault.com, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.06.2015)
15. Lighting Software. Application of TracePro [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.lambdare.com/applications>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.06.2015).
16. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1966. 565 с.

<i>Анитропов Роман Викторович</i>	–	ведущий программист, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, romaninitropov@gmail.com
<i>Бенитез Пабло</i>	–	PhD, доктор технических наук, профессор, профессор, Мадридский Политехнический Университет, Мадрид, 28223, Испания, pablo.benitez@upm.es
<i>Васильев Владимир Николаевич</i>	–	доктор технических наук, профессор, член.-кор. АН РФ, ректор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vasiliev@mail.ifmo.ru
<i>Зайцева Анастасия Сергеевна</i>	–	инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, nastasy112@gmail.com
<i>Летуновская Марина Валерьевна</i>	–	кандидат технических наук, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mletunovskaya@gmail.com
<i>Лившиц Ирина Леонидовна</i>	–	кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ecenter-optica10@yandex.ru
<i>Стафеев Сергей Константинович</i>	–	доктор технических наук, профессор, декан, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, stafeevs@yahoo.com
<i>Roman V. Anitropov</i>	–	leading programmer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, romaninitropov@gmail.com
<i>Pablo Benitez</i>	–	PhD, Professor, Professor, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 28223, Spain, pablo.benitez@upm.es
<i>Vladimir N. Vasiliev</i>	–	D.Sc., Professor, Corresponding member of RAS, Rector, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vasiliev@mail.ifmo.ru
<i>Anastasiya S. Zaitceva</i>	–	engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, nastasy112@gmail.com
<i>Marina V. Letunovskaya</i>	–	PhD, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mletunovskaya@gmail.com
<i>Irina L. Livshits</i>	–	PhD, Senior researcher, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ecenter-optica10@yandex.ru
<i>Sergey K. Stafeev</i>	–	D.Sc., Professor, Dean, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, stafeevs@yahoo.com