

УДК 535.4

## ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОСТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖАЮЩИХ СИСТЕМАХ

Н.Д. Зорич<sup>а</sup>, И.Л. Лившиц<sup>а</sup>, Е.А. Соколова<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия

<sup>б</sup> РиверД Интернационал, Роттердам, 3029 АК, Нидерланды

Адрес для переписки: [nenadnex@gmail.com](mailto:nenadnex@gmail.com)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 01.10.14, принята к печати 02.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-6-13

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Зорич Н.Д., Лившиц И.Л., Соколова Е.А. Преимущества использования дифракционных оптических элементов в простых оптических изображающих системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 6–13

**Аннотация.** Исследовано влияние дифракционных оптических элементов на оптические аберрации. Их преимуществом является способность генерировать произвольные сложные волновые фронты в плоском слое оптического материала. Рассмотрены вопросы коррекции аберраций в простых оптических системах с одной и двумя линзами (синглет и дублет). Оптические системы со стандартными поверхностями были разработаны и оптимизированы с использованием одних и тех же исходных параметров. На этой базе спроектированы и оптимизированы гибридные оптические системы с дифракционными и асферическими поверхностями. На первом этапе для сравнения уровня сложности проектирования оптических систем с узким и широким полем отдельно исследована оптическая система с узкими полями. Аналогичным образом проанализирована система с широким полем. Оптические системы были разработаны с помощью специализированного программного обеспечения для проектирования оптических систем. Характеристики проектируемых дифракционных поверхностей контролировались с использованием программного обеспечения DIFSYS 2.30. Применение дифракционных оптических элементов обеспечило снижение продольной хроматической аберраций почти в 5 раз по оси (узкие поля). Абсолютное значение коэффициента Зейделя, соответствующего сферической аберрации, снижено до диапазона 0,03. В связи с тем, что дифракционные оптические элементы имеют известные недостатки (возможность присутствия паразитарных порядков дифракции и вероятное снижение пропускающей способности), нами проанализированы и разработаны оптические системы с комбинированными асферическими и дифракционными поверхностями. Сочетание дифракционных и асферических поверхностей в оптической системе объектива, считывающего информацию с оптического диска, обеспечило снижение продольных хроматических аберраций по оси почти в 15 раз по сравнению с объективом, содержащим только асферические и стандартные сферические поверхности. Все рассчитанные дифракционные оптические элементы могут быть изготовлены с применением имеющегося оборудования.

**Ключевые слова:** дифракционные оптические элементы, бинарная поверхность, аберрации, линзы, моделирование оптических систем

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке People Programme (Marie Curie Actions) Седьмой рамочной программы Европейского Союза (FP7/2007-2013), грант REA, соглашение № PITN-GA-2013-608082 «ADOPSYS».

## ADVANTAGES OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS APPLICATION IN SIMPLE OPTICAL IMAGING SYSTEMS

Nenad Dj. Zoric<sup>а</sup>, Irina L. Livshits<sup>а</sup>, Elena A. Sokolova<sup>б</sup>

<sup>а</sup> ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

<sup>б</sup> RiverD, International B.V., Rotterdam, 3029 AK, The Netherlands

Corresponding author: [nenadnex@gmail.com](mailto:nenadnex@gmail.com)

### Article info

Received 01.10.14, accepted 02.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-6-13

Article in Russian

**Reference for citation:** Zoric N.Dj., Livshits I.L., Sokolova E.A., Advantages of diffractive optical elements application in simple optical imaging systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 6–13 (in Russian)

**Abstract.** The paper deals with the influence of diffractive optical elements on the optical aberrations. The correction of optical aberrations was investigated in the simple optical systems with one and two lenses (singlet and doublet). The advantages of diffractive optical elements are their ability to generate arbitrary complex wave fronts from a piece of optical material that

is essentially flat. The optical systems consisting of the standard surfaces were designed and optimized by using the same starting points. Further, the diffractive and aspheric surfaces were introduced into the developed systems. The resulting hybrid systems were optimized. To compare the complicity of the development of narrow field systems and wide field optical systems, the optimization has been done separately for these two types of the instruments. The optical systems were designed by using special Optical Design Software. The characteristics of designed diffractive surfaces were controlled in Software DIFSYS 2.30. Due to the application of diffractive optical elements the longitudinal chromatic aberration was 5 times reduced for the narrow field systems. The absolute value of Seidel coefficient related to the spherical aberration was reduced in the range of 0.03. Considering that diffractive optical elements have the known disadvantages, like possible parasitic diffraction orders and probable decrease of the transmission, we also developed and analyzed the optical systems with combined aspheric and diffractive surfaces. A combination of the aspheric and diffractive surfaces in the optical disk system of the disk reading lens, gave cutting down of the longitudinal color aberrations almost 15 times on-axis, comparing to the lens consisting of the aspherical and standard surfaces. All of the designed diffractive optical elements possess the parameters within the fabrication limits.

**Keywords:** diffractive optical elements, binary surface, aberrations, lens, optical systems design.

**Acknowledgements.** The research leading to these results has received funding from the People Programme (Marie Curie Actions) of the European Union's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under REA grant agreement no. PITN-GA-2013-608082 'ADOPSY'S'.

### Введение

Дифракционные линзы могут быть использованы для уменьшения числа элементов в обычных линзовых системах и для альтернативного подхода к коррекции хроматических aberrаций. Дифракционные линзы представляют собой решетки с переменным периодом, который обуславливает их хроматические aberrации. При использовании дифракционных свойств поверхности становится возможным спроектировать гибридный элемент для получения ахроматического скорректированного элемента за счет того, что дифракционная поверхность вносит дополнительные параметры (коэффициенты бинарной поверхности типа 2) в оптическую схему. Сферическая aberrация для точки на оси, как правило, является одной из самых важных первичных aberrаций, поскольку без ее удовлетворительной коррекции не удастся получить хорошее качество изображения и по всему полю объектива. Альтернативный метод уменьшения сферической aberrации также заключается в использовании дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1].

Дифракционные линзы представляют собой очень тонкие элементы [2] с общей толщиной, равной  $\lambda/(n-1)$ , где  $\lambda$  – рабочая длина волны и  $n$  – показатель преломления (рис. 1). Дифракционная линза состоит из серии зон, толщина которых становится тоньше по направлению к краю линзы. Бинарные элементы достигают эффективности около 80% (без учета потерь на поверхностях) и часто могут быть экономичными в производстве, особенно если их размеры невелики и если требуемый рисунок имеет центральную симметрию. Основным свойством дифракционной линзы является то, что она использует интерференцию и дифракцию. В результате спектральные свойства дифракционной линзы совершенно отличны от свойств обычной преломляющей линзы. Дифракционные и рефракционные элементы могут быть объединены в одном элементе (гибридные элементы), чтобы устранить или, по крайней мере, значительно снизить хроматическую aberrацию. Эти так называемые гибридные ахроматы используют тот факт, что дисперсия преломляющих элементов противоположна по знаку дисперсии дифракционных элементов, так что они могут компенсировать друг друга [3–5]. Дисперсия дифракционной линзы примерно в 7 раз больше, чем дисперсия самого сильного стекла типа флинт, имеющегося в настоящее время. Замена рефракционной линзы на дифракционную обычно обеспечивает существенное снижение веса и количества оптических элементов, необходимых для достижения заданного уровня разрешающей способности.

Программное обеспечение (ПО) для автоматического расчета оптических систем существенно экономит время разработчика. Исторически такое ПО создавалось в первую очередь для проектирования линзовых объективов, и уже позже добавлялись возможности моделирования других оптических систем, например, использующих дифракцию. При этом разработчики ПО не всегда были знакомы со всеми технологическими тонкостями изготовления дифракционных элементов. В связи с этим в описаниях ПО часто отсутствует полная информация о том, каким образом параметры оптимизации связаны с aberrационными свойствами и с параметрами изготовления [6].

В ряде публикаций рассматривается использование ДОЭ в сложных многокомпонентных системах, содержащих не только дифракционные оптические элементы, но также и асферическую и градиентную оптику [7]. Из таких примеров трудно выделить влияние именно ДОЭ на качество изображения, а также оценить целесообразность такого усложнения оптической системы и связанного с ним увеличения стоимости ее изготовления. В работе [8] рассмотрен ряд примеров оптических схем, содержащих два и даже три дифракционных элемента в одной системе. В связи с физической природой дифракционной оптики такие примеры имеют чисто академический интерес и не могут быть рекомендованы для производства. Кривая эффективности дифракционной линзы имеет довольно узкий спектральный максимум. При использовании в системе двух и более дифракционных линз значения эффективности для каждой длины волны перемножаются, и кривая становится еще более узкой. Кроме того, если теоретический

максимум такой кривой составляет почти 100%, практически он всегда ниже из-за погрешностей формы дифракционного профиля.

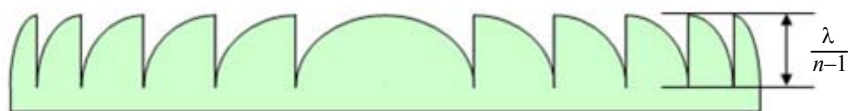


Рис. 1. Дифракционная поверхность

Таким образом, включение каждого дополнительного дифракционного элемента снижает пропускание системы. В связи с технологическими ограничениями на минимальный размер структуры дифракционного элемента область практического использования дифракционной оптики в основном ограничена средней и дальней инфракрасной (ИК) областью [9]. Однако с развитием микро- и нанотехнологий представляется перспективным расширение применения дифракционной оптики на ближнюю ИК [10], а также на видимую и даже ультрафиолетовую области спектра. Последнее может быть особенно актуально для современных систем микрофотографии.

В связи с вышесказанным авторами считают практически важным и актуальным рассмотреть преимущества использования ДОЭ на примерах простых оптических систем с использованием ПО автоматического проектирования, доступных широкому кругу расчетчиков оптических систем. Данная работа является началом систематического изучения широкого круга вопросов, связанных со спецификой использования ДОЭ в системах различного назначения. Многие поверхности в ПО ZEMAX 9.1 [11] могут быть заданы как дифракционные в дополнение к преломляющим. Сила дифракционной поверхности не зависит от показателя преломления и стрелки прогиба поверхности и изменяет фазу лучей. Бинарная поверхность типа 2 часто используется для ахроматизации, как можно заметить на примере простого синглета (рис. 2), где показано, что длины волны большей длины фокусируются на большем расстоянии  $Z$  (ось  $Z$ ) от объектива, чем для коротких длин волн [11]. Бинарная поверхность заменяет гладкие грани Френеля ступенчатым контуром, который может быть изготовлен с помощью процесса фотолитографии высокого разрешения. Рельеф поверхности создается путем воздействия серии масок. Число уровней, полученных таким образом, равно  $2m$ , где  $m$  – число масок, отсюда и название «бинарная поверхность». Эффективность (т.е. процент света, который проходит в нужном направлении) бинарной поверхности ограничена количеством уровней, которые используются для аппроксимации идеально гладкого контура Френеля [12–14]. ДОЭ с круговой симметрией, например, бинарная поверхность типа 2, может использоваться для коррекции продольного хроматизма.

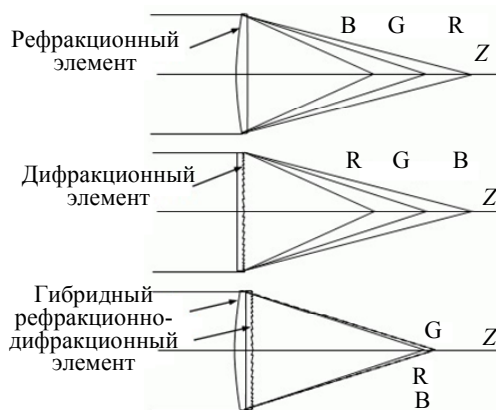


Рис. 2. Оптическая система, рассчитанная с применением ДОЭ (R – лучи красного спектрального диапазона, G – лучи зеленого спектрального диапазона, B – лучи синего спектрального диапазона)

В настоящей работе была проведена оптимизация простых оптических систем с использованием бинарной поверхности типа 2, заданной в ПО ZEMAX 9.1. Далее мы подробно объясним преимущества использования ДОЭ в синглете и дублете соответственно. В заключение будут приведены результаты расчетов в системах с применением ДОЭ и без них.

#### Преимущества использования ДОЭ при проектировании гибридного синглета

В работе были отдельно исследованы синглеты с малым полем (на оптической оси) и синглеты с увеличенным угловым полем, что позволило проследить влияние поля. Для оптимизации стартовой точки синглета (одиночной линзы) по методу минимизации квадратичного отклонения радиуса пятна рассеяния была использована оценочная функции «по умолчанию» из ПО ZEMAX 9.1. В качестве стартовой точки для расчета синглета была выбрана линза номер 10.0255 Rolyn Optics из каталога ZEMAX. В табл. 1 представлены технические характеристики стартовой точки. Результаты, полученные после оп-

тимизации одной и той же стартовой точки с использованием ДОО и без него, представлены далее. Мы начали наш подход к проектированию на примере преобразования плосковыпуклого синглета в ахромат (ахроматизованная линза). Используя бинарную поверхность типа 2, в ПО ZEMAX 9.1 провели оптимизацию синглета с малым полем и синглета с широким полем.

Наименование	Значение
Фокусное расстояние	100 мм
Апертурное число	2,8
Основная длина волны	$\lambda = 0,587$ мкм

Таблица 1. Технические характеристики стартовой точки

Для оптимизации стартовой точки синглета по методу минимизации квадратичного отклонения радиуса пятна рассеяния была использована оценочная функция «по умолчанию» центриод РА 18×18. Плоская поверхность линзы номер 10.0255 (рис. 4) была выбрана и определена как бинарная поверхность типа 2 и рассчитывалась для высоты 20 мм.

Полученные в редакторе данных коэффициенты были использованы для контроля рассчитанной бинарной поверхности типа 2 в ПО DIFFSYS Ver.2.30. Коэффициенты  $Dn$  – коэффициенты фазы в радианах, нормированные по высоте апертурного луча линзы. Эти коэффициенты равны бинарным коэффициентам в ZEMAX для случая, когда радиус нормализации равен половине высоты светового диаметра дифракционной (бинарной) поверхности, что изменяет фазу луча. Коэффициенты  $Dn$  синглета с малым полем равны  $D2 = -1723,762988$ ;  $D4 = 462,802191$ ;  $D6 = -22,896256$ ;  $D8 = 6,289262$ . Рассчитанная нами дифракционная поверхность имеет 203 зоны с минимальной шириной 0,0340 мм между двумя зонами (рис. 3, а). Дифракционная поверхность имеет кривой профиль, разделенный на зоны. Полученные коэффициенты  $Dn$  синглета с широким полем составляют  $D2 = -2081,843288$ ;  $D4 = 1450,300445$ ;  $D6 = 1835,981640$ ;  $D8 = 1078,19394$ . Смоделированная таким образом дифракционная поверхность имеет 221 зону с минимальной шириной 0,029051 мм между двумя зонами (рис. 3, б). Дифракционная поверхность может быть изготовлена, поскольку минимальная ширина между зонами больше 10 мкм. На рис. 4 проведено сравнение продольной сферической aberrации полученной оптимизированной линзы номер 10.0255 с аналогичными характеристиками стандартной линзы, и ясно видно значительное снижение продольного хроматизма (рис. 4, в) синглета с ДОО. Сферическая и продольные aberrации снижаются в случае гибридного синглета, но оптимизация менее эффективна в случае продольной хроматической aberrации, которая имеет место для синглета с увеличенным угловым полем.

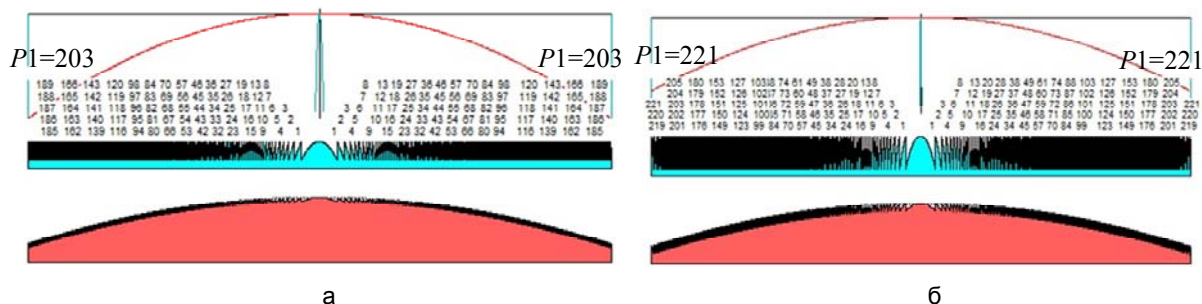


Рис. 3. Бинарная поверхность типа 2: синглет с малым полем (а); синглет с увеличенным угловым полем (б).  $P$  – число зон профиля

Можем заключить, что ДОО лучше подходит для оптической системы с малым полем. Коэффициенты Зейделя для продольной сферической aberrации, также как и значения aberrаций, представленные в табл. 2, показывают улучшения в синглете с простым использованием одной дифракционной поверхности. Оптические aberrации – кому, астигматизм и дисторсию – мы в этом случае не рассматривали.

Коэффициенты Зейделя	Синглет с малым полем	Синглет с широким полем
SPHE без ДОО	0,20677	0,20688
LSPH без ДОО	3,19456	3,19627
SPHE с использованием ДОО	0,17291	0,16993
LSPH с использованием ДОО	2,66836	2,62255

Таблица 2. Коэффициенты Зейделя для синглета с малым и широким полем. SPHE – коэффициент сферической aberrации, LSPH – коэффициент латеральной сферической aberrации

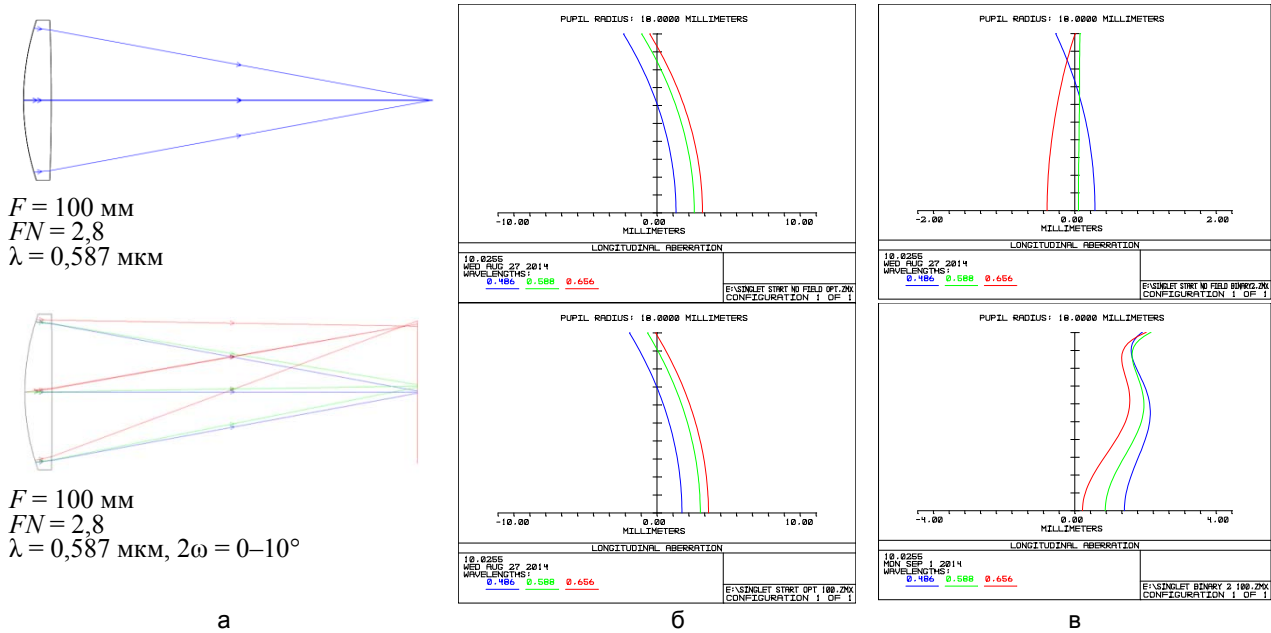


Рис. 4. Сравнение продольной сферической aberrации синглета с использованием ДОЭ и без него: оптическая схема синглета (а); без использования ДОЭ (б); с использованием ДОЭ (в).  $F$  – фокусное расстояние,  $FN$  – апертурное число,  $2\omega$  – угловое поле

**Преимущества использования ДОЭ при проектировании гибридного дублета**

В работе были отдельно исследованы дублеты с малым полем (на оптической оси) (рис. 5, а) и дублеты с увеличенным угловым полем (рис. 5, б), что позволило проследить влияние поля. Линза номер 22.0120 Rolyn Optics была выбрана из каталога ZEMAX в качестве стартовой точки для расчета дублета. Расчеты и оптимизация параметров дублета проведены по методике, аналогичной предыдущей (синглету), результаты представлены на рис. 6.

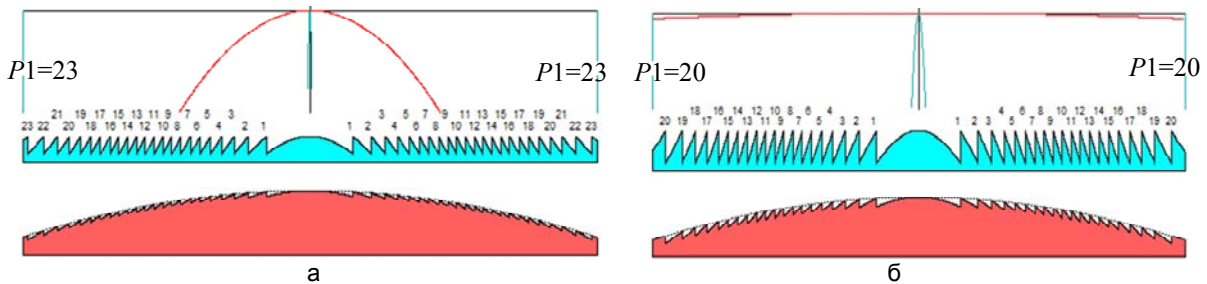


Рис. 5. Бинарная поверхность типа 2: дублет с малым полем (а) и дублет с увеличенным угловым полем (б)

Полученные коэффициенты  $D_n$  дублета с малым полем,  $D_2 = -283,170392$ ,  $D_4 = 173,132979$ ,  $D_6 = -34,885398$ ,  $D_8 = -0,051832$ ,  $D_{10} = -1,057353$ , были использованы для контроля рассчитанной бинарной поверхности типа 2 в ПО DIFFSYS Ver. 2.30. Дифракционная поверхность имеет 23 зоны с минимальной шириной 0,151698 мм между двумя зонами (рис. 5, а). Коэффициенты  $D_n$  дублета с широким полем равны  $D_2 = -261,538817$ ,  $D_4 = 168,731802$ ,  $D_6 = -36,731802$ , а дифракционная поверхность имеет 20 зон с минимальной шириной 0,16838 мм между двумя зонами (рис. 5, б).

**Преимущества использования ДОЭ в объективах для считывания информации с оптических дисков**

Оптические системы широко применяются в системах записи и считывания информации, например, музыка, компьютерных играх и т.д. К таким устройствам предъявляются требования как по качеству изображения, так и по весо-габаритным характеристикам. При проектировании таких систем также необходимо учитывать технологичность, обеспечивающую возможность их массового производства.

В дифракционно-ограниченных системах оптических дисков должен выполняться критерий Маршалла [15], согласно которому aberrация волнового фронта не может превышать  $0,07 \lambda$ . В процессе изготовления и тестирования ДОЭ были обнаружены такие эффекты, как распространение паразитных порядков дифракции, снижение пропускания. Если выбрать в качестве стартовой точки простой синглет,



то очевидно, что число его параметров ограничено пятью: оба радиуса, толщина, а также параметры оптического материала – показатель преломления и коэффициент дисперсии. Следует заметить, что материал для производства системы для считывания с оптического диска определяется особенностями его изготовления и не может быть изменен. Оставшееся количество параметров является недостаточным для обеспечения технических характеристик и разрешающей способности объектива. Увеличение количества параметров достигается изменением формы синглета – использованием асферических поверхностей, а также нанесением дифракционной структуры на одну из его поверхностей. В этом случае дополнительными параметрами станут коэффициенты уравнения асферики и коэффициенты ДОЭ.

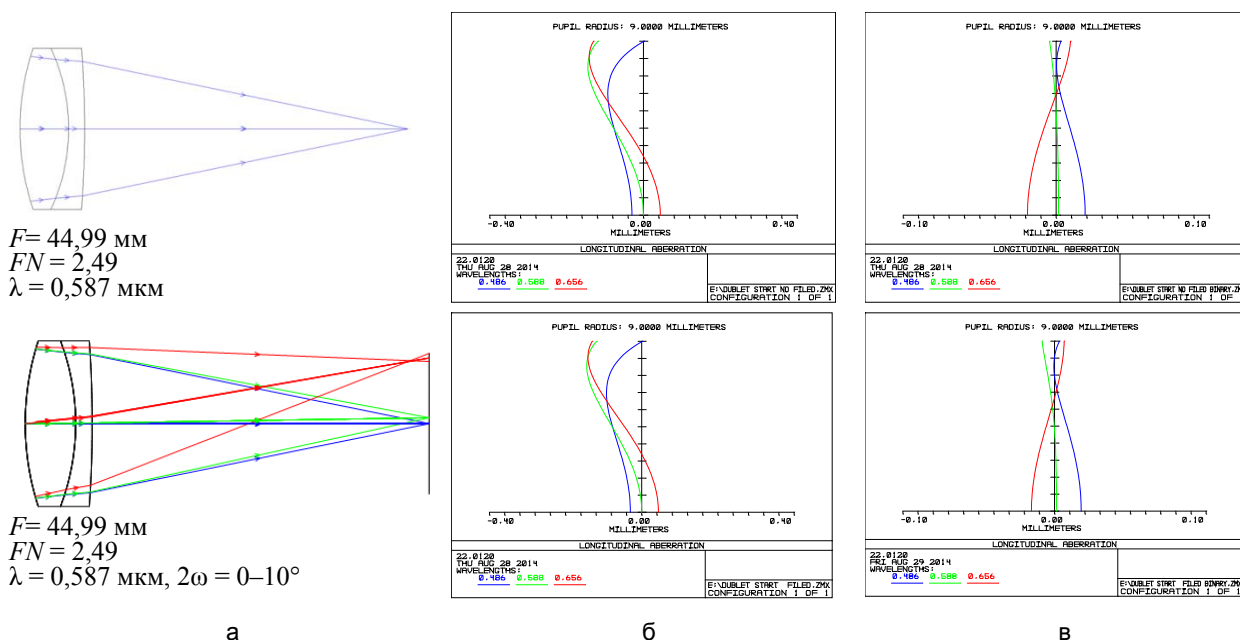


Рис. 6. Сравнение продольной сферической aberrации дублета с использованием ДОЭ и без него: оптическая схема дублета (а); без использования ДОЭ (б); с использованием ДОЭ (в)

В табл. 3 представлены технические характеристики типичного объектива, который обычно изготавливается из материала РММА (полиметилметакрилат) и используется для считывания информации с оптического диска. Толщина линзы, которая также могла бы быть параметром, была зафиксирована по конструктивным соображениям. Используя для оптимизации стартовой систем ПО ZEMAX и оценочную функцию «по умолчанию», где оптимизировался радиус пятна рассеяния за счет изменения дополнительных параметров стартовой системы синглета – двух эксцентриситетов поверхностей и трех коэффициентов асферик высших порядков на каждой поверхности, мы значительно улучшили показатели стартовой системы. Следующий шаг – добавление дифракционной структуры на первую поверхность линзы, что было нами выполнено в редакторе данных.

Наименование	Обозначение	Значение
Основная длина волны	$\lambda$	405 нм
Рабочий диапазон длин волн	$\lambda_1-\lambda_2$	400–410 нм
Фокусное расстояние	$F$	2 мм
Апертурное число	$FN$	1
Качество изображения	$Q$	Дифракционно-ограниченное
Угловое поле	$2\omega$	0,001°
Положение апертурной диафрагмы	PAPS	Вблизи первой поверхности

Таблица 3. Технические характеристики объектива для считывания информации с оптического диска

Дифракционная бинарная поверхность типа 2 имеет 5 дополнительных параметров – коэффициентов. Для оптимизации использовалась аналогичная оценочная функция. На рис. 7 представлены графики остаточных продольных aberrаций и частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) объектива с двумя асферическими поверхностями и ДОЭ на первой поверхности, а на рис. 8 – параметры профиля полученной линзы.

Хроматическая aberrация лежит в пределах 0,0002 мм для заданного спектрального диапазона и 0 мм для основной длины волны. В данном случае преимущества дифракционной поверхности очевидны. Графики ЧКХ показывают, что объектив является дифракционно-ограниченным – идеальная ЧКХ не

отличается от реальной. Смоделированная таким образом дифракционная поверхность имеет 71 зону с минимальным расстоянием 0,00289 мм между двумя зонами (рис. 8). Дифракционная поверхность реализована на пределе возможностей производства, поскольку минимальное расстояние между областями находится в диапазоне 1–10 мкм. Полученные дополнительные параметры (9 параметров!) представлены в табл. 4, именно они позволяют обеспечить дифракционно-ограниченное качество изображения.

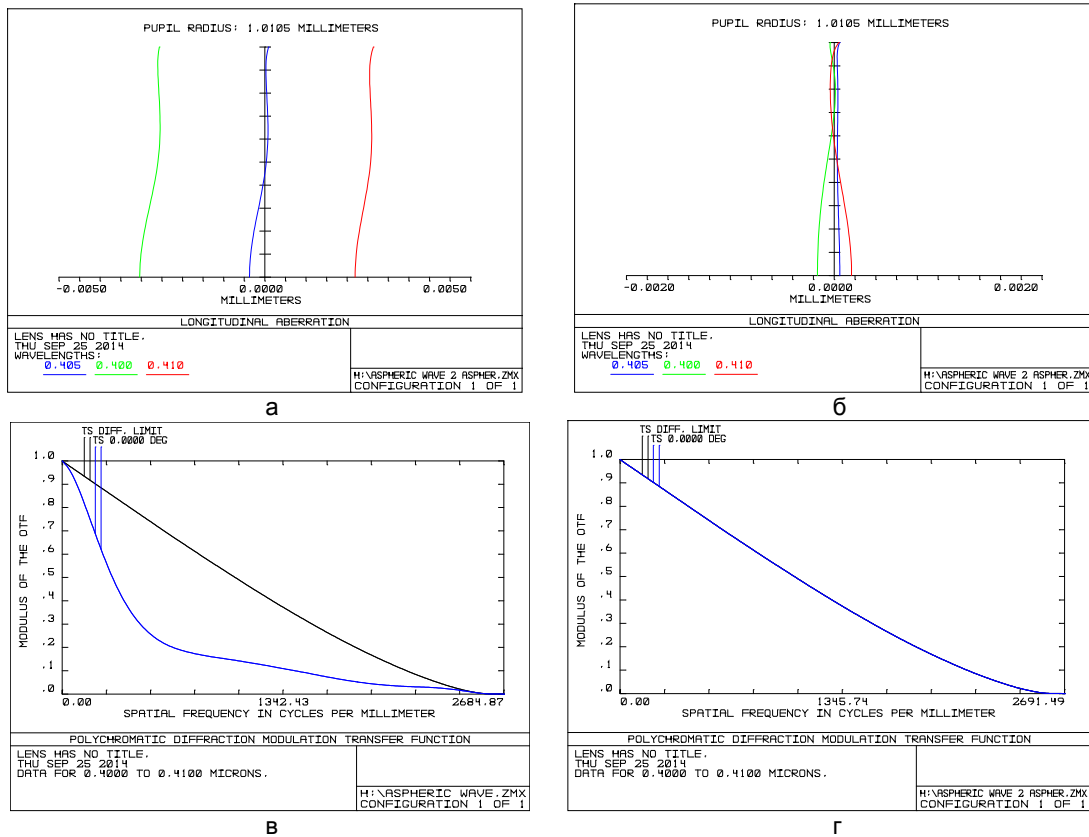


Рис. 7. Сравнение качества изображения вариантов объектива для чтения оптических дисков: графики остаточных продольных aberrаций и ЧКХ объектива с двумя асферическими поверхностями (а), (в); графики остаточных продольных aberrаций и ЧКХ объектива с двумя асфериками и ДОО на первой поверхности (б), (г)

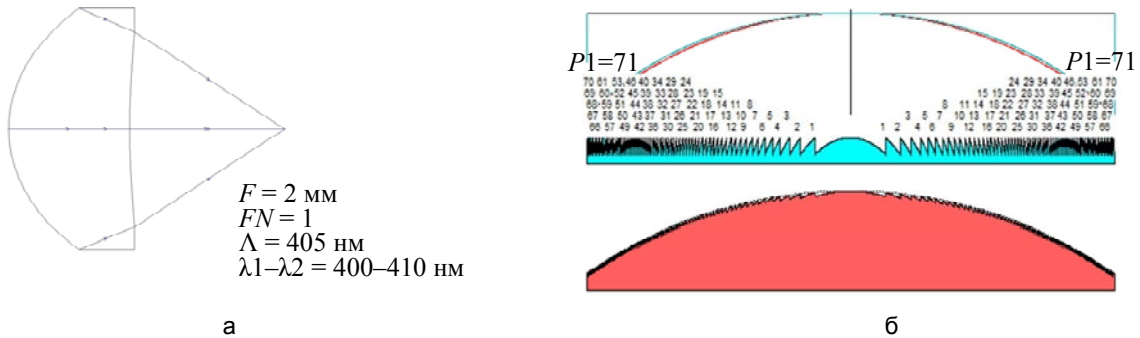


Рис. 8. Асферико-дифракционная линза для оптического диска: оптическая схема (а); бинарная поверхность типа 2 (б)

Коэффициент ДОО поверхности 1	Коэффициент асферической поверхности 1	Коэффициент асферической поверхности 2
$D2 = -350,914577$	$A2 = -0,018781$	$A2 = 0,035240$
$D4 = -95,357615$	$A4 = -0,003510$	$A4 = 7,64E-004$
$D6 = -1,571301$	$A6 = 0,01284$	$A6 = -0,01585$
$D8 = 0,117387$	$CC = -0,537862$	$CC = 276,9996$
$D10 = -3,43724$	—	—

Таблица 4. Дополнительные параметры – коэффициенты ДОО и асферики

### Заключение

Показаны преимущества применения ДОЭ при оптимизации простейших оптических систем. Введение одной дифракционной поверхности в синглет и дублет (с использованием ПО ZEMAX) позволило значительно сократить aberrации, особенно продольные хроматические aberrации. В работе уделено особое внимание плоско-выпуклым линзам. Такие линзы особенно выгодны, потому что они относительно просты, и ДОЭ проще наносить на плоскую поверхность. Кроме того, исследовано влияние увеличения поля на оптическую систему с ДОЭ и без ДОЭ, и показано, что увеличение поля существенно меняет результаты оптимизации. Мы контролировали возможность изготовления дифракционной поверхности в программном обеспечении DIFFSYS и показали, что ДОЭ, которые мы разработали, могут быть изготовлены. В работе не рассматривалось влияние такого материала, как стекло, а также положение и количество бинарных поверхностей в оптической системе, что может быть сделано дополнительно. При проведении настоящего исследования мы хотели продемонстрировать замечательные возможности дифракционной оптики, которые еще полностью не реализованы и применение которых в сочетании с другими эффективными средствами aberrационной коррекции позволит создать много простых оптических систем различного назначения.

### Литература

1. Garcia-Lievanos O., Vazquez-Montiel S., Hernandez-Cruz J.A. Spherical aberration correction using refractive-diffractive lenses with an analytic-numerical method // *Advances in Optical Technologies*. 2010. Art. 783206. doi: 10.1155/2010/783206
2. Diffractive Optical Elements [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.rpcphotonics.com/optical.asp](http://www.rpcphotonics.com/optical.asp), свободный. Яз. англ. (дата обращения 10.12.2014).
3. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. 7<sup>th</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 987 p.
4. Davidson N., Friesem A.A., Hasman E. Analytical design of hybrid diffractive-refractive achromats // *Applied Optics*. 1993. V. 32. N 25. P. 4770–4774.
5. Liping Z., Loy L.Y., Yan Z., Zhisheng Y. Achromatic design strategies with diffractive optical elements // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 1999. V. 3897. P. 624–631.
6. Kalikmanov V.I., Sokolova E.A. Ill-posed inverse problem in diffractive optics. Tolerance analysis of diffractive lenses and gratings // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 2006. V. 23. N 2. P. 497–503. doi: 10.1364/JOSAA.23.000497
7. Грейсух Г.И., Безус Е.А., Быков Д.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Дифракционные элементы в оптических системах оптоэлектроники // *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. № 7. С. 25–30.
8. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. *Оптика дифракционных элементов и систем*. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.
9. Бармичева Г.В., Ган М.А., Старков А.А. Анализ эффективности применения асферико-дифракционных элементов в оптических системах для ИК области // Сборник трудов 9 Международной конференции "Прикладная оптика-2010". СПб., 2010. С. 227–230.
10. Васильев В.Н., Лившиц И.Л., Сергеев М.Б., Соколова Е.А. Гибридный микрообъектив для оптико-информационных систем комбинационного рассеяния // *Информационно-управляющие системы*. 2012. № 5 (60). С. 2–6.
11. ZEMAX 9.1 Optical Design Program User's Manual, 2010. P. 259–301.
12. Smith W.J. *Modern Optical Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. NY: McGraw-Hill, 2000. 617 p.
13. Soifer V.A. *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*. NY: John Wiley & Sons, 2002. 784 p.
14. Laikin M. *Lens Design*. 4<sup>th</sup> ed. NY: Marcel Dekker Inc., 1995. 446 p.
15. Kojima T. Progress of Lenses for Optical Disk System // *Konica Technical Report*. 2002. V. 15. P. 5–12.

- Зорич Нэнад Джуро** – магистр, аспирант, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [nenadnex@gmail.com](mailto:nenadnex@gmail.com)
- Лившиц Ирина Леонидовна** – кандидат технических наук, профессор, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [ecenter-optical10@yandex.ru](mailto:ecenter-optical10@yandex.ru)
- Соколова Елена Алексеевна** – доктор технических наук, профессор, оптический дизайнер, РиверД Интернационал, Роттердам, 3029 АК, Нидерланды, [Elena@scarlet.nl](mailto:Elena@scarlet.nl)
- Nenad Dj. Zoric** – postgraduate, junior scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [nenadnex@gmail.com](mailto:nenadnex@gmail.com)
- Irina L. Livshits** – PhD, Professor, senior scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [ecenter-optical10@yandex.ru](mailto:ecenter-optical10@yandex.ru)
- Elena A. Sokolova** – D.Sc., Professor, RiverD, International B.V., Rotterdam, 3029 AK, The Netherlands, [Elena@scarlet.nl](mailto:Elena@scarlet.nl)