

# Расчёт и изготовление дифракционной интраокулярной линзы, применяемой для лечения катаракты

А.В. Горноста́й

Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королёва, 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

## Введение

В статье рассмотрены существующие типы дифракционных интраокулярных хрусталиков, широко тиражируемых в производстве. Проведено сравнение форм и рельефов хрусталиков различных изготовителей. Выполнен анализ технологий изготовления хрусталиков. Приведено сравнение российских и зарубежных интраокулярных линз по качеству изображения. Предложены способы улучшения качества интраокулярных линз путём использования методов голографии.

*Ключевые слова:* компьютерная оптика; дифракционная оптика; фокусатор; интраокулярная линза; хрусталик; объёмные голограммы; голография; бихромированная желатина; фото-термо-рефрактивные стёкла; галогеносеребряная нанопористая среда.

## 1. Введение

У пожилых людей часто возникает катаракта – помутнения хрусталика. Вследствие необратимости процесса естественный хрусталик удаляют. Так как глаз теряет способность фокусировки изображения на сетчатке, необходимо применять искусственные хрусталики или интраокулярные линзы (ИОЛ). Существует несколько основных типов ИОЛ: однофокусные, аккомодационные и гибридные дифракционно-рефракционные линзы [1]. Однофокусные линзы наиболее просты в изготовлении, однако после их имплантации пациенты не способны обходиться без очков. Эта проблема была решена путём создания аккомодирующих линз. Однако такие линзы обладают ограниченными возможностями в коррекции аберраций. Наиболее полноценное зрение пациенты имеют возможность получить после имплантации гибридных хрусталиков, в которых симитирована естественная аккомодационная способность глаза. Об этом типе хрусталиков, их преимуществах, недостатках и методах устранения путём использования метода записи толстослойных голограмм, в дальнейшем и пойдёт речь.

## 2. Анализ отечественных и зарубежных аналогов

### 2.1. Зарубежные аналоги

За рубежом известны линзы AcrySof ReSTOR корпорации Alcon из США, линзы AcriLisa немецкой фирмы «AcriTec», линзы Tecnis ZM900 фирмы «AMO» [2-11].

Эти линзы соответствуют следующим **стандартным требованиям:**

- линзы должны быть мягкими для имплантации через малый разрез;
- материал линз должен быть гидрофобным для минимизации осложнений и уменьшения риска появления биологических отложений на линзах;
- дополнительная оптическая сила, создаваемая дифракционной структурой, составляет около +4 диоптрий для снижения интенсивности расфокусированного изображения;
- линза должна поглощать ультрафиолетовое излучение, чтобы оно не повредило сетчатку.

Преимуществом линз AcrySof ReSTOR является сохранение зрения вдаль при различных условиях освещённости. При диаметре зрачка более 3,5 мм начинает работать рефракционная часть линзы и энергия перекачивается в дальний фокус. В линзе был устранён эффект ослепления фарами при ночном вождении, ради чего был уменьшен размер центральной зоны. Несмотря на небольшой увеличение числа зон, выигрыш в энергии получился несущественным. Кроме того, из-за относительно малого (3,6 мм) диаметра дифракционной структуры линзы чувствительны к смещению центра зрачка относительно оси.

Перераспределение световой энергии в линзах ReSTOR осуществляется за счёт уменьшения глубины дифракционного рельефа. При увеличении диаметра зрачка осуществляется перекачка энергии из ближнего фокуса в дальний. Радиус центральной зоны определяются как

$$r_0 = \sqrt{2\lambda_0 f} \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  – конструктивная длина волны,  $f$  – фокус линзы в 1-м порядке дифракции. При внесении фазового сдвига можно уменьшить радиус центральной зоны:

$$r_k^2 = r_0^2 + 2k\lambda f \quad (2)$$

Однако далее накладывается условие

$$r_2^2 - r_1^2 = r_k^2 - r_{k-1}^2 \quad (3)$$

Таким образом, число зон можно увеличить лишь на одну и существенного эффекта добиться не удаётся [12-20].

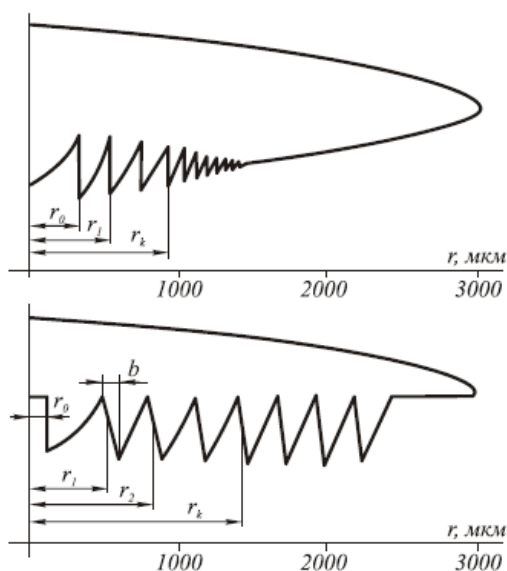
Гибридная мультифокальная линза AcriLisa (Acri. Tec GmbH, Германия) представляет собой монолитную асферическую бифокальную ИОЛ с коррекцией aberrаций, изготовленную из гидрофобного акрила. В фокус дальнего зрения попадает 65% интенсивности, в фокус ближнего – 35%. Бифокальное функционирование не зависит от размера и функции зрачка, так как дифракционная структура полностью покрывает световой диаметр. Отсутствуют резкие края рефракционного и дифракционного профиля. Рефракционный компонент имеет асферическую форму.

Трёхкомпонентная силиконовая дифракционная мультифокальная линза Tecnis ZM900 (Advanced Medical Optics, Inc., США) имеет диаметр оптической части 6 мм. Дифракционная структура, нанесённая на заднюю поверхность линзы, обеспечивает дополнительную оптическую силу в +4 диоптрии, падающий свет также равномерно распределяется независимо от размера и функции зрачка. Передняя поверхность линзы также имеет асферическую форму.

## 2.2. Отечественные линзы

В России бифокальные искусственные хрусталики впервые были разработаны группой учёных в Новосибирске, среди них Г.А. Ленкова, В.П. Коронкевич, И.А. Исаков, В.П. Корольков. В разработанном хрусталике были достигнуты обеспечение качества зрения вдаль и вблизи, обеспечение зрачковой независимости бифокального функционирования ИОЛ от условий освещения, в том числе при ослеплении и незначительной децентрации. Впервые была введена функция компенсации aberrаций глаза и самой ИОЛ, а также была разработана форма обратных скатов дифракционной структуры, уменьшающая риск биологических отложений на острых краях дифракционной решётки. Оптическая часть линзы имеет выпукло-плоскую форму с пилообразной конструкцией с кольцевой микроструктурой на плоской задней поверхности (рис. 1).

ИОЛ изготавливаются в Нижнем Новгороде фирмой «Репер-НН» (рис. 2). Разработка была проведена при участии Института Автоматики и Электрометрии СО РАН, Новосибирского филиала МНТК «Микрохирургия глаза» и ЗАО «Интра ОЛ».



**Рис. 1.** Схематические радиальные сечения сравниваемых линз: а) ReSTOR, б) МИОЛ-Аккорд.  $r$  – радиальная координата,  $r_0$ ,  $r_1$ ,  $r_k$  – радиусы дифракционных зон.

Формирование ИОЛ осуществляется в одну стадию путём фотоотверждения жидких олигомеров, способных к полимеризации. Процесс полимеризации проходит по типу роста кристаллов. Отсутствие необходимости механической обработки линзы и структура полимера снижает риск появления биологических отложений. Материал обладает хорошей биосовместимостью. В качестве шаблона используется кварцевая матрица с дифракционной

микроструктурой, изготавливаемой методом прямой лазерной записи (рис. 3, 4). При использовании этого метода появляется возможность изменения формы пучка.

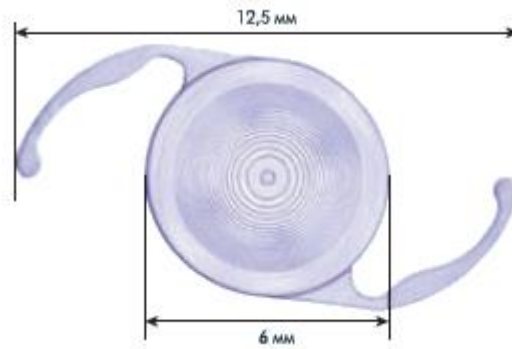


Рис. 2. Дифракционно-рефракционная линза МИОЛ-аккорд.

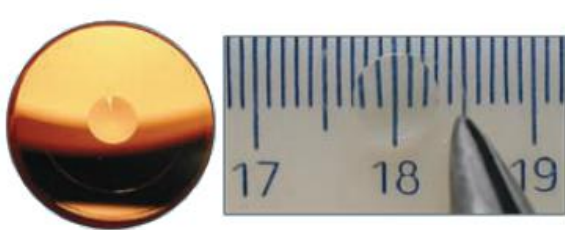


Рис. 3. Дифракционная матрица и готовая линза.

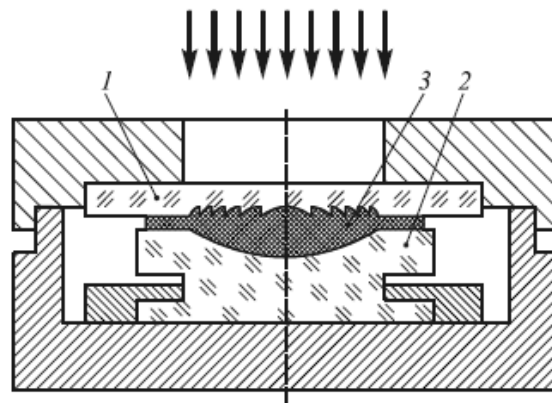


Рис. 4. Штампование интраокулярной линзы с помощью дифракционного шаблона.

Чтобы компенсировать падение дифракционной эффективности из-за появления обратных склонов, были увеличены высоты зубцов. Дифракционная структура в линзе нанесена до внешнего края. Такая конструкция линзы эффективно распределяет свет поровну между фокусами независимо от размера зрачка и сохранности его функции. При децентрации линзы из-за смещения центра зрачка обрезания дифракционных зон не происходит. Это также гарантирует сохранение соотношения энергии в фокусах и устранение размытия одного изображения другим. Для устранения эффекта ослепления при резком сужении зрачка была введена дополнительная мини-зона. Её кривизна совпадает с базовой кривизной плоскости, на которую нанесена дифракционная структура. В ИОЛ есть возможность корректировки aberrаций рефракционных компонент ИОЛ, роговицы и стекловидного тела. Она может быть осуществлена за счёт изменения оптической силы.

По сравнению с линзами ReSTOR у линз МИОЛ-Аккорд площадь каждой последующей дифракционной зоны возрастает

$$M = c\lambda / f \tag{4}$$

где  $c$  – безразмерный aberrационный коэффициент. Увеличение зон является результатом введённой коррекции aberrаций. Модель глаза рассматривалась по Лотмару.

В дальнейшем, в фирме «Репер-НН» были разработаны гибридные линзы с прямоугольным дифракционным профилем. Это дало возможность использовать уже три порядка дифракции. Максимум -1-го порядка можно использовать для образования изображения дальних объектов (бесконечность), максимум 0-го – для промежуточных расстояний (50 см) и максимум 1-го порядка – для близких расстояний (25 см). Для сравнения: более распространённый треугольный профиль обеспечивает лишь фокусировку в два порядка дифракции, хотя энергетическая эффективность здесь выше. Таким образом, повышение числа фокусов улучшает видение объектов на любых расстояниях [12-20].

Институт систем обработки изображений РАН совместно с Ганноверским лазерным центром провели исследование возможностей использования технологии двухфотонной полимеризации для изготовления в том числе интраокулярных линз. Элемент является трёхфокальным, его диаметр – 2,7 мм, фокусные расстояния лежат между 27 и 34 мм. Размер участка элемента меньше длины волны излучения. По сравнению с методом алмазного точения или электронной литографии, метод является более экономичным. Он позволяет формировать сложные трёхмерные структуры.

Экспериментально была изготовлена бинарная структура и проанализированы её характеристики. Высота ступени микрорельефа вычисляется по формуле

$$h = \frac{\text{mod}_{2\pi}(\varphi)}{k(n-1)} \quad (5)$$

где  $k$  – волновое число,  $n$  – коэффициент преломления,  $\text{mod}_{2\pi}(\varphi)$ .

Комплексные амплитуды исходной и преобразованной волн

$$W_0(\rho) = \sqrt{I_0(\rho)} \exp[i\varphi_0(\rho)] \quad (6)$$

$$W(\rho) = \sqrt{I_0(\rho)} \exp\left(-\frac{ik\rho^2}{2f_1} + i\Phi[\text{mod}_{2\pi}\left(\frac{k\rho^2}{2f_2}\right)]\right)$$

где  $\rho$  – текущий радиус элемента,  $f_1$  и  $f_2$  – фокусные расстояния.

Фокусы элемента представлены как

$$F_{-1} = \frac{f_1 f_2}{f_1 - f_2} \quad (7)$$

$$F_0 = f_1$$

$$F_1 = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2}$$

Распределение интенсивности представлено как

$$I(r, z) = \left| \frac{k}{z} \int_0^R W(\rho) \exp\left\{i\left[\varphi_{mf}(\rho) + \frac{k\rho^2}{2z}\right]\right\} J_0\left(\frac{kr\rho}{z}\right) \rho d\rho \right|^2 \quad (8)$$

где  $z$  – продольная координата,  $\varphi_{mf}(\rho)$  – фазовая функция,  $r$  – координата по радиусу. График представлен на рис. 5.

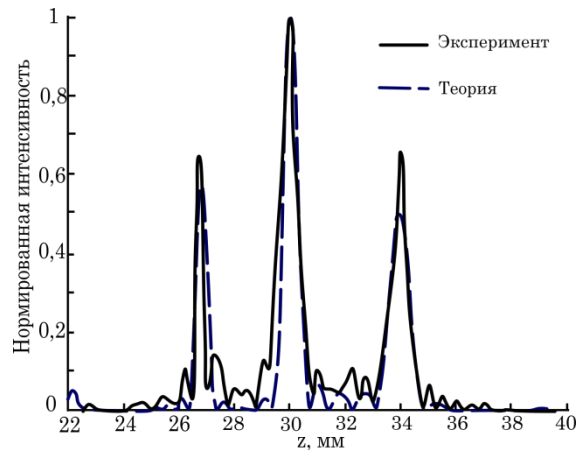


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения вдоль оптической оси.

Теми же организациями позднее была рассмотрена возможность изготовления дифракционного рельефа субмикронной высоты синусоидального профиля. Изучалась возможность изготовления трифокальных гибридных дифракционно-рефракционных линз с помощью технологии нанопечати. Распределение интенсивности между фокусами рассчитывается заранее. Оптические силы фокусов равны -3, 0 и 3 дптр. По сравнению с методом двухфотонной полимеризации, метод нанопечати существенно быстрее и точнее. Теоретические результаты оказались согласованными с экспериментальными [21-23].

### 3. Новые способы устранения хроматизма

#### 3.1 Зарубежные линзы

В Киеве в 2015 году был разработан искусственный хрусталик с уменьшенной абберацией. Он представляет собой многопорядковую линзу. У таких линз хроматизм существенно меньше. Толщина у таких линз увеличена в  $p$  раз.

Массив фокусных расстояний определяется по формуле

$$f_N = \frac{pf_0\lambda_0}{N\lambda} \quad (9)$$

где  $f_0$  – фокусное расстояние для расчётной длины волны  $\lambda_0$ ;  $N$  – рабочий порядок дифракции;  $\lambda \neq \lambda_0$ ;  $p$  – параметр. Из уравнения следует, что при  $p\lambda_0/N\lambda = 1$  несколько длин волн фокусируются в одну точку с большой дифракционной эффективностью. Она определяется по формуле

$$\eta_N = \text{sinc}^2(\alpha\mu p - N) \quad (10)$$

где  $\alpha = \frac{\lambda_0[n(\lambda)-1]}{\lambda[n(\lambda_0)-1]}$  – относительная фазовая задержка при  $\lambda \neq \lambda_0$ ,  $\mu = t'/t$  – коэффициент толщины микрорельефа, где

$t'$  и  $t$  – реальная и расчётная толщины профиля соответственно. Коэффициент  $\mu$  не влияет на положение фокусов, но изменяет распределение энергии в них. В статье [1] он принимается равным 1. При увеличении параметра  $p$  увеличивается количество длин волн, удовлетворяющих условию максимума. Для основного максимума  $p = N$  и длина волны –  $\lambda_0$ . Для красной, зелёной и синей волн наиболее подходящее значение  $p = 6$ . На рис. 6 показана зависимость дифракционной эффективности от длины волны. При  $p = 20$  хроматические aberrации сравнимы с aberrациями сферических линз, что не представляет интереса. Дисперсия линзы для трёх длин волн вычисляется по формуле

$$v_\lambda = \frac{N_3\lambda_3}{N_e\lambda_c - N_k\lambda_k} \quad (11)$$

На рис. 7 показана зависимость дифракционной эффективности от фокусного расстояния. Номера порядков дифракции могут не совпадать. Рассматривались две группы длин волн:  $\lambda_c = 485$  нм,  $\lambda_3 = 573$  нм,  $\lambda_k = 700$  нм и  $\lambda_c = 420$  нм,  $\lambda_3 = 485$  нм,  $\lambda_k = 573$  нм. Для ближнего и дальнего фокусов дисперсии равны -32, 74 и 38,8 соответственно. Однако дисперсия обычной дифракционной линзы равна -3,5. Таким образом, хроматизм у многопорядковой линзы на порядок меньше, чем у стандартной. Также линзы имеют бесконечную аккомодацию.

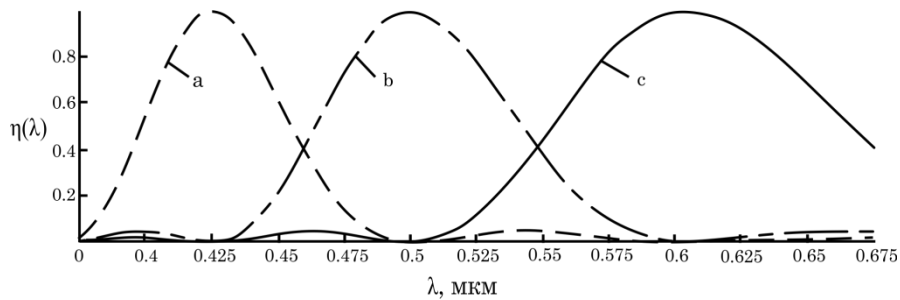


Рис. 6. Зависимость дифракционной эффективности от длины волны. а)  $N = 7$ ; б)  $N = 6$ ; в)  $N = 5$ .

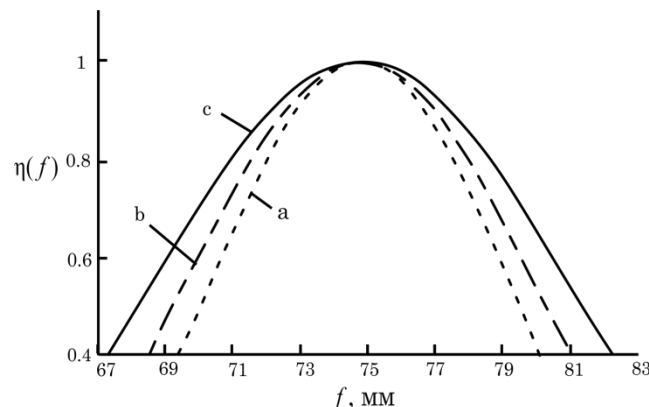


Рис. 7. Распределение света из заданных спектральных диапазонов вдоль оптической оси: а)  $N = 7$  (синий); б)  $N = 6$  (зелёный); в)  $N = 5$  (красный).

Для предложенной интраокулярной линзы приведены следующие параметры:  $f = 100$  мм,  $p = 6$ , материал – ПММА,  $\lambda_0 = 525$  нм. В пределах светового диаметра линзы  $D = 7$  мм размещается 19 дифракционных зон, максимальная глубина канавки равна 6 мкм. Передняя поверхность линзы – сферическая, модель глаза человека с искусственным хрусталиком представлена по Гультранду [24].

### 3.2 Голографический подход к вопросу проектирования хрусталиков

Для устранения хроматизма можно также использовать толстослойные (объёмные) голограммы. Так как при записи имеет значение направление лучей, она производится путём совмещения объектной и опорной волн в толще фоточувствительного слоя. По сравнению с методом прямой лазерной записи, метод записи «традиционных» голограмм существенно быстрее. В объектной волне заданные значения aberrаций могут быть рассчитаны и воспроизведены с помощью методов компьютерной оптики.

Голограммы начинают проявлять свойства объёмных (толстослойных) при толщине фоточувствительного слоя  $\sim 7$  мкм. В этом случае при записи образуется лишь одно изображение. Голограммы являются фазовыми, но, в отличие от вышерассмотренных, их поверхность гладкая. У таких голограмм нет хроматической aberrации вследствие необходимости выполнения условия Брэгга:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (12)$$

где  $d$  – период дифракционной решётки,  $\theta$  - угол между лучом и нормалью к поверхности,  $n$  - порядок дифракции,  $\lambda$  - длина волны [25].

Для записи объёмных голограмм предлагается применять бихромированную желатину (БХЖ), фотополимерную композицию, разработанную фирмой Байер, галогеносеребряные нанопористые среды для записи голограмм, Ultimate-08 либо фото-термо-рефрактивные стекла для записи объёмных голограмм, разработанные в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики (ИТМО).

Бихромированная желатина может быть нанесена на любую поверхность, голограммы из такого материала имеют высокое разрешение и хорошую спектральную селективность, а влияния гигроскопичности на свойства готовой голограммы можно избежать путём нанесения на желатину покрытия. Применение голограмм на БХЖ в качестве светоделиителей было рассмотрено в [26-28]. Однако голограмма меняет свойства при повышении температуры до 34 градусов, что затрудняет использование материала.

Галогеносеребряные среды по сравнению с БХЖ менее капризны. Методы повышения их дифракционной эффективности по сравнению с существующими аналогами, производимыми заводом «Славич» представлены ИТМО в [29-30].

Материал Ultimate-08 был неоднократно представлен Алкиссом Лембессисом на выставках «Голоэкспо». Этот материал обладает хорошей цветопередачей и готовая голограмма менее капризна по сравнению с БХЖ [31].

Фото-термо-рефрактивные стёкла представлены ИТМО в [32-33]. По сравнению с БХЖ материал менее капризен, однако недостаток ФТР стёкол – негибкость. Запись голограммы производится в ультрафиолете, однако рабочие длины волн могут отличаться от длин волн записи при условии одновременного изменения угла падения, что непосредственно следует из формулы Брэгга.

Схема восстановления точечного источника с изменением длины волны представлена на рис. 8. Чтобы получить не мнимое, а действительное изображение, источник при записи применяется мнимый. То есть, записывающий пучок будет расходящимся. Помещая перед источником оптические элементы, можно вносить требуемые aberrации, которые в готовой голограмме будут скомпенсированы роговицей [34].

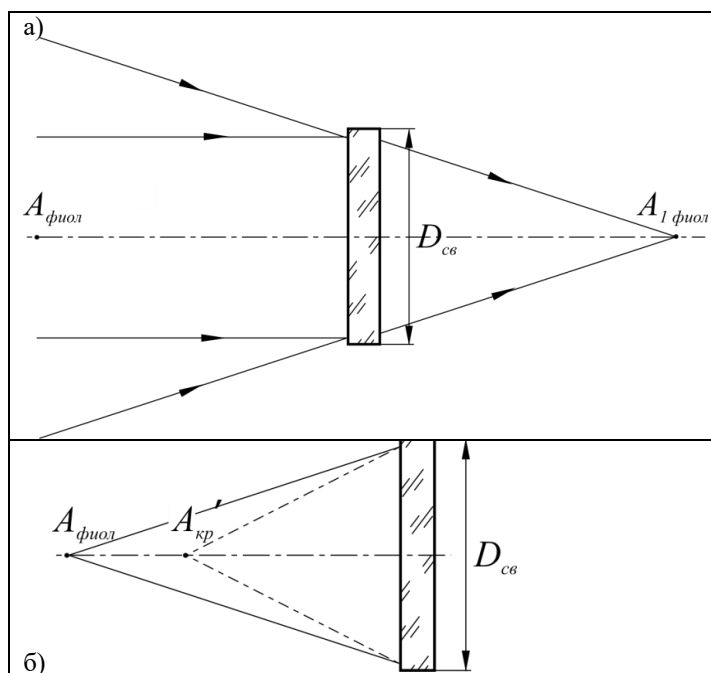


Рис. 8. Исходный и восстановенный идеальные точечные источники.

#### 4. Заключение

Рассмотрены существующие в промышленности образцы дифракционных интраокулярных линз. Приведено сравнение форм рельефов линз различных производителей. Выполнен анализ существующих технологий изготовления ИОЛ. Показано сравнение российских и зарубежных аналогов, пути устранения монохроматических и хроматических aberrаций. Предложены методы дальнейшего совершенствования технологии изготовления интраокулярных линз и повышения их качества, проанализирована целесообразность их применения.

#### Литература

- [1] Кокин, С.А. Клинико-функциональная оценка оптимизированного метода достижения прогнозируемой анизотропии при коррекции афакии монофакальными интраокулярными линзами: диссертация кандидата медицинских наук: 14.01.07/ Кокин Сергей Андреевич; Кафедра глазных болезней ГОУ ВПО Московского Государственного Медико-Стоматологического Университета им. А.И. Евдокимова Министерства здравоохранения Российской Федерации. – Москва, 2015.
- [2] Kohnen, T., Allen, D., Boureau C. European multicenter study of the AcrySof ReSTOR apodized diffractive intraocular lens / *Ophthalmology.*, 113 (2006), pp. 578-584
- [3] Souza, C.E., Muccioli, C., Soriano, E.S. Visual Performance of AcrySof ReSTOR apodized diffractive IOL: a prospective comparative trial / *Am J Ophthalmol.*, 141 (2006), pp. 827-832 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ajo.2005.12.031>
- [4] Alfonso, J.F., Fernández-Vega, L., Señaris, A., Montés-Micó, R. Prospective study of the Acri.LISA bifocal intraocular lens / *J Cataract Refract Surg.*, 33 (2007), pp. 1930-1935 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrs.2007.06.067>
- [5] URL: <http://www.tecnisiol.com/> (дата захода на сайт 24.01.2017)
- [6] Метод интраокулярной коррекции афакии мультифокальными рефракционно-дифракционными и с торическим компонентом линзами после факоэмульсификации. Учебно-методическое пособие. – ООО Глазной центр «Восток-прозрение», Москва, 2013 г. – 22 с.
- [7] Анисимова, С.Ю. Клинический опыт имплантации мультифокальных дифракционных ИОЛ AcrySof® ReSTOR / С.Ю. Анисимова, С.И. Анисимов, Л.В. Загребельная. – Современные технологии хирургии катаракты – 2009: Международ. научно-практ. конф.: Сб. науч. ст. – М., 2009. – С. 12-15.
- [8] Анисимова, С.Ю. Алгоритм выбора метода интраокулярной коррекции афакии с учетом сопутствующей пресбиопии и астигматизма / С.Ю. Анисимова, С.И. Анисимов, Л.В. Загребельная. – Современные технологии катарактальной и рефракционной хирургии – 2010: Сб. науч. ст. – М., 2010. – С. 24-30.
- [9] Беликова, Е.И. Первый опыт клинического применения ИОЛ AcrySof® IQ ReSTOR® Toric / Е.И. Беликова, С.В. Антонюк, С.А. Кочергин // *Офтальмохирургия.* – 2011. – №1. – С. 39-43.
- [10] Коновалов, М.Е. Клинические результаты факоэмульсификации с имплантацией мультифокальной ИОЛ ReSTOR для коррекции аметропий и пресбиопии у пациентов старшего возраста / М.Е. Коновалов, М.Л. Зенина, С.В. Милова // *Современные технологии катарактальной и рефракционной хирургии – 2006: сб. науч. ст. – М., 2006. – С. 102-107.*
- [11] Тахтаев, Ю.В. Хирургическая коррекция гиперметропии и пресбиопии рефракционно-дифракционными псевдоаккомодирующими линзами AcrySof Restor / Ю.В. Тахтаев, Л.И. Балашевич // *Офтальмохирургия.* – 2005, – № 3. – С. 12-16.
- [12] Отчетственная бифокальная дифракционно-рефракционная структура ИОЛ: конструкция, оптические свойства / И.А. Исаков, В.П. Коронкевич, Г.А. Ленкова, В.П. Корольков // *Вестник ОГУ.* – 2007. – № 12. – С. 85-88.
- [13] Новое поколение бифокальных дифракционно-рефракционных линз / В.П. Коронкевич, Г.А. Ленкова, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, И.А. Исаков, В.М. Треушников // *Компьютерная Оптика.* – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 50-58.
- [14] Бифокальная интраокулярная линза вместо хрусталика / В.П. Коронкевич, Г.А. Ленкова, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, И.А. Исаков, А. Гутман, В.М. Треушников // *Фотоника.* – 2008. – № 1. – С. 10-13.
- [15] Чередник, В.И. Мультифокальные интраокулярные линзы – качество видения / В.И. Чередник, В.М. Треушников // *Фундаментальные исследования.* – 2008. – № 4. – С. 108-111.
- [16] Лазерные интерферометрические и дифракционные системы / В.П. Коронкевич, А.Г. Полещук, В.П. Седухин, Г.А. Ленкова // *Компьютерная Оптика.* – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 4-23.
- [17] Ленкова, Г.А. Исследование моделей глаза с дифракционно-рефракционным хрусталиком / Г.А. Ленкова // *Автометрия.* – 2012. – Т. 48, №4. – С. 12-19.
- [18] Ленкова, Г.А. Дифракционные элементы в конструкциях внутриглазных (факичных) контактных линз // Г.А. Ленкова // *Голография. Наука и практика Сборник трудов 10-й Международной конференции «ГолоЭкспо – 2013» 17-18 сентября 2013 г. – Москва, 2013. – С. 180-184.*
- [19] Ленкова, Г.А. Особенности измерения оптической силы бифокальных дифракционно-рефракционных хрусталиков глаза МИОЛ-Аккорд / Ленкова Г.А. // *Голография. Наука и практика Сборник трудов 10-й Международной конференции «ГолоЭкспо – 2013» 17-18 сентября 2013 г. – Москва, 2013. – С. 421.*
- [20] Lenkova, G.A. Specific Features of Measuring the Optical Power of Artificial Refractive and Diffractive-Refractive Eye Lenses / G.A. Lenkova // *Optics and Spectroscopy.* 2016. – V. 121 №2. – P. 335-347.
- [21] Osipov, V., Doskolovich, L. L., Bezus, E. A., Cheng, W., Gaidukeviciute, A., & Chichkov, B. (2012). Fabrication of three-focal diffractive lenses by two-photon polymerization technique. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 107(3), 525-529. doi:10.1007/s00339-012-6903-9
- [22] Osipov, V., Doskolovich, L. L., Bezus, E. A., Drew, T., Zhou, K., Sawalha, K., . . . Wolffsohn, J. S. W. (2015). Application of nanoimprinting technique for fabrication of trifocal diffractive lens with sine-like radial profile. *Journal of Biomedical Optics*, 20(2) doi:10.1117/1.JBO.20.2.025008
- [23] Hinze, U., El-Tamer, A., Doskolovich, L. L., Bezus, E. A., Reiß, S., Stolz, H., ... & Chichkov, B. (2016). Additive manufacturing of a trifocal diffractive-refractive lens. *Optics Communications*, 372, 235-240.
- [24] Колобродов, В.Г. Проектирование многопорядковых интраокулярных линз / В.Г. Колобродов, Г.С. Тымчик, И.О. Кучугура // *Приборы и методы измерений.* – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 204-210.
- [25] Кольер, Р. Оптическая голография. / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин // пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 421 с.
- [26] Горностай, А.В. Метод расчёта дифракционного делителя пучков лазерного излучения со спектральной селекцией на основе бихромированной желатин / А.В. Горностай, С.Б. Одинок // *Компьютерная оптика.* – 2016. – Т.40, № 1. – С. 45-50. – DOI: 10.18287/2412- 6179-2016-40-1-45-50.
- [27] Горностай, А.В. Мультифокальные интраокулярные линзы. Методы расчёта и изготовления / А.В. Горностай // «Оптические технологии в телекоммуникациях» ОТТ-2016: материалы XIV Международной научно-технической конференции, г. Самара, 22-24 ноября 2016 г. – С. 135-136.
- [28] Ганжерли, Н.М. Изменение свойств голографических дифракционных решеток на бихромированном желатине после воздействия коротковолнового УФ излучения / Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, И.А. Маурер // *Голография. Наука и Практика. Сборник трудов 13-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2016» 12-15 сентября 2016 г. – Ярославль, 2013. – С. 131-137.*
- [29] Андреева, О.В. Галогеносеребряная нанопористая среда для объёмной голографии / О.В. Андреева // *Голография. Наука и Практика. Сборник трудов 10-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2013» 17-18 сентября 2013 г. – Москва, 2013. – С. 35-40.*
- [30] Сайтов, С.В. Эффективные оптические постоянные нанопористой серебросодержащей среды с объёмными амплитудно-фазовыми голограммами / Сайтов С.В., Андреева Н.В., Андреева О.В. // *Голография. Наука и Практика. Сборник трудов 10-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2013» 17-18 сентября 2013 г. – Москва, 2013. – С. 323-325.*

- [31] Andreas Sarakinos. Opto Clones and HoLoFoS: advances in colour display holography / Andreas Sarakinos, Alkis Lembessis, Nikos Zervos // Голлография. Наука и Практика. Сборник трудов 10-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2013» 17-18 сентября 2013 г. – Москва, 2013. – С. 124-125.
- [32] Иванов, С.А. Голлографические метки на фото-термо-рефрактивном стекле для коллиматорных прицелов / С.А. Иванов, А.И. Игнатъев, Н.В. Никоноров // Голлография. Наука и Практика. Сборник трудов 10-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2013» 17-18 сентября 2013 г. – Москва, 2013. – С. 99-101.
- [33] Никоноров, Н.В. Новые фото-термо-рефрактивные стекла для записи объемных голлограмм: свойства, технологии и применения / Н.В. Никоноров // Голлография. Наука и Практика. Сборник трудов 13-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2016» 12-15 сентября 2016 г. Ярославль, Россия. С. 68-70.
- [34] Островский, Ю.И. Голлография и её применение / Ю. И. Островский. – Л. – Наука, 1973. – 178 с.
- [35] Золотарёв, Е.В. Глубина резкости интраокулярных линз с абберациями высших порядков / А.В. Золотарёв, Е.В. Карлова, С.П. Котова, В.В. Патлань, К.Н. Руссков, С.А. Самагин, Т.Н. Сапшина // Краткие сообщения по физике ФИАН, №12, 2013.
- [36] Грейсух, Г.И. Дифракционная оптика в прошедшем десятилетии: тенденции и итоги / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, З.А. Сидякина, С.А. // Голлография. Наука и Практика. Сборник трудов 10-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2013» 17-18 сентября 2013 г. – Москва, 2013. – С. 44-55.
- [37] Грейсух, Г.И. Расчет рельефов микроструктуры фазовых дифракционных элементов на криволинейных поверхностях вращения / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, З.А. Сидякина, С.А. Степанов // Голлография. Наука и Практика. Сборник трудов 13-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2016» 12-15 сентября 2016 г. Ярославль, Россия. С. 165-171.
- [38] Грейсух, Г.И. Дифракционная эффективность и качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой / Грейсух Г. И., Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Голлография. Наука и Практика. Сборник трудов 12-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2015» 12-15 октября 2015 г. Казань, Россия. С. 102-109.
- [39] Вениаминов, А.В. Объемная голлограмма изнутри: лазерная сканирующая микроскопия голлограмм в кристаллах фторида кальция с центрами окраски / Вениаминов А. В., Захаров В.В., Ангервакс А.Е., Щеулин А.С., Рыскин А.И. // Голлография. Наука и Практика. Сборник трудов 12-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2015» 12-15 октября 2015 г. Казань, Россия. С. 180-184.
- [40] Ворзобова, Н.Д. Формирование и свойства объемных и гибридных объемноповерхностных периодических структур и элементов на их основе / Н.Д. Ворзобова, В.О. Веселов // Голлография. Наука и Практика. Сборник трудов 13-й Международной Конференции «ГолоЭкспо – 2016» 12-15 сентября 2016 г. Ярославль, Россия. С. 238-240.
- [41] Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соифер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Соифера. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 736 с. – ISBN 5-9221-0845-4.
- [42] Одинокоев, С.Б. Создание ДОО для формирования точечных эталонных изображений в оптических системах / С.Б. Одинокоев, М.С. Ковалев, Г.П. Сагателян, А.Б. Соломашенко, Е.А. Дроздова // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 341-351.
- [43] Kazanskiy, N.L. Binary beam splitter / N.L. Kazanskiy, R.V. Skidanov // Applied Optics. – 2012. – V. 51(14).– P. 2672-2677. – DOI: 10.1364/AO.51.002672.
- [44] Карпеев, С.В. Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217.
- [45] Dammann, H. Colour separation gratings / H. Dammann // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17(15). – P. 2273-2279.
- [46] Chen, P.-C. Color separation system with angularly positioned light source module for pixelized backlighting / P.-C. Chen, H.-H. Lin, C.-H. Chen, C.-H. Lee, M.-H. Lu // Optics Express. – 2010. – Vol. 18(2). – P. 645-655.
- [47] Li, G. Splitting of femtosecond laser pulses by using a Dammann grating and compensation gratings // G. Li, C. Zhou, E. Dai // Journal of the Optical Society of America. – 2005. – Vol. 22(4). – P. 767-772.
- [48] А.с. SU 1053056 А СССР, МПК G 02 В 5/32. Светоделитель / Дьяченко Н.Г., Мандель В.Е., Тюрин А.В., Нечаева Т.В. (СССР). – 3504124/18-10; заявлено 22.07.82; опублик. 07.11.83, Бюл. №41. – С. 3.
- [49] А.с. SU 1826075 А СССР, МПК G 02 В 5/26. Светоделитель с плавным изменением коэффициента светоделения / Парусинов В.Г., Беспалько Н.В., Андрущенко В.В., Ешан В.Н. (СССР). – 4856093/10; заявлено 01.08.90; опублик. 07.07.93, Бюл. №25. – С. 2.
- [50] Лушников, Д.С. Расчёт и исследование угловой и спектральной селективностей для полнопараллаксных голлограммных стереограмм / Д.С. Лушников, А.Ю. Жердев, В.В. Маркин, С.Б. Одинокоев, А.В. Смирнов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 802–809. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-802-809.
- [51] Бобров, С.Т. Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
- [52] Казанский Н.Л., Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Морозов А.А., Харитонов С.И., Волотовский С.Г. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой // Компьютерная оптика, 2014, Том 38, № 3, с. 425-434.
- [53] Хонина, С.Н. Бинарная линза: Исследование локальных фокусов / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 339-346.
- [54] Davis JA, Field AM, Cottrell DM. Subharmonic focal-length intensities formed by Fresnel lenses. Appl Opt. 1994 Dec 10;33(35):8194-6. doi: 10.1364/AO.33.008194. PubMed PMID: 20963052.
- [55] Berezny, A.E. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography / A.E Berezny, S.V. Karpeev, G.V Uspleniev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 331-340.
- [56] Futhey J.A. Diffractive bifocal intraocular lens / J.A. Futhey // SPIE. 1989. – V. 1052: Holographic Optics: Optically and Computer Generated. – P. 142.
- [57] Lombardo, M. Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance / M. Lombardo, G. Lombardo // Journal of Cataract & Refractive Surgery. – 2010. – Vol. 36, Issue 2. – P. 313-331. – DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.09.026.
- [58] Artal, P. Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age / P. Artal, E. Berrio, A. Guirao, P. Piers // Journal of the Optical Society of America A. – 2002. – Vol. 19(1). – P. 137-143. – DOI: 10.1364/JOSAA.19.000137.
- [59] He, J.C. Wavefront aberrations in the anterior corneal surface and the whole eye / J.C. He, J. Gwiazda, F. Thorn, R. Held // Journal of the Optical Society of America A. – 2003. – Vol. 20(7). – P. 1155-1163. – DOI: 10.1364/JOSAA.20.001155.
- [60] Mrochen, M. Correlation between corneal and total wavefront aberrations in myopic eyes / M. Mrochen, M. Jankov, M. Bueeler, T. Seiler // Journal of Refractive Surgery. – 2003. – Vol. 19(2). – P. 104-112. – DOI: 10.3928/1081-597X-20030301-04.
- [61] Kelly, J.E. Compensation of corneal horizontal/vertical astigmatism, lateral coma, and spherical aberration by internal optics of the eye / J.E. Kelly, T. Mihashi, H.C. Nowland // Journal of Vision. – 2004. – Vol. 4. – P. 262-271. – DOI: 10.1167/4.4.2.
- [62] Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973.
- [63] Khonina, S.N. Diffractive optical element matched with Zernike basis / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, Ya. Wang // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2001. – Vol. 11(2). – P. 442-445.
- [64] Khonina, S.N. Zernike phase spatial filter for measuring the aberrations of the optical structures of the eye / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, D.V. Kirsh // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2015. – Vol. 1, Issue 2. – P. 146-153.
- [65] Kirilenko, M.S. Wavefront analysis based on Zernike polynomials / M.S. Kirilenko, P.A. Khorin, A.P. Porfirev // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1638. – P. 66-75. - DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-66-75.
- [66] Анализ аббераций роговицы человеческого глаза / Хорин П.А., Хонина С.Н., Карсаков А.В., Бранчевский С.Л. // Компьютерная оптика, 2016, том 40, №6, С. 810-817.
- [67] Porfirev, A.P. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions / A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – 98070E. – DOI: 10.1117/12.2231378.
- [68] Zemax® User's Guide. Zemax Development Corporation; 2005.
- [69] Tocci, M. How to Model the Human Eye in Zemax [Electronical Resource] / M. Tocci. – URL: <http://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/how-to-model-the-human-eye-in-zemax>.



- [70] Guirao, A. Optical aberrations of the human cornea as a function of age / A. Guirao, M. Redondo, P. Artal // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2000. – Vol. 17(10). – P. 1697-1702.
- [71] Грейсух, Г.И. Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // *Компьютерная оптика*, 2005, том 28, С. 60-65.
- [72] Казанский, Н.Л. Процедура корректировки фазовой функции фокусатора по результатам вычислительного эксперимента / Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*, 1987, том 1, С. 90-95.
- [73] Bifocal multiorder diffractive lenses for vision correction № 7093938 B2 / G. Michael Morris, Victor, Nordan Dale A. Buralli, Rochester, Richard J. Federico // Accepted 22.08.2006.
- [74] Diffractive lenses for vision correction / G. Michael Morris, Dale A. Buralli, Richard J. Federico, US 7 156 516 B2// Accepted Jan. 2, 2007.
- [75] Bifocal multiorder diffractive lenses for vision correction / G. Michael Morris, Dale A. Buralli, Richard J. Federico, US 2005/0057720 A1, Accepted Mar. 17, 2005.
- [76] Invited Paper / Multi-focal and combined diffractive elements // Victor A. Soifer, Leonid L. Doskolovich, Michail A. Golub, Nikolay L. Kazanskiy, Sergey I. Kharitonov, Piero P. Perlo'.
- [77] Power Profiles of Multifocal Contact Lenses and Their Interpretation / Sotiris Plainis, David A. Atchison, and W. Neil Charman // *Optometry and Vision Science*, Vol. 90, No. 10, October 2013, PP. 1066-1077.
- [78] Diffractive multi-focal lens / T. Cosoburd, J. Kedmi, Israel Grossinger, U. Levy, US 5760871, Acc. June 2, 1998.
- [79] Diffractive optical element / I. Grossinger J. Kedmi, US 5227915, Acc. July 13, 1993.
- [80] Simultaneous multifocal lens and method of utilising same for treating visual disorders / I/ Grossinger, M. Golub / US 6364483, Acc. Apr. 2, 2002.
- [81] Golub, M.A., Karpeev, S. V., Prokhorov, A. M., Sisakyan, I. N. and Soifer, V. A., "Focusing light into a specified volume by computer synthesized holograms," *Soviet Technical Physics Letters* 7(10), 264-266 (1981).
- [82] Serafimovich, P.G., "Diffraction analysis of focusing optical elements," *Proc. SPIE* 9156, (2013); DOI: 10.1117/12.2054492.
- [83] Golub, M.A., Kazanskii, N. L., Sisakyan, I. N. and Soifer, V. A., "Computational experiment with plane optical elements," *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 24(1), 78-89 (1988).
- [84] Kazanskii, N.L., "Correction of focuser phase function by computer-experimental methods," *Computer Optics* 1(1), 69-73 (1989).
- [85] Doskolovich, L.L., Kazanskiy, N. L., Soifer, V. A. and Tzaregorodtzev, A. Ye., "Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment," *Optik – International Journal for Light and Electron Optics* 101(2), 37-41 (1995).
- [86] Golub, M.A., Doskolovich, L.L., Kazanskiy, N.L., Kharitonov, S.I., Orlova, N.G., Sisakian, I.N., Soifer, V.A. Computational experiment for computer generated optical elements // *Proceedings of SPIE* 1500, 194-206 (1991).
- [87] Soifer, V.A., Doskolovich, L.L., Kazanskiy, N.L., Pavelyev, V.S. A hybrid method for calculating DOEs focusing into radial focal domains // *Proceedings of SPIE* 2426, 358-365 (1995).
- [88] Kazanskiy, N.L., Kotlyar, V.V., Soifer, V.A. Computer-aided design of diffractive optical elements // *Optical Engineering* 33(10), 3156-3166 (1994).
- [89] Golovashkin, D.L., Kazanskiy, N.L., Soifer, V.A., Pavelyev, V.S., Solovyev, V.S., Usplenyev, G.V., Volkov, A.V. Technology of DOE Fabrication. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements / V.A. Soifer eds // A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, 267-345 (2002).
- [90] Golub, M.A., Kazanskii, N.L., Sisakyan, I.N., Soifer, V.A., Kharitonov, S.I. Diffraction calculation of the field intensity near the focal line of a focuser // *Optics and Spectroscopy* 67(6), 814-815 (1989).
- [91] Kazansky, N.L. Numerical experiment with a Fresnel lens // *Computer Optics* 2(1), 17-21 (1990).
- [92] Doskolovich, L.L., Kazanskiy, N.L., Kharitonov, S.I., Tzaregorodtzev, A. Ye. A method for estimating the DOE's energy efficiency // *Optics and Laser Technology*, 27(4), 219-221 (1995).
- [93] Popov, V.V. Materials and methods for flat optical elements // *Computer Optics* 1(1), 125-128 (1989).
- [94] Golub, M.A., Doskolovich, L.L., Kazanskiy, N.L., Kharitonov, S.I., Soifer, V.A. Computer generated diffractive multi-focal lens // *Journal of Modern Optics* 39(6), 1245-1251 (1992); DOI: 10.1080/713823549.
- [95] Soifer, V.A., Doskolovich, L.L., Kazanskiy, N.L. Multifocal diffractive elements // *Optical Engineering* 33(11), 3610-3615 (1994); DOI: 10.1117/12.179890.
- [96] Doskolovich, L.L., Kazanskiy, N.L., Soifer, V.A., Perlo, P., Repetto, P. Design of DOEs for wavelength division and focusing // *Journal of Modern Optics* 52(6), 917-926 (2005); DOI: 10.1080/09500340512331313953.
- [97] Doskolovich, L.L., Kazanskiy, N.L., Repetto, P., Tyavin, Ye.V. Design and investigation of colour separation diffraction gratings // *Journal of Optics* 9(2), 123-127 (2007); DOI: 10.1088/1464-4258/9/2/001.
- [98] Kazanskiy, N., Skidanov, R. Binary beam splitter // *Applied Optics* 51(14), 2672-2677 (2012); DOI: 10.1364/AO.51.002672.
- [99] Golub, M.A., Kazanskii, N.L., Sisakyan, I.N., Soifer, V.A., Usplenyev, G.V., Yakunenkov, D.M. Multigradation Fresnel Lens // *Soviet Technical Physics* 61(4), 195-197 (1991).
- [100] Doskolovich, L.L., Kazanskiy, N.L., Khonina, S.N., Skidanov, R.V., Heikkila, N., Siitonen, S., Turunen, J. Design and investigation of color separation diffraction gratings // *Applied Optics* 46(15), 2825-2830 (2007); DOI: 10.1364/AO.46.002825.