

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАНАРИЗАЦИИ МИКРОРЕЛЬЕФА ФОТОРЕЗИСТОМ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ДИФРАКЦИОННЫХ МАТРИЦ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БИФОКАЛЬНЫХ ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ «МИОЛ-АККОРД»**

*Виктор Павлович Корольков*

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, заместитель директора, тел. +7 (383) 333 3091, e-mail: victork@iae.nsk.ru

*Полина Егоровна Коношенко*

Новосибирский государственный технический университет, 630087, Россия, г. Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, 136, Институт Автоматизации и Электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, студент, тел. +7 (909) 5339970, e-mail: konoshenko.polina@mail.ru

*Сергей Львович Микерин*

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики лазеров, тел. +7 (913) 9053208, e-mail: mikerinsl@iae.sbras.ru

Бифокальные дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы (БДРИОЛ) широко используются в офтальмологии для замены естественных хрусталиков, помутневших при катаракте. В России на предприятии РЕПЕР-НН разработана технология изготовления таких линз «МИОЛ-АККОРД» на основе фронтальной полимеризации жидкого фотополимера, помещенного между двумя прозрачными кварцевыми матрицами. Прямое измерение распределения энергии света по фокусам после изготовления кварцевой дифракционной матрицы осложняется тем, что глубина дифракционного рельефа соответствует работе полимерной линзы во внутриглазной жидкости и поэтому существенно больше, чем требуется при работе в воздухе. Нами разработан метод измерения распределения энергии по фокусам дифракционного компонента БДРИОЛ на основе временной планаризации рельефа матрицы слоем фоторезиста. Заполнение дифракционного рельефа материалом с показателем преломления на заданную величину выше, чем у плавленого кварца, позволяет достичь условий фокусировки света, эквивалентным работе во внутриглазной среде, и также измерить распределение энергии света по фокусам в условиях, близких к расчетным, на длине волны света в видимом диапазоне. Первоочередной задачей на данный момент является получение такого показателя преломления фоторезиста, который обеспечит глубину рельефа дифракционного компонента интраокулярной линзы, соответствующую работе в стекловидном теле глаза. Работа посвящена подбору условий сушки и методу измерения показателя преломления фоторезиста.

**Ключевые слова:** бифокальные дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы, дифракционная эффективность, измерение энергии света по фокусам линзы, фоторезист, измерение коэффициента преломления

## **APPLICATION OF MICRORELIEF PLANARIZATION BY PHOTORESIST FOR CHARACTERIZATION OF DIFFRACTIVE ORIGINALS AT PRODUCTION OF BIFOCAL INTRAOCULAR LENS «MIOL-ACCORD»**

*Viktor P. Korolkov*

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademika Koptyuga Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Deputy Director, phone: (383) 333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

***Polina Y. Konoshenko***

Novosibirsk State Technical University, 136, Nemirovicha-Danchenko St., Novosibirsk, 630087, Russia, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, prospekt Akademika Koptyuga, 1, Novosibirsk, 630090, Russia, student, phone: +7 (909) 5339970, e-mail: konoshenko.polina@mail.ru

***Sergey L. Mikerin***

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Akademika Koptyuga Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of the Laboratory of Laser Physics, phone: +7 (913) 9053208, e-mail: mikerinsl@iae.sbras.ru

Bifocal diffraction-refractive intraocular lenses (BDRIOL) are widely used in ophthalmology for replacing natural lenses that have been clouded by cataracts. In Russia, the REPER-NN company has developed a manufacturing technology for such BDRIOLS which based on the frontal polymerization of a liquid photopolymer placed between two transparent quartz matrices. The direct measurement of the light energy distribution over the foci after the manufactured quartz diffraction matrix is complicated by the fact that the diffraction relief depth corresponds to the polymer lens operation in the intraocular fluid and is therefore significantly greater than is required when working in air. We have developed a method for the energy distribution measuring over the foci of the BDRYOL diffraction component which based on the time planarization of the matrix relief by a photoresist layer. The diffraction relief filling with a material with a refractive index of a given value higher than refractive index of fused quartz makes it possible to achieve light focusing conditions equivalent to working in the intraocular environment, and also to measure the light energy distribution across the foci under conditions close to the calculated light wavelength in the visible range. The primary task at the moment is to obtain such a photoresist refractive index, which will provide the relief depth of the intraocular lens diffraction component, corresponding to the work in the vitreous body of the eye. The work is devoted to the selection of drying conditions and the method of measuring the photoresist refractive index.

**Keywords:** bifocal diffraction-refractive intraocular lenses, diffraction efficiency, light energy measurement by lens foci, photoresist, refractive index measurement

***Введение***

Мультифокальные интраокулярные линзы, широко применяемые офтальмологами, изготавливаются в различных формах, но основная концепция заключается в том, чтобы совместить в одном оптическом элементе две или три разные оптические силы, позволяющие формировать одновременно изображения как удаленных, так и близких предметов (рис. 1).

На рис. 1 показан принцип работы дифракционно-рефракционной бифокальной интраокулярной линзы. Два дифракционных порядка (0-й и +1-й) обычно используется для создания эффекта псевдоаккомодации зрения без перестройки фокуса путем формирования одновременно сфокусированных изображений для дали и близи с помощью одного имплантата. Недифрагированный свет в 0-м порядке дифракции формирует изображение для зрения вдаль, а +1-й порядок – для зрения вблизи [1, с. 2]. На рис. 1 показано только формирование изображения для зрения вдаль. При этом нулевой порядок сфокусирован на сетчатке, а +1-й порядок расфокусирован. Очевидно, что такой метод приводит к ухудшению контраста изображения, но позволяет пациенту обойтись без очковой коррекции.

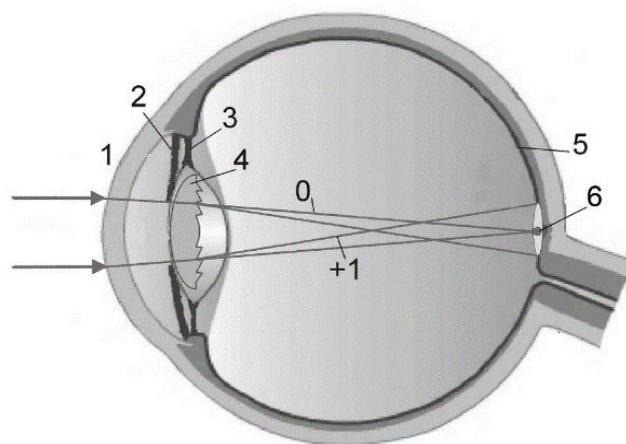


Рис. 1. Принцип работы БДРИОЛ:

1 – роговица, 2 – радужка, 3 – зоны, фиксированные к цилиарной мышце, 4 – БДРИОЛ в задней камере глаза, 5 – сетчатка, 6 – зрительный нерв, 0 – нулевой порядок дифракции, +1 – первый порядок дифракции

В России на предприятии РЕПЕР-НН разработана технология изготовления таких БДРИОЛ «МИОЛ-АККОРД» на основе фронтальной полимеризации жидкого фотополимера, помещенного между двумя прозрачными кварцевыми матрицами [1, с. 7]. Одна из них имеет выемку сферической формы, другая - плоскую поверхность с дифракционным оптическим элементом (ДОЭ), отвечающим за дополнительную оптическую силу. Диаметр сферического компонента равен 6 мм, дифракционного – около 5 мм. Согласно разработанному ранее дизайну БДРИОЛ «МИОЛ-АККОРД» [1, с. 2] глубина рельефа дифракционной матрицы изменяется от центра к периферии так, чтобы распределение энергии по фокусам слабо зависело от диаметра зрачка, несмотря на сглаживание границ дифракционных зон, применяемое для уменьшения вероятности формирования вторичной катаракты. Прямое измерение распределения энергии света по дифракционным порядкам, формируемым изготовленной кварцевой дифракционной матрицей, осложняется тем, что глубина дифракционного рельефа соответствует работе полимерной линзы в стекловидном теле глаза и поэтому существенно больше, чем требуется при работе в воздухе. Настоящая работа посвящена решению данной проблемы. За рубежом используется совершенно иная технология изготовления БДРИОЛ, основанная на алмазном точении замороженного полимера. Недостатком данной технологии является нарушение структуры полимера, приводящее часто к вторичной катаракте. С линзами, изготовленными по российской технологии, такая проблема не возникает, так как поверхность линзы после фотополимеризации практически не активна химически. Зарубежные производители БДРИОЛ не встречаются с необходимостью характеристики дифракционных матриц, так как они их не используют. Таким образом, решаемая нами проблема достаточно уникальна в силу уникальности российской технологии производства интраокулярных линз на предприятии «РЕПЕР-НН».

## **Тестирование дифракционной матрицы для изготовления БДРИОЛ**

Для измерения оптических параметров дифракционной матрицы, применяемой для изготовления БДРИОЛ, используется оптическая схема, показанная на рис. 2. Она состоит из твердотельного лазера 1 с диодной накачкой (длина волны 561 нм), системы из двух положительных линз 2, настраиваемой диафрагмы 3 для изменения диаметра освещаемого пучка, дифракционной матрицы с нанесенным слоем фоторезиста 5, видеокамеры 6 (камера ВС106N).

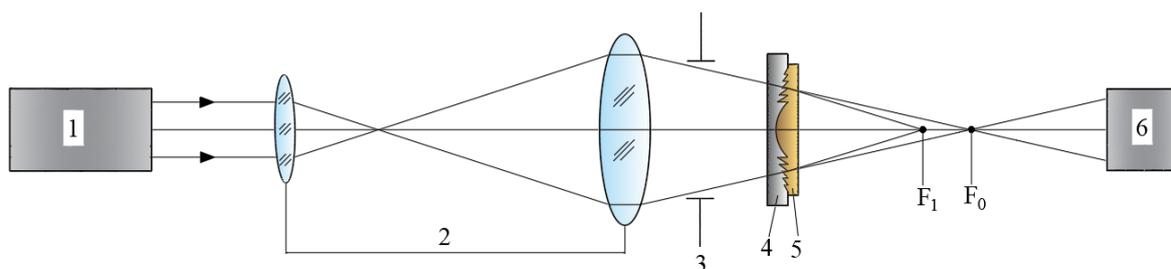


Рис. 2. Схема устройства для тестирования дифракционной матрицы

Система из двух положительных линз 2 расширяет и фокусирует лазерный пучок в 0-й порядок дифракции, отвечающий за дальнее зрение. Далее в систему вводится дифракционная матрица 4 с нанесенным слоем фоторезиста 5. Элемент 4 добавляет в +1-м порядке дифракции дополнительную оптическую силу для ближнего зрения, эквивалентную 4 дптр при очковой коррекции [2, с. 5]. Измерение фокусных расстояний производится с помощью видеокамеры 6, перемещаемой вдоль оптической оси для определения расстояния между фокусами. Изображение фокального пятна в каждом фокусе оценивается, когда БДРИОЛ помещается в сходящийся пучок.

Стоит отметить, что для более полной имитации условий работы дифракционной структуры БДРИОЛ в человеческом глазу необходимо полностью заполнить фоторезистом участок от дифракционной матрицы до фокуса. Но наша цель состоит в измерении распределения энергии света при фокусировке в 0-м и +1-м порядках дифракции, а не в определении качества изображения, формируемого системой, состоящей из обычной линзы и дифракционной матрицы. Поэтому различные типы искажений волнового фронта, возникающие из-за введения границы раздела в самом начале фокального отрезка, не столь существенны, по нашему мнению, для задачи измерения дифракционной эффективности. Некоторую ошибку могут вносить френелевские потери на отражение на двух границах раздела кварц–резист и резист–воздух, но они одинаковы для интересующих нас дифракционных порядков.

### **Параметры БДРИОЛ**

Для правильной работы интраокулярной линзы в человеческом глазу необходима глубина рельефа кварцевой дифракционной матрицы, при которой будет наблюдаться одинаковая дифракционная эффективность в 0-м и +1-м порядках

дифракции. Глубина рельефа определяется из условий работы имплантированной БДРИОЛ во внутриглазной жидкости и рассчитывается по формуле (1):

$$h = \frac{\lambda}{2 \cdot (n_2 - n_1)} = \frac{555 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot (1,505 - 1,336)} = 1642 \text{ нм}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – расчетная длина волны (середины спектрального диапазона глаза);  $n_2, n_1$  – показатели преломления материала БДРИОЛ и окружающей среды соответственно [3, с. 104].

Ожидаемая разность показателей преломления материала линзы и внутриглазной жидкости на длине волны 555 нм составляет 0,169.

Прямое измерение дифракционной эффективности по фокусам осложнено тем, что глубина дифракционного рельефа соответствует работе полимерной линзы во внутриглазной жидкости и существенно больше, чем требуется при работе в воздухе. Для приближения глубины рельефа в сухой схеме к стекловидному телу глаза предполагалось поместить БДРИОЛ в полость с определенным раствором. В качестве раствора рассматривались: этиленгликоль, пропанол, вода, спирт и глицерин. Коэффициенты преломления перечисленных жидкостей не смогли обеспечить необходимую разность показателей преломления. Поэтому было необходимо найти другой материал для заполнения рельефа матрицы.

Одно из основных требований к бифокальным интраокулярным линзам состоит в том, чтобы распределение дифракционной эффективности по порядкам дифракции было одинаково, как в 0-м, так и в +1-м порядке. При ошибке глубины на 10% соотношение в 0 и +1 порядках дифракции изменится примерно на 34%.

### ***Планаризация рельефа фоторезистом и измерение его коэффициента преломления***

Заполнение дифракционного рельефа матрицы материалом с показателем преломления выше, чем у плавленого кварца позволяет достичь необходимой разности коэффициентов преломления.

Исходя из вышеизложенного, рассчитанная глубина рельефа в 1642 нм даст необходимое распределение между фокусами при разнице показателей преломления 0,169 между фоторезистом и кварцевым компонентом.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость от длины волны падающего излучения глубины рельефа дифракционной матрицы, при которой обеспечиваются одинаковые дифракционные эффективности DE0 и DE1 при фокусировке в 0-м и +1-м порядках дифракции, при планаризации рельефа полностью высушенным фоторезистом серии MICROPOSIT S1800.

Для глубины рельефа 1642 нм необходимое условие DE0=DE1 будет соблюдаться на длине волны в 611,8 нм. На практике, измерение на данной длине

волны трудно реализовать в силу отсутствия подходящих лазеров. Кроме этого, данная длина волны далека от расчетной длины волны 555 нм. Поэтому было решено брать длину волны 561 нм. Для получения необходимого коэффициента преломления для этой длины волны встала задача подбора параметров термообработки фоторезиста. В качестве наносимого фоторезиста был выбран позитивный фоторезист ФП-3535, являющийся российским аналогом зарубежного S1828 из серии MICROPOSITS1800 G2.

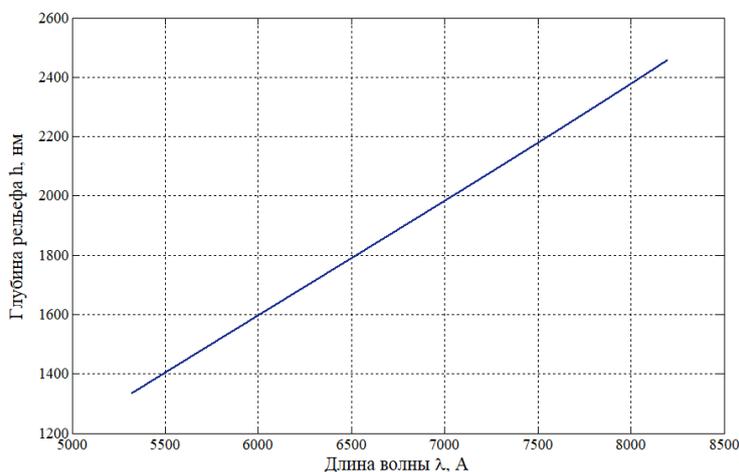


Рис. 3. Зависимость от длины волны излучения глубины рельефа, обеспечивающей условие  $DE_0 = DE_1$

Были произведены следующие эксперименты:

- Нанесение тонкого слоя жидкого фоторезиста на подложку. Измерения показателя преломления жидкого фоторезиста производились на рефрактометре ИРФ-454Б N850887. Среднее значение измерений показателей преломления жидкого фоторезиста составило 1,509. Данный коэффициент слишком мал и не обеспечит необходимую разницу показателей преломления.

- Нанесение фоторезиста и неполная его сушка. Было использовано 2 образца: толщина нанесенного слоя составила 4,5 мкм, время сушки в конвекционной печи 9 мин, температура сушки 85 °С. После сушки образцы были проэкспонированы ультрафиолетовым излучением для уменьшения поглощения света. Время экспонирования составило 6 мин для предельного обесцвечивания фоторезиста. Измерения показателя преломления выполнялись на установке PRISM COUPLER SYSTEM 2010/M METRICON для трех длин волн: 532 нм, 635,9 нм, 846,4 нм. Результаты измерений отображены на рис. 4 в виде графика зависимости показателя преломления недосушенного фоторезиста от длины волны.

Из графика было определено, что на длине волны 561 нм показатель преломления фоторезиста составляет 1,615. Для получения равной дифракционной эффективности для фокусов в 0-м и +1-м дифракционных порядках показатель преломления фоторезиста должен быть равен:

$$n_2 = \frac{\lambda}{2h} + n_1 = \frac{561 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 1642 \cdot 10^{-9}} + 1,4595 = 1,630, \quad (2)$$

где  $n_1$  – показатель преломления плавленого кварца при  $\lambda = 561$  нм.

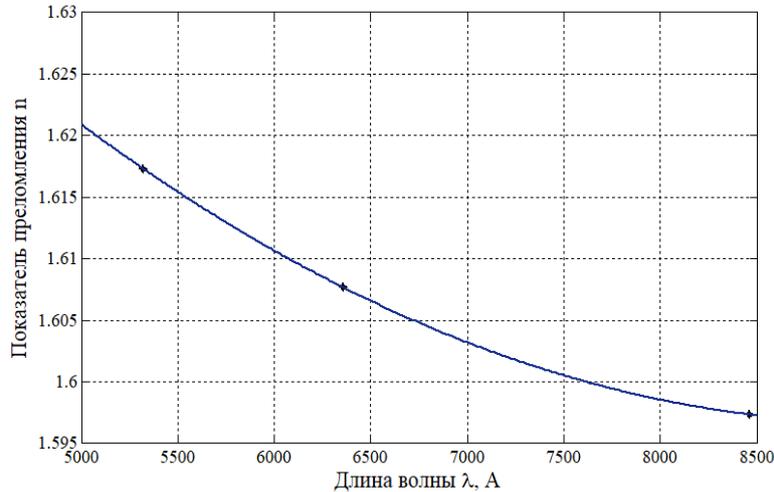


Рис. 4. Зависимость показателя преломления недосушенного фоторезиста ФП-3535 от длины волны падающего излучения

Зависимость показателя преломления фоторезиста от температуры сушки в печи представлена на рис. 5. Измерения показателя преломления проводились на длине волне 532 нм. Из рис. 5 видно, что необходимый показатель преломления может быть достигнут при температуре в области 93-94 °С. При этом более точная подгонка может быть осуществлена за счет управления временем сушки.

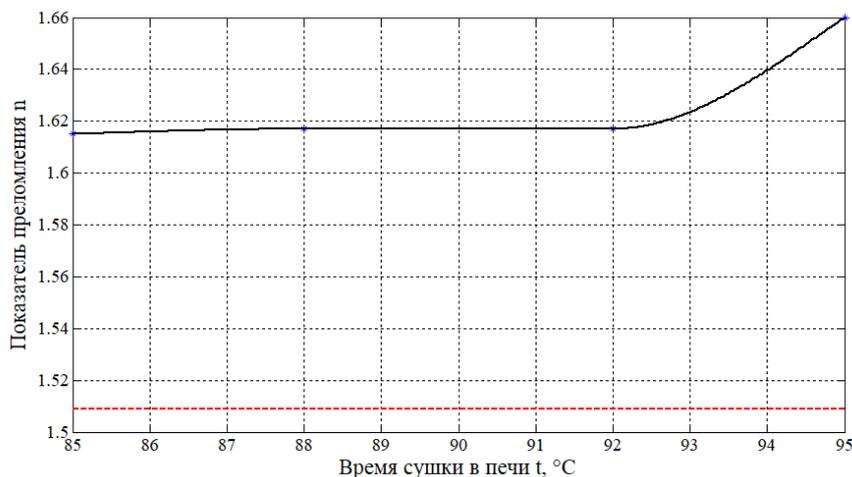


Рис. 5. Зависимость показателя преломления фоторезиста ФП-3535 от температуры сушки в печи. Пунктирной линией обозначен коэффициент преломления жидкого фоторезиста

После уточнения условий обработки фоторезиста предполагается провести эксперименты по измерению распределения энергии света по фокусам для реальных кварцевых матриц.

### *Заключение*

Предложено применение временной планаризации микрорельефа фоторезистом при характеристике распределения энергии по фокусам, формируемого дифракционной матрицей, используемой при производстве бифокальных дифракционно-рефракционных интраокулярных линз «МИОЛ-АККОРД». Такой подход позволяет получить условия фокусировки света дифракционной структурой, близкие к тем, в которых она работает после имплантации в глаз пациента. Исследовано влияние условий сушки фоторезиста на его коэффициент преломления. В литературе ранее публиковались только данные для полностью высушенного фоторезиста. Необходимая разность коэффициентов преломления плавленого кварца и фоторезиста вблизи расчетной длины волны достигается при температуре сушки в диапазоне 93-94 °С.

Данная работа выполнена за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания. В исследованиях использовано оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Koronkevich Voldemar P., Korolkov Victor P., Lenkova Galina A., Treushnikov Valerii M., Viktorova E. A., Iskakov Igor A., Gutman Arthur S. Phototechnologies for Fabrication of Bifocal Intraocular Lenses // Proceedings SPIE. – 2007. – Vol. 6734. – 67340Z. – С. 1–9.
2. Ленкова Г. А. Дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы / Г. А. Ленкова, В. П. Корольков, В. П. Коронкевич, Р. К. Насыров, М. М. Мызник, А. С. Гутман, И. А. Искаков, В. М. Треушников // Автометрия. – 1997. – № 6. – С. 30.
3. Ленкова Г. А. Хроматические аберрации дифракционно-рефракционных интраокулярных линз в модели глаза // Автометрия. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 103–104.

© В. П. Корольков, П. Е. Коношенко, С. Л. Микерин, 2021