

О методе измерения распределения энергии света по фокусам для матрицы дифракционного компонента бифокальной интраокулярной линзы

В. П. Корольков¹, П. Е. Коношенко², С. Л. Микерин¹, Р. К. Насыров, Р. И. Куц¹

¹ Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Бифокальных дифракционно-рефракционных интраокулярных линз (БДРИОЛ) производятся в России на предприятии РЕПЕР-НН на основе фронтальной полимеризации жидкого фотополимера, помещенного между двумя прозрачными кварцевыми матрицами (вогнутой сферической и плоской с дифракционным рельефом). В ИАиЭ СО РАН разработан метод измерения распределения энергии по фокусам дифракционного компонента БДРИОЛ на основе временной планаризации слоев фоторезиста рельефа кварцевой матрицы дифракционного компонента. Получение необходимого коэффициента преломления фоторезиста осуществляется за счет подбора условий его сушки. Схема измерения распределения света по фокусам дифракционного элемента с планаризованным рельефом позволяет имитировать условия работы БДРИОЛ во внутриглазной среде и проводить измерения на длине волны света близкой к расчетной.

Ключевые слова: бифокальные дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы, дифракционная эффективность, фоторезист, планаризация, измерение коэффициента преломления.

Цитирование: Корольков, В. П. О методе измерения распределения энергии света по фокусам для матрицы дифракционного компонента бифокальной интраокулярной линзы / В. П. Корольков, П. Е. Коношенко, С. Л. Микерин, Р. К. Насыров, Р. И. Куц // НОЛОЕХРО 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 201–206.

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. Чаще всего недифрагированный свет в 0-й порядке дифракции используется для формирования изображения удаленных объектов, а +1-й порядок — для зрения вблизи [1].

В России на предприятии РЕПЕР-НН разработана технология изготовления таких БДРИОЛ на основе фронтальной полимеризации жидкого фотополимера, помещенного между двумя прозрачными кварцевыми матрицами [2]. 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 [3–4]

глубина рельефа дифракционной матрицы изменяется от центра к периферии так чтобы распределение энергии по фокусам слабо зависело от диаметра зрачка несмотря на влияние сглаживания границ дифракционных зон. 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. В настоящей предлагается и обсуждается метод решения данной проблемы.

1. Конструкция БДРИОЛ «МИОЛ-АККОРД» и дифракционной матрицы

Для правильной работы интраокулярной линзы в человеческом глазу необходима глубина рельефа кварцевой дифракционной матрицы, при которой дифракционная эффективность в 0- и +1-порядках будет одинакова. Такая ситуация возникает при глубине рельефа многоуровневого рельефа, соответствующей максимальному скачку фазы π . При такой разности фаз распределение дифракционной эффективности по порядкам дифракции весьма чувствительно к ошибкам глубины рельефа. Например, при ошибке глубины на 10% соотношение в 0 и +1 порядках дифракции изменится примерно на 34%. Абсолютная глубина рельефа определяется из условий работы имплантированной БДРИОЛ во внутриглазной жидкости и может быть найдена по формуле

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

где λ — расчетная длина волны (середина спектрального диапазона глаза); n_2 и n_1 — показатели преломления материала БДРИОЛ и окружающей его внутриглазной жидкости [3]. 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. Достичь указанной выше разности коэффициентов преломления путем иммерсии дифракционной матрицы в жидкость с низким коэффициентом преломления не удастся в силу того, что требуется жидкость с коэффициентом преломления порядка 1,29. Поэтому предлагается покрыть дифракционный рельеф матрицы материалом с коэффициентом преломления n_p не меньше, а больше, чем у плавленого кварца на величину, обеспечивающую максимальный скачок фазы π на длине волны пробного светового пучка, используемого для измерения распределения энергии по фокусам. С учетом того, что коэффициент преломления плавленого кварца, из которого изготавливается дифракционная матрица, равняется 1,4597 на длине волны 555 нм, коэффициент преломления планаризирующего материала должен быть как можно ближе к величине 1,6287.

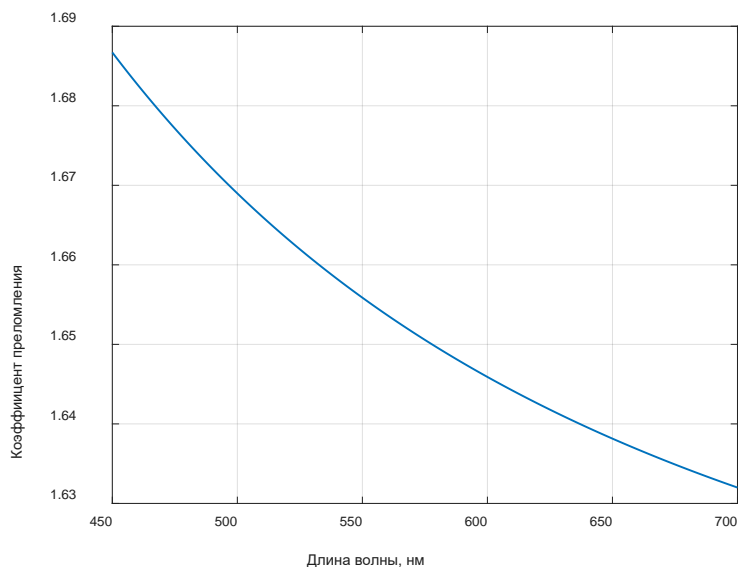


Рис. 1. Дисперсия коэффициента преломления высушенного фоторезиста S1828

2. Выбор материала для планаризации рельефа дифракционной матрицы

Кроме определенного коэффициента преломления материал для планаризации рельефа дифракционной матрицы должен обладать несколькими специфическими свойствами. Во-первых, должен удаляться с матрицы, полностью не оставляя ни каких химических следов после себя, чтобы избежать переноса загрязнений на интраокулярную линзу. Во-вторых, он должен наноситься достаточно толстым слоем, создавая на границе с воздухом плоскую поверхность с минимальными проявлениями рельефа матрицы. В-третьих, он должен быть достаточно стабильным, чтобы обеспечить неизменность свойств в процессе измерения распределения энергии света по фокусам дифракционной матрицы.

По нашему мнению, наиболее подходящим материалом, удовлетворяющим всем указанным требованиям, являются фоторезисты, разработанные для нанесения покрытий толщиной от 3 мкм и более.

Из отечественных фоторезистов наиболее подходящим является позитивный фоторезист ФП-3535, являющийся аналогом зарубежного S1828. Однако для российского фоторезиста в открытой печати отсутствуют данные о коэффициенте преломления для каких-либо длин волн. Поскольку производитель представляет ФП-3535 аналогом S1828, то в первом приближении их коэффициенты преломления должны быть близки. На рис. 1 показан график дисперсии коэффициента преломления фоторезиста S1828, высушенного по стандартной процедуре после нанесения на центрифуге. Как видно из графика, на длине волны 555 нм коэффициент преломления значительно выше определенного в параграфе 1 значения 1,6287.

Наша гипотеза состояла в том, что, понижая температуру или время сушки фоторезиста можно снизить коэффициент преломления фоторезиста до необходимого значения. Однако, предельное в данной ситуации значение коэффициента преломления жидкого фоторезиста

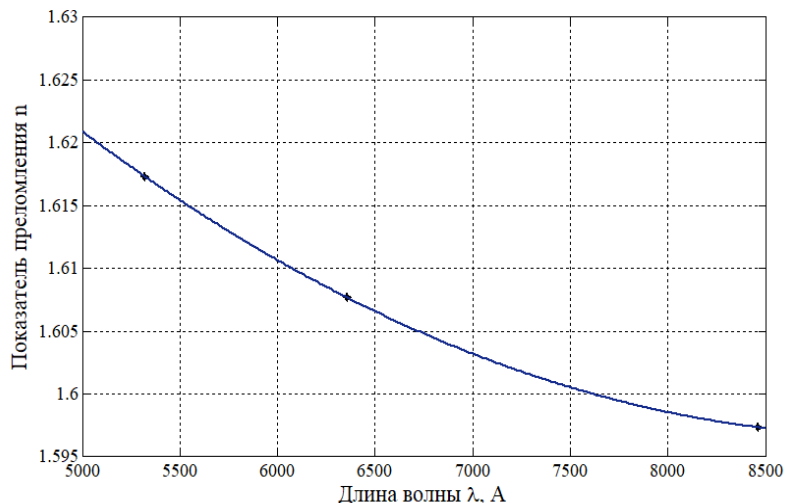


Рис. 2. Зависимость показателя преломления недосушенного фоторезиста ФП-3535 от длины волны падающего излучения

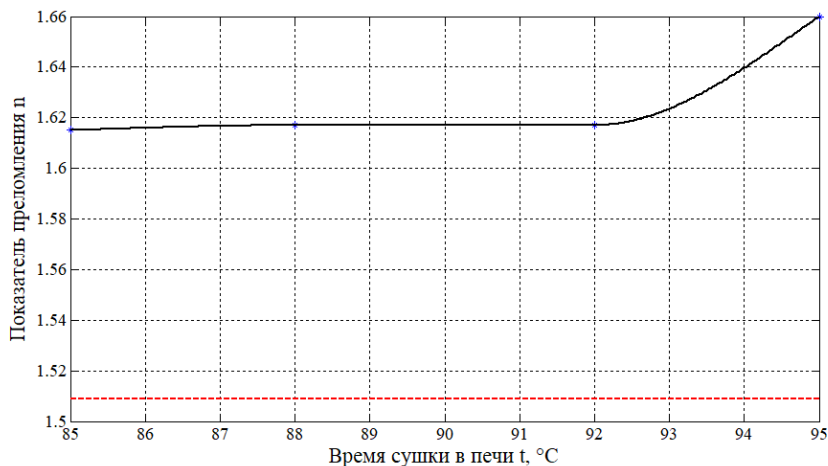


Рис. 3. Зависимость показателя преломления фоторезиста ФП-3535 от температуры сушки в печи. Красной линией обозначен коэффициент преломления жидкого фоторезиста

не было известно из литературы. Производители дают коэффициент преломления только для высушенных фоторезистов. С помощью рефрактометра ИРФ-454Б нами был измерен коэффициент преломления жидкого фоторезиста ФП-3535. Он оказался равен 1,509 на рабочей длине волны рефрактометра 584 нм. Это свидетельствует о достаточно большом диапазоне изменения коэффициента преломления фоторезиста от жидкого до твердого состояния.

Для определения зависимости коэффициента преломления от температуры сушки были подготовлены образцы пленок фоторезиста ФП-3535 толщиной 4,5 мкм. Исследовался диапазон температур 85–95 °C сушки в конвекционной печи с длительностью 9 минут. После сушки образцы подвергались экспонированию УФ излучением для уменьшения поглощения в фоторезисте. Измерения показателя преломления выполнялись на установке PRISM COUPLER

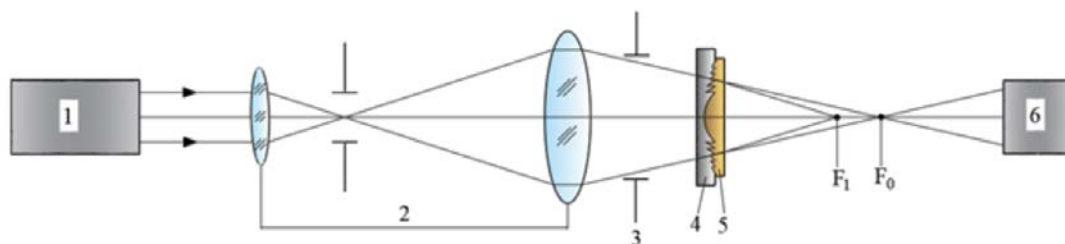


Рис. 4. Схема для интегральной характеристики дифракционных матриц, используемых для изготовления бифокальных дифракционно-рефракционных интраокулярных линз

SYSTEM 2010/M производства METRICON для трех длин волн: 532 нм, 635,9 нм, 846,4 нм. Результаты измерения для температуры 85 °С отображены на рис. 2 в виде графика зависимости показателя преломления недосушенного фоторезиста от длины волны.

Зависимость показателя преломления фоторезиста от температуры сушки в печи представлена на рис. 3. Измерения показателя преломления проводились на длине волны 532 нм. Из рис. 3 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.

3. Схема интегральной характеристики дифракционной матрицы БДРИОЛ

Для измерения интегральных оптических параметров изготовленных дифракционных матриц, планаризованных фоторезистом, может быть использована установка, оптическая схема которой показана на рис. 1. Данная схема, отличается от схемы, использованной ранее [2] для контроля характеристик готовых БДРИОЛ.

Она состоит из твердотельного лазера 1 (длина волны 532 или 561 нм, ближайšie к расчетной длине волны БДРИОЛ — 555 нм), оптической системы расширения и фокусировки лазерного пучка из двух положительных линз 2 с диафрагмой для пространственной фильтрации пучка в фокусе, ирисовой диафрагмы 3 для изменения диаметра освещающего пучка, дифракционной матрицы 4, планаризованной слоем 5 фоторезиста, цифровой видеокамеры 6, перемещаемой вдоль оптической оси системы для фиксации распределения интенсивности света в фокусах, соответствующих различным дифракционным порядкам.

Дифракционная матрица 4, обладая оптической силой 4 дптр [2], фокусирует свет в +1-й порядке дифракции в случае покрытия дифракционного рельефа фоторезистом с показателем преломления больше, чем у плавленого кварца. Фокусировка света в нулевой порядок соответствует фокусировке света монофокальной интраокулярной линзой с оптической силой 20 дптр. Количество света, сфокусированное в каждом фокусе, оценивается по сумме сигналов от пикселей видеокамеры, освещаемых фокальным пятном. Нормировка результата измерения может проводиться по плоской кварцевой пластине с толщиной как у дифракционной матрицы, покрытой таким же слоем фоторезиста с необходимым коэффициентом пре-

ломления n_p . При обработке результатов измерений необходимо учитывать вывод, сделанный в работе [5] о том, что перераспределение энергии света между дифракционными порядками интраокулярных линз связано не только с погрешностями формирования формы рельефа дифракционного компонента линзы, но и взаимным влиянием порядков дифракции.

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 55 достигается при температуре сушки в диапазоне 93–94 °С.

Благодарность

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

Список источников

- [1] **Ленкова, Г. А.** Особенности оптических поверхностей мультифокальных дифракционно-рефракционных хрусталиков глаза / Г. А. Ленкова // *Автометрия*. — 2017. — Том 53. — № 5. — С. 17–29.
- [2] **Koronkevich, V. P.** [Phototechnologies for Fabrication of Bifocal Intraocular Lenses](#) / V. P. Koronkevich, V. P. Korolkov, G. A. Lenkova, V. M. Treushnikov, E. A. Viktorova, I. A. Iskakov, A. S. Gutman // *International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007 : Laser Technologies for Medicine : Proceedings of SPIE*. — 2007. — Vol. 6734. — P. 67340Z.
- [3] **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. Исаков, В. М. Треушников // *Дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы / Автометрия*. — 2008. — Том 44. — № 4. — С. 75–88.
- [4] **Коронкевич, В. П.** Новое поколение бифокальных дифракционно-рефракционных интраокулярных линз / В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, В. П. Корольков, А. Г. Полещук, И. А. Исаков, А. С. Гутман // *Компьютерная оптика*. — 2008. — Том 32. — № 1. — С. 50–58.
- [5] **Ленкова, Г. А.** Исследование пространственно-энергетических характеристик фокальных областей бифокальных дифракционно-рефракционных хрусталиков глаза / Г. А. Ленкова // *Автометрия*. — 2017. — Том 53. — № 1. — С. 83–93.