

Формирование контролируемого пространственного распределения лазерного излучения для коррекции формы и рефракции роговицы глаза

О.И.Баум, А.И.Омельченко, Е.М.Касьяненко, Р.В.Скиданов, Н.Л.Казанский, Э.Н.Соболь, А.В.Большунов, С.Э.Аветисов, В.Я.Панченко

Представлены результаты расчета и разработки устройства по формированию лазерного излучения с кольцевым распределением интенсивности с гомогенизацией пространственных мод, а также апробации данного устройства на биологических фантомах и глазах в экспериментах ex-vivo в режимах лазерной абляционной коррекции профиля роговицы. Исследованы интенсивности излучения и распределения тепловых полей на поверхности фантома и выделенного глаза кролика, подтверждено отсутствие значительного нагрева в центральной зоне глаза. Показано, что данное устройство может быть использовано для лазерного воздействия с целью симметричного изменения рефракции глаза.

Ключевые слова: лазер, рефракция, кольцевое распределение интенсивности, роговица глаза, коррекция.

1. Введение

Известно, что заболевания глаз часто приводят к нарушению зрения [1]. Эти нарушения связаны с изменениями, происходящими в элементах оптомеханической системы глаза человека, таких как роговица, хрусталик и др. В ряде случаев эти изменения корректируют с помощью дополнительных оптических элементов (очки, контактные линзы и др.) [2] или проводят хирургические вмешательства по исправлению рефракции отдельных элементов [3], восстановлению, а также замене самих элементов, например хрусталика – интраокулярными линзами (ИОЛ) [4].

В последнее время определенных успехов в рефракционной медицине достигла отokerатология [5]. Однако применяемое в кератологии ночное ношение контактных линз лишь на короткое время восстанавливает нормальную рефракцию глаза. Локальное термомеханическое воздействие лазерного излучения на роговицу вне ее оптической зоны приводит к более стойкому изменению рефракции [6–8]. Необходимо также отметить, что за последние несколько лет были разработаны новые диагностические методы на основе оптической когерентной томографии, которые позволяют исследовать тонкие особенности термомеханического изменения формы роговицы глаза [9, 10] и медленные деформации, происходящие после окончания лазерного воздействия [11]. Симметричное относительно парацентральной зоны роговицы последователь-

ное облучение ряда точек на ее поверхности [12] может привести к асимметрии натяжения роговицы в оптической зоне. Это может служить причиной побочных явлений (астигматизм, кератоконус и др.) при абляционных методах лечения заболеваний [3]. Одномоментное облучение излучением с симметричным профилем интенсивности способно решить эту проблему.

Используемое в офтальмологических операциях излучение лазеров (эрбиевые твердотельные или волоконные лазеры с диодной накачкой) имеет недостаточно стабильное пространственное распределение интенсивности [13, 14]. Как показали предварительные исследования, это связано как с неравномерным распределением интенсивности в различных пространственных модах, так и с неустойчивостью системы передачи лазерного пучка, что затрудняет клинические испытания и дальнейшее практическое применение нового метода коррекции рефракции глаза в офтальмологии.

Для формирования лазерного пучка с кольцевым распределением интенсивности использовались различные оптические элементы и схемы: отражающие цилиндрические зеркала, линзовая оптика, поверхности свободной формы, аксиконы и дифракционные оптические элементы (ДОЭ), синтезированные на основе компьютерных расчетов [15]. Среди них наиболее эффективными, с точки зрения коэффициента преобразования энергии лазерного излучения и качества распределения энергии по кольцу, оказались устройства на основе так называемых фокусаторов [15–17], и совершенствование такого рода элементов продолжается [18, 19]. Так, в работе [19] рассматривается формирование заданной освещенности на криволинейной поверхности с помощью преломляющего элемента свободной формы. Однако всем перечисленным работам присущи свои недостатки. Обычно считается, что на оптический элемент, формирующий заданное распределение интенсивности, падает плоская волна, гауссов пучок или пучок более сложной формы [19], но с известным распределением интенсивности. В оптических экспериментах исходный пучок специальным образом преобразуется, причем, как правило, с большой потерей мощности. В том случае, когда форма этого пучка далека

О.И.Баум, А.И.Омельченко, Е.М.Касьяненко, В.Я.Панченко. Институт фотонных технологий Федерального научного центра «Кристаллография и фотоника» РАН, Россия, Москва, 142190 Троицк, ул. Пионерская, 2; e-mail: baumolga@gmail.com

Р.В.Скиданов, Н.Л.Казанский. Институт систем обработки изображений Федерального научного центра «Кристаллография и фотоника» РАН, Россия, 443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151
Е.Н.Соболь. Arcuo Medical, Inc., Los Altos, 94022 California, USA
А.В.Большунов, С.Э.Аветисов. Научно-исследовательский институт глазных болезней, Россия, 119021 Москва, ул. Россолимо, 11А

Поступила в редакцию 4 декабря 2019 г.

от идеальной или вовсе неизвестна, формируемое распределение может сильно отличаться от расчетного.

В настоящей работе представлена модификация метода расчета на основе алгоритма Гершберга–Сакстона (ГС), которая позволяет сформировать световое кольцо с высокой равномерностью распределения интенсивности за счет разбиения области дифракционного оптического элемента на сегменты и отдельного расчета фазовой функции элемента для каждого сегмента. Представлены результаты разработки устройства формирования лазерного излучения с кольцевым распределением интенсивности с гомогенизацией пространственных мод. Конечная цель работы – осуществление лазерного воздействия и исследование интенсивностей излучения и тепловых полей на поверхности глаза в экспериментах ex-vivo в режимах лазерной неабляционной коррекции профиля роговицы с применением разработанного устройства для дальнейшего возможного использования этого метода в лазерных операциях по изменению рефракции роговицы.

2. Материалы и методы

В работе использовались: твердотельный лазер с диодной накачкой ЛАХТА-МИЛОН (С.-Петербург, Россия), излучающий на $\lambda = 1.56$ мкм; флуоресцентные инфракрасные детекторы FID-AS-22 (ООО-Полироник, Москва, Россия) для преобразования энергии ИК излучения в видимое – визуализации ИК излучения; измеритель профиля распределения мощности лазерного пучка на основе CCD-камеры с VGA-разрешением 640×480 , подключенной к компьютеру с программным обеспечением, предназначенным для обработки изображений; волоконные световоды с диаметром 600 мкм (Avantes, USA); рефракционные преобразователи распределения интенсивности лазерных пучков (ВОЛО, С.-Петербург, Россия) и аналогичные дифракционные преобразователи (ИСОИ РАН, Самара, Россия).

Для уменьшения влияния рассеяния света в флуоресцентных преобразователях при измерениях распределения излучения в проходящем свете были изготовлены тонкие флуоресцентные пленки. Излучение направлялось на пленку, а затем после зеленого светофильтра ЗС-1 на CCD-камеру. Измерение мощности лазерного излучения осуществлялось с помощью измерителя мощности Fieldmaster (Coherent, Inc., USA).

Фототермический эффект воздействия лазерного излучения на модели роговицы глаза (гелевые шары) оценивался с помощью тепловизора Testo 875-1 (TESTOSE & CO, KGA, Lenzkirch, Germany). Лазерное излучение со специальной формой распределения интенсивности после кольцевого преобразователя направлялось на поверхность шара диаметром 10 мм. Тепловое излучение нагреваемой поверхности шара фокусировалось с помощью ИК объектива на чувствительную поверхность регистрирующего тепловизора.

3. Формирование лазерного пучка с кольцевым распределением интенсивности

Формирование лазерного пучка с кольцевым распределением интенсивности из пучка с прямоугольным распределением интенсивности и неравномерным заполнением мод основано на синтезе ДОЭ, преобразующего неоднородное излучение на выходе лазера в однородное.

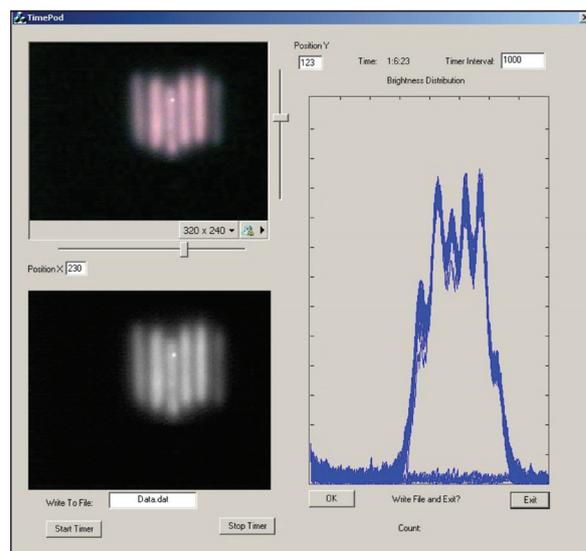


Рис.1. Распределение интенсивности в лазерном пучке на выходе твердотельного лазера с диодной накачкой: пространственное распределение мод (слева), профиль распределения интенсивности (справа).

На рис.1 показано исходное распределение интенсивности лазерного излучения, состоящее из шести поперечных мод, измеренное на расстоянии 100 мм от выходного оптического разьема лазера.

Расчет ДОЭ, формирующего заданное кольцевое распределение на заданном расстоянии от плоскости ДОЭ, сводится к поиску фазовой функции пропускания элемента, формирующего заданное кольцевое распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы без учета получающегося в выходной плоскости фазового распределения. Для решения этой задачи могут быть использованы различные итеративные методы [20–24], например метод Гершберга–Сакстона. Главное их преимущество – это то, что итерационные алгоритмы являются более точными по сравнению с другими алгоритмами расчета фазы ДОЭ. С другой стороны, следует принять во внимание, что в большинстве случаев полученные при использовании таких методов элементы имеют нерегулярный микрорельеф, что повышает требования к технологии их производства [20, 21].

3.1. Алгоритм Гершберга–Сакстона

Алгоритм ГС – это алгоритм решения нелинейного интегрального уравнения Френеля, предназначенного для расчета оптических элементов, формирующих произвольное заданное распределение интенсивности когерентного монохроматического света в некоторой плоскости, перпендикулярной оптической оси [18]. Новая оценка искомой функции на каждом этапе итерации выбирается не только в соответствии с требуемой функцией интенсивности, но и в зависимости от предыдущей оценки. Скорость сходимости алгоритма зависит от выбора конкретных значений некоторых весовых или регуляризационных параметров. Далее будем рассматривать обычный алгоритм ГС без введения каких-либо весовых параметров.

В скалярной теории дифракции комплексная амплитуда волны в плоскости (u, v) оптического элемента

$$W(u, v) = A(u, v)\exp[i\phi(u, v)] \quad (1)$$

связана с комплексной амплитудой волны в плоскости (ξ, η) изображения

$$F(\xi, \eta) = B(\xi, \eta) \exp[i\psi(\xi, \eta)]. \quad (2)$$

В плоскости формирования требуемого распределения интенсивности имеем

$$F(\xi, \eta) = \frac{ik}{2\pi z} e^{ikz} \int_{-\infty}^{\infty} \int W(u, v) H(u - \xi, v - \eta, z) du dv, \quad (3)$$

где

$$H(u - \xi, v - \eta, z) = \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(u - \xi)^2 + (v - \eta)^2]\right\} \quad (4)$$

– функция импульсного отклика свободного пространства в приближении Френеля; z – расстояние между ДОЭ и плоскостью наблюдения; k – волновое число. В случае приближения Фраунгофера функция импульсного отклика свободного пространства принимает вид

$$H(u - \xi, v - \eta, z) = \exp[ik(u\xi + v\eta)]. \quad (5)$$

В уравнении (3) комплексная амплитуда W в приближении тонкого оптического элемента (приближение транспаранта), которое не учитывает рефракцию лучей, равна произведению комплексной амплитуды $W_0(u, v)$ на собственную функцию пропускания $T(u, v)$ ДОЭ:

$$W(u, v) = W_0(u, v) T(u, v). \quad (6)$$

В используемом приближении рассматриваются только фазовые оптические элементы, поэтому функция пропускания ДОЭ выбрана в виде

$$T(u, v) = \exp[ig(u, v)], \quad (7)$$

где $g(u, v)$ – заданная фаза ДОЭ.

Расчет фазовой функции $g(u, v)$ можно свести к решению нелинейного интегрального уравнения

$$I_0(\xi, \eta) = |F(\xi, \eta)|^2 = \left| \frac{k}{2\pi z} \int_{-\infty}^{\infty} \int A_0(u, v) e^{i\phi(u, v)} H(u - \xi, v - \eta, z) du dv \right|^2, \quad (8)$$

где $I_0(\xi, \eta)$ – заданная интенсивность в области изображения. Схема формирования изображения при помощи ДОЭ приведена на рис.2.

Итерационный метод расчета фазы $\phi(u, v)$, а соответственно, и фазы $g(u, v)$, состоит в решении уравнения (8) методом последовательных приближений. Алгоритм ГС, или алгоритм уменьшения ошибки, содержит следующие шаги:

- 1) произвольно выбирается начальная оценка фазы $\phi_0(u, v)$;
- 2) по формуле (3) осуществляется интегральное преобразование функции $W_0 = A_0(u, v) \exp[i\phi(u, v)]$;
- 3) полученная комплексная амплитуда $F(\xi, \eta)$ в плоскости формирования изображения заменяется на комплексную амплитуду $\bar{F}(\xi, \eta)$ по правилу

$$\bar{F}(\xi, \eta) = B_0(\xi, \eta) F(\xi, \eta) |F(\xi, \eta)|^{-1}, \quad (9)$$

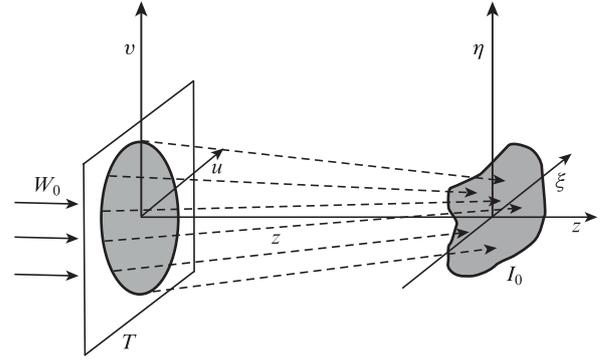


Рис.2. Схема формирования изображения при помощи ДОЭ.

где $B_0(\xi, \eta) = \sqrt{I_0(\xi, \eta)}$;

4) вычисляется преобразование, обратное (3), относительно функции $\bar{F}(\xi, \eta)$,

$$W(u, v) = \frac{ik}{2\pi z} e^{-ikz} \int_{-\infty}^{\infty} \int \bar{F}(\xi, \eta) H^* \times (\xi - u, \eta - v, z) d\xi d\eta; \quad (10)$$

5) полученная комплексная амплитуда $W(u, v)$ в плоскости ДОЭ заменяется на $\bar{W}(u, v)$ по правилу

$$\bar{W}(u, v) = \begin{cases} A_0(u, v) W(u, v) |W(u, v)|^{-1}, & (u, v) \in Q, \\ 0, & (u, v) \notin Q, \end{cases} \quad (11)$$

где Q – форма апертуры ДОЭ;

6) переход к шагу 2.

Эта процедура выполняется до тех пор, пока ошибки δ_F и δ_W , определяемые как

$$\delta_F^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int [|F(\xi, \eta)| - B_0(\xi, \eta)]^2 d\xi d\eta}{\int_{-\infty}^{\infty} \int B_0^2(\xi, \eta) d\xi d\eta}, \quad (12)$$

$$\delta_W^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int [|W(u, v)| - A_0(u, v)]^2 du dv}{\int_{-\infty}^{\infty} \int A_0^2(u, v) du dv}, \quad (13)$$

не станут маломеняющимися величинами. Процесс сходимости алгоритма ГС характеризуется эффектом стагнации: в ходе нескольких начальных итераций ошибка δ_F (или δ_W) быстро уменьшается, а все последующие итерации не приводят к ее заметному уменьшению.

В настоящей работе модификация алгоритма ГС, касается области расчета фазовой функции элемента. Описанный выше алгоритм последовательно применялся к шести сегментам (рис.3).

Каждый сегмент на рис.3 рассчитывался как полностью самостоятельный элемент, фокусирующий пучок в кольцо. При расчете распределение интенсивности в исходном пучке считалось гауссовым. В результате совокупной работы шести отдельных фокусирующих элементов, даже при существенно несимметричной форме исходного пучка и ошибке при центрировании элемента в выходной плоскости, можно добиться хорошей равномерности освещенности светового кольца.

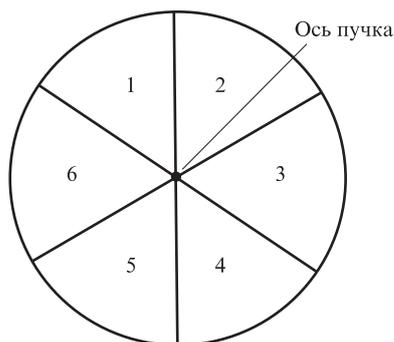


Рис.3. Сегментация ДОЭ для формирования кольцевого распределения.

3.2. Расчет выходных параметров ДОЭ

Модель ДОЭ представляет собой картинку с изображением рельефа, который наносится на стекло (или другой подобный материал). Обычно при расчетах изображения фазовых функций пропускания получаются в виде черно-белых рисунков с 255 градациями серого. В этом случае белым цветом изображаются участки с наибольшей высотой фазового рельефа, а черным – участки с нулевой высотой рельефа. При переходе от белого к черному цвету рельеф углубляется на величину $\lambda/(n-1)$, где λ – длина волны лазерного излучения, а n – показатель преломления материала, из которого сделан ДОЭ. Поэтому после прохождения излучения через ДОЭ его фаза изменяется от белых к черным участкам на 2π . На рис.4 представлены фаза ДОЭ, рассчитанная по алгоритму ГС в случае формирования распределения интенсивности в виде светового кольца в приближении Фраунгофера, и сформированное распределение интенсивности.

На рис.5 показан преобразователь распределения интенсивности излучения, использующий оптический элемент, который был рассчитан по приведенному выше ал-

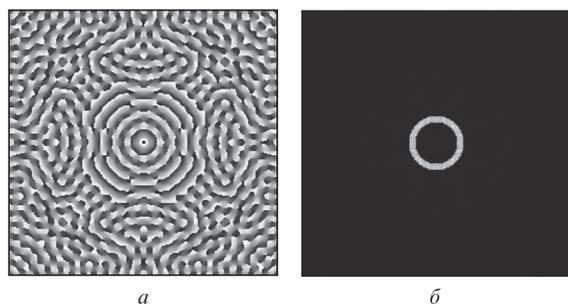


Рис.4. Расчет ДОЭ по алгоритму ГС: фаза ДОЭ (а) и сформированное изображение кольца (б).

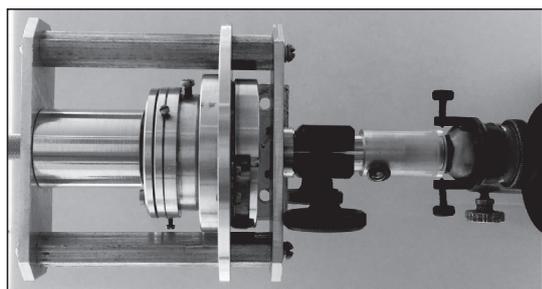


Рис.5. Кольцевой преобразователь распределения интенсивности лазерного излучения.

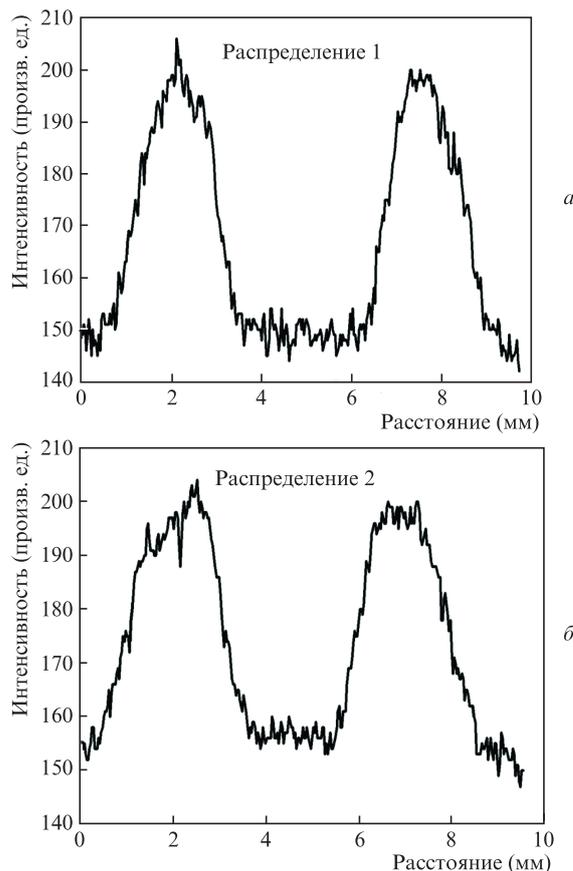


Рис.6. Сечения распределений интенсивности лазерного излучения в форме колец диаметром 8.1 (а) и 8.5 мм (б), полученные с помощью флуоресцентного преобразователя FID-AS-22.

горитму. Преобразователь изменяет распределение интенсивности лазерного излучения, представленное на рис.1, в кольцевое распределение (рис.6). Отметим, что неоднородное в пространстве лазерное излучение имело прямоугольное распределение интенсивности для каждой из шести пространственных мод, было нестабильно во времени и зависело от уровня излучаемой мощности.

Кольцевой преобразователь (см. рис.5) крепится на световоде, который присоединен к лазеру ЛАХТА-МИЛОН. Излучение после преобразователя имело распределение в форме кольца. Два распределения интенсивности лазерного излучения, показанные на рис.6,а и б, получены с помощью флуоресцентного преобразователя FID-AS-22 в непрерывном режиме работы лазера с мощностью излучения на выходе 7.4 и 7.0 Вт соответственно; при этом на выходе преобразователя интегральная мощность излучения в кольце составляла 1.3 и 1.2 Вт соответственно. Неравномерность распределения интенсивности по азимуту не превышала 5%, нестабильность выходной мощности в кольце – 2.5% от мощности на выходе лазера.

4. Экспериментальное исследование температурных полей на однородных объектах

Излучение после преобразователя имело распределение интенсивности в виде кольца, толщиной и диаметром которого можно было управлять. Были найдены и жестко зафиксированы два положения преобразователя, даю-

щие кольца с двумя разными диаметрами и толщинами (см. рис.6), с сохранением при этом одинакового уровня средней интенсивности во всем кольце.

В результате облучения поверхности гидрогелевого фантома, имеющего шарообразную форму с радиусом кривизны, соответствующей кривизне внешней поверхности роговицы человеческого глаза в центральной оптической зоне, лазерным пучком кольцевой формы, направленным по нормали к поверхности в верхней точке шара (рис.7), поверхность нагревалась неоднородно, но осесимметрично. Облучение проводилось в импульсно-периодическом режиме: 5 импульсов облучения с длительностью импульса 500 мс и интервалом между импульсами 300 мс. На гелевой поверхности образовывалось тепловое поле кольцеобразной формы с максимумом температуры, отличающимся в конце облучения на 8 °С от температуры окружающей среды. Тепловое поле, симметричное относительно центра, имело в центре провал, равный 5 °С. Ввиду того, что тепловизионная съемка осуществлялась под углом 60°, распределение температуры на рис.7 несимметрично относительно оси облучения.

Следует отметить, что для симметричного однородного нагрева сферических образцов, необходимого для симметричного изменения рефракции глаза, лазерное излучение направлялось вдоль оси сферы, а измерение температуры с помощью тепловизора осуществлялось под некоторым углом к этой оси. В результате зарегистрированное распределение температуры по радиусу в пятне лазерного облучения на поверхности шара было несимметрично из-за несовпадения осей регистрации и пучка излучения (рис.8).

Картинки теплового поля на поверхности выделенного глаза кролика при облучении лазерным пучком кольцевой формы с широким и узким распределениями интенсивности в непрерывном режиме в течение 5 с представлены на рис.9, а соответствующие распределения температур – на рис.10.

Видно, что для более широкого кольца провал температуры в центре больше и его максимум расположен дальше от оси распространения лазерного излучения. Из термограмм следует, что в течение 5 импульсов распределение температуры сохраняет форму кольца с провалом в 5–7 °С в центре и при остывании тенденция

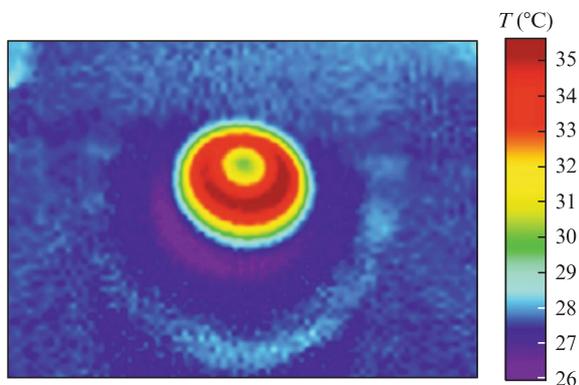


Рис.7. Распределение температуры на поверхности гелевого фантома после воздействия лазерного излучения с кольцевым распределением интенсивности (диаметр кольца 8.5 мм) при средней мощности 7.4 Вт в импульсно-периодическом режиме (5 импульсов, длительность импульса 500 мс, интервал 300 мс). Цветные варианты рис.7–12 помещены на сайте нашего журнала <https://www.quantum-electron.ru>.

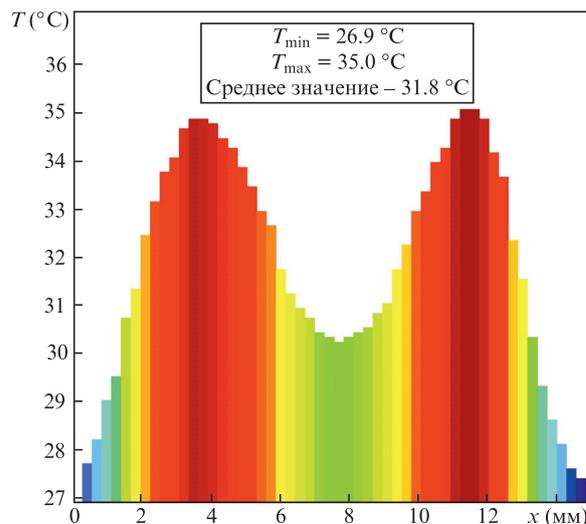


Рис.8. Распределение температуры по радиусу в пятне лазерного облучения на поверхности гелевого шара.

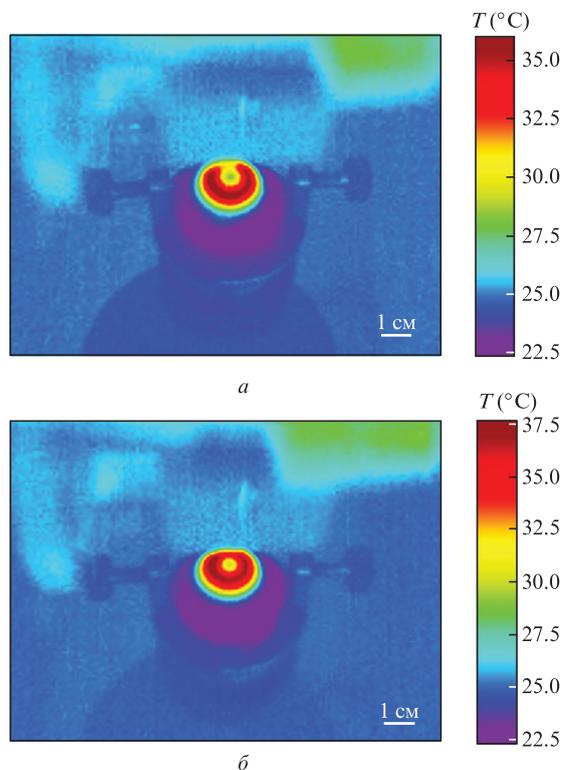


Рис.9. Картинки теплового поля на поверхности выделенного глаза кролика при облучении лазерным пучком кольцевой формы в непрерывном режиме в течение 5 с: облучение пучком с широким (диаметр кольца 8.5 мм) (а) и узким (8.1 мм) распределением интенсивности (б).

распространения тепла с сохранением провала в центре остается (рис.11).

Представленное на рис.10 распределение теплового поля, образующееся на сферической поверхности образцов при поглощении лазерного излучения, представляет собой истинное распределение температуры только в окрестности элемента поверхности, обращенной по нормали к детектору тепловизора. Ввиду кривизны поверхности образцов это поле воспринимается тепловизором в искаженной форме. С одной стороны, при широкоапертурной съемке объекта возникают искажения изображения

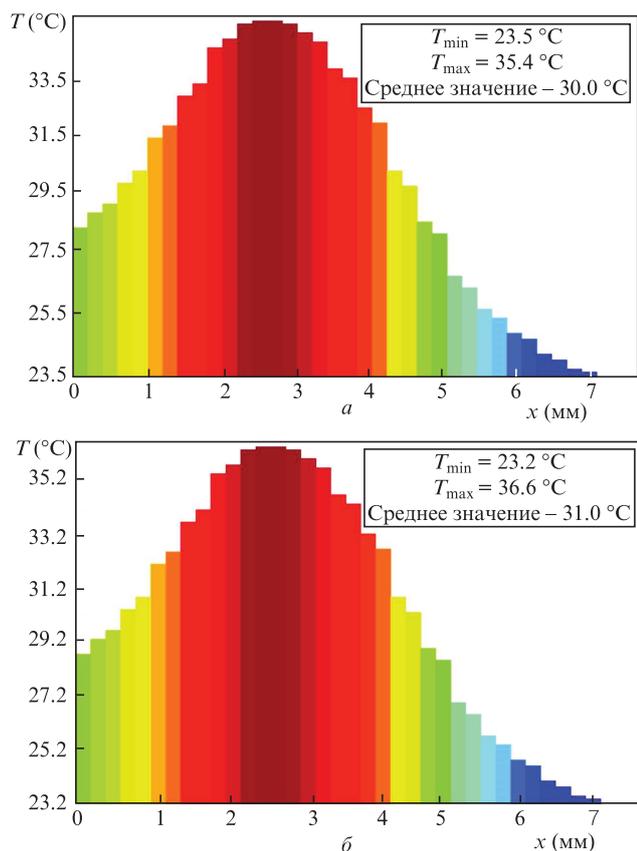


Рис.10. Радиальные распределения температуры на поверхности выделенного глаза кролика в пятне облучения пучком кольцевой формы в непрерывном режиме в течение 5 с: облучение с распределением интенсивности в кольце диаметром 8.5 (а) и 8.1 мм (б).

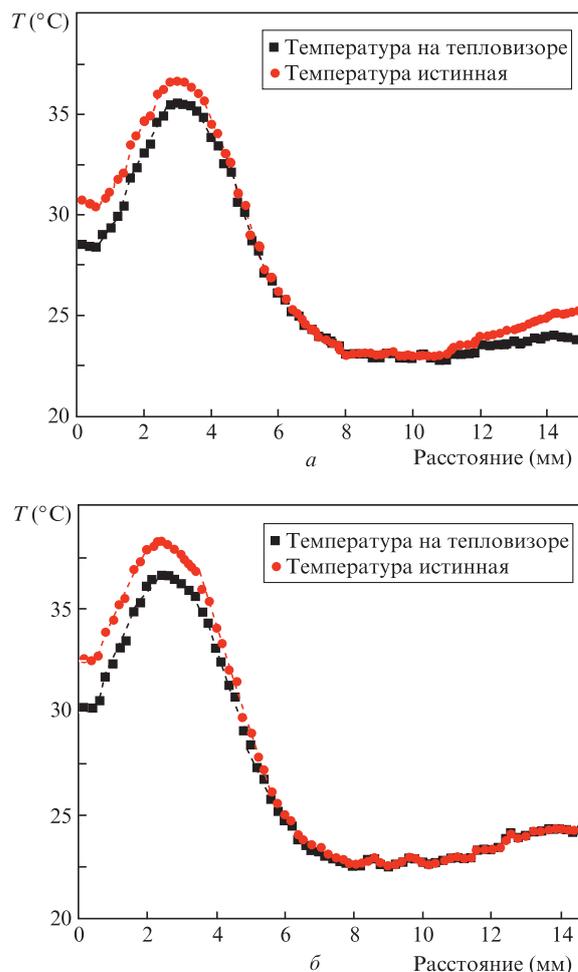


Рис.12. Распределения измеренной (черная кривая) и рассчитанной истинной (красная кривая) температуры по радиусу на поверхности выделенного глаза кролика в пятне лазерного облучения с распределениями интенсивности в кольце диаметром 8.5 (а) и 8.1 мм (б).

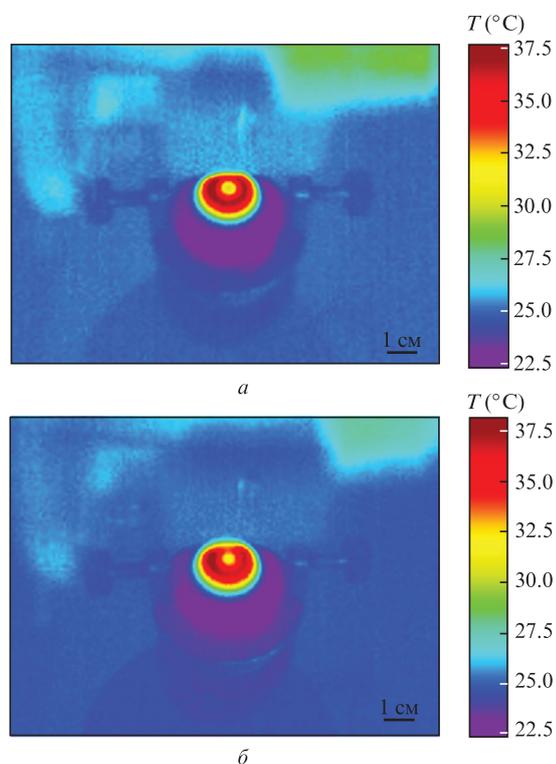


Рис.11. Картина теплового поля на поверхности выделенного глаза кролика в момент окончания облучения лазерным пучком с кольцевым распределением интенсивности диаметром 8.5 мм (а) и спустя 2 с после выключения лазера (б).

ния (дисторсия), с другой стороны, наблюдается уменьшение ИК сигнала, излучаемого поверхностью при больших углах ее наклона к направлению съемки. Учет угла наклона поверхности к направлению оси оптической системы позволил измерить радиальное распределение температуры от центра кольца для линии на поверхности, лежащей в плоскости съемки. Распределения измеренной и рассчитанной истинной температур нагрева экспериментальных образцов для обоих распределений интенсивности облучения приведены на рис.12.

Для подтверждения симметричности нагрева сферических поверхностей использовалась многокадровая съемка с помощью вращающейся камеры. В результате была подтверждена симметричность теплового поля, возникающего при облучении пучком с кольцевым распределением интенсивности, относительно оси облучения.

5. Заключение

В работе представлен алгоритм и выполнен расчет для разработки устройства формирования лазерного излучения с кольцевым распределением интенсивности с гомогенизацией пространственных мод. Для разработанного на базе данного алгоритма устройства исследованы интенсивности излучения и тепловые поля на поверхности глаза в экспериментах ex-vivo в режимах лазерной не-

абляционной коррекции профиля роговицы. Показано, что данное устройство может быть использовано для лазерного воздействия с целью симметричного изменения рефракции глаза относительно его оптической оси.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в соответствии с Государственным заданием ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

1. Морозов В.И., Яковлев А.А. *Фармакотерапия глазных болезней* (М.: Медицина, 2001).
2. Егорова Т.С., Розенблум Ю.З. *Рефракционная хирургия и офтальмология*, **2** (3), 12 (2002).
3. Куренков В.В. *Руководство по эксимерлазерной хирургии роговицы* (М.: Изд-во РАМН, 2002).
4. Большунов А.В., Гамидов А.А. *Лазерная микрохирургия зрочковых мембран* (М.: Памятники исторической мысли, 2008).
5. Соболев Э.Н., Большунов А.В., Баум О.И., Захаркина О.Л., Омельченко А.И., Сиплиев В.И., Федоров А.А. В кн. *Лазерные технологии в офтальмологии*. Под ред. С.Э.Аветисова (М.: Апрель, 2013, гл.7).
6. Baum O.I., Bol'shunov A.V., Sipliviy V.I., Ignat'eva N.Y., Zakharkina O.L., Lunin V.V., Myakov A.V. *Laser Phys.*, **16**, 5 (2006).
7. Bolshunov A., Sobol E., Avetisov S., Baum O., Siplivy V., Omelchenko A., Fedorov A. <https://doi.org/10.1111/j.1755-3768.2011.2172.x>.
8. Баум О.И. Южаков А.В., Большунов А.В., Сиплиев В.И., Хомчик О.В., Желтов Г.И., Соболев Э.Н. *Квантовая электроника*, **47** (9), 860 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (9), 860 (2017)].
9. Zaitsev V.Y., Matveyev A.L., Matveev L.A., Gelikonov G.V., Omelchenko A.I., Baum O.I., Sobol E.N. *J. Biophotonics*, **10** (11), 1450 (2017); DOI:10.1002/jbio.201600291.
10. Zaitsev V.Y., Matveyev A.L., Matveev, L.A., et al. <https://doi.org/10.1002/jbio.201800250>.
11. Zaitsev V.Y., Matveev L.A., Matveyev A.L., Sovetsky A.A., Shabanov D.V., Ksenofontov S.Y., Sobol E.N. *Laser Phys. Lett.*, **16** (6), 065601 (2019).
12. Баум О.И., Большунов А.В., Омельченко А.И., Полева Р.П., Сиплиев В.И., Соболев Э.Н. *Альманах клинической медицины*, (М., 2008, том XVII, ч. 1, с. 32–34).
13. Klopfer M., Block M.K., Deffenbaugh J., et al. *Proc. SPIE*, **10090**, 100901N (2017).
14. Nemeč M., Indra L., Šulc J., Jelínková H. *Proc. SPIE*, **9726**, 97261B (2016).
15. Golub M.A., Kazanskii N.L., Sisakyan I.N., Soifer V.A., Kharitonov S.I. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, **6**, 7 (1987).
16. Doskolovich L.L., Kazansky N.L., Kharitonov S.I., Soifer V.A. *J. Mod. Opt.*, **43** (7), 1423 (1996).
17. Doskolovich L.L., Kazanskij N.L., Pavel'ev V.S., Sojfer V.A. *Avtometriya*, **1**, 114 (1995).
18. Kang G.-G., Xie J.-H., Mo X.-L., Wang D.-F., Zhang H. Guangzi Xuebao. *Acta Photonica Sinica*, **37** (7), 1416 (2008).
19. Bykov D.A., Doskolovich L.L., Mingazov A.A., Bezus E.A., Kazanskiy N.L. *Opt. Express*, **26**, 27812 (2018).
20. Gerchberg R.W., Saxton W.O. *Optik*, **35** (2), 237 (1972).
21. Fienup J.R. *Appl. Opt.*, **21** (15), 2758 (1982).
22. Kazanskiy N.L., Kotlyar V.V., Soifer V.A. *Opt. Eng.*, **33** (10), 3156 (1994).
23. Kharitonov S.I., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. *Computer Opt.*, **40** (4), 439 (2016).
24. Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Kozlova I.N., Moiseev M.A. *Computer Opt.*, **42** (4), 574 (2018).