

УДК 621.315.592 : 772.99

В. П. Бессмельцев, С. Г. Баев, И. Г. Пальчикова

(Новосибирск)

РАСТРОВЫЕ ДИФРАКЦИОННО-АПЕРТУРНЫЕ ОЧКИ

Сообщается о разработке растровых дифракционно-апертурных очков. Приводятся зависимости диаметра отверстий в маске таких очков от степени аметропии глаза, а также расстояния между отверстиями от диаметра зрачка. Рассматриваются возможности и преимущества применения лазерных технологий для изготовления растровых дифракционно-апертурных очков. Обсуждаются результаты экспериментов с моделью глаза.

Введение. Одной из актуальных задач исследования и разработки дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является изучение возможности их применения для целей коррекции недостатков зрения человека. Мы предлагаем использовать для этого амплитудные ДОЭ в виде одиночных отверстий или их растров в непрозрачных масках.

Известны солнцезащитные апертурные очки, в которых перед глазом помещается непрозрачная маска с набором щелей, круглых или квадратных отверстий [1, 2]. Они предназначены для ослабления светового потока и облегчения состояния больных катарактой.

Цель настоящей работы — расчет и изучение дифракционных растровых очков для коррекции недостатков зрения и разработка лазерной технологии их изготовления.

1. Постановка задачи. Рефракционные линзы осуществляют коррекцию недостатков зрения путем сопряжения дальней точки ясного видения глаза с бесконечностью. В растровых очках линза заменена маской с отверстиями. Вопрос о создании изображения простым отверстием изучен в ряде работ, например [3, 4].

Для того чтобы растровые очки, подобно линзовым, создавали на сетчатке глаза четкое изображение, необходимо согласовать диаметр отверстия с оптической системой глаза и найти оптимальные способы расположения отверстий в маске.

В расчетах использована общепринятая оптическая схема глаза и характеристики редуцированного глаза по Гультранду [5, 6]. Для удобства расчетов реальный глаз заменен одной линзой, расположенной в главной плоскости, и принято, что аметропия и астигматизм вызваны дефектами линзы-хрусталика. Сетчатка же располагается на фиксированном расстоянии F_0 от главной плоскости. Редуцированное заднее фокусное расстояние F_0 глаза по Гультранду равно 22,8 мм. Редуцирование осуществляется путем деления определяемого расстояния на показатель преломления той среды, в которой расположена оптическая система. Учитывая, что в выбранной геометрии изображение будет формироваться в области центральной ямки желтого пятна, где преобладают колбочки, наиболее чувствительные к свету с длиной волны $\lambda = 550$ нм, в дальнейших расчетах используем именно это значение.

В качестве меры разрешающей способности глаза и качества изображения на сетчатке глаза удобно использовать диаметр δ каустики в изображении

звезды, который характеризует ширину функции рассеяния точки глазом. Диаметр каустики δ осесимметричной оптической системы с круглой диафрагмой диаметром D равен [7]

$$\delta = 2,44 \frac{\lambda F_0}{D}. \quad (1)$$

Дифракционная глубина каустики Δz определяется выражением

$$\Delta z \approx \pm 2 \left(\frac{F_0}{D} \right)^2 \lambda \sim \frac{\delta^2}{2\lambda}. \quad (2)$$

Изображение удаленной точки формируется в фокальной плоскости, а в плоскостях, расположенных вне фокуса на расстоянии x от него, наблюдается большое световое пятно, диаметр $\Delta\delta$ которого определяется геометрически:

$$\Delta\delta = \frac{D|x|}{F_0}. \quad (3)$$

2. Расчет размеров отверстия в зависимости от степени аметропии глаза. Эмметропический (нормальный) глаз видит бесконечно удаленные предметы без напряжения аккомодации. Такой глаз использует отверстие как лупу, так как через него может четко видеть предметы, расположенные ближе, чем ближняя точка глаза. Диаметр δ_0 изображения звезды на сетчатке эмметропического глаза находится из выражения (1), где D — диаметр зрачка. Например, при $D = 2$ мм $\delta_0 = 15,3$ мкм и $\delta_0 = 5,1$ мкм при $D = 6$ мм.

Аметропия глаза [5, 6] обуславливается тем, что оптическая система глаза строит изображение звезды не на сетчатке глаза, а ближе (миопия) или дальше ее (гиперметропия). Для миопического глаза дальняя точка четкого видения располагается на конечном расстоянии ($-a_D$) от главной плоскости HH' перед глазом, а для гиперметропического глаза — на конечном расстоянии (a_D) за глазом. Величина аметропии в диоптриях определяется как $A = (1000/a_D)$. У аметропического глаза дифракционный предел в изображении звезды не достигается, диаметр изображения звезды на сетчатке $\Delta\delta$ зависит от степени аметропии и его можно оценивать с помощью выражения (3). Характерные значения $\Delta\delta$ для гиперметропии приведены в третьем и четвертом столбцах табл. 1. Легко видеть, что разрешающая способность глаза резко падает с ростом степени аметропии.

2.1. Гиперметропия. В случае гиперметропии для коррекции недостатков зрения предлагается использовать явление сдвига фокуса оптической системы при диафрагмировании. Расчет величины сдвига аналогичен расчету камеры-обскуры. Далее используем вывод, сделанный Рэлеем относительно диаметра отверстия в камере-обскуре, который вполне согласуется с эмпирическим выводом: «... Наилучший результат получается, когда отверстие, рассматривае-

Т а б л и ц а 1

A, дптр	a_D , мм	$\Delta\delta$, мкм		δ_0 , мкм
		D = 2 мм	D = 6 мм	
1	1,33	45,8	137,3	23
2	0,94	91,2	273,6	32,6
3	0,77	136,8	410,5	39,7
4	0,667	182,8	548,5	45,9
5	0,6	227,7	683	51
6	0,545	273,2	819,7	56,1

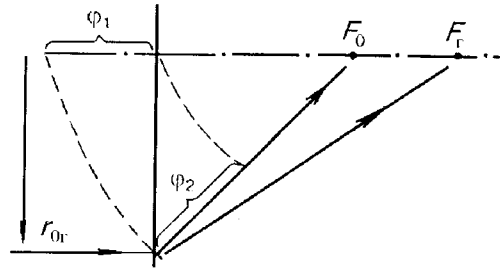


Рис. 1

мое со стороны изображения, пропускает около девяти десятых первой зоны Френеля».

Наличие хрусталика глаза приводит к преобразованию плоской световой волны в сходящуюся в точке F_r , как показано на рис. 1. Поэтому, определяя радиус первой зоны Френеля [8], необходимо учитывать как разницу хода φ_2 между волной, распространяющейся вдоль осевого луча, и волной, распространяющейся вдоль краевого луча, так и дополнительную разницу хода φ_1 , обусловленную формой волнового фронта. Радиус первой зоны r_{0r} Френеля находится следующим образом:

$$r_{0r} = \left(\frac{\lambda}{\frac{1}{F_0} - \frac{1}{F_r}} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где F_r — редуцированное заднее фокусное расстояние гиперметропического глаза.

Для глаза справедлива и формула линзы, а поскольку a_D — расстояние до дальней точки глаза, то ее изображение формируется на сетчатке без напряжения accommodation. Используя этот факт, выражение (4) и вывод Рэлея, находим диаметр отверстия d_r , которое необходимо поместить на оптической оси гиперметропического глаза, чтобы получить на сетчатке четкое изображение:

$$d_r = 1,8 \left(\frac{1000\lambda}{\Lambda} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Численные значения величин представлены в табл. 1. В первом столбце приведена степень гиперметропии глаза, во втором — диаметры d_r оптимальных отверстий, необходимых для коррекции соответствующей гиперметропии. В третьем и четвертом столбцах представлены диаметры изображения звезды $\Delta\delta$ на сетчатке в отсутствие коррекции при диаметрах зрачка 2 и 6 мм. В пятом столбце приведены диаметры изображения звезды δ_r на сетчатке глаза с коррекцией оптимальным отверстием. В расчетах принималось, что $\lambda = 550$ нм.

Сравнивая величины $\Delta\delta$ и δ_r , легко убедиться в том, что диафрагмирование зрачка существенно уменьшает диаметр изображения звезды на сетчатке, увеличивая при этом разрешающую способность глаза.

2.2. *Миопия.* В случае миопии коррекция недостатков зрения путем изменения фокусного расстояния оптической системы глаз — отверстие невозможно. Однако сохраняются возможности, связанные с увеличением глубины фокуса при диафрагмировании. Необходимо потребовать, чтобы увеличение глубины резкого изображения Δz превысило расстояние между фокусом и сетчаткой, что, согласно (2), математически выражается следующим образом:

$$F_0 - F_M \leq \Delta z(F_M, d) = 2 \left(\frac{F_M}{d_M} \right)^2 \lambda, \quad (6)$$

Т а б л и ц а 2

A , дптр	d_M , мм	δ_M , мкм
0		29,4
-1	1,04	28,8
-2	0,73	40,1
-3	0,59	48,5
-4	0,50	56,1
-5	0,44	62,4

где F_M — редуцированное заднее фокусное расстояние миопического глаза; d_M — диаметр оптимального отверстия. Откуда находим

$$d_M \leq \left(\frac{2F_M^2 \lambda}{F_0 - F_M} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Как и в случае с гиперметропией, величина F_M вновь определяется формулой линзы для дальней точки глаза:

$$\frac{1}{F_M} = \frac{1}{F_0} - \frac{A}{1000}. \quad (8)$$

Полученное выражение (7) является неравенством и не определяет однозначно диаметр оптимального отверстия. Уменьшение отверстия влечет за собой резкое ослабление светового потока, попадающего на сетчатку. Кроме того, дальнейшее уменьшение отверстия нежелательно из-за увеличения дифракционной расходимости световой волны. Поэтому оптимальным является наибольший диаметр из всех возможных согласно (7).

В табл. 2 представлены значения диаметров оптимального отверстия d_M и диаметров изображения звезды на сетчатке δ_M в системе глаз—отверстие в зависимости от степени миопии A ($\lambda = 550$ нм).

Сравнивая величины δ_M и δ_r из табл. 1, легко убедиться в том, что диафрагмирование зрачка дает близкие значения в случаях миопии и гиперметропии.

2.3. Астигматизм. Астигматизм глаза заключается в том, что рефракция глаза, а потому и его аметропия различны в разных меридиональных сечениях.

При необходимости более полной коррекции с учетом особенностей рефракции глаза можно согласовать не только размеры, но и форму отверстия. При правильном астигматизме отверстие должно иметь вид эллипса, ориентированного согласно положению главных сечений глаза. Величина каждой оси эллипса рассчитывается по формулам, приведенным выше, согласно виду и степени аметропии в соответствующем главном сечении.

2.4. Угловой размер поля зрения. Оценим угловой размер 2α поля зрения оптической системы глаз—отверстие, учитывая, что диаметр отверстия d в несколько раз меньше диаметра зрачка D . Ход крайних лучей изображен на рис. 2, z — расстояние между маской S с отверстием d и зрачком глаза D .

Легко видеть, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D}{2z}, \quad d \ll D. \quad (9)$$

Приведем характерные численные примеры для случая, когда маска с отверстием используется в оправе для очков: $D = 3$ мм; $z = 12$ мм; $2\alpha \approx 14^\circ$; $D = 4$ мм; $z = 12$ мм; $2\alpha \approx 18^\circ$.

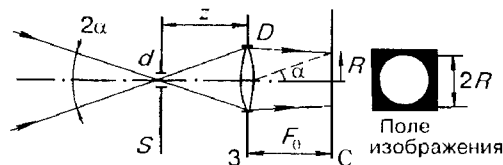


Рис. 2

Зона ясного видения, в которой глаз способен распознавать изображения, составляет примерно 22° по вертикали и 30° по горизонтали. Откуда следует, что изображение на сетчатке не выходит за пределы зоны ясного видения глаза вне зависимости от диаметра отверстия. Поле зрения глаза, скорректированного отверстием, зависит от поля зрения самого глаза и расстояния от апертурной маски до глаза.

Если отверстие находится непосредственно на поверхности роговицы, то поле зрения будет определяться выражением (9), в котором z равно 3,6 мм — расстоянию от вершины роговицы до плоскости радужки. Максимальный угол зрения, который можно получить с отверстием на непрозрачной контактной линзе, будет примерно 45 или 58° в зависимости от соответствующего диаметра зрачка, равного 3 или 4 мм. При темновой адаптации, когда диаметр зрачка равен 8 мм, поле зрения расширяется до $2\alpha = 130^\circ$.

Если отверстие приблизить к зрачку вплотную, что возможно в случае искусственного хрусталика с диафрагмой, то глаз не ощутит изменения поля зрения.

2.5. Поле изображения от одного отверстия. Поле изображения от одного отверстия не заполняет всю сетчатку, что связано с малым размером поля зрения (9). Далее для краткости изложения область изображения на сетчатке S от одного отверстия будем называть «пятном». Согласно ходу крайних лучей, изображенных на рис. 2, диаметр «пятна» $2R$ линейно зависит от диаметра зрачка D :

$$2R = 2F_0 \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_0 D}{z}. \quad (10)$$

Осевой луч светового пучка проходит через центр отверстия, затем через центр линзы и, не отклоняясь линзой, попадает в центр «пятна».

3. Гексагональный растр отверстий. Одно отверстие значительно сокращает поле зрения и вряд ли может использоваться в качестве очков. Вопрос о применении непрозрачной контактной линзы с одиночным отверстием или искусственного хрусталика с диафрагмой требует специального рассмотрения. Чтобы ответить на вопрос, каким образом располагать относительно друг друга несколько отверстий на непрозрачной маске вместо очковой линзы, необходимо провести анализ поля изображения. Поле изображения от растра отверстий является суммой полей изображений («пятен») от каждого из отверстий.

Рассмотрим ход лучей через два отверстия в маске (рис. 3). Через каждое из отверстий маски S проходит световой пучок, создавая на сетчатке C «пятно». Поле изображения состоит из этих двух «пятен». Диаметр каждого «пятна» определяется формулой (10). Расстояние между центрами «пятен» можно найти, строя ход осевых лучей $O_1O'_1$ и $O_2O'_2$ световых пучков, как показано на рис. 3. Введем обозначения: $\Delta = O_1O_2$ — расстояние между центрами отверс-

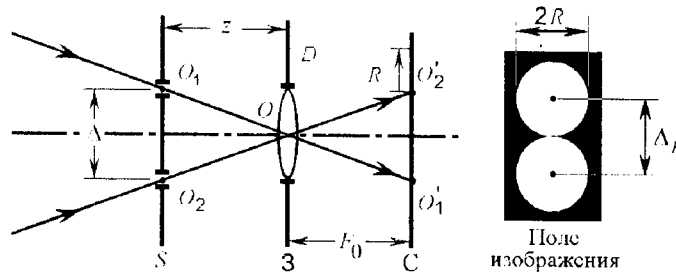


Рис. 3

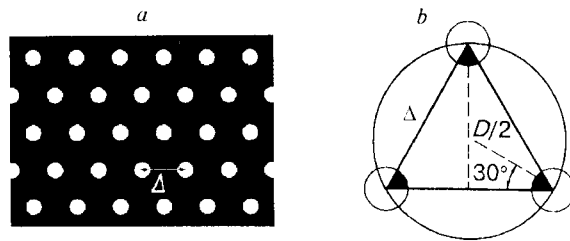


Рис. 4

тий, $\Delta_F = O_1'O_2'$ — расстояние между центрами «пятен». Запишем пропорцию, которая следует из подобия треугольников O_1OO_2 и $O_1'O_2'$ и выражения (10):

$$\frac{\Delta_F}{2R} = \frac{\Delta}{D}. \quad (11)$$

Расстояние Δ_F между центрами «пятен» зависит от отношения расстояния между центрами отверстий к диаметру зрачка, оно может быть меньше диаметра «пятна» $2R$, и в этом случае «пятна» перекрываются. С другой стороны, вид и форма поля изображения не зависят от расстояния z между растровой маской и зрачком, что следует из (11). При изменении z меняется только масштаб картины. Например, при увеличении расстояния z диаметры «пятен» уменьшаются и во столько же раз уменьшается расстояние между ними.

В областях перекрытия двух «пятен» будет наблюдаться двоение изображения, если глаз не способен аккомодировать на расстояние до предмета. Этот эффект прекрасно иллюстрируется классическим опытом Шейнера [7].

В растровых очках поле изображения на сетчатке состоит из растра круглых «пятен», внутри которых и есть изображение, в промежутках между «пятнами» изображения нет. Растр «пятен» имеет тот же вид, что и растр отверстий на маске. Площадь промежутков минимальна в гексагональном растре. Наиболее удачным с нашей точки зрения следует признать случай, когда в поле зрения площадь перекрытия «пятен» минимальна, но при этом отсутствуют темные провалы в местах, равноудаленных от центров трех ближайших «пятен». Вид поля изображения на сетчатке будет зависеть от соотношения диаметра зрачка и расстояния между центрами проекций отверстий на зрачок, а также расстояния от апертурной маски до глаза.

В приближении $d \ll D$ наиболее близкое к оптимальному поле зрения удастся получить, если на поверхности зрачка помещается одно отверстие. Маска с гексагональным растром отверстий показана на рис. 4, *a*. Чертеж для расчета расстояния между центрами отверстий дан на рис. 4, *b*. Большой круг изображает зрачок, маленькие — отверстия маски. Расстояние между центрами отверстий Δ определяется из треугольников, указанных на рис. 4, *b*, и равно

$$\Delta = \frac{\sqrt{3}D}{2} = 0,866D. \quad (12)$$

Оптимальный шаг растра Δ для различных зрачков D в предположении $d \ll \Delta$ указан в табл. 3.

В большинстве случаев отверстия растровых очков имеют диаметры, сравнимые с расстояниями между отверстиями, и условие $d \ll \Delta$ не выполняется. Это приводит, с одной стороны, к изменению вида поля зрения, а с другой — к иному оптимальному шагу Δ , как если бы диаметр зрачка увеличился на величину, равную диаметру отверстия.

Во время аккомодации и при вариации освещенности диаметр зрачка рефлекторно изменяется обычно

Таблица 3

D , мм	Δ , мм
2	1,73
2,5	2,17
3	2,6
3,5	3,03
4	3,5
4,5	3,9
5	4,33

от 2 до 8 мм. Поэтому соотношение между расстоянием Δ и диаметром зрачка D не остается постоянным в процессе видения и на практике можно пользоваться простой формулой (12). Наилучшим и наиболее точным способом подбора Δ является выбор правильной освещенности по виду поля изображения.

Различные режимы функционирования очков, области применения, механизмы улучшения зрения обсуждаются в [9].

4. Прецизионные методы изготовления. Изготовление растровых масок для дифракционных очков производилось методом послойного лазерного гравирования пленок различных органических материалов. Эксперименты по изготовлению масок проводились на лазерном растровом устройстве записи барабанного типа с CO_2 -лазером [10].

В качестве исходных материалов для масок были выбраны пленки полимеров с большим коэффициентом поглощения на длине волны CO_2 -лазера: поливинилхлорида, триацетатцеллюлозы и полиметилметакрилата. Коэффициенты поглощения этих материалов на длине волны 10,6 мкм лежат в диапазоне $200 \div 300 \text{ см}^{-1}$. Глубина поглощения излучения в таких материалах не превышает 100 мкм. Используемые нами в экспериментах материалы характеризуются также низкими коэффициентами теплопроводности — не более $2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см} \cdot \text{град}$. Обработка материалов в процессе лазерного гравирования проводилась в режиме сканирующего импульсного экспонирования со временами воздействия, не превышающими $1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. Обработка материалов в таком режиме не приводила к увеличению зоны гравирования в результате процессов теплопроводности. Размер участка обработки или дискретность изготовления гравированного изображения определялись целиком размерами сфокусированного лазерного пучка, глубиной его поглощения в материале, мощностью лазера и составляли величину, не превышающую 50 мкм.

Высокая точность изготовления растровых масок обусловлена малой погрешностью (5 мкм) позиционирования сфокусированного лазерного пучка в лазерном устройстве записи.

Вследствие того что за один процесс экспонирования с поверхности материала удаляется слой толщиной порядка 100 мкм, полное количество циклов экспонирования определяется толщиной пленки исходного материала. В частности, для слоев поливинилхлорида толщиной 0,25 мм требуются три цикла экспонирования для получения готовой маски с необходимыми отзерстиями. Общее время изготовления десяти заготовок растровых масок не превышало 30 мин.

5. Экспериментальное исследование. Экспериментальное изучение влияния одиночной диафрагмы на резкость изображения, поля изображения двойной диафрагмы и поля изображения растровой маски проводилось с помощью экспериментальной модели глаза. Схема установки показана на рис. 5. Роль хрусталика выполнял объектив с фокусным расстоянием $F = 65 \text{ мм}$. Перед объективом вплотную к первой линзе располагалась ирисовая диафрагма 3,

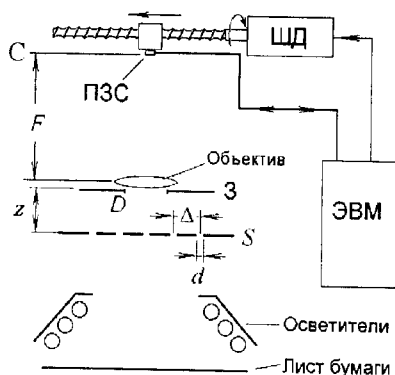


Рис. 5

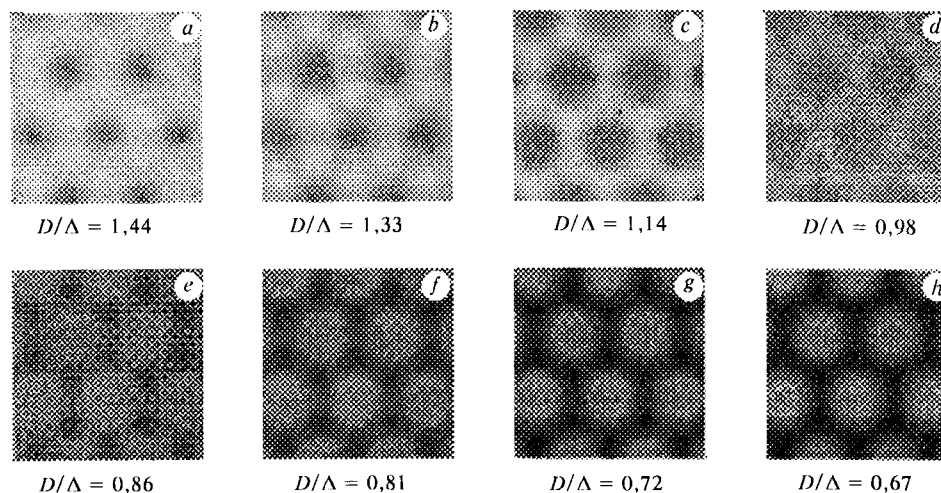


Рис. 6

диаметр D которой можно было устанавливать с точностью $0,1$ мм. На расстоянии $z = 36$ мм от диафрагмы помещалась дифракционная маска S , состоящая из гексагонального раstra отверстий диаметром $d = 3,2$ мм, с расстоянием между центрами отверстий $\Delta = 9,0$ мм. Таким образом, установка моделировала глаз с растровой маской в масштабе $3 : 1$. Равномерно освещенный лист белой бумаги заполнял все поле зрения. Роль сетчатки S выполняла линейка ПЗС, состоящая из 2048 фоточувствительных ячеек, расположенных в фокальной плоскости объектива. Сигнал с линейки считывался в компьютер, создавая одну строку изображения. Затем по команде компьютера линейка перемещалась шаговым двигателем (ШД) на место следующей строки, и таким образом по строчкам строилось все изображение. Результаты измерений позволяют измерять яркость и координаты любой точки изображения. Вид изображения сильно зависит от отношения D/Δ и не изменяется при пропорциональном изменении всех размеров установки. Поле изображения растровой маски показано на рис. 6.

Для удобства сравнения представленных изображений с узорами, видимыми глазом через растровую маску, под рисунками даны уменьшенные в 3 раза значения D , что соответствует растру с диаметром отверстий $d = 1,06$ мм и шагом $\Delta = 3$ мм. Изображения на рис. 6, $a-h$ соответствуют изменению диаметра зрачка D от $4,33$ до $2,0$ мм. Эти изображения не зависят от субъективного восприятия человека и демонстрируют зависимость вида изображения в фокальной плоскости объектива от диаметра диафрагмы. Сравнивая узор, видимый через растровые очки, с узором на рис. 6, наблюдатель может

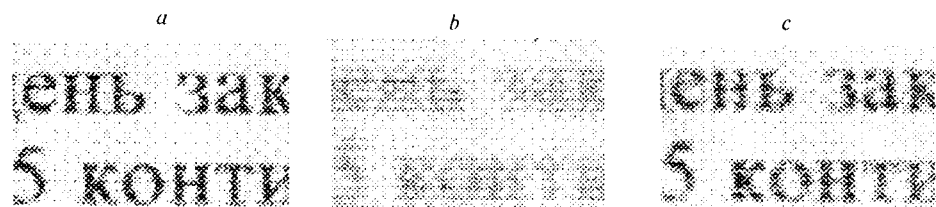


Рис. 7

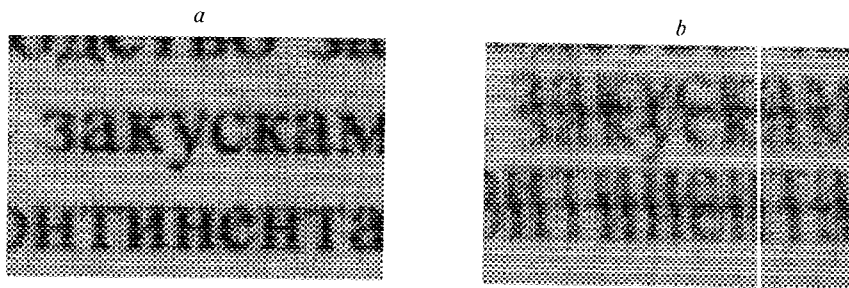


Рис. 8

точно определить отношение диаметра своего зрачка к расстоянию между отверстиями раstra.

Каждое отверстие маски увеличивает глубину фокуса и смещает фокальную плоскость. Эти эффекты легко продемонстрировать, например, в следующем эксперименте.

Вначале получаем четкое изображение с диафрагмой диаметром 5 мм (рис. 7, *a*). Далее оставляем диафрагму неизменной, а объектив перемещаем по направлению к предмету, при этом изображение становится нечетким (рис. 7, *b*). Уменьшаем диафрагму до диаметра 1 мм и вновь получаем четкое изображение (рис. 7, *c*).

Эксперимент с двумя отверстиями в маске и полностью открытой диафрагмой демонстрирует отсутствие двоения изображения в случае точной наводки на резкость (глаз аккомодирует) (рис. 8, *a*) и хорошо наблюдаемое двоение вне фокуса (глаз не аккомодирует) (рис. 8, *b*).

Таким образом, если глаз способен аккомодировать на дистанцию до рассматриваемого предмета, то видно единственное изображение, но яркость его модулирована согласно изображениям на рис. 6.

При невозможности аккомодировать на дистанцию до рассматриваемого предмета в областях перекрытия «пятен» от двух или трех отверстий появляется двоение и троеие изображения.

ВЫВОДЫ

Разработаны растровые дифракционно-апертурные очки, которые обладают оптической силой и подобно линзовым очкам создают на сетчатке аметропического глаза четкое изображение. Найдена зависимость диаметра отверстий в маске таких очков от степени аметропии глаза. Предложено использовать смещение фокуса оптической системы при диафрагмировании для коррекции гиперметропии и увеличение глубины фокуса в случае миопии. Показано, что можно провести полную коррекцию недостатков зрения с учетом особенностей рефракции глаза путем видоизменения формы отверстия и оптимальным является гексагональный растр отверстий, шаг которого зависит от размера зрачка пользователя.

Изготовление растровых масок осуществлялось методом послойного лазерного гравирования пленок. Лазерные технологии обеспечивают точность изготовления 5 мкм, что позволяет производить маски для коррекции недостатков рефракции глаза в заданном меридиане.

Проведены экспериментальные исследования поля изображения модели глаза, подтвердившие теоретический анализ.

В заключение отметим, что разработанные очки принципиально отличаются от общепринятых способом формирования поля изображения на сетчатке и, несомненно, заслуживают внимания, во-первых, как средство для коррекции недостатков зрения с улучшенным цветовым восприятием и улучшенной визуальной оценкой расстояния между предметами по сравнению с общепринятыми и, во-вторых, как тренажер для мышц глаза.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН С. Т. Васькову и д-ру техн. наук П. Е. Твердохлебу за интерес к работе, полезные обсуждения и поддержку.

Частичное финансирование работ осуществлялось по гранту РФФИ (№ 96-15-38219).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 4249803 US. Optical device for preoperative cataract patients /W. H. Byler, T. T. Byler. Publ. 10.02.81.
2. Пат. 1286118 СССР. Оптическая сетка для коррекции оптических аберраций /Мигель Салия-Муньоз. Оpubл. 27.01.87, Бюл. № 3.
3. Вуд Р. Физическая оптика. М.: ОНТИ, 1936.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
5. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.: Машиностроение, 1966.
6. Урмахер Л. С., Айзенштат Л. И. Очковая оптика. М.: Медицина, 1982.
7. Хвольсон О. Д. Курс физики. Петроград: Издание Риккера, 1918.
8. Коронкевич В. П., Пальчикова И. Г. Современные зонные пластинки // Автометрия. 1992. № 1. С. 85.
9. Пальчикова И. Г., Пальчиков Е. И. Растровые дифракционно-апертурные очки // Сибирский физический журнал. 1997. № 1.
10. Баев С. Г., Бессмельцев В. П., Выдрин Л. В. и др. Прецизионный лазерный термографический генератор изображения // Автометрия. 1991. № 5. С. 3.

Поступила в редакцию 8 сентября 1997 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!