

РАСТРОВЫЕ ДИФРАКЦИОННО - АПЕРТУРНЫЕ МАСКИ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ НЕДОСТАТКОВ ЗРЕНИЯ

И.Г. Пальчикова, Е.И. Пальчиков, В.П. Бессмельцев, С.Г. Баев
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН (Новосибирск)

Сообщается о разработке растровых дифракционно-апертурных очков. Приводятся зависимости диаметра отверстий от степени аметропии глаза и 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: различные режимы функционирования очков, области применения, механизмы улучшения зрения.

1. Введение

Развитие современных фототехнологий и компьютерного синтеза дифракционных оптических элементов (ДОЭ) позволило значительно снизить трудности их изготовления и тиражирования и привело к появлению нового типа компонентов в оптическом приборостроении [1,2]. Использование ДОЭ и их разновидностей - зонных пластинок (ЗП) для коррекции зрения является одним из наиболее важных применений. Ожидается, что ЗП могут заменить контактные очковые линзы и позволят глазу в нулевом порядке дифракции наблюдать предметы на бесконечности без напряжения аккомодации. А при рассмотрении объектов вблизи, глаз будет рефлекторно воспринимать первый порядок дифракции [3]. Во многом это - путь механической замены хорошо известной и нашедшей признание рефракционной линзы на дифракционную. И именно поэтому на этом пути не удаётся решить проблемы, связанные с особенностями физической природы ДОЭ, и в частности, избавиться от гигантской хроматической аберрации и исключить падение контраста изображения, связанное с влиянием порядков дифракции друг на друга. По нашему мнению, успеха в применении ДОЭ для коррекции зрения можно достичь, лишь прибегая к неординарным решениям.

При синтезе дифракционных структур поверхность элемента разбивается на части, которым придаются особые свойства по пропусканию с целью выделения из падающего волнового фронта требуемого. Отверстия так же являются ДОЭ. Исторически интерес к использованию отверстий для коррекции зрения периодически возникает и затухает. Появление очков заставило забыть на две сотни лет про возможность применения одиночного отверстия для разглядывания мелких предметов. Однако и в настоящее время офтальмологи назначают пациентам дырчатые очки, в которых перед глазом помещается непрозрачная маска с набором щелей, прорезей, круглых или квадратных отверстий [4,5]. Такие очки применяются с целью ослабления светового потока для облегчения состояния больных катарактой перед и после операции. Параметры очков выбираются методом эмпирического подбора и субъективных оценок. Проведен-

ный нами поиск и анализ доступных работ показал отсутствие статей специалистов-физиков или специалистов-оптиков, посвященных расчету или экспериментальному измерению характеристик растровых очков. Этот факт, дифракционная природа растровых очков и очередное возрастание интереса послужили отправной точкой данной работы.

Целями настоящей работы являются расчёт и изучение растровых дифракционно - апертурных масок для коррекции недостатков зрения и разработка лазерной технологии их изготовления.

2. Постановка задачи

Рефракционные линзы осуществляют коррекцию недостатков зрения путём сопряжения дальней точки глаза с бесконечностью. В растровых очках линза заменена маской с отверстиями. Вопрос об образовании изображения простым отверстием разобран в ряде работ, например [6].

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

В расчётах мы использовали общепринятую оптическую схему глаза и оптические характеристики редуцированного глаза по Гульстранду [7,8]. Для удобства расчётов реальный глаз заменяется одной линзой, расположенной в главной плоскости, и принимается, что аметропии и астигматизм вызываются дефектами линзы-хрусталика. Сетчатка же располагается на фиксированном расстоянии F_0 от главной плоскости. Редуцированное заднее фокусное расстояние глаза по Гульстранду F_0 равно 22,8 мм. Редуцирование осуществляется путём деления определяемого расстояния на показатели преломления той среды, в которой расположена оптическая система. Учитывая, что в выбранной геометрии изображение будет формироваться в области центральной ямки жёлтого пятна, где преобладают колбочки наиболее чувствительные к свету с длиной волны $\lambda=550$ нм, то в дальнейших расчётах использовано именно это значение.

В качестве меры разрешающей способности глаза и меры качества изображения на сетчатке глаза удобно использовать диаметр δ каустики в изображении звезды, который характеризует ши-

рину функции рассеяния точки глазом. Диаметр каустики δ осесимметричной оптической системы с круглой диафрагмой, диаметром D , равен [9]:

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

Дифракционная глубина каустики Δz определяется выражением:

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

Изображение удалённой 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:

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

3. Расчёт размеров отверстия в зависимости от степени аметропии глаза

Эмметропический глаз видит бесконечно удалённые предметы без напряжения аккомодации. Такой глаз использует отверстие как лупу, так как может через него видеть чётко предметы, расположенные ближе, чем ближняя точка глаза. Диаметр δ_3 изображения звезды на сетчатке эмметропического глаза находится из выражения (1), где D - диаметр зрачка. Что составляет $\delta_3 = 15,3$ мкм при $D=2$ мм и $\delta_3 = 5,1$ мкм при $D=6$ мм.

Аметропия глаза [7,8] обуславливается тем, что оптическая система глаза строит изображение звезды не на сетчатке глаза, а ближе (миопия), или дальше её (гиперметропия). Для миопического глаза дальняя точка чёткого видения располагается на конечном расстоянии ($-a_D$) от главной плоскости HN' перед глазом, для гиперметропического глаза дальняя точка располагается 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 геометрически с помощью выражения (3). Характерные значения $\Delta\delta$ для гиперметропии приведены в третьем и четвертом столбцах таблицы 1. Легко видеть, что разрешающая способность глаза резко падает с ростом степени аметропии.

3.1. Гиперметропия

В случае гиперметропии для коррекция зрения мы предлагаем использовать явление сдвига фокуса оптической системы при диафрагмировании. Расчёт величины сдвига аналогичен расчёту камеры-обскуры. Далее мы используем вывод, сделанный Рэлеем относительно диаметра отвер-

стия в камере-обскуре, который вполне согласуется с эмпирическим выбором: "... Наилучший результат получается, когда отверстие, рассматриваемое со стороны изображения, пропускает около девяти десятых первой зоны Френеля."

Таблица 1.

A , дптр	d_r , мм	$\Delta\delta$, мкм ($D=2$ мм)	$\Delta\delta$, мкм ($D=6$ мм)	δ_r , мкм
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

Наличие хрусталика приводит к преобразованию плоской световой волны в сходящуюся в точку фокуса F_r . Поэтому, определяя радиус первой зоны Френеля [2], необходимо учитывать как разницу хода между волной, распространяющейся вдоль осевого луча и волной, распространяющейся вдоль краевого луча, так и дополнительную разницу хода, обусловленную формой волнового фронта. Радиус первой зоны r_{0r} Френеля находится следующим образом:

$$r_{0r} = \sqrt{\frac{\lambda}{\frac{1}{F_0} - \frac{1}{F_r}}} \quad (4)$$

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 её изображение формируется на сетчатке без напряжения аккомодации. 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 чёткое изображение:

$$d_r = 1,8 \cdot \sqrt{\frac{1000 \cdot \lambda}{A}} \quad (5)$$

где A - степень аметропии $A = \frac{1000}{a_D}$, дптр.

Численные значения величин представлены в таблице 1. В первом столбце приведена степень гиперметропии глаза, во втором столбце - 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 2мм и 6мм. В пятом столбце приведены диаметры изображения звезды δ_r на сетчатке глаза с коррекцией оптимальным отверстием. В расчётах принималось $\lambda = 550$ 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.

3.2. Миопия

В случае миопии коррекция зрения путем изменения фокусного расстояния оптической системы глаз - отверстие невозможна. Но сохраняются возможности, связанные с увеличением глубины фокуса при диафрагмировании. Необходимо потребовать, чтобы увеличение глубины резкого изображения ΔZ превысило расстояние между фокусом и сетчаткой. Учитывая (2), находим:

$$d_M \leq \sqrt{\frac{2 \cdot F_M^2 \cdot \lambda}{F_0 - F_M}} \quad (6)$$

Как и в случае с гиперметропией, величина F_M вновь определяется из формулы линзы для дальней точки глаза.

Полученное выражение (6) является неравенством и не определяет однозначно диаметр оптимального отверстия. Уменьшение отверстия влечёт за собой резкое ослабление светового потока, попадающего на сетчатку. Кроме того, неоправданное уменьшение отверстия нежелательно из-за увеличения дифракционной расходимости световой волны. Поэтому оптимальным является наибольший диаметр из всех возможных согласно (6).

В таблице 2 представлены значения диаметров оптимального отверстия d_M (мм) и диаметров δ_M (мкм), изображения звезды на сетчатке глаза с коррекцией отверстием в зависимости от степени миопии A ($\lambda = 550$ нм).

Таблица 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

Сравнивая величины δ_M и δ_r из таблицы 1, легко убедиться в том, что диафрагмирование зрачка даёт близкие значения в случае миопии и в случае гиперметропии.

3.3 Астигматизм

Глазной астигматизм 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, приведённым выше, согласно виду и степени аметропии в соответствующем главном сечении.

3.4. Угловой размер поля зрения

Оценим угловой размер 2α поля зрения глаза с отверстием, учитывая, что диаметр отверстия d в несколько раз меньше диаметра зрачка D . Ход крайних лучей изображён на рис. 1, z - расстояние между маской S с отверстием d и зрачком глаза 3 .

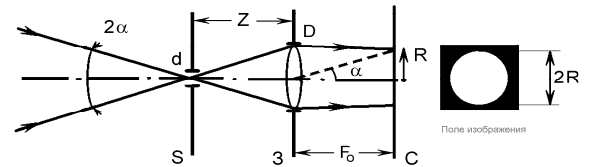


Рис.1. Ход крайних лучей.

Легко видеть, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D}{2 \cdot z}, \quad d \ll D. \quad (7)$$

Приведём характерные численные примеры для случая, когда маска с отверстием используется в оправе для очков :

$$D=3\text{мм}; z=12\text{мм}; 2\alpha \approx 14^\circ.$$

$$D=4\text{мм}; z=12\text{мм}; 2\alpha \approx 18^\circ.$$

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

Если отверстие находится непосредственно на поверхности роговицы, то поле зрения будет определяться выражением (7) в котором z равно 3,6мм - 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 - 3 мм или 4мм. При темновой адаптации, когда диаметр зрачка равен 8мм, 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.

3.5. Поле изображения от одного отверстия

Поле изображения от одного отверстия не заполняет всю сетчатку, что связано с малым размером поля зрения (7). Далее для краткости изложения область изображения на сетчатке C от одного отверстия будем называть "пятном". Согласно хо-

ду краевых лучей, изображённых на рис.1 диаметр “пятна” $2 \cdot R$ линейно зависит от диаметра зрачка D

$$2 \cdot R = 2 \cdot F_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_0 \cdot D}{z}. \quad (8)$$

Осевой луч светового пучка проходит через центр отверстия, затем - через центр линзы и, не отклоняясь линзой, попадает в центр “пятна”.

4. Гексагональный растр отверстий

Одно отверстие значительно сокращает поле зрения и вряд ли может использоваться в качестве очков. Вопрос об использовании непрозрачной контактной линзы с одиночным отверстием или искусственного хрусталика с диафрагмой требует специального рассмотрения. Ответить на вопрос, каким образом располагать друг относительно друга несколько отверстий на непрозрачной маске вместо очковой линзы можно, проведя анализ поля изображения. Поле изображения от растра отверстий является суммой полей изображений (“пятен”) от каждого из отверстий.

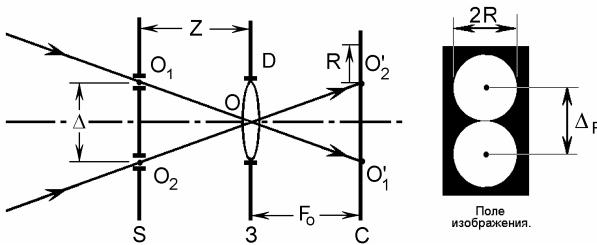


Рис. 2. Поле изображения от двух отверстий.

Рассмотрим ход лучей через два отверстия на маске (рис.2). Через каждое из отверстий маски S проходит световой пучок, создавая на сетчатке C “пятно”, и поле изображения состоит из этих двух пятен. Диаметр каждого пятна определяется формулой (8). Расстояние между центрами пятен можно определить, строя ход осевых лучей O_1O_1' и O_2O_2' световых пучков, как показано на рис.2. Вводя обозначения $\Delta = O_1O_2$ - расстояние между центрами отверстий и $\Delta_F = O_1'O_2'$ - расстояние между центрами “пятен”, запишем пропорцию, которая следует из подобия треугольников O_1OO_2 и $O_1'O_2'$ и выражения (8):

$$\frac{\Delta_F}{2 \cdot R} = \frac{\Delta}{D}. \quad (9)$$

То есть, 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 (9). 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 [9].

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 так же отстояния дырчатого транспаранта от глаза.

В приближении $d \ll D$ наиболее близкий к оптимальному вид поля зрения удаётся получить, если на поверхности зрачка помещается одно отверстие. Маска с гексагональным растром отверстий показана на рис. 3а.

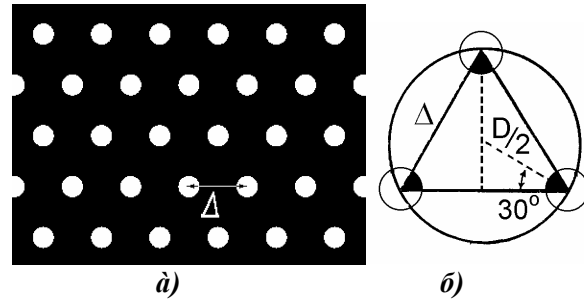


Рис. 3. Растровая маска.

Чертёж для расчёта расстояния между центрами отверстий дан на рис. 3б. Большой круг изображает зрачок, маленькие - отверстия маски. Расстояние между центрами отверстий Δ определяется из треугольников, указанных на рис. 3б и оно равно:

$$\Delta = \frac{\sqrt{3} \cdot D}{2} = 0,866 \cdot D. \quad (10)$$

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

Таблица 3.

$D, \text{ мм}$	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$\Delta, \text{ мм}$	1,73	2,17	2,6	3,03	3,5	3,9	4,33

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, с другой стороны - к

изменению оптимального шага Δ , как если бы диаметр зрачка увеличился на величину, равную диаметру отверстия.

Во время аккомодации и при изменении освещённости диаметр зрачка изменяется рефлекторно, обычно от 2 до 8 мм. Поэтому соотношение между расстоянием Δ и диаметром зрачка D не остаётся неизменным в процессе видения и на практике можно пользоваться простой формулой (10). Наилучшим и наиболее точным способом подбора Δ является выбор правильной освещённости по виду поля изображения.

Различные режимы функционирования очков, области применения, механизмы улучшения зрения обсуждаются в [10].

5. 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 в качестве источника излучения [11].

В качестве исходных материалов для прозрачных нами 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 рабочего лазера 10.6 мкм лежат в диапазоне $200 - 300 \text{ см}^{-1}$. Соответственно, глубина поглощения излучения в такие материалы не превышает 100 мкм . Используемые нами в экспериментах материалы характеризуются также низкими коэффициентами теплопроводности - не более $2 \times 10^{-3} \text{ Вт/см} \cdot \text{градус}$. Обработка материалов в процессе лазерного гравирования проводилась в режиме сканирующего импульсного экспонирования со временами воздействия не превышающими $1 \times 10^{-4} \text{ сек}$. Обработка материалов в таком режиме не приводила к увеличению зоны гравирования в результате процессов теплопроводности и, следовательно, размер участка обработки или дискретность изготовления гравированного изображения определялись целиком размерами сфокусированного лазерного пучка, глубиной его поглощения в материале и мощностью и составляла величину не превышающую 50 мкм .

Высокая точность изготовления растровых масок обусловлена точностью позиционирования сфокусированного лазерного пучка в лазерном устройстве записи, величина которой не превышает 5 мкм .

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 требуется три цикла экспонирования для получения готовой маски с необходимыми отверстиями.

Общее время изготовления десяти заготовок растровых масок не превышало 30 минут .

6. 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. 4.

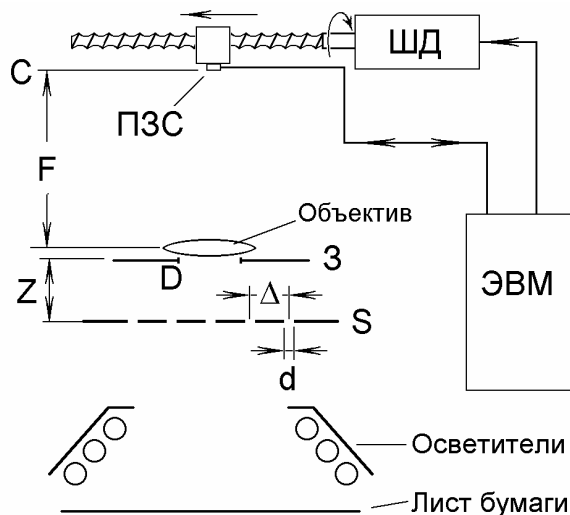


Рис.4. Экспериментальная установка.

Роль хрусталика выполнял объектив с фокусным расстоянием $F=65 \text{ мм}$. Перед объективом вплотную к первой линзе располагалась ирисовая диафрагма 3, диаметр D которой можно было устанавливать с точностью $0,1 \text{ мм}$. На расстоянии $z=36 \text{ мм}$ от диафрагмы помещалась дифракционная маска S, состоящая из гексагонального растра отверстий диаметром $d=3,2 \text{ мм}$, с расстоянием между центрами отверстий $\Delta=9,0 \text{ мм}$. Таким образом, установка моделировала глаз с растровой маской в масштабе 3:1. Равномерно освещенный лист белой бумаги заполнял все поле зрения. Роль сетчатки С выполняла микросхема - линейка ПЗС, состоящая из 2048 фоточувствительных ячеек, расположенных в линию в фокальной плоскости объектива. Сигнал с линейки считывался в компьютер, создавая одну строку изображения. Затем, по сигналу компьютера, линейка перемещалась шаговым двигателем ШД на место следующей строки и таким образом, по строчкам, строилось всё изображение. Результаты измерений, записанные в файл, позволяют количественно 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.5.

Для удобства сравнения представленных изображений с узорами, видимыми глазом через растровую маску, в подписях под рисунками даны уменьшенные в три раза значения D , что соответ-

стствует растру с диаметром отверстий $d=1,06$ мм и шагом $\Delta=3$ мм. Картины на рис.5а - рис.5з соответствуют изменению диаметра зрачка D от 4,33 мм до 2,0 мм. Эти изображения не зависят от субъективного восприятия человека, они демонстрируют зависимость вида изображения в фокальной плоскости объектива от диаметра диафрагмы. Сравнивая узор, видимый через растровые очки с видом узора на рис.5, наблюдатель может точно определить отношение диаметра своего зрачка к расстоянию между отверстиями растра.

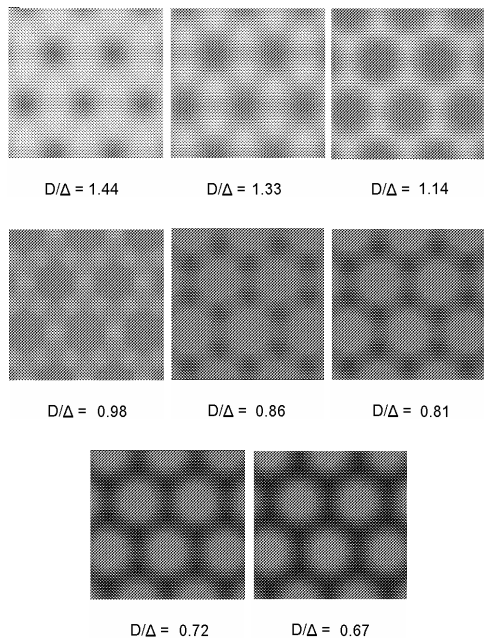


Рис. 5. Поле изображения растровой дифракционно - апертурной маски

Каждое отверстие маски увеличивает глубину фокуса и смещает фокальную плоскость. Эти эффекты легко продемонстрировать с помощью сканера (рис. 4), например, в следующем эксперименте. Вначале получаем четкое изображение с диафрагмой диаметром 5 мм - рис.6а.

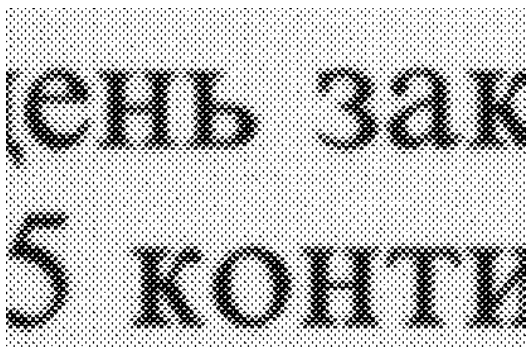


Рис. 6а.

Затем, диафрагму оставляем неизменной, а объектив перемещаем, изображение становится нечетким - рис.6б.

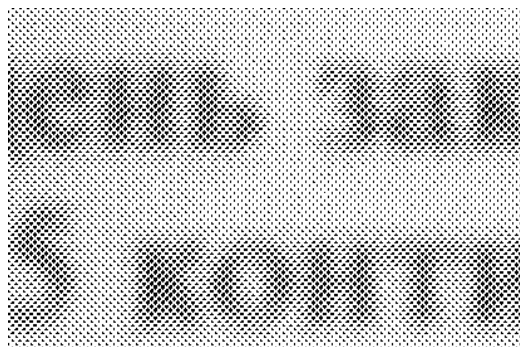


Рис. 6б.

После уменьшения диафрагмы до диаметра 1мм, вновь наблюдаем четкое изображение как показано на рис. 6в.

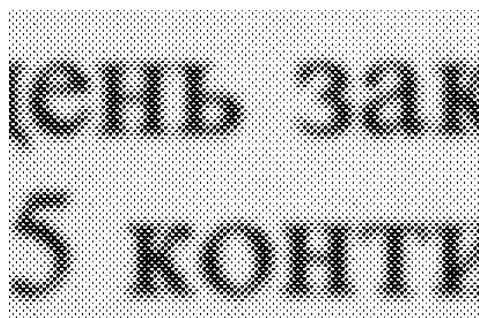


Рис. 6в.

Эксперимент с двумя отверстиями на маске и полностью открытой диафрагмой демонстрирует отсутствие двоения изображения в случае точной наводки на резкость (глаз аккомодирует) – рис. 7а и хорошо наблюдаемое двоение вне фокуса (глаз не аккомодирует) – рис. 7б.

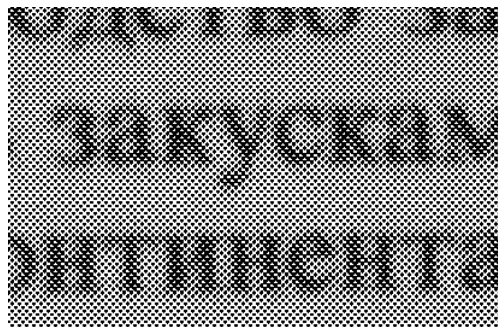


Рис. 7а.

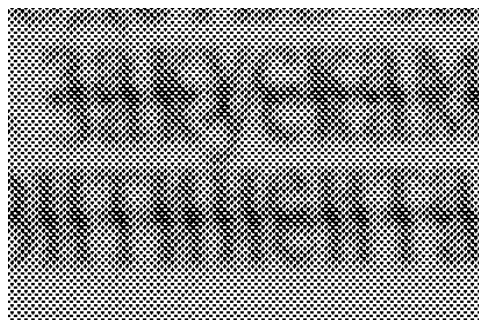


Рис. 7б.

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

При невозможности аккомодировать глаз на дистанцию до рассматриваемого предмета в областях перекрытия “пятен” от двух или трех отверстий появляется двоение и троеение изображения.

7. Выводы

Разработаны растровые дифракционно-апертурные очки, которые обладают оптической силой, и подобно линзовым очкам, создают на сетчатке аметропического глаза четкое изображение. Найдены способы расчета диаметров отверстий, позволяющие согласовать диаметр отверстия с оптической системой глаза. В случае гиперметропии для коррекция зрения предложено использовать явление сдвига фокуса оптической системы при диафрагмировании. В случае миопии предложено основывать расчет на явлении увеличения глубины фокуса. Показано, что возможно провести полную коррекцию с учетом особенностей рефракции глаза путем видоизменения формы отверстия. В расчетах использовалась общепринятая оптическая схема глаза и оптические характеристики редуцированного глаза по Гульстранду. В качестве меры качества изображения на сетчатке глаза выбран диаметр δ изображения звезды, который характеризует ширину функции рассеяния точки глазом. Показано, что оптимальным является гексагональный растр отверстий шаг которого зависит от размера зрачка пользователя.

Изготовление растровых масок для дифракционных очков производилось методом послойного лазерного гравирования пленок на лазерном растровом устройстве записи. Лазерные технологии обеспечивают точность изготовления 5 мкм, что позволяет производить маски для коррекции недостатков рефракции глаза в наперед заданном меридиане.

Экспериментально на модели глаза проведены исследования поля изображения и экспериментальные данные подтверждают теоретические рассуждения.

В заключение отметим, что разработанные очки принципиально отличаются от общепринятых способом формирования поля изображения на сетчатке, и несомненно заслуживают внимания в первую очередь, 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.

8. Заключение

Авторы благодарны чл.-корр. РАН С.Т. Василькову и д.т.н. П.Е. Твердохлебу и за интерес к работе, полезные обсуждения и поддержку. Частичное финансирование работ осуществлялось по гранту РФФИ.

Литература

1. Hochmuth D. H., Reardon P.J. Diffractive optics gives laser pointer a new twist// Photonics Spectra.- 1995.- V.29.- N8.
2. Коронкевич В.П., Пальчикова И.Г. Современные зонные пластинки// Автометрия.- 1992.- N1.- p.86-101.
3. Freeman M.H. Improving vision// Phys.Bull.- 1988.-N2.
4. Byler W.H., Byler T. T.. Optical device for pre-operative cataract patients// Pat. US 4,249,803, Feb.10, 1981.
5. Мигель Салия-Муньоз. Оптическая сетка для коррекции оптических aberrаций// Пат. СССР SU 1286118.
6. Р.Вуд. Физическая оптика. - М.: ОНТИ, 1936.3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1970.
7. В.Н. Чуриловский. Теория оптических приборов. - М.: “Машиностроение”, 1966.
8. Л.С. Урмахер, Л.И. Айзенштат. Очковая оптика. - М.: “Медицина”, 1982.
9. О.Д. Хвольсон. Курс физики.- Петроград: “Издание Риккера”, 1918.
10. И.Г. Пальчикова, Е.И. Пальчиков. Растровые дифракционно-апертурные очки// Сибирский физический журнал. - 1997.- № 1.
11. S.G. Baev, V.P. Bessmeltsev, L.V. Vydrin, I.A. Maksimov. Precision laser heat-mode recording image generator// Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.-1991.- N 5.- p.3-11.