

## ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.92, 004.932

ДИФРАКЦИОННАЯ ГЛУБИНА ТРЁХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ,  
СТИМУЛИРУЮЩИХ АККОМОДАЦИЮ ГЛАЗАА. М. Ковалев<sup>1, 2</sup>, Е. В. Власов<sup>2, 3</sup><sup>1</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1<sup>2</sup>Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,  
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Рассматривается глубина двумерных планов-изображений, разнесённых вдоль зрительной оси глаза для стимулирования аккомодации в 3D-дисплеях. Определена дифракционная глубина планов и показано её увеличение при уменьшении остроты разрешающей способности изображений.

*Ключевые слова:* 3D-изображение, модели глаза, аккомодация, дифракционная глубина, острота разрешающей способности.

**Введение.** В 3D-дисплеях с «добавленной аккомодацией» [1–4] изображение формируется путём линейной комбинации ограниченного числа плоскопараллельных планов-изображений, распределённых по глубине пространства. В работе [5] показано, что предельное разрешение и визуальный комфорт достигаются, если расстояние между планами не превышает дифракционной глубины фокуса, которая для типового зрачка глаза диаметром 3 мм равна 0,25–0,3 дптр. В [1] представлены результаты исследования экспериментального образца бипланового мультифокального стереодисплея наголовного типа. Установлено, что на реальном образце соответствие дифракционной глубины расстоянию между планами нарушается примерно вдвое. Визуально комфортное изображение может быть получено при расстоянии между планами  $\sim 0,5$ – $0,6$  дптр. В работах [3, 4] расстояние между планами устанавливается равным 0,67 дптр. В [6] с помощью авторефрактора с горячим зеркалом в инфракрасном свете экспериментально подтверждена линейная зависимость аккомодации глаза от взвешенной суммы изображений на планах, отстоящих друг от друга на расстоянии до 1 дптр.

Целью предлагаемой работы являются анализ аксиального распределения интенсивности изображений и определение количественных характеристик дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности планов и диаметра зрачка глаза.

**Оптическая схема и сигналы.** На рис. 1 представлена схема наголовного дисплея, включающая в себя микродисплейную матрицу  $P$ , окуляр  $O$  и глаз с сетчаткой  $R$ . Окуляр выполнен в виде тонкой линзы, а в качестве глаза используются модели Эскудеро-Санс, Наварро и Атчисона [7].

Зрительная ось, проходящая через узловую точку глаза и фовеальную ямку сетчатки, пересекает оптическую ось глаза под углом  $5^\circ$ . Свет проникает в глаз через приведённый к роговице входной зрачок диаметром  $a$  миллиметров. Путём гауссовой аподизации входных зрачков учитывается дирекционный эффект Стайлса и Крауфорда [8].

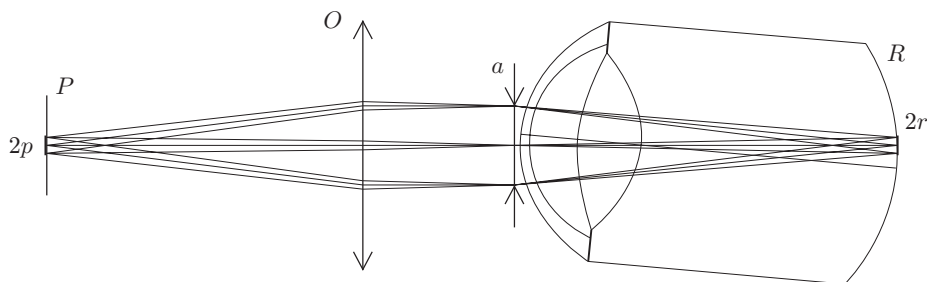


Рис. 1

В работе [5] для анализа аксиальной интенсивности и дифракционной глубины дисплеев применялись точечные источники света. На практике при использовании в наголовных дисплеях матриц типа AMOLED и FLCOS с разрешением от  $800 \times 600$  до  $1920 \times 1200$  пикселей источник света минимального размера — это квадрат со стороной  $2p = 9,6\text{--}15$  мкм. По законам геометрической оптики микродисплейный пиксел проецируется на сетчатку в пиксел изображения — квадратную область со стороной  $2r$ , размер которой можно найти исходя из поля зрения дисплея. Обычно угловые размеры пиксела изображения  $\gamma \approx 2\text{--}3$  угл. мин, ширина пиксела  $2r = \gamma f$ , где  $f$  — фокусное расстояние глаза. При  $f = 16,7$  мм сторона  $2r = 9,7\text{--}14,6$  мкм, т. е. размеры пикселей источника и изображения практически совпадают.

Все последующие расчёты выполнены на основе фурье-оптики с помощью программы оптического конструирования Zemax EE фирмы "Focus Software, Inc." при следующих ограничениях:

- 1) длина волны  $\lambda = 550$  нм, что соответствует самому низкому порогу спектральной чувствительности для фотопического (колбочкового, цветового) зрения [9, с. 157];
- 2) диаметр  $a$  аподизированного зрачка изменяется от 2 до 6 мм;
- 3) полуширина пиксела  $r = 2,5, 5$  и  $7,5$  мкм, что с погрешностью  $<3\%$  соответствует угловому разрешению  $\gamma = 1, 2$  и  $3$  угл. мин.

**Дифракционный анализ изображения.** Геометрическое изображение пиксела на сетчатке в плоскости  $XOY$  показано на рис. 2. Центр пиксела лежит на зрительной оси  $OZ$  в начале координат. Изображение может быть представлено в виде

$$J(x, y) = \begin{cases} I_0 & \text{при } -r \leq x, y \leq r, \\ 0 & \text{при } -r > x, y > r, \end{cases} \quad (1)$$

где  $I_0$  — равномерная по поверхности интенсивность пиксела. Пусть  $h(x, y)$  — системная функция рассеяния точки (ФРТ). Тогда дифракционное изображение пиксела

$$I(x, y) = \iint_{-r}^r h(u, v) J(x - u, y - v) dudv, \quad (2)$$

где оба интеграла имеют одинаковые пределы от  $-r$  до  $r$ . Очевидно, что в центре пиксела при  $x = y = 0$  интенсивность

$$I(0, 0) = I_0 \iint_{-r}^r h(x, y) dx dy, \quad (3)$$

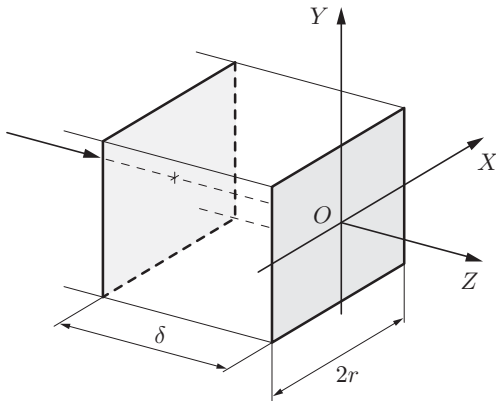


Рис. 2

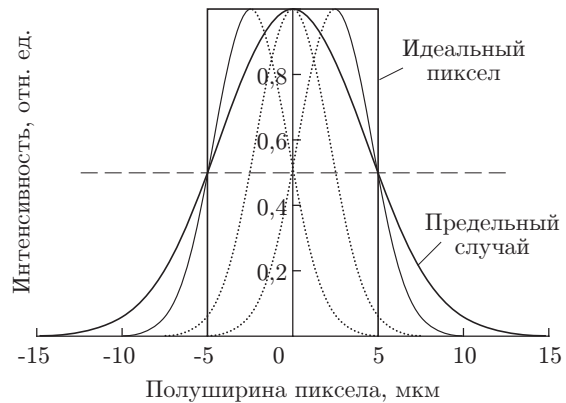


Рис. 3

т. е. на зрительной оси интенсивность равна дифракционной энергии, рассеиваемой в квадрате со стороной  $2r$ . Если пиксел смещается вдоль оси  $Z$  (например, в позицию  $z = -\delta$ , см. рис. 2), то его аксиальная интенсивность

$$I(0, 0, z) = I(z) = I_0 \iint_{-r}^r h(x, y, z) dx dy, \tag{4}$$

где  $h(x, y, z)$  — трёхмерная ФРТ.

В работе [5] исследовано распределение аксиальной интенсивности в системе с точечными источниками света. Показано, что фокусировка на пиковую интенсивность кривой при любых абберациях задаёт местоположение лучшей плоскости изображений. Лучшей в том смысле, что в этой плоскости изображение световой точки (например, звезды) подобно пятну рассеяния Эйри. При этом дифракционная глубина фокуса (ДГФ) соответствует четвертьволновому правилу Рэлея и находится на уровне  $0,81I_0$ . Но в [5] учитывалась интенсивность только центральной точки пиксела в виде  $I_0 h(0, 0, z)$ . Отличие аксиальных точек (4) в том, что их интенсивность пропорциональна энергии, заключённой в пиксельном квадрате. Энергия пиксела растёт, что и приводит, на наш взгляд, к увеличению ДГФ.

Выбор уровня потери пиковой интенсивности для расчёта дифракционной глубины фокуса в исследуемой системе является не решаемой или труднорешаемой аналитически задачей. Поэтому воспользуемся некоторыми допущениями и приближениями. Пусть функции рассеяния нормализованы, фокус изображения находится в точке  $z = 0$ , а размеры пиксела сохраняются на уровне  $0,5I_0$ . Тогда, как показано на рис. 3, «идеальный» пиксел пересекается множеством ФРТ и согласно (2) размывается на своих границах минимальным образом, а интенсивность (4) центральной точки становится максимальной. При удалении пиксела от фокуса за счёт аббераций, вызванных дефокусировкой, ФРТ уширяется и в предельном случае (см. рис. 3) радиус пятна ФРТ на уровне  $0,5I_0$  становится равным полуширине пиксела. Результаты численного интегрирования при этом показывают, что если ФРТ аппроксимирована гауссовой функцией, то в пиксельном квадрате рассеивается  $\sim 70\%$  всей энергии, в то время как вдоль осей  $X$  или  $Y$  интенсивность пропорциональна  $\sim 0,8I_0$ .

Для расчёта распределений интенсивности вдоль зрительной оси (4) в программе Zemax использован оператор концентрации энергии DENF (Diffraction Encircled Energy (Fraction)), который может вычислять долю энергии дифракционного пятна в квадрате,

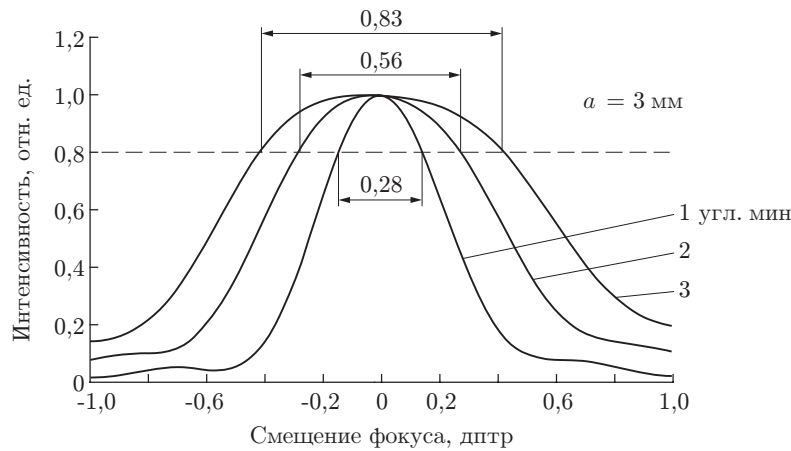


Рис. 4

заданном полушириной  $r$ . Нормализованные результаты расчёта на модели глаза Атчисона для входного зрачка диаметром  $a = 3$  мм показаны на рис. 4. Для перевода смещений фокуса  $\delta$  в диоптрийную метрику применялось известное из [5] соотношение  $\delta$  (дптр) =  $\delta$  (мкм) /  $\{n[f$  (мм)]<sup>2</sup>, где  $n = 1,336$  — показатель преломления стекловидного тела. В качестве предела, который определяет ДГФ, выбрано уменьшение пиковой интенсивности на 20 % (пунктирная линия). Нетрудно видеть, что глубина фокуса увеличивается практически линейно от 0,28 до 0,83 дптр при уменьшении остроты зрения от 1 до 3 угл. мин.

Для подтверждения достоверности исследований проведён дифракционный анализ изображений пиксела с помощью программы Zemax для модели Атчисона. В качестве пиксела использовалась матрица  $7 \times 7$  точек с расстоянием между точками  $5/3$  мкм, так что размер пиксела  $2r = 10$  мкм. Расчёт проводился для изображения в фокусе и при дефокусировке на  $\pm 0,28$  дптр или ДГФ = 0,56 дптр (см. рис. 4) для разрешения 2 угл. мин. Изображения интенсивностей пикселей приведены на рис. 5,  $a, b$  в виде 3D-поверхности и

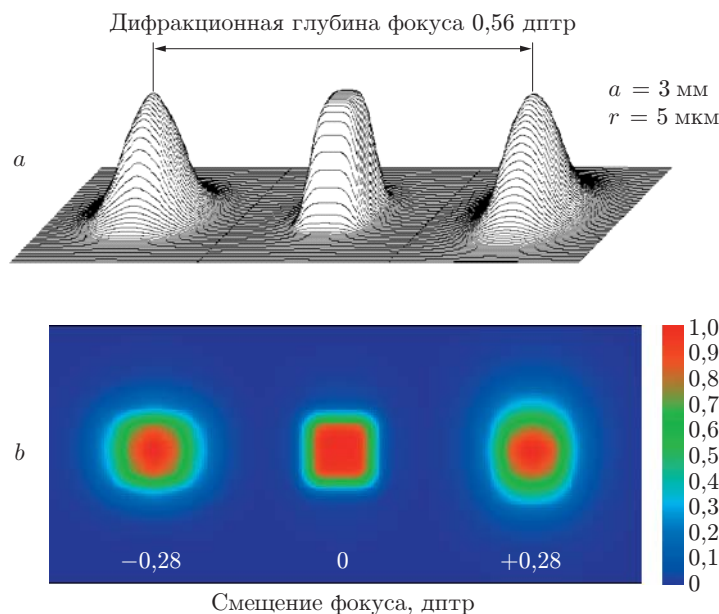


Рис. 5

на плоскости в псевдоцвете. На рис. 5, *a* представлены поверхности рассеяния на «ступеньках» пиксела, которые находятся в согласии с ФРТ на рис. 3. Обратим внимание на то, что гауссова аподизация зрачка и интегрирование хорошо убирают «хвосты» функции рассеяния, поэтому сама ФРТ может быть аппроксимирована функцией Гаусса. При детальном рассмотрении рис. 5, *b* можно обнаружить, что на уровне интенсивности 50 % в пределах дифракционной глубины сохраняются размеры пиксела  $2r$  по горизонтали и вертикали, но уменьшаются размеры по диагонали. Пиксел приближается к округлой форме. Заметен небольшой астигматизм, вызванный поворотом зрительной оси относительно оптической оси глаза. В целом компьютерный эксперимент подтвердил достоверность проведённых исследований.

**Дифракционная глубина фокуса** определялась на двух моделях глаза при длине волны  $\lambda = 550$  нм. Диаметр аподизированного зрачка изменялся от 2 до 6 мм. Разрешение изображений составляло от 1 до 3 угл. мин. Процедура определения ДГФ для заданной модели, зрачка и разрешения состояла в следующем:

1) для выбранного диаметра зрачка  $a$  в согласии с (2) из [5] задавался коэффициент гауссовой аподизации  $G = 0,115(a/2)^2$  для функции  $A(\rho) = \exp[-G(\rho)^2]$ , где  $\rho$  — нормализованный зрачок в программе Zemax;

2) вычислялась функция DENF для заданного размера полуширины пиксела  $r$ ;

3) выполнялась нормализация кривой DENF для получения пиковой интенсивности;

4) на уровне 80 % от пиковой интенсивности по кривой DENF рассчитывалась ДГФ.

Результаты показаны на рис. 6 (кривые 2, 4, 6 — модели Атчисона (1–3 угл. мин соответственно), кривые 3, 5, 7 — модели Наварро (1–3 угл. мин соответственно)). Они дополнены двумя кривыми: дифракционным пределом ДГФ (кривая 1) и данными субъективного эксперимента Кэмпбелла (кривая 8), приведёнными в [10]. Дифракционный предел  $4\lambda/a^2$  получен в [5] для глаза без aberrаций. При зрачках диаметром 2–3 мм и разрешении 1 угл. мин для обеих моделей наблюдается близость ДГФ к предельной. Для зрачков 3–4 мм происходит линейное возрастание ДГФ с уменьшением остроты разрешающей способности. При зрачках 4–6 мм возрастают aberrации, особенно на модели Наварро, диапазон ДГФ сокращается, но закономерность увеличения ДГФ с уменьшением остроты зрения остаётся. Наблюдается хорошее согласие с данными субъективного эксперимента Кэмпбелла при разрешении 2 угл. мин.

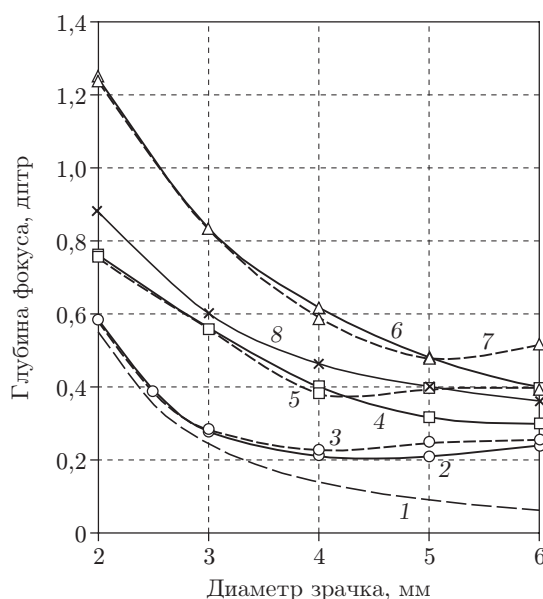


Рис. 6

**Заключение.** В данной работе проведён анализ распределения аксиальной интенсивности изображений, заданных микродисплейными матрицами с характерным размером пикселей от 5 до 15 мкм. Показано отличие аксиальной интенсивности от интенсивности в системах с точечными источниками света, что обусловлено увеличением энергии, заключённой в пиксельном квадрате, по сравнению с энергией в центральной точке пикселя. Проведён дифракционный анализ пиксельных изображений и определены количественные характеристики дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности и диаметра зрачка глаза. Для типового зрачка диаметром 3 мм дифракционная глубина фокуса прямо пропорциональна угловой разрешающей способности и увеличивается от 0,28 до 0,83 дптр при изменении разрешения от 1 до 3 угл. мин.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев А. М., Кравченко Ю. Л., Хрящев С. В. и др. Бифокальный объёмный стереоскопический дисплей // Сб. матер. VII Междунар. науч. конгресса «Гео-Сибирь-2011». Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, Ч. 1. С. 94–97.
2. Ковалев А. М., Власов Е. В. О качестве трёхмерного изображения, стимулирующего аккомодацию глаза // Автометрия. 2012. **48**, № 4. С. 33–40.
3. Akeley K., Watt S. J., Girshick A. R., Vancks M. S. A stereo display prototype with multiple focal distances // ACM Trans. Graph. 2004. **23**, N 3. P. 804–813.
4. Love G. D., Hoffman D. M., Hands P. J. et al. High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display // Opt. Express. 2009. **17**, N 18. P. 15716–15725.
5. Ковалев А. М. О мультифокальных дисплеях, дифракционной глубине фокуса и визуальном комфорте // Автометрия. 2010. **46**, № 3. С. 86–94.
6. Mackenzie K. J., Hoffman D. M., Watt S. J. Accommodation to multiple-focal-plane displays: Implications for improving stereoscopic displays and for accommodation control // Journ. Vision. 2010. **10**(8), N 22. P. 1–20.
7. Bakaraju R. C., Ehrmann K., Papas E., Ho A. Finite schematic eye models and their accuracy to in-vivo data // Vision Research. 2008. **48**, N 16. P. 1681–1694.
8. Applegate R. A., Lakshminarayanan V. Parametric representation of Stiles-Crawford functions: normal variation of peak location and directionality // JOSA. 1993. **10**, N 7. P. 1611–1623.
9. Шиффман Х. Р. Ощущение и восприятие. С.-Пб.: Питер, 2003. 928 с.
10. Сергиенко Н. М. Офтальмологическая оптика. М.: Медицина, 1991. 143 с.

*Поступила в редакцию 28 февраля 2013 г.*