

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

---

УДК 535.317, 629.5.058.74

## ШИРОКОУГОЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С КОМБИНЕРОМ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАММ ДЛЯ НАШЛЕМНЫХ ДИСПЛЕЕВ

© 2008 г. М. А. Ган, доктор техн. наук; С. А. Щеглов; Я. М. Ган; А. С. Чертков

НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: gan@mail.wplus.net

Рассмотрены вопросы проектирования и изготовления широкоугольных оптических систем для нашлемных дисплеев (НД). Определены и проанализированы требования, которые предъявляются к таким системам. Рассмотрены вопросы проектирования ключевых элементов НД – спектрального и поляризационного комбинеров. В качестве спектрального комбинера мы предложили использовать синтезированные объемные голограммы. Выполнены анализ и сравнение оптических и эксплуатационных свойств голографических оптических элементов на основе объемных голограмм, которые были записаны путем регистрации объемной интерференционной картины по методу Ю. Денисюка. Выполнено исследование цветных искажений внешнего пространства при наблюдении через комбинер. Рассмотрены вопросы синтеза проекционного объектива. Приведены результаты проектирования, анализа и испытания оптических систем для НД.

Коды OCIS: 110.0110, 090.0090.

*Поступила в редакцию 25.09.2007.*

### Введение

Широкоугольные оптические коллиматорные системы совместно с малогабаритными формирователями изображения применяются для отображения на бесконечности информационной картины, которая накладывается на изображение, видимое непосредственно наблюдателем. Нашлемные широкоугольные дисплейные системы в настоящее время находят применение в различных системах виртуальной реальности, системах пилотирования, обучения и т. д.

Поскольку оптическая система нашлемного дисплея (НД) работает по принципу окуляра (т. е. формирует изображение на практической бесконечности), такие системы относят к классу систем ретинальной проекции, независимо от типа формирователя изображения (матричный, сканирующий).

К широкоугольным следует относить системы, которые имеют поле зрения  $20^\circ$  и более.

Первые поколения таких систем в качестве формирователей изображения использовали миниатюрные электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), которые требуют применения высокого напряжения, что затрудняет их широкое применение.

В настоящее время более перспективными представляются низковольтные формирователи изображения, просветные на основе технологии TFT (Thin Film Transistor) и отражательные на основе технологии LCOS (Liquid Crystal on Silicon).

Применение малогабаритных матричных формирователей изображения выдвигает следующие требования к проектированию широкоугольных оптических коллиматорных дисплеев:

НД должен обеспечивать проекцию изображения с высоким разрешением (1280 пикселей в строке и более) в широком поле зрения порядка  $30^\circ$ – $40^\circ$  и более;

НД должен иметь малую массу, и при этом особенно важно не допускать существенного смещения центра масс;

при наблюдении внешней картины НД не должен значительно снижать пропускания или вносить сильное изменение цвета наблюдаемого изображения внешнего пространства.

В настоящей работе рассматриваются принципы построения оптической системы широкоугольного дисплея с высокоразрешающим LCOS-формирователем изображения для использования в различных нашлемных системах.

## 1. Оптические схемы широкоугольных дисплеев

Оптическая система широкоугольного дисплея строится по двум принципиальным схемам: системы с промежуточным изображением и без промежуточного изображения (предмет проецируется непосредственно на бесконечность).

Системы на основе схемы с промежуточным изображением состоят из двух основных частей – проекционной оптической системы (англ. *relay lens*) и комбинера (англ. *combiner*). Проекционная оптическая система передает изображение с источника информации (матрицы) в фокус комбинера и согласует положение выходного зрачка системы. Комбинер обеспечивает отображение информации от источника в поле зрения одновременно с возможностью наблюдения внешнего пространства.

На ранних этапах разработок и применения в кабинных и нашлемных дисплеях использовались осесимметричные оптические системы с плоским комбинером. Современные широкоугольные оптические системы, как правило, используют комбинер как силовой оптический элемент, который обеспечивает значительный вынос зрачка и уменьшение общих габаритных размеров системы.

Оптические системы широкоугольных дисплеев по типу построения можно разделить на три вида: осесимметричные, псевдоосесимметричные (построены на основе осесимметричных систем с применением плоских ломающих зеркал), неосесимметричные.

Как правило, в осесимметричных и псевдоосесимметричных системах удастся хорошо исправить аберрации, в том числе и дисторсию. Неосесимметричные системы, как правило, имеют значительную трапецеидальную дисторсию (англ. *keystone distortion*) – геометрическое искажение изображения, вызываемое неперпендикулярностью оси проекции относительно плоскости наблюдения. Коррекция такой дисторсии на формирователе изображения в виде ЭЛТ возможна, однако затруднительна на матричных источниках, которые имеют фиксированный растр.

Дополнительным требованием, которое налагает использование формирователя изображения в виде LCOS-матрицы, является обеспечение телецентрического хода лучей в пространстве предметов и большого заднего отрезка для размещения элементов осветительной системы матрицы.

Для проектирования и моделирования широкоугольной оптической системы НД мы использовали программный комплекс WinDEMOS [1–8], с помощью которого проводилась оптимизация, анализ аберраций и дифракционной эффективности, моде-

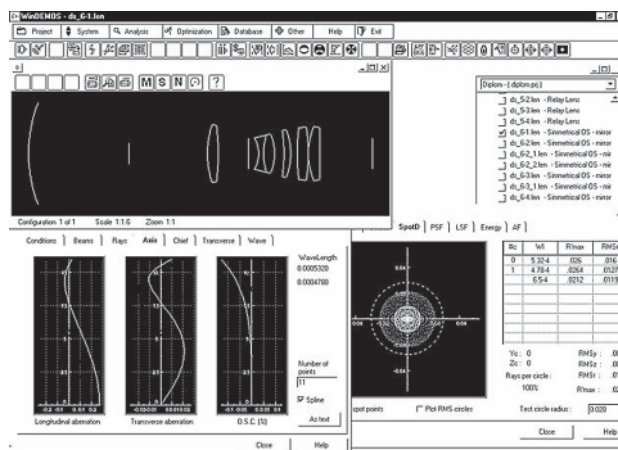


Рис. 1. Осесимметричная оптическая система широкоугольного дисплея.

лирование дисторсионных искажений и другие расчеты, необходимые для создания НД.

Для расчета мы применили центрированную оптическую систему, которая показана на рис. 1, которая с помощью плоского светоделивателя была преобразована в псевдоцентрированную.

## 2. Комбинеры

Важным элементом широкоугольной оптической системы является комбинер.

Начиная с 80-х годов прошлого века в кабинных дисплейных системах начали применяться голографические комбинеры. Такие комбинеры были сделаны на основе объемных голограмм, записанных во встречных пучках по методу Ю. Денисюка. Подобные голографические оптические элементы (ГОЭ) имеют высокий коэффициент селективного отражения для рабочей длины волны излучения и в то же время обеспечивают высокий коэффициент пропускания для остальных длин волн. Это позволяет использовать такие элементы в качестве спектральных комбинеров в широкоугольных дисплейных системах, формирующих монохромное изображение.

Теория расчета и условия коррекции аберраций широкоугольных ГОЭ были рассмотрены в работах [1, 2].

При дифракции света с длиной волны  $\lambda$  на объемной голографической решетке, которая записана в толстом слое чувствительного к свету материала путем регистрации интерференции лучей  $S'_0$  и  $S_0$  на длине волны  $\lambda_0$ , направления падающего  $S$  и дифрагировавшего пучка лучей  $S'$  связаны обобщенным уравнением преломления и дифракции луча, которое графически показано на рис. 2,

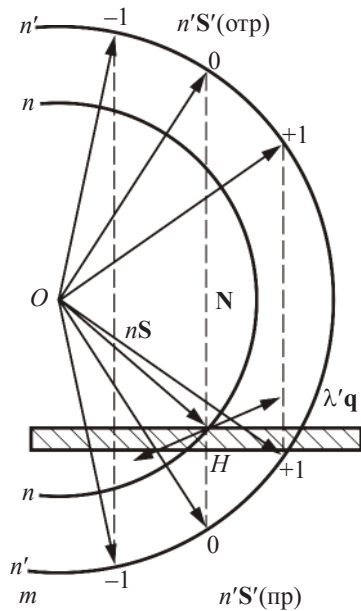


Рис. 2. Иллюстрация к обобщенному уравнению преломления и дифракции луча на голограмме.

$$n'S' = nS + m\lambda'q + \gamma N, \quad (1)$$

где  $n$  и  $n'$  – соответствующие показатели преломления,  $m$  – номер дифракционного порядка,  $N$  – единичный вектор нормали к поверхности голограммы,  $\gamma$  – нормирующий скалярный множитель,  $q$  – вектор локальных пространственных частот объемной голограммы.

Дифракционная эффективность при преобразовании луча голограммой зависит от величины отклонения по условию Брэгга:

$$\Delta\beta = \gamma. \quad (2)$$

В программе WinDEMOS [1] реализованы различные модели описания дифракционной эффективности при трассировке лучей через голограмму (модель Борна, Когельника и другие модели).

Хотя теория Борна является приближенной, она адекватно описывает базовые закономерности, которые необходимы для прогнозирования спектральной и угловой селективностей объемных голограмм, особенно если использовать не геометрическое, а эффективное значение толщины слоя.

Дифракционная эффективность  $\eta$  объемной голограммы в приближении Борна описывается следующим соотношением:

$$\eta = \text{sinc}^2\left(\frac{k\Delta\beta d}{2}\right), \quad (3)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\Delta\beta$  – отклонение от условия Брэгга,  $d$  – эффективная толщина отражающей голограммы.

Голограммные оптические элементы, используемые в качестве комбинеров, записываются в слое бихромированного желатина и обладают высокой чувствительностью к влаге. Для защиты их заклеивают между двумя стеклами. Это приводит к существенному увеличению массы оптических деталей.

Для широкоугольных наשלмных оптических систем весьма важно снижение массы и габаритов всех оптических элементов, в том числе и комбинеров.

Анализ показывает, что многослойные интерференционные покрытия обладают весьма близкими к голограмме оптическими свойствами. Их можно назвать синтезированными объемными голограммами (СГОЭ).

На рис. 3а и 3б показаны угловое и спектральное распределения дифракционной эффективности объемной голограммы с эффективной толщиной 11,2 мкм.

На рис. 3в и 3г показаны распределения дифракционной эффективности ГОЭ и многослойного интерференционного покрытия (ЗНЗВ)<sup>28</sup> с аналогичными характеристиками.

Расчеты показывают, что объемная голограмма имеет менее выраженные побочные максимумы и осцилляции в распределении дифракционной эффективности. Однако при соответствующей оптимизации полосовой многослойный фильтр может иметь очень близкие характеристики, которые позволяют использовать его в качестве комбинера в наשלмной дисплейной системе, формирующей монохроматическое изображение. В таких системах (с использованием в качестве формирователя изображения LCOS-матрицы) для получения высокой яркости мы применяли осветительные системы на основе мощных светодиодов.

Общий вид широкоугольного НД на основе LCOS-матрицы показан на рис. 4. Технические характеристики приведены в табл. 1.

В ходе проектирования были выполнены анализ и минимизация цветовых искажений при наблюдении внешнего пространства через комбинер.

Были исследованы синтезированные многослойные комбинеры с полосой пропускания 20 и 40 нм при  $\lambda_{\text{max}}$  525 и 545 нм (табл. 2).

Как видно из табл. 2 и рис. 5, при ширине полосы спектра отражения 20 нм и менее цветные искажения становятся малозаметны. Применение светодиодов с максимумом излучения 525 нм также позволяет уменьшить цветовые искажения при наблюдении внешнего пространства.

Кроме спектрально-селективного комбинера, имеющего оптическую силу, в псевдоосесимметричной оптической системе широкоугольного дисплея используется плоский светоделитель.

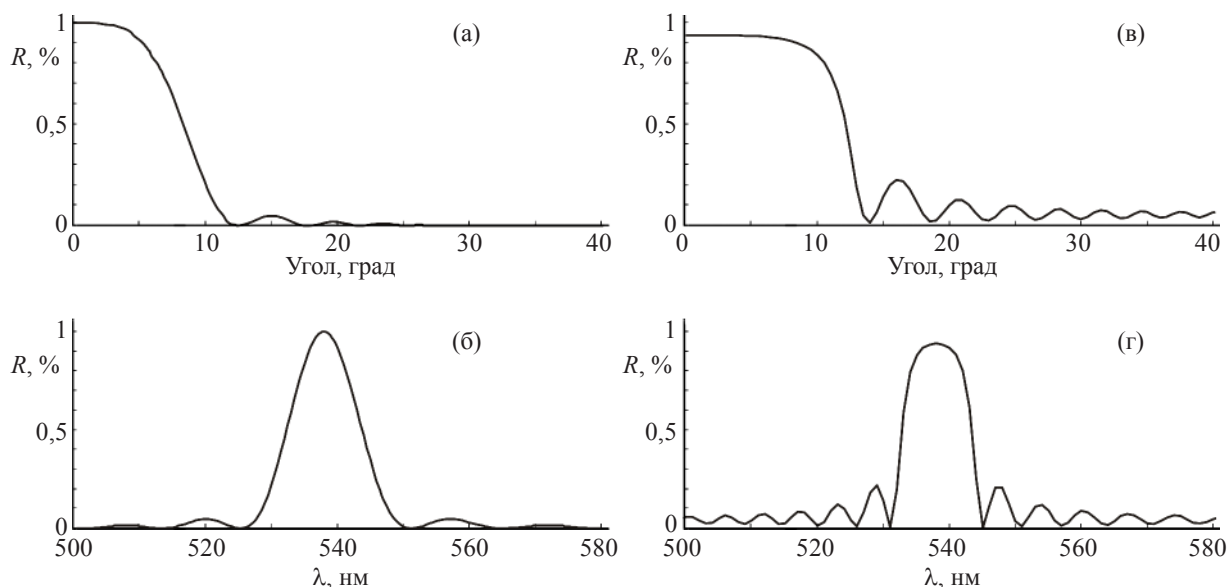


Рис. 3. Спектральные и угловые характеристики ГОЭ (в, г) и СГОЭ (а, б).

Нами были исследованы два вида плоских светоделителей: нейтральный (коэффициент отражения одинаков для рабочего спектра волн) и поляризационный.

Поскольку LCOS-матрица работает в поляризованном свете, применение поляризационного светоделителя представляет большой интерес. Теоретически и экспериментально показано, что применение поляризационного светоделителя в сочетании с четвертьволновой пластинкой, которая установлена между светоделителем и комбинером, позволяет

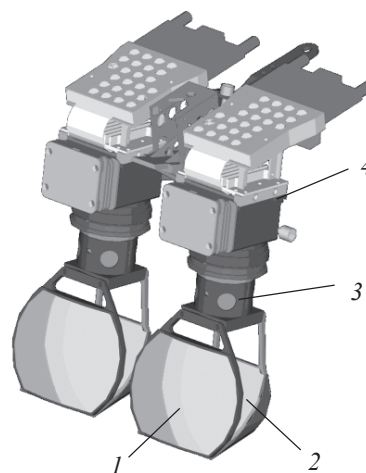


Рис. 4. Общий вид нашлемного широкоугольного дисплея. 1 – комбинер, 2 – светоделитель, 3 – проекционный объектив, 4 – LCOS-формирователь изображения.

Таблица 1. Технические характеристики широкоугольного НД

Тип	Бинокуляр
Поле зрения, град	30×40
Яркость, кд/м <sup>2</sup>	2000
Масса, г	350
Размеры LCOS-матрицы, пиксел	1280×1024
Цвет изображения	монохромный (зеленый)
Разрешение, пиксел	1

Таблица 2. Характеристики многослойных покрытий комбинера

Полуширина пропускания, нм	$\lambda_{\max}$ , нм	Цветовые координаты			$\tau_{\text{внешн}}$ , %	$\rho_{\lambda_{\max}}$ , %
		X	Y	Z		
Узкий 20	525	0,345	0,301	0,354	79,43	85–98
	545	0,339	0,294	0,367	72,1	85–98
Широкий 40	525	0,36	0,265	0,375	65,86	85–98
	545	0,341	0,248	0,411	51,49	85–98

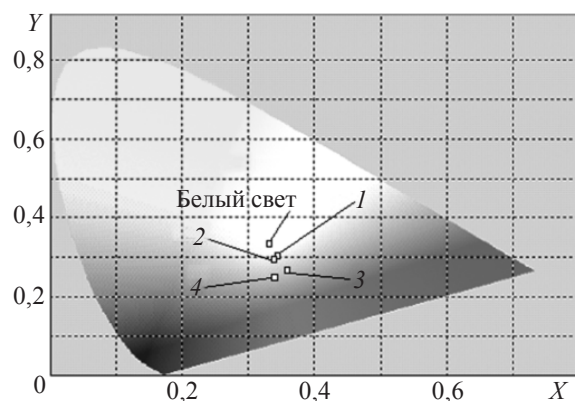
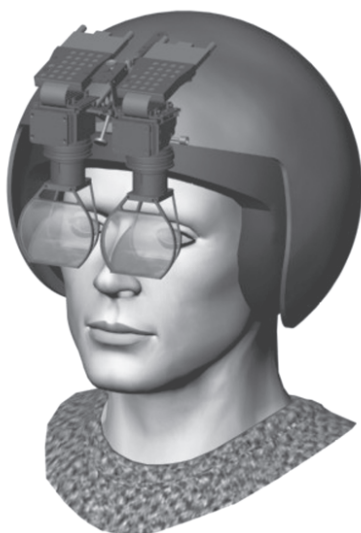
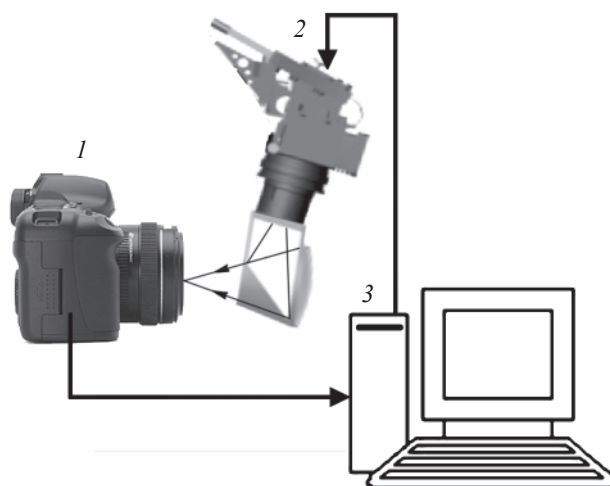


Рис. 5. Цветовые координаты покрытия. 1 – узкого покрытия (20 нм),  $\lambda_{\max} = 525$  нм; 2 – узкого покрытия,  $\lambda_{\max} = 545$  нм; 3 – широкого покрытия (40 нм),  $\lambda_{\max} = 525$  нм; 4 – широкого покрытия,  $\lambda_{\max} = 545$  нм.



**Рис. 6.** Общий вид 3D-модели разработанного на-шлемного дисплея.



**Рис. 7.** Принципиальная схема тестирования НД. 1 – цифровая камера, 2 – тестируемый НД, 3 – компьютер.

повысить в 1,5–2 раза пропускание в канале индикации в поляризованном свете.

Однако такое решение требует применения дополнительного оптического элемента, что увеличивает массу узла комбинера.

### 3. Особенности проектирования широкоугольного дисплея

При проектировании широкоугольного дисплея возникает сложная проблема компоновки оптической системы на шлеме и взаимного согласования оптических и механических элементов. При этом требуется многократная передача данных между программами оптического и механического проектирования. Для успешного решения этих задач комитетом ISO TS172/W4 разрабатывается проект стандарта для электронной передачи данных об оптических системах. Принципы построения стандарта и его современное состояние отражены в [9, 10]. Нами был разработан, реализован и успешно использован проект этого стандарта при проектировании дисплейных систем. Общий вид 3D-модели разработанной на-шлемной дисплейной системы показан на рис. 6.

### 4. Тестирование НД

Методика тестирования и юстировки оптических систем дисплеев с вынесенным зрачком на основе анализа дистогрмм (тестовых изображений для оценки дисторсионных искажений) была изначально разработана для тестирования кабинных диспле-

ев. Методика была модернизирована для тестирования НД [8]. На рис. 7 показана схема регистрации и анализа дистогрмм для НД.

Кроме дисторсии, методика позволяет проводить проверку разрешающей способности, конвергенции, дивергенции и углового рассогласования осей монокуляров, а также пропускания по каналу внешнего пространства, яркости формируемого изображения и контроль бликов.

### Заключение

Разработанная оптическая система широкоугольного дисплея может быть использована для создания на-шлемных дисплеев различного назначения.

При проектировании оптико-механической системы на-шлемного дисплея и его компоновке впервые был реализован проект стандарта электронной передачи данных NODIF.

Показано, что синтезированные многослойные структуры по своим оптическим свойствам могут быть весьма близки к объемным голограммам и позволяют использовать их в качестве комбинеров.

При тестировании и юстировке оптической системы на-шлемного дисплея был использован метод, основанный на цифровой регистрации и компьютерном анализе дистогрмм.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ган М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. Л.: ГОИ, 1984. 140 с.

2. *Gan M.* Optical systems with holographic and kinoform elements // Proc. SPIE. 1989. V. 1136. P. 150–153.
  3. *Gan M., Zhdanov D., Novoselskiy V., Ustinov S., Fedorov A., Potyemin I., Bezdidko S.* Design of optical systems with HOE by DEMOS program // Proc. SPIE. 1991. V. 1574. P. 254–260.
  4. *Gan M., Zhdanov D., Novoselskiy V., Ustinov S., Fedorov A., Potyemin I.* DEMOS: state-of-the-art application software for design, evaluation, and modeling of optical systems // Opt. Engin. 31(04). 1992. P. 696–700.
  5. *Gan M., Zhdanov D., Novoselskiy V., Ustinov S., Fedorov A., Potyemin I.* DEMOS: new possibility for design and modeling of complex optical systems // Proc. SPIE. 1993. V. 1780. P. 517–522.
  6. *Gan M., Zhdanov D., Novoselskiy V.* New features of DEMOS software for design of optical systems with nonconventional optical elements // Proc. SPIE. 1994. V. 2169. P. 120–125.
  7. *Gan M., Zhdanov D., Novoselskiy V., Ustinov S., Fedorov A., Potyemin I., Starkov A., Smirnov S.* DEMOS III: new possibilities // Proc. SPIE. 1995. V. 2540. P. 190–196.
  8. *Gan M., Gan I., Tchertkov A.* Design and testing large FOV retinal displays on the basis holographic combiner // Proc. Asia Display (IMID'04). 2004. P. 442–445.
  9. *Ган М.А., Ларионов С.А.* Разработка стандарта обменного файла для описания оптических элементов и систем // Сборник тр. VII Междунар. конф. “Прикладная оптика-2006”. СПб., 2006. Т. 3. С. 74–93.
  10. *Prudence M J H Wormell.* The Current State of the International Standard for Exchange of Optical Data in Electronic Form // Proc. SPIE. 2006. V. 6342.
-