

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.3, 535.8

## ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ВИРТУАЛЬНЫХ ДИСПЛЕЕВ

© 2013 г. А. В. Бахолдин, канд. техн. наук; В. Н. Васильев, доктор техн. наук; В. А. Grimm;  
Г. Э. Романова, канд. техн. наук; С. А. Смирнов, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru, romanova\_g\_e@mail.ru, mopsat@mail.ru, sma46@mail.ru

Современные оптические системы виртуальных дисплеев организованы на разных принципах, в том числе голографических, геометрических, дифракционных. В статье рассмотрены наиболее распространенные типы и особенности этих систем.

*Ключевые слова:* системы индикации, волноводные структуры, комбинер.

Коды OCIS: 080.1238, 350.4600, 090.2820.

*Поступила в редакцию 06.02.2013.*

В условиях современного быстро меняющегося мира все большее применение находит технология виртуальных дисплеев, названных так поскольку пользователь видит изображение, созданное системой, “висящим” в воздухе перед ним [1–7]. Такие системы также носят название систем индикации.

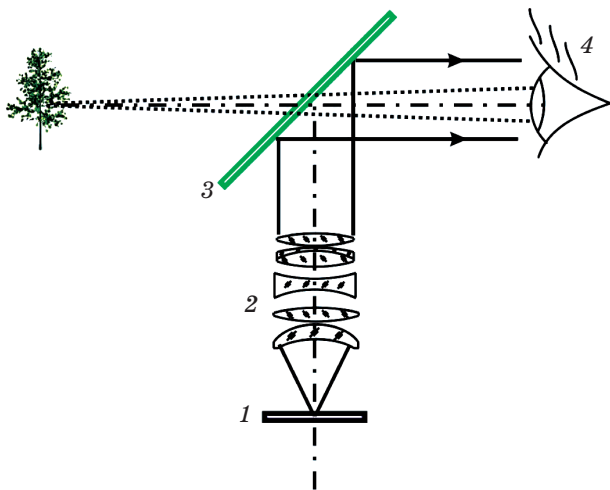
Системы индикации представляют собой комплексную оптическую систему, позволяющую отображать в поле зрения оператора дополнительную информацию, например, направление движения, скорость и высоту полета наблюдаемого объекта. Устройства такого типа могут быть прозрачными (просветными), когда дополнительная информация накладывается на изображение внешнего пространства, или непрозрачными. В последнем случае система создает некоторое “виртуальное пространство”, что используется чаще всего в игровой и развлекательной индустрии или для обучающих целей. Данная статья посвящена рассмотрению систем “просветного” типа.

Дисплеи второго типа, прозрачные, позволяющие видеть в поле зрения, в дополнение к основному изображению объекта, множество дополнительной информации, применяются как для военных целей (в авиации, при ведении боевых операций), так и для гражданских, например, в медицине, в технике, в системах “дополненной реальности” [1–3, 5]. Такие системы получили название “Head-Up-Display”,

то есть “дисплеи поднятой головы”, поскольку позволяют не переводить взгляд на шкалы и индикаторы, что позволяет оперативно реагировать на изменение внешней обстановки.

Системы индикации информации можно разделить также на нашлемные и кабинные. Первая группа представляет собой относительно компактное устройство, надеваемое непосредственно на голову или шлем или закрепляемое на оправе очков. Оптическая система при этом располагается вблизи глаз наблюдателя.

Вторая группа дисплеев размещается в кабине самолета или автомобиля. Дисплеи этого типа могут формировать изображение как на конечном расстоянии, так и на бесконечности. Системы, формирующие изображение на конечном расстоянии, действуют по принципу проекционной системы [8, 9]: создают изображение шкал, меток и цифр в области лобового стекла, на которое нанесено покрытие, рассеивающее излучение. В этом случае оператор должен для рассматривания информации перефокусироваться на это изображение, хотя при этом и нет необходимости опускать голову. Такими системами иногда снабжают автомобильные салоны, а на лобовом стекле высвечивается информация о скорости автомобиля. В гражданской и военной авиации такие системы не применяются, поскольку доли секунды, требующиеся для перефокусировки на другое расстояние, могут быть критическими. В этом



**Рис. 1.** Схема системы отображения информации. 1 – генератор символов (экран электронно-лучевой трубки или микродисплей), 2 – объектив, 3 – комбинер, 4 – глаз наблюдателя.

случае оптическая система должна создавать изображение на бесконечно большом расстоянии, чтобы оператор одновременно видел и внешнее пространство, и дополнительную информацию без перефокусировки. Такие системы должны не препятствовать обзору внешнего пространства и позволять видеть дополнительную информацию от генератора символов с достаточным контрастом даже в солнечный день.

Оптические системы виртуальных дисплеев чрезвычайно разнообразны по назначению, характеристикам и физическим принципам

[2–17]. На рис. 1 схематично показана оптическая система виртуальных дисплеев.

В составе оптической системы для индикации информации можно выделить несколько составных частей: генератор символов, объектив, который обеспечивает формирование изображения генератора символов, и так называемый комбинер, то есть элемент, который обеспечивает отражение части излучения, идущего от генератора символов, в направлении к наблюдателю. На рис. 1 показан случай плоского комбинера, но он также может быть реализован как силовой компонент в канале индикации.

Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) – исторически первые системы, использованные для полноценной индикации информации. В наплевных вариантах это миниатюрные ЭЛТ (диаметр 10–20 мм, длина 75–100 мм, масса 45–75 г.) [3, 4, 21]. Такие источники изображения обеспечивают значительную яркость изображения, что обычно представляет серьезную проблему с другими генераторами изображения. К их недостаткам относится сравнительно большая длина, высокое потребление энергии и питающее напряжение. Поэтому в современных системах индикации все чаще используют жидкокристаллические и светодиодные микродисплеи [19]. К микродисплеям относят все миниатюрные (с диагональю меньше 1 дюйма) матричные генераторы изображения. В таблице приведены некоторые характеристики микродисплеев [20, 21].

#### Свойства микродисплеев для систем индикации

Тип	AMLCD	OLED	LCOS	FLCOS
Производитель	Kopin	Emagin	Brilliant	Forth dimension
Диагональ (дюйм)	0,97"	0,61"	0,75–0,86"	0,88"
Разрешение (пиксели)	1280×1024	800×600	1600×1200	1280×1024
Глубина модуляции	100:1	100:1	2000:1	200:1
Размер пикселя (мкм)	15×15	15×15	9,5×9,5	13,4×13,4
Скорость переключения (мс)	<30	<1	11	0,04
Частота (Гц)	60	До 85	До 120	60
Разрядность цвета (бит)	24	24	Нет данных	24
Способ подсветки	Просветная	Самоизлучающая	Отражательная	Отражательная
Яркость (кд/м <sup>2</sup> )	≈100	70–200	>1000, зависит от светового устройства	До 1000, зависит от светового устройства
Оптическая эффективность	<15%	Нет данных	70%	60–70%

Технология использования жидких кристаллов позволяет сформировать изображение с достаточно большим разрешением, однако, как видно из таблицы, микродисплеи отличаются прежде всего схемой организации подсветки, быстродействием и обеспечиваемым контрастом.

В системах индикации в качестве генератора изображения могут использоваться микродисплеи на органических светодиодах (OLED – Organic Light Emitting Device), при этом дополнительной системы подсветки не требуется, но при использовании этого типа генератора изображения трудно обеспечить необходимую высокую яркость изображения. Кроме того, время работы таких систем по сравнению с остальными невелико [4, 21]. Также используются AMLCD (Active Matrix Liquid Crystal Display – жидкокристаллический дисплей с активной матрицей) [22] и LCOS (Liquid Crystal on Silicon – жидкие кристаллы на кремнии) [19–21].

Дисплеи FLCOS (Ferroelectric Liquid Crystal on Silicon – ферроэлектрические жидкие кристаллы на кремнии) по сравнению с остальными генераторами изображения имеют быстрый отклик (до единиц микросекунд). Особенностью таких систем является требуемая дополнительная система подсветки, то есть такие микродисплеи несамосветящиеся [19, 20]. Обычно подсветка таких дисплеев организуется за счет системы освещения, в которой используется дополнительная призма-куб со светоделительной гранью. Еще одной отличительной чертой таких систем является то, что они работают с поляризованным излучением. Это позволяет за счет рационально организованной системы подсветки и формирования изображения повысить эффективность использования светового потока в системе [20].

Объективы проекционных систем индикации информации представляют собой репродукционные объективы, достаточно сложной конструкции, обеспечивающие необходимый масштаб символов в пространстве перед наблюдателем, например, на лобовом стекле.

Блок формирования изображения для наплемных виртуальных дисплеев, а также для кабинных систем индикации информации представляет собой так называемый коллиматорный объектив, чаще всего со значительно вынесенным зрачком. Схемы объективов чрезвычайно разнообразны и сильно зависят от типа используемого генератора изображения,

схемы его подсветки, назначения системы, ее углового поля и т. п. Оптические схемы могут представлять собой как традиционные осесимметричные системы, так и системы, использующие децентрированные элементы и элементы без осевой симметрии [4, 6, 7, 21, 23–26], в том числе внеосевые зеркала. Направление развития оптических систем для наплемных и кабинных дисплеев как проекционного, так и коллиматорного типа, – упрощение конструкции, снижение затрат на изготовление, сокращение габаритов и повышение качества изображения.

Важной частью оптических систем виртуальных дисплеев является комбинер. Комбинер представляет собой устройство, которое устанавливается непосредственно на линии визирования оператора, как следствие, он должен быть достаточно прозрачен, чтобы не затруднять визуальную работу наблюдателя, то есть коэффициент пропускания для дневного света должен составлять 70–80%. В этом случае для обеспечения необходимого контраста символов на фоне внешнего пространства в системах виртуальных дисплеев требуется обеспечить высокую яркость излучения генератора символов, что, как упоминалось выше, является отдельной достаточно сложной задачей.

По принципу действия комбинеры могут быть голографическими, дифракционными, призматическими, с селективным отражающим покрытием. Наиболее очевидным способом организации деления светового потока на поверхности комбинера является нанесение узкополосного отражающего покрытия, у которого пик отражающей способности приходится на спектральный максимум излучения генератора символов [6]. В случае, если необходимо иметь цветное изображение для повышения информативности системы, предлагается использовать сложное покрытие, имеющее пики отражательной способности на трех основных длинах волн [27]. Системы, организованные по такому принципу, имеют сравнительно большие габариты, поскольку для обеспечения необходимого размера зрачка (зрачковой зоны) и поля оптическая система, формирующая изображение, должна иметь диаметр выходного зрачка не менее требуемого [3, 6].

Возможным способом обеспечения избирательной отражающей способности комбинера является применение отражающих голограмм [3, 7, 18]. Голограмма записывается в фоточувствительной среде двумя когерентными

лазерными пучками. Материал голограммы хрупок, поэтому его необходимо защищать от внешних механических воздействий, из-за этого голографический комбинер представляет собой систему из двух слоев стекла, между которыми находится среда с записанной голограммой [3, 28].

Отражательная способность голографических комбинеров сильно зависит от угла падения и длины волны, что препятствует созданию прежде всего цветных дисплеев. Зависимость от угла падения приводит к ограничению поля зрения, в пределах которого комбинер эффективно отражает свет. Обычно голограмма является высокоэффективным отражателем только для света, падающего под определенным углом, при отклонении угла падения света от оптимального отражающая способность комбинера резко падает, а для лучей, углы падения которых отличаются от расчетных более чем на  $8-10^\circ$ , голографический комбинер практически прозрачен. Как правило, из-за всех особенностей голографических элементов поле зрения в системах с голографическими структурами не превышает  $\pm(6^\circ-8^\circ)$  [15, 17]. Синтезированная голограмма имеет более высокий коэффициент отражения, что позволяет получить эффективное отражение в более широком диапазоне углов падения света. Следствием этого является лучшая равномерность яркости в пределах рабочей зоны и более высокая прозрачность.

Для обеспечения работы с цветным изображением голографические системы должны включать две или три голограммы, кроме того, для обеспечения равномерности освещения по полю голографические элементы должны иметь разную дифракционную эффективность (переменный шаг структуры), что представляет технологические трудности. Системы с голографическими комбинерами из-за сложности их изготовления по возможности стараются заменить на системы с особыми покрытиями, которые более долговечны и менее чувствительны к изменению углов наклона.

К системам призматического типа можно отнести устройства, показанные на рис. 2. Устройство на рис. 2 [12] представляет собой поверхность типа линзы Френеля. Профиль ступеней подбирается таким образом, чтобы свет, идущий от генератора изображений, отражался от поверхности по направлению к наблюдателю, а свет, идущий от внешнего пространства, проходил практически без измене-

ний. Указывается, что в таком случае можно достичь необходимого соотношения световых потоков: от внешнего пространства проходит 70% света, 30% отражается от профиля. Соответствующим образом рассчитанный профиль штрихов несимметричной частично-гладкой поверхности линзы, как утверждается, позволяет не только наблюдать изображение и внешнюю среду одновременно, но и не дает бликовой засветки и двоения изображения, что является частой проблемой отражательных комбинеров.

Примерные параметры системы такого типа, приводимые в [12]: при наклоне  $45^\circ$  относительно горизонтальной оси, расстоянии от линзы до глаза наблюдателя 800 мм, размер зрачковой области 60 мм, показатель преломления элемента 1,49 (полиметилметакрилат), размер отдельного элемента (ступени) около 0,3 мм, но не менее 0,01 мм. Такой элемент также может выполнять силовую функцию.

Несмотря на относительную простоту такого устройства и теоретическую обоснованность его работы данные о реализации на практике систем такого рода отсутствуют. Профиль линзы Френеля в этом случае, очевидно, должен быть достаточно сложным и при этом структура очень миниатюрна и должна быть изготовлена с высокой точностью, чтобы обеспечить свойства такого элемента, близкие к теоретическим – достаточное для наблюдения отражение, пропускание света от внешнего пространства, отсутствие двоения изображения и бликов.

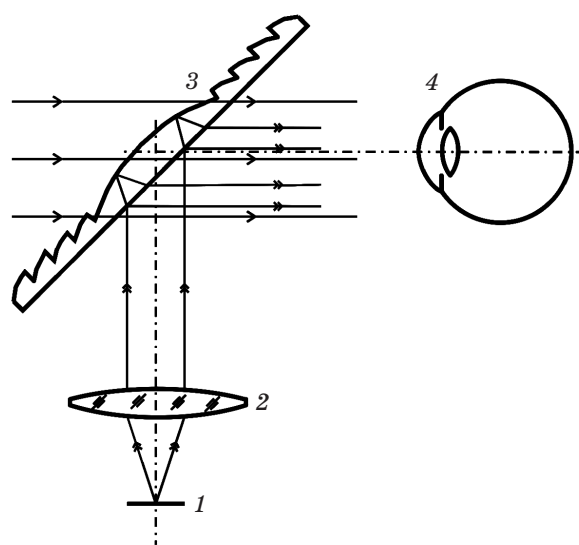


Рис. 2. Комбинер с поверхностью типа линзы Френеля. 1 – генератор символов, 2 – объектив, 3 – линза Френеля, 4 – глаз наблюдателя.

Направление излучения в сторону наблюдателя можно выполнить также за счет нанесения частично отражающей структуры на поверхность световодного элемента (рис. 3). С использованием такого рода устройств можно получить поле зрения  $24^\circ \times 18^\circ$ .

Устройство, показанное на рис. 3, представляет собой световод, на участок которого нанесен профиль с частично отражающим покрытием, что позволяет вывести часть света по направлению к наблюдателю [16]. Отражающая структура может быть нанесена как на плоскую поверхность, так и на сферическую или асферическую. В [16] приводятся некоторые параметры такой структуры: размер ступеней 500 мкм, наклон ступеней  $25,5^\circ$ , толщина комбинера 2–5 мм. Коэффициент отражения поверхностей может быть постоянным и принимать значения 0,1–0,3.

В такой схеме можно подобрать оптимальную область расположения глаз наблюдателя таким образом, чтобы освещенность в пределах поля менялась не более чем на 30%, что обеспечивает комфортное наблюдение. В качестве альтернативного метода выравнивания освещенности в пределах поля можно наносить покрытия с переменным коэффициентом отражения.

Такая структура при ее использовании в качестве комбинера позволяет сократить габариты системы и является достаточно технологичной. Однако, не сообщается о размерах зрачковой зоны, достигаемой при приемлемых габаритах объектива, формирующего изображение, и толщине комбинера. Создание виртуального дисплея с использованием системы такого типа для кабинного применения с достаточными размерами зрачковой зоны представляется затруднительным. При разработке устройства с элементами такого типа, могут возникнуть сложности обеспечения необходимой яркости и контраста изображения символов, а также двоение изображения и бликовые засветки.

Одним из возможных решений комбинера для создания компактных виртуальных дисплеев является элемент, который представляет собой набор призм с селективно отражающими покрытиями [13, 14]. В таких системах предложено выводить свет за счет отражения от покрытий, нанесенных на грани призматических элементов составного экрана комбинера. Покрытие работает с одним из состояний поляризации (чаще *P*-поляризацией). График

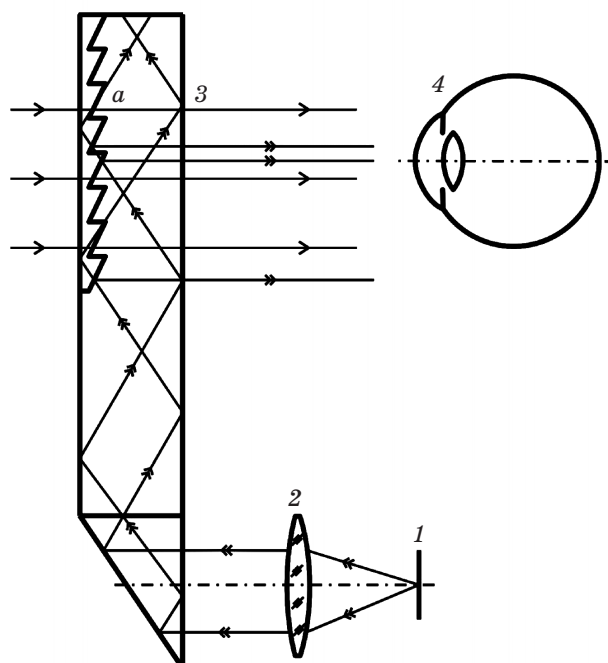


Рис. 3. Система со световодным элементом и отражающей структурой.

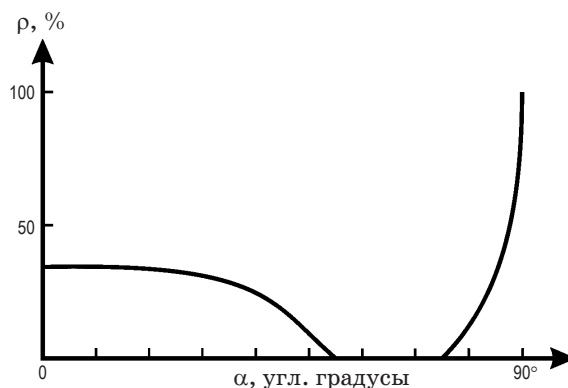
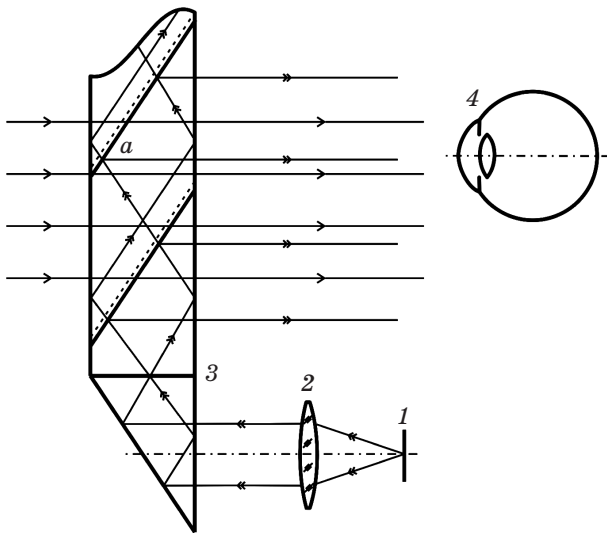


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от угла для покрытия граней призматических элементов.

отражающей способности для возможного покрытия в зависимости от угла падения показан на рис. 4 (для *P*-поляризации).

На рис. 5 показана принципиальная схема устройства согласно патенту [13]. Параллельный пучок света от коллиматорного объектива, попадает на гипотенузную грань призмы, которая должна иметь максимальный коэффициент отражения, чтобы обеспечить максимальную эффективность ввода излучения в световод. На поверхности раздела *a* излучение, угол падения которого на поверхность составляет малую величину, испытывает частич-



**Рис. 5.** Система с составным призматическим комбинером. 1 – генератор символов, 2 – коллиматорный объектив, 3 – комбинер, а – границы призматических элементов с нанесенным селективным покрытием, 4 – глаз наблюдателя.

ное отражение. Отраженные лучи выходят при этом из пластины комбинера по направлению к наблюдателю, часть излучения, прошедшая через поверхность раздела, распространяется далее в пластине и может либо снова частично отразиться на следующем слое или испытать полное внутреннее отражение на боковых поверхностях пластины. С другой стороны, лучи, попадающие на поверхность *a* под достаточно большими углами, полностью проходят эту поверхность и далее могут полностью отразиться за счет полного внутреннего отражения на одной из параллельных сторон световода и выйти по направлению к наблюдателю на одной из последующих поверхностей *a*. Для обеспечения этого эффекта на каждую поверхность раздела *a* наносят покрытие с характеристиками, подобными приведенным на рис. 4.

Для обеспечения достаточного размера зрачковой зоны при использовании миниатюрного коллиматорного объектива и генератора изображения (микродисплея) такую “развертку” пучка необходимо выполнить в двух направлениях, то есть необходимо два взаимно перпендикулярных набора призматических элементов. Например, для получения зрачковой зоны размером 15–20 мм может понадобиться 4 слоя для одного направления и 4 – для другого. Для выравнивания освещенности изображения по полю на поверхности призма-

тических элементов необходимо наносить покрытие, которое для разных слоев должно иметь разный коэффициент отражения. Кроме того, зрачковая зона при использовании такой системы может иметь мозаичную структуру, то есть имеются зоны в пределах полезного размера, где нет изображения зрачка. При их относительно небольшой величине наличие “слепых” зон будет приводить к снижению воспринимаемой яркости изображения в индикаторном канале.

Составная структура из призматических элементов при использовании ее в составе системы наשלемного дисплея технологична, позволяет обеспечить увеличенный размер зрачковой зоны при использовании миниатюрного объектива и микродисплея в качестве генератора изображения. Однако, комбинер такого типа имеет и некоторые недостатки. При переходе от систем наשלемного типа к системам кабинного типа при использовании составного призматического комбинера возникают принципиальные трудности. В наשלемном варианте границы призматических элементов находятся вне глубины резкости глаза, если глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность, в кабинном варианте в этом случае расстояние до глаз наблюдателя может составлять 0,5–1 м, границы элементов могут быть видны оператору. Эта структура накладывается на изображение внешнего пространства и полезную информацию от генератора символов и может мешать восприятию. Слои, имеющие различную отражающую способность, при достаточном расстоянии до глаз наблюдателя будут видны как минимум в виде полос разного пропускания. Кроме того, чем больше размер зрачковой зоны, тем большее число слоев необходимо изготовить и объединить в экран, что может представлять значительные технологические трудности, несмотря на теоретическую привлекательность такого решения, предлагающего существенный выигрыш в габаритах системы.

Значительное число систем для индикации информации, реализованных на практике, монохромные с комбинерами, которые используют узкополосное отражающее покрытие, а также системы голографического типа. Системы наשלемного типа также выпускаются с комбинером, состоящим из призматических элементов [29]. Таким образом, несмотря на разнообразие предлагаемых, в том числе и в патентной литературе, комбинеров для систем

виртуальных дисплеев, физически реализовано относительно небольшое число. Дальнейшие пути развития систем индикации информации как нашлемного, так и кабинного типа – сокращение габаритов, улучшение технологичности, достижение равномерной яркости изображе-

ния по полю, увеличение углового поля и получение качественных цветных изображений.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта 11.519.11.6014.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Cakmakci O., Rolland J.* Head-Worn Displays: The Future Through New Eyes // Optics and Photonics News. 2009. V. 20. № 4. P. 20–27.
2. *Olwal A., Lindfors C., Gustafsson J., Kjellberg T., Mattson L.* ASTOR: An Autostereoscopic Optical See-through Augmented Reality System // Proceedings of ISMAR 2005 (IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality), Oct. 5–8. 2005. P. 24–27.
3. *Кучерявый А.А.* Бортовые информационные системы. Курс лекций / Под ред. В.А. Мишина и Г.И. Ключева. 2-е изд. перераб. и доп. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 504 с.
4. *Cakmakci O., Rolland J.* Head-Worn Display: A Review // Journal of Display Technology. 2006. V. 2. № 3. P. 199–216.
5. *Rolland J.P., Fuchs H.* Optical Versus Video See-Through Head-Mounted Displays in Medical Visualization // Presence. 2000. V. 9. № 3. P. 287–309.
6. *Никифоров О.В., Пименов Ю.Д., Сокольский М.Н., Строганов А.А., Эфрос А.И.* Оптическая система широкоугольного коллиматорного авиационного индикатора // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 37–41.
7. *Ган М.А., Щеглов С.А., Ган Я.М., Чертков А.С.* Широкоугольные оптические системы с комбинерами на основе синтезированных объемных голограмм для нашлемных дисплеев // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 3. С. 18–23.
8. *Садчихин А.В.* Проекционные системы отображения информации // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 6. С. 52–63.
9. *Марчук С.М.* Широкоугольный проекционный объектив для системы отображения информации // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 27–29.
10. *Putilin A.N., Borodin Y.P., Chernopiatov A.V.* Waveguide holograms in LCD illumination units // Proc. SPIE. 2000. V. 4511. P. 144–148.
11. *Amitai Y., Friesem A.A., Shariv I.* Planar holographic optical device for beam expansion and display // United States Patent US 6169613, January 2001.
12. *Masuda L., Shimakawa S., Okada, N., Horiuchi K., Okumura H., Sasaki T., Suzuki H.* Optical element with a Fresnel lens, display apparatus, display method and moving body // European Patent Application EP 2372407A2, May 2011.
13. *Amitai Y.* Light Guide Optical Device // United States Patent US 8 004 765 B2, August 2011.
14. *Light Guide Optical Device* // European Patent Application EP1562066A2, August 2005.
15. *Amitai Y., Reinhorn S., Friesem A.A.* Visor Display Design based on planar holographic optics // Appl. Opt. 1995. V. 34. № 8. P. 1352–1356.
16. *Repetto P., Borello E., Stefano B.* Light Guide for display devices of the head mounted or head-up type // United States Patent US6825987, November 2004.
17. *Eisen L., Meyklyar M., Golub M., Friesem A., Gurwich J., Weiss V.* Planar configuration for image projection // Appl. Opt. 2006. V. 45. № 17. P. 4005–4011.
18. *Ган М.А., Бармичева Г.В., Старков А.А., Щеглов С.А., Ган Я.М.* Оптическая система нашлемного коллиматорного дисплея // Патент России RU 2353958 C1. 2009.
19. *Самарин А.* LCoS дисплеи и их применение // Компоненты и технологии. 2008. № 8. С. 24–32.
20. *Zhang R., Hua H.* Design of a polarized head-mounted projection display using FLCOS microdisplays // Proc. SPIE. 2007. V. 6489. 64890B-1-10.

21. *Rolland J.P., Hua H.* Head-mounted displays // Encyclopedia of Optical Engineering / Ed. by R.B. Johnson and R.G. Driggers. Taylor and Francis, 2005.
  22. *Snow M.P., Jackson T.W., Meyer F.M., Reising J.M., Hopper D.G.* AMLCD cockpit: promise and payoffs // Proc. SPIE. 1999. V. 3690. P. 103–114.
  23. *Антропов Р.В., Бронштейн Т.И., Бронштейн И.Г., Васильев В.Н., Волков Д.Ю., Волкова С.Л., Лившиц И.Л.* Широкоугольный объектив с вынесенным входным зрачком // Патент на полезную модель RU 101212 U1 (2010).
  24. *Бронштейн И.Г., Лившиц И.Л.* Объектив с вынесенным входным зрачком (варианты) // Патент России RU 2225628 C2 (2001).
  25. *Hoshi H., Taniguchi N., Morishima H., Akiyama T., Yamazaki S., Okuyama A.* Off-axial HMD optical system consisting of aspherical surfaces without rotational symmetry // SPIE Proceedings. 1996. V. 2653. P. 234–242.
  26. *Cheng D., Wang Y., Hua H., Sasian J.* Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling // Opt. Lett. 2011. V. 36. № 11. P. 2098–2100.
  27. *Allen J.* Optical coatings: rugate coatings enhance performance of head-up displays. LaserFocusWorld, 2008: <http://www.laserfocusworld.com/articles/2008/05/optical-coatings-rugate-coatings-enhance-performance-of-head-up-displays.html>
  28. *Allan S.T., Herrington B., Cole C., Mackrodt K., Slim T., Lingwood D.* Rugate coatings for an avionics head-up display // Proc. SPIE. 2004. V. 5443. P.130–137.
  29. <http://lumus-optical.com>
-