

В. А. ГРИММ, М. С. РУДАКОВА, С. А. СМИРНОВ

МИКРОПРОЕКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ СМЕШАННОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ПЛОСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ ЭКРАНАХ

Рассматривается архитектура микропроекторной системы с двумерной растровой структурой, реализованной на плоских оптических световодных (волноводных) элементах. Представлены различные варианты реализации такого устройства и приведены расчеты по выбору параметров призматических элементов, составляющих плоский световодный экран: угла наклона и требуемых коэффициентов отражения слоев в зависимости от заданных размеров поля обзора.

Ключевые слова: системы индикации, оптический световодный (волноводный) элемент, комбинер, мультипликатор поля зрения, коллиматорный объектив, жидкокристаллический дисплей.

В последнее десятилетие появилось значительное количество публикаций, посвященных микропроекторным системам, реализующим технологии смешанной и дополненной реальности. Подобные устройства могут выполняться либо в виде индикаторов, установленных, к примеру, в кабине летательного аппарата, с увеличенным полем обзора и удаленным расположением относительно глаз наблюдателя, либо в виде моно- или бинокулярных систем, расположенных на расстоянии 15—30 мм от глаза. В качестве генератора изображений, как правило, используются отражательные FLCOS-микродисплеи, снабженные осветительной системой. Изображение с экрана микродисплея вводится с использованием малогабаритного коллиматорного объектива в двумерную растровую систему, создающую необходимое поле обзора и формирующую изображение, в виде растрово-символьной информации, на сетчатке глаза на фоне окружающего пространства. Область использования подобных систем достаточно широка: модульная авионика, индивидуальные системы поля боя, автомобилестроение, телевидение высокого разрешения, мультимедийные системы формирования 3D-изображений и т.п. Основным элементом таких микропроекторных систем является двумерная растровая структура — комбинер, обеспечивающая требуемое мультиплицирование световых пучков, заполняющих выходной зрачок коллиматорного объектива. Принципы построения таких растровых структур на основе плоских световодных (волноводных) элементов могут быть различными [1, 2]: с использованием призматических элементов, имеющих профилированный коэффициент отражения поверхностей; с использованием голографических элементов типа линз и дифракционных решеток на поверхностях световодной пластины для ввода—вывода излучения либо дифракционных оптических элементов для тех же целей.

Задача создания подобного рода систем и, в первую очередь, их оптического расчета на сегодняшний день не является типовой задачей теории оптического изображения и не решена с позиции обеспечения „сквозного“ расчета от плоскости предметов (с учетом характера ос-

вещающего поля) до плоскости изображения (сетчатка глаза). Отсутствуют расчетные модели и алгоритмы, а существующие специализированные программные продукты (ZEMAX, Trance-Pro, MOPS) не предназначены для расчета с большими массивами лучей и поверхностей. Не выработаны надежные критериальные оценки качества формируемого изображения и не определена их связь с конструктивными характеристиками оптических элементов, что не позволяет ставить и решать оптимизационную задачу теории оптического расчета подобных элементов и систем.

Актуальность настоящей статьи связана с решением указанных проблем и созданием цветных систем индикации приборной информации, для которых существуют несколько основных вариантов построения плоских волноводных экранов. В данной статье рассматривается комбинированный метод построения плоского экрана на основе геометрических методов транспортировки плоскополяризованного излучения через селективно-отражающие/пропускающие слои (склеенные поверхности).

Плоский волноводный экран данного типа можно отнести к разряду двумерных растровых оптических систем, которые реализованы на односторонних призмных элементах. На рис. 1 показана принципиальная схема транспортировки излучения от микродисплея 1 через объектив 2, оптическую систему, состоящую из призм и представляющую собой плоский волноводный экран 3—8, до плоскости наблюдения 9. Как видно из рисунка, основными элементами сложной структуры экрана являются два скрещенных призмных блока: блок 3, 4, 5, именуемый мультипликатором горизонтального поля (МГП), и блок 6, 7, 8 — мультипликатор вертикального поля (МВП). Количество элементов (призм) в мультипликаторах полей может быть различным. Излучение в мультипликаторы вводится через входные прямоугольные призмы 3, 6 с углом β в основании.

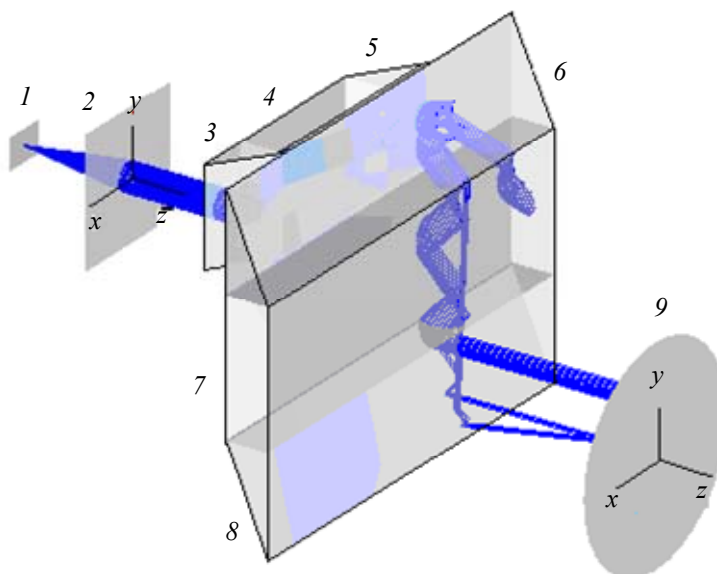


Рис. 1

Здесь, как и относительно любой сложной составной призмной системы, можно говорить о необходимости соблюдения постоянства числа отражений от поверхностей каждого из двух ортогональных призмных блоков для заданного поля зрения. Несоблюдение данного принципа для лучей из заданного поля зрения приводит к появлению паразитных изображений и бликов и, как следствие, к снижению контраста в изображении информационной панели.

Если сохраняется четное число отражений от поверхностей в обоих блоках, то наблюдатель будет видеть прямое изображение. В этом случае перемещение точки на экране микродисплея по направлению будет всегда совпадать с видимым направлением перемещения

объекта. При нечетном числе отражений от поверхностей в одном из блоков будет получаться зеркальное изображение. „Нечетность“ первого блока приводит к зеркальности изображения на экране дисплея относительно горизонтали, а „нечетность“ второго — к зеркальности изображения относительно вертикали. В данном случае согласованное движение точки по экрану дисплея с направлением движения объекта будет нарушено. Для наблюдателя изображение точки будет перемещаться в направлении, противоположном движению объекта. При нечетном числе отражений от поверхностей обоих блоков (суммарно — четное число) получается перевернутое изображение. Этот недостаток легко устраняется поворотом микродисплея вокруг оптической оси на 180° (без учета работы объектива).

Для анализа мультипликатора можно использовать приближения в рамках лучевой геометрической оптики. Решение вопроса о том, каким образом обеспечить постоянную четность (или нечетность) числа отражений для всей совокупности рассматриваемых лучей, достигается выбором особенных селективно-отражающих/пропускающих покрытий входных граней призм, в дальнейшем именуемых ТР-слоями. На рис. 2, а—в соответственно представлены возможные варианты реализации мультипликатора в зависимости от выбора угла наклона α ТР-слоя (или угла β в основании входной прямоугольной призмы):

вариант 1 — наклон ТР-слоя под углом $\alpha = \beta > 30^\circ$;

вариант 2 — наклон ТР-слоя под углом $\alpha = \beta < 30^\circ$;

вариант 3 — наклон в основании прямоугольной призмы под углом $\beta = 30^\circ$.

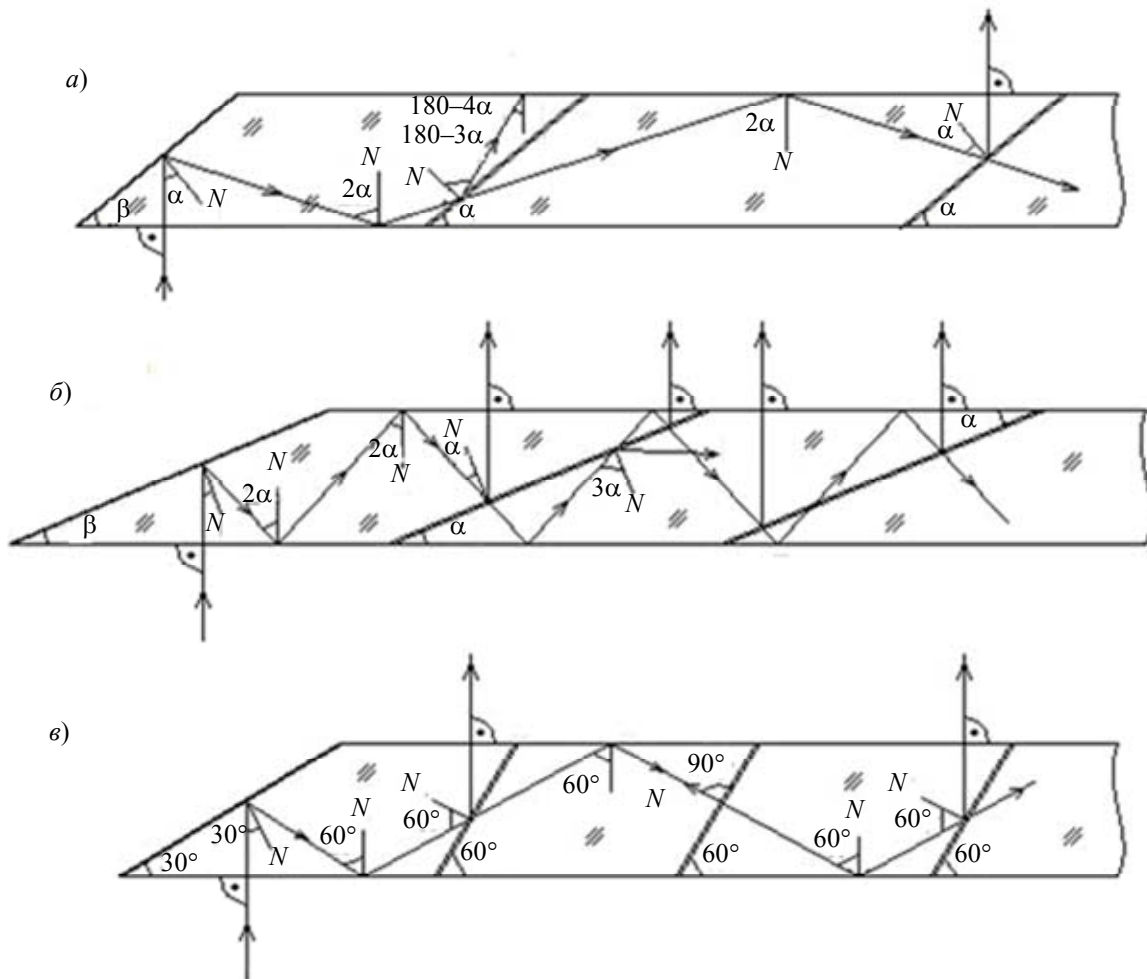


Рис. 2

Величина угла падения луча на грани определяет, будет ли излучение пропущено или отражено ТР-слоем. Если угол падения превышает заданное значение, то луч проходит через ТР-слой без частичного отражения. На рис. 3, а—в показан принципиальный ход кривой, ха-

характеризующей отражательную способность слоя, с учетом максимального полевого угла ω в мультипликаторе. Для варианта 1 (см. рис. 3, а) углы падения должны лежать в пределах $180 - 3\alpha \pm \omega$, для варианта 2 (см. рис. 3, б) — в пределах $3\alpha \pm \omega$. В случае варианта 3 (см. рис. 3, в) пропускание обеспечивается в окрестности углов $\pm \omega$. С точки зрения реализации зависимости коэффициента пропускания слоя ρ от угла падения вариант 3 можно отнести к тривиальному решению. Для вариантов 1 и 2 ход кривой, характеризующей отражательную способность оптических материалов на границе двух сред, противоречит обычному представлению.

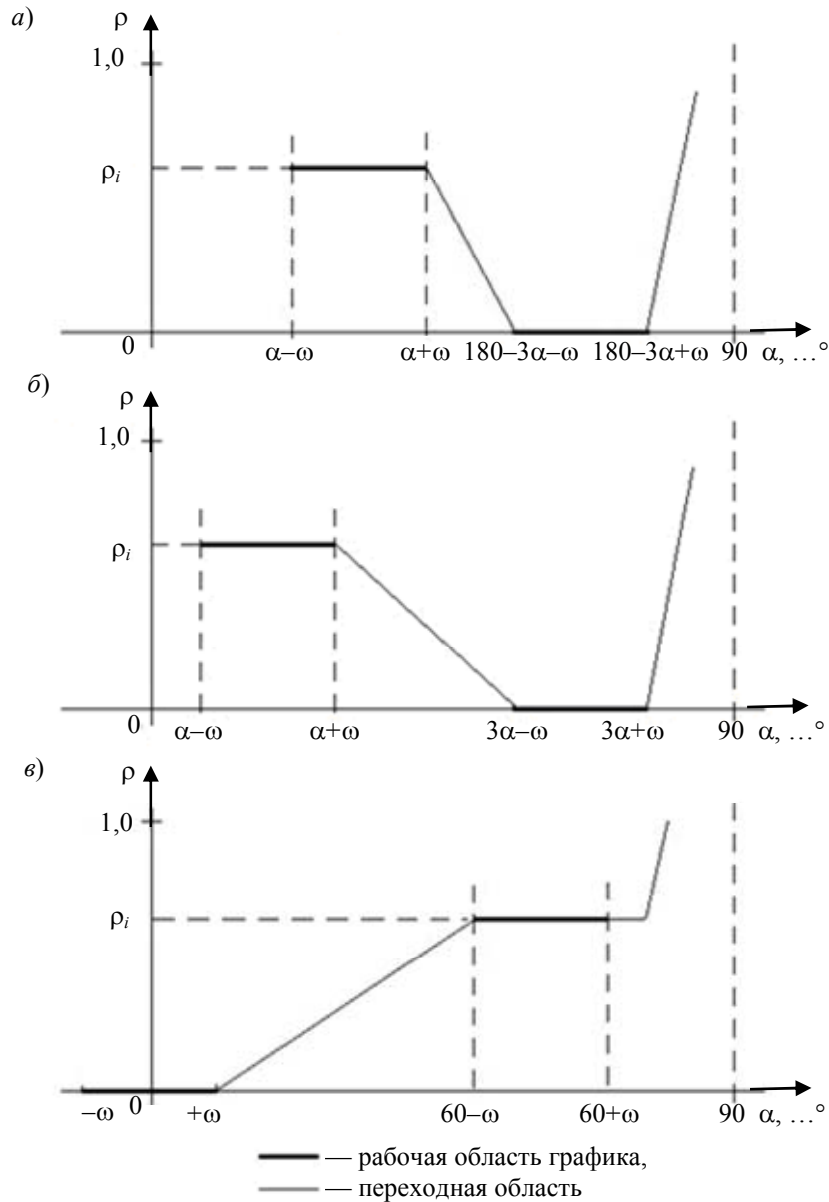


Рис. 3

Для обеспечения равномерной освещенности плоскости наблюдения необходимо соблюсти условие равномерного деления светового потока ТР-слоями. При общем количестве ТР-слоев N мультипликатора коэффициент отражения ρ_i -го слоя в области углов падения $\alpha \pm \omega$ для вариантов 1 и 2 и при углах падения $60 \pm \omega$ для варианта 3 будет определяться по следующей формуле:

$$\rho_i = \rho_0 \frac{1}{(N - i + 1)}, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где ρ_0 — отражательная способность мультипликатора; для МГП $\rho_0 = 1,0$, для МВП $\rho_0 = 0,2 \dots 0,4$.

Оптимальный угол наклона ТР-слоя (α) и входной прямоугольной призмы (β) определяются из условия равенства переходных зон. Для варианта 1 при наклоне ТР-слоя под углом $\alpha=\beta>30^\circ$ можно составить следующее равенство:

$$180 - 3\alpha - \omega - (\alpha + \omega) = 90 - (180 - 3\alpha + \omega).$$

Отсюда находим, что

$$\alpha = \beta = 38,57 - \frac{1}{7}\omega.$$

Мультипликаторы могут быть выполнены из различных оптических материалов, но наиболее приемлемыми являются стекла марок К8, N-ВК7, ТК21, полистирол, так как они обладают малыми потерями на исследуемых длинах волн. Рассмотрим случай, когда материалом мультипликатора является стекло ТК21 с показателем преломления $n=1,65306$. В данном случае максимальный полевой угол в мультипликаторе $\omega=9^\circ$ (в воздухе $\omega = \pm 15^\circ$). Тогда для варианта 1 $\alpha = \beta = 37,3^\circ$, а переходные области составят $12,8^\circ$.

Для варианта 2 при наклоне ТР-слоя под углом $\alpha=\beta<30^\circ$

$$3\alpha - \omega - (\alpha + \omega) = 90 - (3\alpha + \omega).$$

Отсюда находим, что

$$\alpha = \beta = 18 + \frac{1}{5}\omega.$$

Из этого выражения следует, что для варианта 2 угол наклона $\alpha=\beta$ должен равняться $19,8^\circ$, а переходные области составят $21,6^\circ$. Однако здесь вступает в силу условие обеспечения полного внутреннего отражения на боковых гранях (см. рис. 2, б). Полагая, что

$$2\alpha - \omega > \arcsin(1/n),$$

находим:

$$\alpha > 18,61 + \frac{1}{2}\omega.$$

Для стекла ТК21 угол α должен превышать $23,11^\circ$. Принимая $\alpha=\beta=23,2^\circ$, находим, что размеры переходных зон составляют $28,4$ и $11,4^\circ$.

Для варианта 3, при наклоне в основании прямоугольной призмы под углом $\beta=30^\circ$, наблюдаем большие области переходных зон: $60 - \omega - \omega = 60 - 2\omega$ и $90 - (60 + \omega) = 30 + \omega$, что при $\omega=9^\circ$ дает 42 и 39° соответственно. Чем больше размер области перехода от пропускания излучения к частичному отражению, тем проще достигнуть требуемого коэффициента отражения/пропускания ТР-слоя. С этой точки зрения, решение, реализуемое при нечетном числе отражений (вариант 3), выгодно отличается от вариантов 1 и 2.

Оптимальные значения углов наклона ТР-слоя при использовании некоторых оптических материалов приведены в таблице.

| Материал | α, \dots° | |
|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| | Вариант 1 | Вариант 2 |
| К8, N-ВК7 ($n=1,51452$) | 37,2 | 25,8 |
| Полистирол ($n=1,585376$) | 37,3 | 24,5 |
| ТК21 ($n=1,65306$) | 37,3 | 23,3 |

Таким образом, в настоящей статье представлен возможный вариант реализации двумерной растровой системы, используемой для отображения информации в микропроекторных системах смешанной и дополненной реальности. Разработанная расчетная модель позволила определить основные параметры призматических элементов, а именно углы наклона ТР-слоев и входной прямоугольной призмы, а также требуемые коэффициенты отражения слоев в зависимости от заданных размеров поля обзора ω . Как уже было замечено, возможная область применения такого устройства простирается в очень широких пределах, его разработка и дальнейшая реализация позволит существенно облегчить и повысить качество жизни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багдасаров А. А., Анитропов Р. В., Багдасарова О. В., Лившиц И. Л. Индикаторные системы отображения вторичной информации комплексов авионики и авиабазирования // Изв. вузов. Авиационная техника. 2011. № 2. С. 48—53.

2. Pat. 8.004.765 B2 US. Light Guide Optical Device / Y. Amitai. 2011. Aug.

Сведения об авторах

- Вячеслав Антонович Гримм** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; ст. науч. сотрудник;
E-mail: mopsat@mail.ru
- Мария Сергеевна Рудакова** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: rudakovams@bk.ru
- Сергей Александрович Смирнов** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: sma46@mail.ru

Рекомендована кафедрой лазерной техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию
26.04.13 г.