

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИЗМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПЛОСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ ЭКРАНОВ

© 2013 г. А. В. Бахолдин, канд. техн. наук; В. Н. Васильев, доктор техн. наук; В. А. Гримм;  
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

Рассмотрены вопросы проектирования структурированных оптических систем с периодически повторяющейся группой элементов в виде ромб-призм для передачи изображения от микродисплея в глаз наблюдателя. Даны рекомендации по выбору параметров призмных элементов, составляющих волноводный экран.

**Ключевые слова:** призмный экран, наשלемный дисплей, мультипликатор поля зрения.

Коды OCIS: 080.1238, 350.4600, 110.4190.

Поступила в редакцию 24.01.2013.

В последнее десятилетие в патентной литературе и статьях уделяется много внимания оптическим системам индикации изображения на лобовом стекле [1, 2], а также системам ввода изображения в глаз наблюдателя от отражательных микродисплеев в наשלемном варианте. В обоих случаях перед наблюдателем располагается полупрозрачный экран, интересующий объект наблюдатель видит в проходящем свете. Одновременно, в отраженном свете, наблюдателю предоставляется возможность видеть дополнительное изображение с информационной панели в виде микродисплея [3]. Такие системы применяются как в военной, так и в гражданской технике и являются чрезвычайно востребованными в современных условиях, например, в качестве виртуального дисплея для мобильных устройств.

Существует несколько основных вариантов построения плоских волноводных экранов. В их основе могут лежать голографические, дифракционные, селективно избирательные по хроматизму, поляризации и пропусканию и, конечно, геометрические методы формирования изображения [4]. Принципиально схему индикатора можно представить, как показано на рис. 1: генератор символов 1 (электронно-лучевая трубка, микродисплей на жидких кристаллах и т. п.) устанавливается в фокальной плоскости оптической системы 2, так, что изображение символов строится оптической

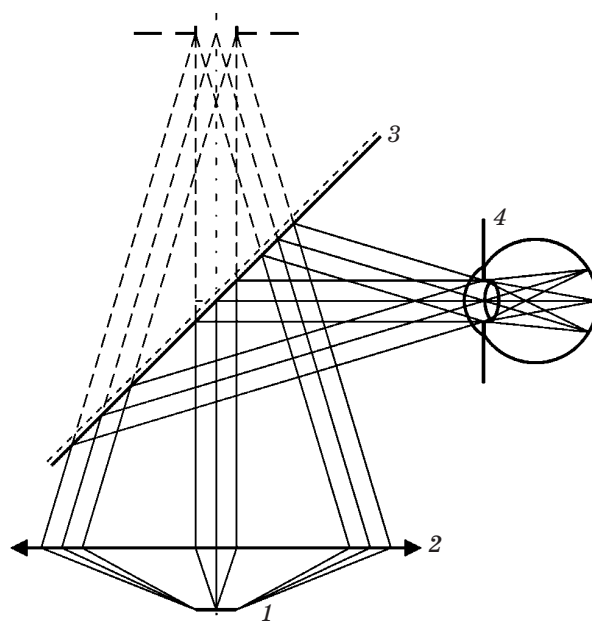


Рис. 1. Принципиальная схема системы индикации (пояснения в тексте).

системой на бесконечно большом расстоянии. Пластина 3 имеет светоделительное покрытие, отражающее узкий спектральный интервал, соответствующий спектральному интервалу генератора символов, по направлению к глазу наблюдателя 4, и практически полностью пропускающее видимый спектральный диапазон. Если зрачок глаза наблюдателя распола-

гается на расстоянии  $p$  от системы, то диаметр оптической системы [1]

$$D \geq 2ptg\omega + D_0,$$

где  $D_0$  – диаметр выходного зрачка оптической системы,  $\omega$  – полевой угол.

При малых расстояниях до наблюдателя систему можно сделать достаточно компактной, кроме того, для дальнейшего сокращения размеров можно использовать принцип мультиплицирования зрачков, что в упрощенном виде схематично показано на рис. 2, где 1 – генератор символов, 2 – объектив, 3 – полупрозрачные зеркала, 4 – глаз наблюдателя. Системы, построенные по такому принципу [4], позволяют значительно сократить габариты устройства, что особенно важно при расположении прибора на голове наблюдателя.

В данной статье рассматривается комбинированный метод построения плоского экрана на основе геометрических методов транспортировки плоско-поляризованного излучения через селективно отражающие/пропускающие слои (склеенные поверхности).

Плоский волноводный экран данного типа можно отнести к разряду двумерных растровых оптических систем, которые реализова-

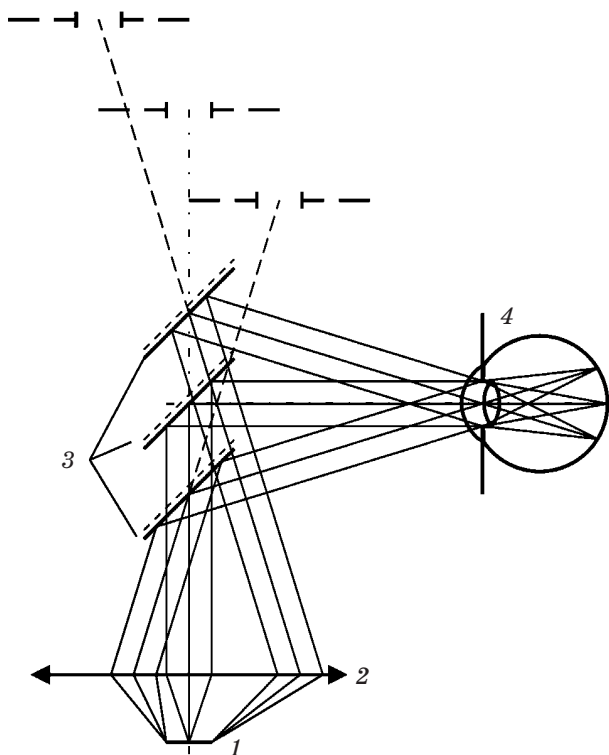


Рис. 2. Упрощенная схема мультиплицирования зрачков (пояснения в тексте).

ны на однотипных призмных элементах. На рис. 3 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 зрачковой области 9. Как видно из рисунка, основными элементами сложной структуры экрана являются два скрещенных призмных блока 3, 4 и 5, которые в дальнейшем будут называться мультипликатором горизонтального поля (МГП), и 6, 7, 8 – мультипликатором вертикального поля (МВП). В модельном представлении всевозможные их сочетания отличаются длинами прямоугольных призм 4 и 7. В программе MOPS [5] подобная задача решается через генерацию состояний, в каждом из которых толщины призм функционально связаны с текущим значением одного из двух генераторов.

В МГП развитие вертикального поля зрения по мере увеличения толщин призм 4 не должно ограничиваться их боковыми поверхностями, в МВП не должно ограничиваться подобным образом развитие горизонтального поля.

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

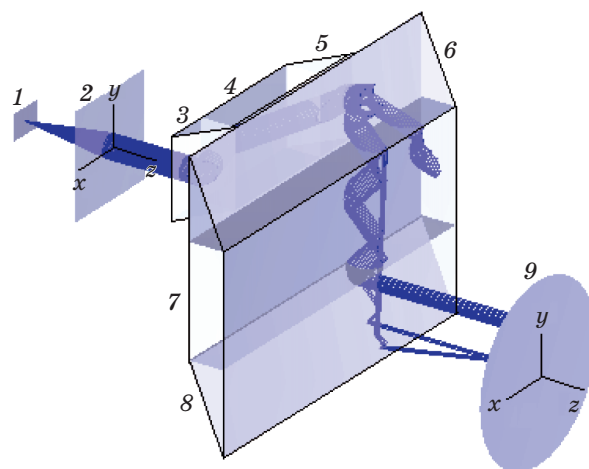
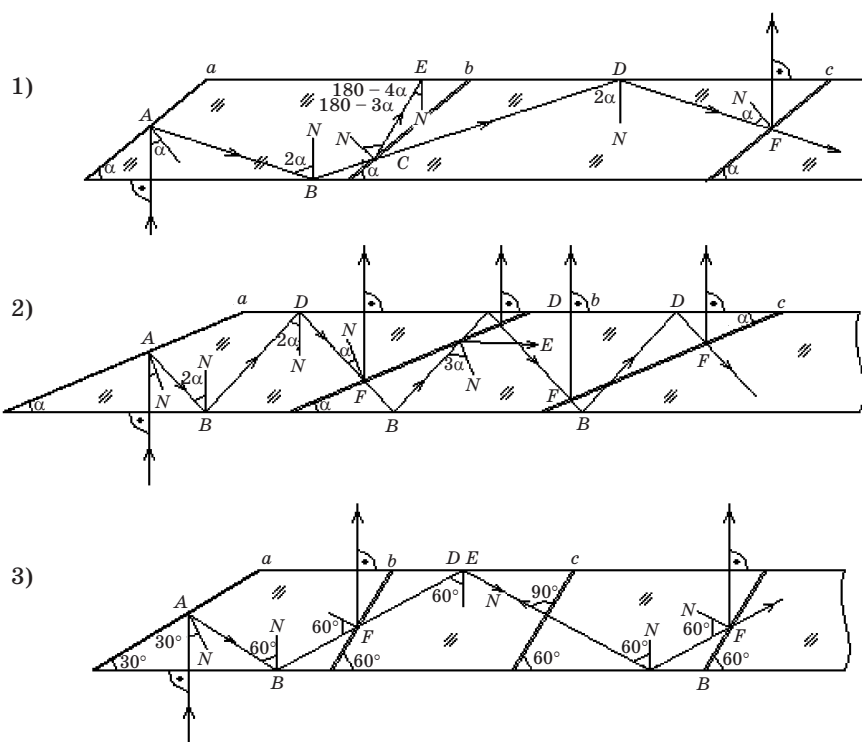


Рис. 3. Принципиальная схема волноводного экрана на призмных элементах (пояснения в тексте).



**Рис. 4.** Мультиплицирование потока излучения на входных гранях призмных элементов. 1 – падение излучения на селективный слой при  $\alpha > 30^\circ$ , 2 – падение излучения на селективный слой при  $\alpha < 30^\circ$ , 3 – нечетное число отражений,  $\alpha = 30^\circ$ .

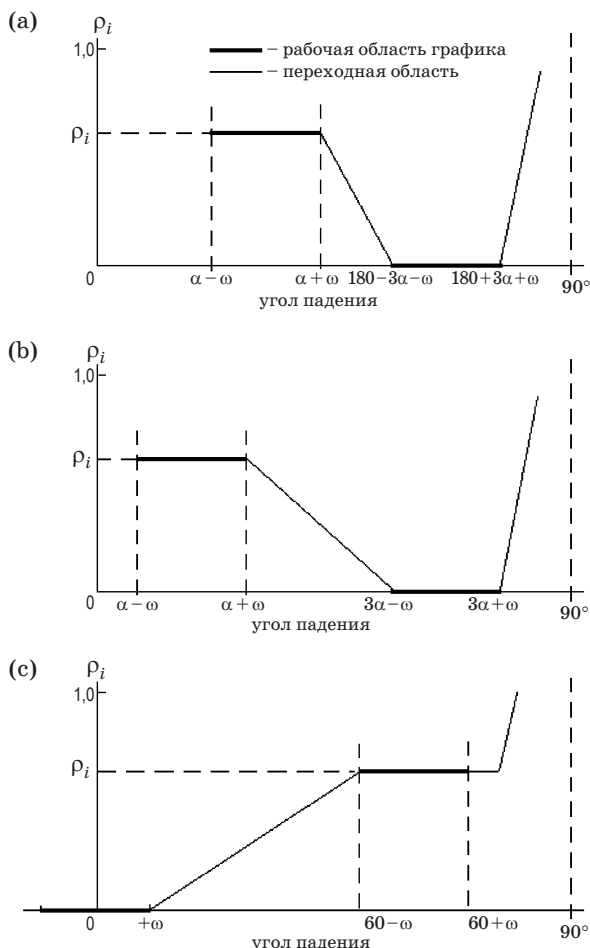
Если сохраняется четное число отражений в обоих блоках, то наблюдатель будет видеть прямое изображение. В этом случае перемещение точки на экране микродисплея по направлению будет всегда совпадать с видимым направлением перемещения объекта. При нечетном числе отражений в одном из блоков будет получаться зеркальное изображение. Нечетность в первом блоке приводит к зеркальности в изображении экрана дисплея относительно горизонтали, а нечетность во втором – к зеркальности относительно вертикали. В данном случае согласованное движение точки по экрану дисплея с направлением движения объекта будет нарушено. Для наблюдателя изображение точки будет двигаться в противоположном направлении от направления движения объекта. При нечетном числе отражений в обоих блоках (суммарно – четное число) получается перевернутое изображение. Этот недостаток легко устраняется поворотом микродисплея вокруг оптической оси на  $180^\circ$  (без учета работы объектива).

Для анализа работы мультипликатора можно использовать приближения в рамках лучевой геометрической оптики. Решение вопроса о том, каким образом обеспечить постоянную

четность (или нечетность) числа отражений для всех рассматриваемых лучей, достигается выбором селективно отражающих/пропускающих покрытий на входных гранях ромбических призм (ТР-слоев). На рис. 4 представлены возможные реализации мультипликатора в зависимости от выбора угла наклона ТР-слоя или угла в основании ромб-призмы.

С точки зрения реализации зависимости коэффициента пропускания слоя от угла падения случай 3 можно отнести к тривиальному решению. На больших углах здесь обеспечивается частичное отражение, на малых – полное пропускание. В случаях 1 и 2 необходимо обеспечить пропускание излучения на больших углах и частичное отражение на малых, что явно противоречит обычному представлению о ходе отражательной способности на границе двух сред. На рис. 5 показан принципиальный ход кривой отражательной способности слоя с учетом максимального полевого угла  $\omega$  в среде мультипликатора.

Как видим, информацию о том, что излучение необходимо пропустить или частично отразить, ТР-слой получает через величину угла падения. Если угол больше наперед заданной величины, то луч проходит ТР-слой без частич-



**Рис. 5.** Отражательная способность ТР-слоя. а – при внешнем падении излучения на селективный слой ( $\alpha > 30^\circ$ ), б – при внутреннем падении излучения на селективный слой ( $\alpha < 30^\circ$ ), с – при нечетном числе отражений ( $\alpha = 30^\circ$ ),  $\rho_i$  – коэффициент отражения слоя.

ного отражения. Для случая а) углы падения должны лежать в пределах  $180 - 3\alpha \pm \omega$ , для случая б) в пределах  $3\alpha \pm \omega$ . В случае с) пропускание обеспечивается в окрестности углов  $\pm\omega$ . Для обеспечения равномерной освещенности зрачковой области необходимо соблюсти условие равномерного деления светового потока ТР-слоями мультипликатора. При общем количестве слоев мультипликатора  $N$  коэффициент отражения  $i$ -того слоя  $\rho_i$  в области углов падения  $\alpha \pm \omega$  для случаев а) и б) и в случае с) на углах падения  $60 \pm \omega$  будет определяться по следующей формуле

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

где  $\rho_0$  – отражательная способность мультипликатора. Для МПП  $\rho_0 = 1,0$ , для МВП  $\rho_0 = 0,2 - 0,4$ .

Оптимальный угол наклона ТР-слоя определяется из условия равенства переходных зон в области малых и больших углов. Для внешнего падения излучения можно составить равенство

$$180 - 3\alpha - \omega - (\alpha + \omega) = 90 - (180 - 3\alpha + \omega), \quad (2)$$

из которого находим, что угол  $\alpha$  в основании прямоугольной призмы или в основании ромб-призмы будет равен

$$\alpha = 38,57 - \frac{1}{7}\omega. \quad (3)$$

Если взять стекло ТК21 с показателем преломления  $n_c = 1,65306$  и максимальный угол поля в стекле  $\omega = 9^\circ$  (в воздухе угол поля  $\pm 15^\circ$ ), то  $\alpha = 37,3^\circ$ , а переходные области составят  $12,8^\circ$ .

Для внутреннего падения излучения равенство переходных зон дает

$$3\alpha - \omega - (\alpha + \omega) = 90 - (3\alpha + \omega). \quad (4)$$

Отсюда находим, что угол  $\alpha$  в основании прямоугольной призмы или в основании ромб-призмы должен равняться

$$\alpha = 18 + \frac{1}{5}\omega. \quad (5)$$

Для стекла ТК21 с показателем преломления  $n_c = 1,65306$  и максимального угла поля в стекле  $\omega = 9^\circ$ ,  $\alpha$  должно было бы быть равным  $19,8^\circ$ , а переходные области составили бы  $21,6^\circ$ . Однако, здесь вступает в силу условие обеспечения ПВО на боковых гранях в точках  $D$  и  $B$  (рис. 4). Полагая, что

$$2\alpha - \omega > \arcsin(1/n_c), \quad (6)$$

находим

$$\alpha > 18,61 + \frac{1}{2}\omega. \quad (7)$$

Для стекла ТК21  $\alpha$  должно быть больше  $23,11^\circ$ . Принимая  $\alpha = 23,2^\circ$ , находим, что размер переходной зоны со стороны малых углов падения равен  $28,4^\circ$ , а со стороны больших углов –  $11,4^\circ$ .

В случае с нечетным числом отражений мы имеем самые большие области переходных зон. Со стороны малых углов –  $60 - \omega - \omega = 60 - 2\omega$ , со стороны больших –  $90 - (60 + \omega) = 30 + \omega$ , что для поля  $\omega = 9^\circ$  дает  $42^\circ$  и  $39^\circ$  соответственно. Чем больше размер области перехода от пропускания к частичному отражению, тем легче становится в реализации требуемая закономерность коэффициента отражения/пропу-

скания ТР-слоя. С этой точки зрения решение с нечетным числом отражений выгодно отличается от решений а) и б).

В таблице приведены оптимальные значения углов наклона  $\alpha$  рассмотренных выше случаев при использовании ряда оптических материалов.

Рис. 2, где отражающие грани расположены под углом  $45^\circ$ , показывает, как происходит тиражирование зрачков в поперечном и продольном направлении. Однако, в данной статье рассматриваются экраны с ходом осевых и внеосевых пучков, испытывающих дополнительно отражения на боковых гранях плоского экрана (рис. 3). Из-за этого картина распределения зрачков для разных полевых углов становится намного сложнее. Важным оказывается то, как падает осевой пучок на слой, то есть внешне это падение, или внутреннее. Приведенные в статье формулы для выбора углов призм позволяют найти конструктивное решение для

Оптимальное значение угла наклона ТР-слоя

| Материал                        | 1 – а)       | 2 – б)       |
|---------------------------------|--------------|--------------|
| К8, N-ВК7 ( $n_c = 1,51452$ )   | $37,2^\circ$ | $25,8^\circ$ |
| Полистирол ( $n_c = 1,585376$ ) | $37,3^\circ$ | $24,5^\circ$ |
| ТК21 ( $n_c = 1,65306$ )        | $37,3^\circ$ | $23,3^\circ$ |

обоих случаев. Далее должен следовать численный расчет углового распределения на зрачке на заданном расстоянии от экрана, соответствующий техническому заданию. Окончательный выбор того или иного решения будет обусловлен двумя факторами – пропусканием системы и степенью мозаичности углового поля.

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

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Ган М.А., Щеглов С.А., Ган Я.М., Чертков А.С. Широкоугольные оптические системы с комбинерами на основе синтезированных объемных голограмм для наשלемых дисплеев // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 3. С.
3. 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.
4. Amitai Y. Light guide optical device // Патент США № 8.004.765 В2. 2011.
5. Гримм В.А., Карасев В.Б., Кузьмин Ю.В., Лосев К.Д., Смирнов С.А. Лазерные и микроволновые оптические системы. СПбГУ ИТМО, 2005. 232 с.