

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТЕРЖНЕ-ОБРАЗНЫХ ИНТЕГРАТОРОВ В КОМПАКТНЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ВЫСОКОЙ СВЕТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

Рассмотрены стержнеобразные интеграторы, принцип их действия, их типы и особенности применения в компактных проекционных системах с высокой световой эффективностью, а также результаты моделирования и анализа работы устройств данного класса с помощью САПР оптических систем Code V.

Стержнеобразные интеграторы (СИ), как и многолинзовые интеграторы, часто используются в проекционных осветительных системах для формирования равномерной освещенности кадра (модулятора изображения) требуемого формата [1–3]. СИ (в англоязычной литературе — rod, tunnel integrator или light pipe), как следует из названия, представляет собой стержень (часто прямоугольного сечения), который может быть монолитным (МСИ) — стеклянным или пластиковым, или полым (ПСИ) с зеркальными внутренними поверхностями (рис. 1).

Отметим следующие особенности МСИ и ПСИ.

Потери энергии в МСИ меньше, чем в ПСИ, за счет полного (100 %-ного) внутреннего отражения, но при этом торцы МСИ должны быть покрыты просветляющими покрытиями, чтобы избежать потерь вследствие френелевских отражений. Загрязнения на выходном торце МСИ могут влиять на равномерность освещенности; для ПСИ таких проблем не возникает.

ПСИ изготавливается путем склейки четырех попарно одинаковых зеркал. МСИ изготавливается путем полировки шести поверхностей исходной заготовки, т.е. МСИ заметно дороже. Высокая плотность светового потока может заметно влиять на работу МСИ из-за термооптических аберраций. МСИ длиннее, чем ПСИ. МСИ может быть легко интегрирован с линзами.

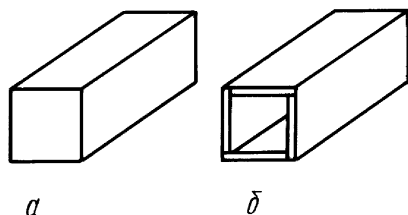


Рис. 1. Типы стержнеобразных интеграторов:

a — МСИ, *б* — ПСИ

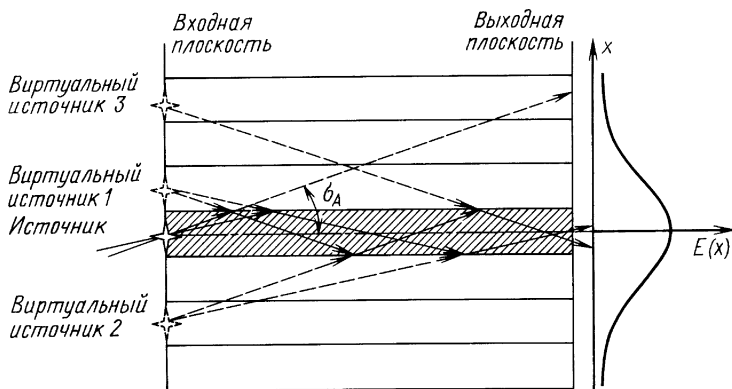


Рис. 2. Модель Вильямсона для СИ с прямоугольным сечением:

x — поперечная координата, $E(x)$ — освещенность

Принцип действия СИ. СИ работает в сходящемся пучке лучей с определенной числовой апертурой, сформированном, например, эллиптическим отражателем или высокоапертурным коллектором. Свет от источника фокусируется вблизи входной плоскости СИ и затем претерпевает множество отражений от его внутренних стенок, формируя виртуальные (вторичные) источники; таким образом, освещенности, создаваемые каждым виртуальным источником, суммируются, в результате чего получается квазиравномерное распределение освещенности в выходной плоскости СИ. На рис. 2 показан процесс формирования виртуальных источников в меридиональном сечении прямоугольного СИ.

Формирование квазиравномерной освещенности на выходе СИ можно объяснить с помощью суперпозиции виртуальных источников (или суперпозиции Кёллера), т.е. как процесс обращения (после нечетного количества отражений) и последующего сложения распределений освещенностей составляющих подобластей.

На рис. 3 показана модель Вильямсона (с выделением пяти подобластей) и распределение освещенности в выходной плоскости СИ, соответствующее полной числовой апертуре сходящегося пучка лучей на входе. При этом отражения от боковых стенок СИ якобы отсутствуют, т.е. поверхности как будто прозрачные.

По сути, каждое отражение от боковой стороны соответствует новому виртуальному источнику; чем больше отражений от боковых сторон СИ, тем больше количество виртуальных источников. Поэтому чем больше длина СИ (при одной и той же угловой апертуре коллектора), тем выше равномерность освещенности на выходе, которая оценивается как отношение освещенности на краю СИ к освещенности в центре.

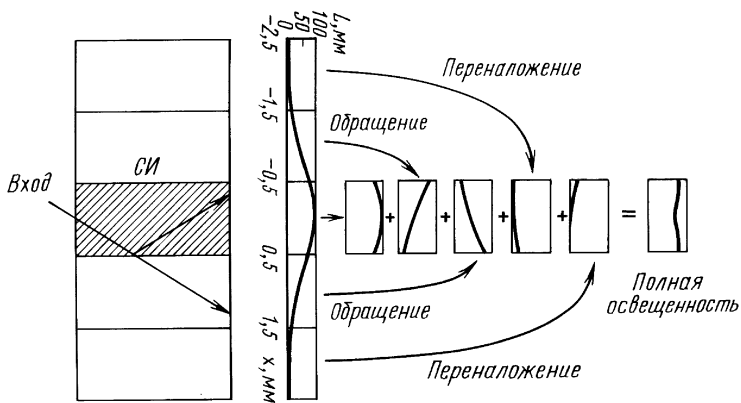


Рис. 3. Модель Вильямсона и суперпозиция Кёллера для СИ с прямоугольным сечением

Функционирование СИ можно описать двумя способами (рис. 4). Картина, наблюдаемая при взгляде внутрь СИ через выходной торец (подобие калейдоскопа), объясняется многочисленностью виртуальных источников. Высокая равномерность освещенности на выходе объясняется многочисленностью осветителей Кёллера. Обе точки зрения одинаково верны: все зависит от того, как группировать лучи, выходящие из СИ, — по углам наклона относительно оптической оси или по месту выхода из торца.

Предварительное моделирование СИ. В настоящее время существует ряд программ оптического дизайна: Code V, Light Tools, ASAP, Zemax, OSLO и др., с помощью которых можно создать модель СИ любой формы и затем проанализировать равномерность освещенности в выходной плоскости.

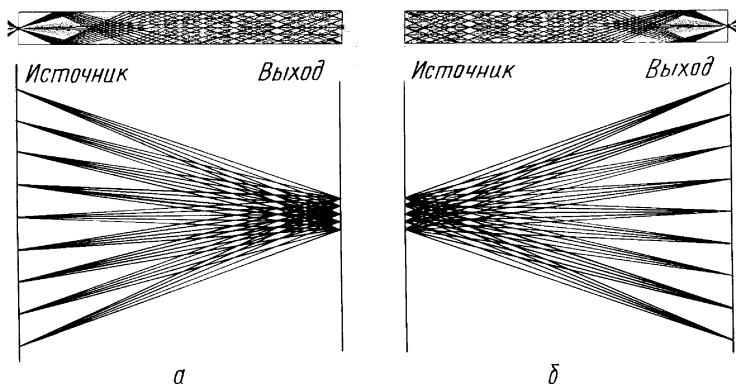


Рис. 4. Два способа представления СИ: множество виртуальных источников (а) и множество осветителей Кёллера (б)

Проанализировав модель ПСИ с квадратным поперечным сечением, построенную с помощью САПР оптических программ Code V, нетрудно установить зависимость количества виртуальных источников от угловой апертуры источника света, установленного во входной плоскости СИ, и параметров СИ (длины и высоты). Обозначим через L_{eff} расстояние от входного торца ПСИ до первого отражения крайнего луча (соответствующего угловой апертуре пучка от источника света) от боковой грани и назовем его минимальной эффективной длиной.

В общем случае — как для ПСИ, так и для МСИ — эффективная длина будет определяться следующей формулой:

$$L_{\text{eff}} = \frac{h}{2A}n, \quad (1)$$

где h — высота (или ширина) СИ; $A = n \sin U$ — угловая апертура во входной плоскости СИ (в воздухе), где U — угол наклона излучения относительно оптической оси; n — показатель преломления материала, из которого изготовлен СИ (для BK7 $n \approx 1,52$, для воздуха $n = 1$).

Тогда количество виртуальных источников, которое создается СИ (с квадратным сечением) длиной L , будет определяться отношением

$$N = \left(\frac{L}{L_{\text{eff}}} \right)^2. \quad (2)$$

Из рис. 5 видно, как изменяется количество виртуальных источников в зависимости от длины ПСИ с квадратным поперечным сечением высотой $h = 5$ мм и входной угловой апертурой $A = 0,22$.

Из распределений освещенности, полученных в плоскости формирования промежуточного изображения виртуальных источников СИ,

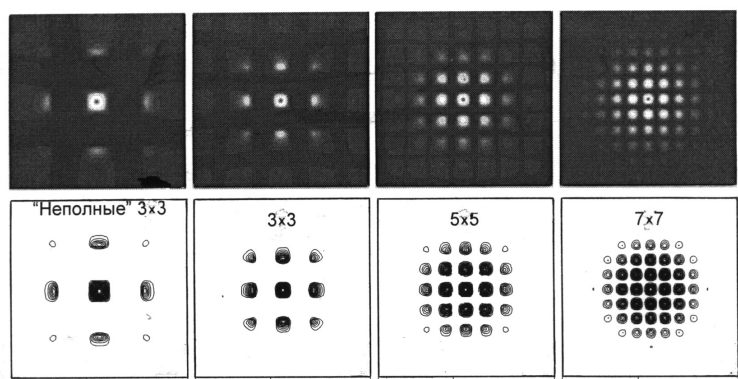


Рис. 5. Зависимость количества виртуальных источников света от длины ПСИ с квадратным поперечным сечением:

$L = 20$ (а), 30 (б), 50 (в), 70 (г) мм ($A = 0,22$, $h = 5$ мм, $L_{\text{eff}} \approx 11$ мм); сверху — распределения освещенности, внизу — контуры равных яркостей

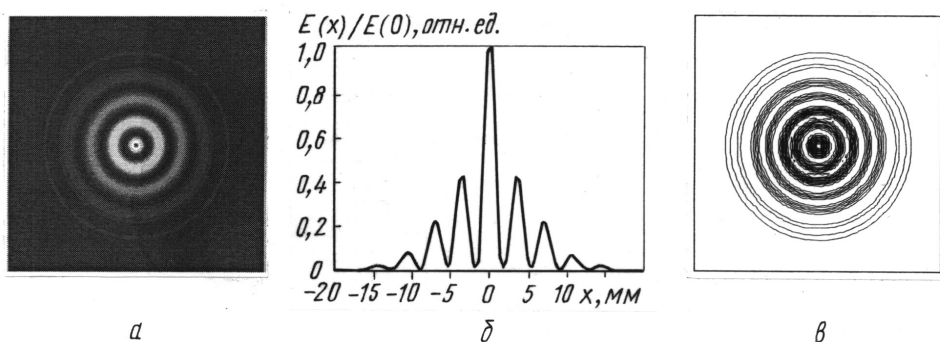


Рис. 6. Распределение освещенности, полученное в плоскости формирования промежуточного изображения виртуальных источников (а), распределение освещенности в центральном сечении (б) и контуры равных яркостей (в) для СИ с круглым поперечным сечением ($A = 0,22$, $h = 5$ мм, $L = 50$ мм)

которые показаны на рис. 5, видно, что результат трассировки лучей в Code V довольно точно совпадает с данными, рассчитанными с помощью формул (1) и (2). Например, при длине СИ $L = 50$ мм образуется около 25 виртуальных источников при минимальной эффективной длине $L_{\text{eff}} \approx 11$ мм.

Однако СИ не со всякой формой поперечного сечения эффективно “перемешивает” излучение для получения равномерного распределения освещенности. Например, СИ с круглым поперечным сечением не обеспечивает равномерного распределения освещенности в выходной плоскости — независимо от длины интегратора, апертуры и источника света (рис. 6).

Как показывает практика, СИ с прямоугольным и шестиугольным поперечным сечением обеспечивают высокую равномерность освещенности при необходимой длине; другие же формы недостаточно хорошо изучены. Было замечено, что все СИ с формами, которые позволяют объединять несколько СИ с одной и той же формой поперечного сечения по периметру одного из них, грань к грани без зазоров, обеспечивают высокую равномерность освещенности. Поскольку для пентагонального СИ невозможно плотное, без зазоров, заполнение площади выходного торца, то, как следствие, равномерность освещенности на выходе такого СИ недостаточна. Из опыта установлено, что если количество виртуальных источников больше или равно 9, то равномерность освещенности на выходе превышает 90 %. Эффект повышения равномерности освещенности при увеличении длины СИ можно видеть на рис. 7, на котором изображен СИ с квадратным сечением (5 мм × 5 мм, $N = 10$), на входе которого помещен круглый ламбертов источник диаметром 4 мм (апертурный угол 30°).

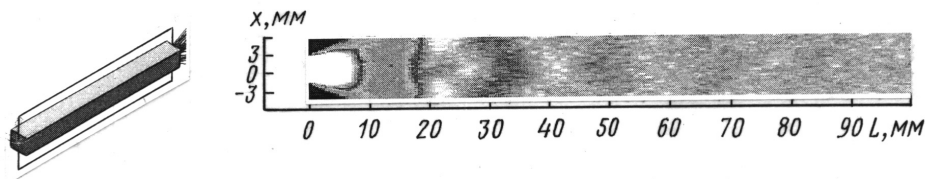


Рис. 7. Зависимость равномерности освещенности на выходном торце от длины СИ

Распределение освещенности, полученное в результате дефокусировки пучка от выхода к входу СИ, очень похоже на распределение освещенности, получаемое с использованием многолинзовых интеграторов, когда первым линзовым массивом формируются изображения источника в плоскости второго линзового массива. При использовании многолинзовых интеграторов опытным путем было установлено, что равномерность освещенности довольно высокая, если количество виртуальных источников больше 25.

Для МСИ из стекла или пластика величина апертуры внутри интегратора согласно закону Снеллиуса меньше входной апертуры в $n_{СИ}$ раз ($n_{СИ}$ — показатель преломления материала, из которого изготовлен СИ). Следовательно, для получения высокой равномерности освещенности в МСИ его длина должна быть больше в $n_{СИ}$ раз, чем для ПСИ с теми же размерами поперечного сечения и входной угловой апертурой. При этом потери в МСИ, как правило, меньше за счет полного (100 %) внутреннего отражения от боковых стенок. В простейшем случае для изготовления МСИ используется стекло ВК7, для которого коэффициент поглощения весьма мал.

Как и для многолинзовых интеграторов, формат СИ соответствует формату освещаемого кадра (объекта): например, если формат модулятора изображения 4:3, то формат СИ также 4:3.

Важной особенностью СИ является сохранение геометрического фактора (в англоязычной литературе *etendue* — “расширение”), который представляет собой произведение площади освещаемого объекта или излучающей площадки на телесный угол в пределах освещающего или излучающего светового конуса.

В отличие от многолинзовых интеграторов СИ, в основном, целесообразно использовать в проекционных системах, основанных на светоклапанных модуляторах изображения, нечувствительных к состоянию поляризации, — таких как микрозеркальные модуляторы (например, DMD™ фирмы Texas Instruments или TMA™ фирмы Daewoo). Это связано с тем, что СИ работает в сильно сходящемся пучке лучей и его сложно использовать совместно с системой преобразования поляриза-

ции, которая эффективно работает только в параллельном (точнее, малоапертурном) пучке лучей.

Если использовать СИ совместно с системой преобразования поляризации, то, во-первых, либо понизится равномерность освещения, либо увеличатся световые потери, а во-вторых, усложнится осветительная система за счет появления дополнительных компонентов; в результате все преимущества от использования СИ как дешевого и эффективного оптического элемента исчезнут.

В последнее время появились публикации о СИ с циклическим преобразованием поляризации (Polarization Recycling Integrating Rod) [4], в которых функции интегрирования и преобразования поляризации объединены; эффективность СИ с циклическим преобразованием поляризации согласно экспериментам составляет в среднем 70 %. Кроме функции преобразования поляризации такой СИ может также выполнять функцию циклического использования цвета (Color Recapture) [5] в однопанельных проекционных системах с последовательной модуляцией цвета (Color Sequential Modulation).

В результате появляется стимул к созданию новых сверхкомпактных и недорогих осветительных систем для высококачественных световых проекторов и проекционных телевизоров.

Пирамидальный СИ. Пирамидальные СИ имеют небольшой угол раскрытия, обычно не превышающий 10° . Они обеспечивают большее количество виртуальных источников в пределах области освещенности от первичного источника и, следовательно, более высокую размерность освещенности на выходе. На рис. 8 приведены модели Вильямсона для пирамидального и обычного СИ.

Из рис. 8 можно видеть, что для пирамидального СИ количество сформированных виртуальных источников в пределах области освещенности

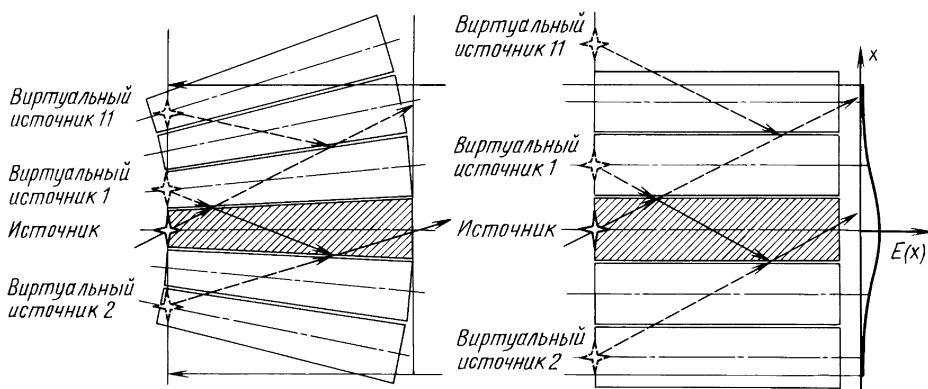


Рис. 8. Сравнение моделей Вильямсона для пирамидального СИ (а) и СИ с прямоугольным сечением (б)

ценности от первичного источника, границы которой определяются крайним лучом, больше, чем для обычного СИ (размеры выходного торца СИ в обоих случаях одинаковы). Однако геометрический фактор для пирамидального СИ меньше, так как максимальный апертурный угол вблизи выходного торца уменьшается за счет пирамидальности. Модель Вильямсона свидетельствует о большем количестве виртуальных источников для пирамидального СИ по сравнению с обычным СИ той же длины, что, как было отмечено ранее, обеспечивает более высокую равномерность освещенности.

Влияние угловой апертуры входного пучка и длины СИ на равномерность освещенности кадра. С помощью САПР оптических систем Code V рассмотрим, как зависит равномерность освещенности кадра от длины СИ при разной входной апертуре A . В качестве источника излучения используем гауссов источник, т.е. источник, интенсивность которого описывается гауссоидой. Изменяя угловую апертуру гауссова источника излучения (угол расходимости по уровню $1/e^2$) и длину СИ, количественно оценим неравномерность освещенности на выходе квадратного ($5\text{ мм} \times 5\text{ мм}$) ПСИ (полого или зеркального СИ) для 25 зон (5×5). Для каждой зоны найдем процентное отношение суммарной освещенности к освещенности в центральной зоне. Неравномерность освещенности определяется как разность между максимальным и минимальным значениями этого отношения для всех зон (кадра).

На рис. 9 представлены результаты анализа равномерности освещенности на выходе в виде диаграммы, из которой видно, что неравно-

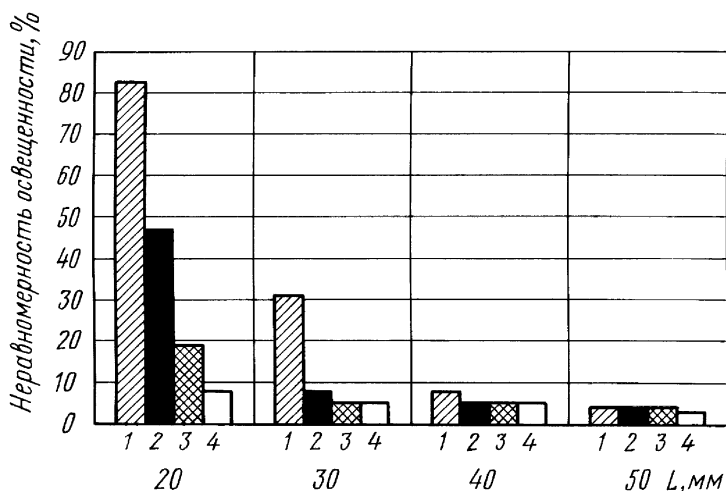


Рис. 9. Неравномерность освещенности на выходе квадратного ($5\text{ мм} \times 5\text{ мм}$) СИ в зависимости от его длины и угловой апертуры гауссова источника:
 $A = 0,13$ (1); $0,17$ (2); $0,22$ (3); $0,26$ (4)

мерность освещенности кадра уменьшается с увеличением длины СИ и угловой апертуры гауссова источника излучения.

Результаты моделирования и анализа использования СИ в высокоэффективных проекционных системах с помощью программы оптического дизайна Code V. СИ, в отличие от многолинзовых интеграторов, используется в сходящемся пучке лучей, сформированном, к примеру, высокоапертурным эллиптическим отражателем. На рис. 10 представлена типичная схема осветительной системы для проектора с использованием СИ и упрощенная модель этой системы для анализа в Code V.

Источник света — металлогалоидная лампа — установлен в первом фокусе малогабаритного эллиптического отражателя, который формирует изображение разрядной дуги лампы во входном торце СИ, совпадающем со вторым фокусом эллипсоида. Угол раскрытия эллиптического отражателя составляет 270° , расстояние от вершины до первого фокуса — 9 мм, расстояние между фокусами — 36 мм, световой диаметр — 30 мм, что соответствует угловой апертуре $A \approx 0,42$ (угловому полю $22,6^\circ$). Размеры СИ (зеркального типа) составляют 12 мм × 9 мм (формат 4:3). Конденсор формирует увеличенное изображение квазиравномерно освещенного выходного торца СИ на модуляторе изображения с размерами 20,3 мм × 15,24 мм (диагональ 1"). В данной модели конденсор представляет собой идеальную линзу с фокусным

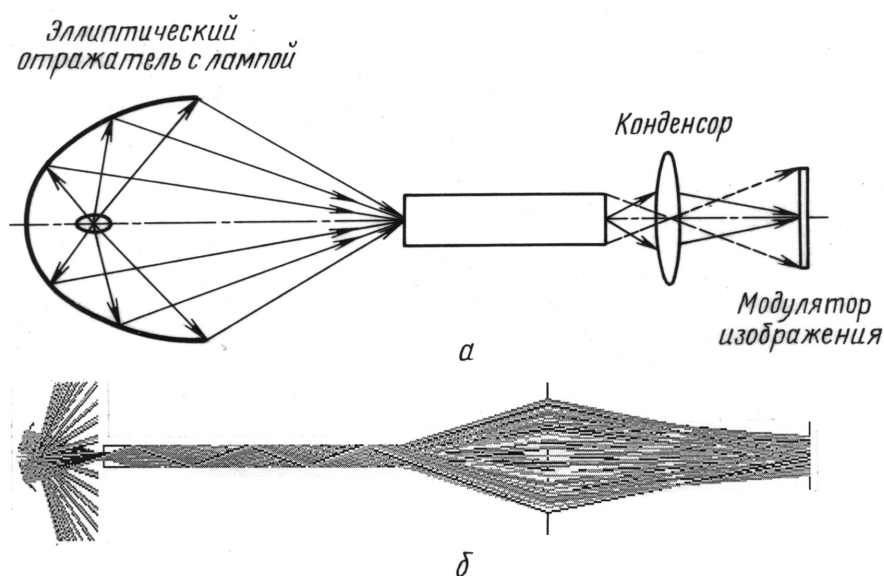


Рис. 10. Оптическая схема осветительной системы (проектора) с использованием СИ (а) и геометрооптическая модель этой системы для анализа равномерности освещенности (б)

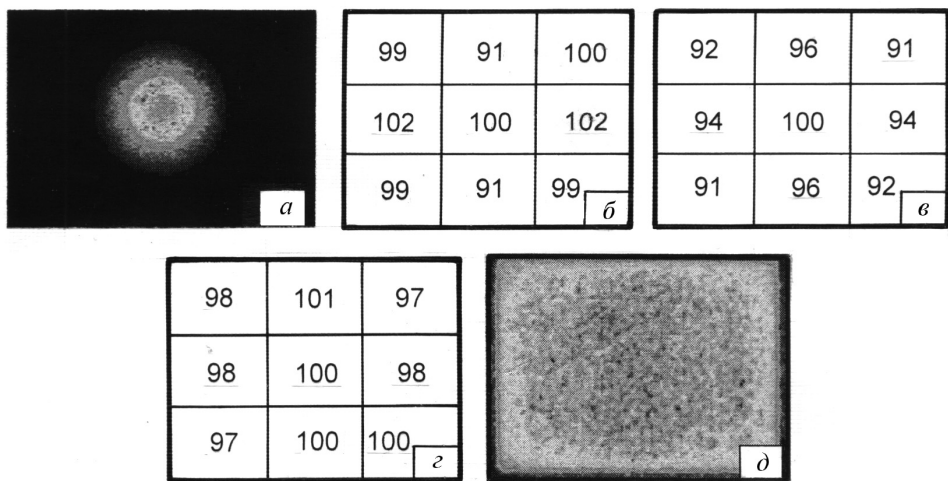


Рис. 11. Распределение освещенности на входном торце СИ (а), на выходном торце при длине СИ 70 (б), 100 (в), 130 (г) мм (размер приемника 13 мм×10 мм) и на модуляторе изображения (д) (размер приемника 21 мм×16 мм)

расстоянием 50 мм и линейным увеличением — 1,69. Первичный источник света — дуга — эмулировался поверхностным цилиндрическим излучателем длиной 1,3 мм с отношением диаметра к длине 1:2,5, излучающим в пределах полусферы.

На рис. 11 представлены результаты оценки освещенности рассматриваемой модели для различных плоскостей анализа. Равномерность освещенности оценивалась по девяти (3×3) зонам (стандартная процедура для обычных проекционных устройств). Для каждой зоны приведено процентное отношение суммарной освещенности в данной зоне к освещенности в центральной зоне. Можно заключить, что изменение освещенности в зонах от максимума к минимуму для длин СИ 70, 100 и 130 мм соответствует 11, 9 и 4 %, т.е. с увеличением длины СИ повышается равномерность освещения (в первом приближении — линейно).

Заключение. Анализ результатов, полученных с помощью построенной в Code V модели СИ, позволяет сделать следующие выводы.

1. Неравномерность освещенности на выходе, создаваемой СИ, уменьшается с увеличением длины СИ и угловой апертуры первичного источника излучения. При этом неравномерность яркости источника на входе СИ не влияет сколь-либо заметно на распределение освещенности на выходе СИ; одинаково эффективно “перемешиваются” изображения виртуальных точечных источников и протяженных источников (например, изображение разрядной дуги, сформированное малогабаритным высокоапертурным эллиптическим отражателем) с одной и той же угловой апертурой.

2. Пирамидальные СИ обеспечивают более высокую равномерность освещения по сравнению с обычным СИ той же длины при одинаковых размерах выходного торца.

3. СИ с прямоугольным и шестиугольным поперечным сечением обеспечивают высокую равномерность освещения на выходе при необходимой длине. СИ с круглым поперечным сечением не обеспечивает высокой равномерности освещения в выходной плоскости, независимо от длины интегратора, апертуры и размеров источника света. Установлено, что все СИ с формами, которые позволяют объединять несколько СИ с одной и той же формой поперечного сечения по периметру одного из них, грань к грани без зазоров, обеспечивают высокую равномерность освещенности; поскольку для пентагонального СИ невозможно плотное, без зазоров, заполнение площади выходного торца, то обеспечиваемая им равномерность недостаточна для практического применения.

4. СИ является дешевым и очень эффективным оптическим элементом проекционных систем, применяемым для получения квазиравномерного некогерентного освещения кадра (в том числе, светоклапанного модулятора изображения) требуемого формата при обеспечении высокой световой эффективности и компактности осветительной системы в целом.

5. СИ, в отличие от многолинзовых интеграторов, целесообразно использовать, в основном, в проекционных системах, основанных на модуляторах изображения, нечувствительных к состоянию поляризации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stupp H. E., Brensholtz M. S. Projection Displays. – John Wiley & Sons, 1999. – P. 121–123.
2. Cassarly W. J. Designing Efficient Illumination Systems: The Art of Uniformly Coupling Flux From a Source // Optical Research Associates (materials of SPIE course). – [Материалы семинаров; год, стр. и т.д. неизвестны].
3. Chong - Min Chang, Han - Ping D. Shieh. Design of illumination and projection optics for projectors with single digital micromirror devices // Applied Optics. – 2000. – V. 39. – C. 19. – P. 3202–3208.
4. Dewald D. S., Penn S. M., Davis M. Sequential Color Recapture and Dynamic Filtering: A Method of Scrolling Color // SID Int. Symp. Tech. Digest. – 2001. – V. XXXII. – P. 1076–1079.
5. Duelli M., McGettigan T., Pentigo C. Integrator Rod with Polarization Recycling Functionality // SID Int. Symp. Tech. Digest. – 2002. – V. XXXI. – P. 1078–1080.

Статья поступила в редакцию 12.09.2003



Олег Владимирович Рожков родился в 1938 г., окончил в 1961 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Действительный член Международной академии информатизации, член Международного общества по оптической технике SPIE и Оптического общества им. Д.С. Рождественского. Автор более 50 научных работ в области оптической обработки изображений методами фурье-оптики и цифровой оптоэлектроники.

O.V. Rozhkov (b. 1938) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. D. Sc. (Eng.), professor of “Laser and Optical-and-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Full member of International Academy of Informatization, member of Optical Society n.a. D.S. Rozhdestvensky, member of International Optical Society SPIE. Author of over 50 publications in the field of optical processing of images by methods of Fourier-optics and digital optoelectronics.



Кирилл Сергеевич Соколов родился в 1976 г., окончил в 2000 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области проекционных дисплеев. Соавтор четырех патентов и трех научных работ.

K.S. Sokolov (b. 1976) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2000. Post-graduate of “Laser and Optical-and-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of projection displays. Co-author of 4 patents and 3 publications.

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МГТУ имени Н.Э. БАУМАНА”

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ имени Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях. Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” с периодичностью 10 номеров в год.

Журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

К публикации в журнале “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” принимаются статьи, подготовленные в учебных, научных и промышленных организациях.

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	150	300
72783	“Приборостроение”	2	150	300
79982	“Естественные науки”	1	—	150