

О. В. Рожков, К. С. Соколов

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИНЗОВЫХ
РАСТРОВ В КАЧЕСТВЕ СВЕТОВЫХ
ИНТЕГРАТОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ
ПРОЕКЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Рассмотрены многолинзовые интеграторы, принципы их действия, типы и особенности применения в высокоэффективных проекционных системах, а также результаты их моделирования и анализа с помощью системы автоматизированного проектирования Code V.

В настоящее время в осветительной части всех проекционных систем с газоразрядными источниками света для повышения эффективности использования светового потока применяются так называемые интеграторы [1–7].

Как правило, они выполняют одновременно две основные функции: первая — количественное преобразование распределения освещенности на модуляторе изображения (кадре) в требуемый формат (обычно из круглого в прямоугольный); вторая — создание квазиравномерного освещения кадра — светового клапана (или модулятора изображения). В зависимости от типа используемого модулятора изображения — жидкокристаллического (например, LCOS — liquid crystal on silicon) или микрозеркального (DMD — digital micromirror device) — соответственно используются интеграторы двух видов: многолинзовые (МЛИ) и стержнеобразные (СИ). Каждый из этих двух видов имеет свои преимущества и недостатки, поэтому для их рационального использования в той или иной проекционной системе необходимо знать не только принцип их действия, но и особенности дизайна осветительной системы на их основе. В настоящей работе рассмотрены наиболее традиционные МЛИ, которые уже давно используются в специализированных оптических системах, например в микролитографии [8].

Принцип действия многолинзового интегратора. МЛИ выполняет в проекционной системе две функции: преобразует формат изображения источника света (круговой или, в общем случае, эллиптический в прямоугольный с требуемым соотношением сторон) и существенно повышает равномерность освещения светового клапана (кадра) путем разделения светового потока на несколько частей и их последующего переналожения (суперпозиции) в плоскости изображения. Как прави-

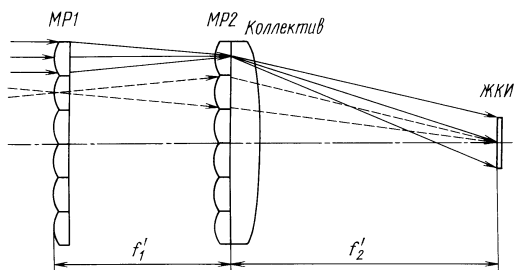


Рис. 1. Принцип действия МЛИ — особенности освещения ЖКИ (кадра)

ло, МЛИ состоит из двух растров (пластин) MP1 и MP2 (рис. 1), которые могут быть как одинаковыми, так и различными по форме.

МЛИ с различными по форме пластинами эффективнее, но из-за большей сложности разработки и производства, а также из-за трудностей, возникающих при юстировке, используется реже, чем МЛИ с идентичными пластинами.

МЛИ чаще всего используется в параллельном (сколлимированном) пучке лучей (например, после квазипараболического отражателя) и формирует массив мультиплицированных изображений источника света (как правило, дуги металлогалоидной лампы), которые затем интегрируются коллективом на пространственно-временном модуляторе проецируемого изображения (т.е. в плоскости кадра).

Рассмотрим типичный пример растра, состоящего из массива $3 \times 4 = 12$ линз, каждый элемент которого имеет формат $4 : 3$. Формат линз первого растра (MP1 на рис. 1) должен всегда соответствовать формату модулятора изображения (соотношению сторон рабочей части кадра).

Каждая из 12 линз первого массива MP1 формирует изображение источника в центре соответствующей линзы второго массива MP2, создавая, таким образом, массив из 12 виртуальных источников света. Каждый элемент второго линзового массива MP2 действует как полевая линза (коллектив) и совместно с основным (большим) коллективом отображает соответствующий элемент первого массива на световом клапане (кадре). Для корректной работы такой осветительной системы необходимо, чтобы фокусные расстояния обоих растров и расстояние между ними были равны.

На рис. 2 показана эффективность использования интегрирования для создания квазиравномерного освещения кадра. Для типичного квазипараболического отражателя с металлогалоидной лампой (дуга которой лежит на оптической оси системы) характерно монотонное убывание яркости от центра к краю; при этом, как правило, присутствует эффект центрального затенения освещающего пучка электро-

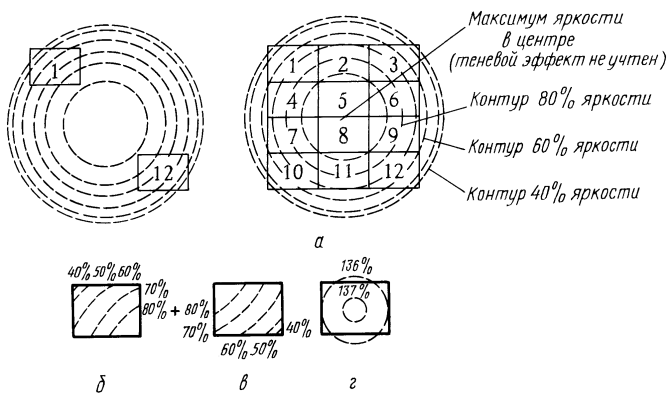


Рис. 2. Эффект интегрирования при создании квазиравномерного освещения:
a — контуры равной яркости первичного изображения дуги; *б* — распределение яркости для элемента 1; *в* — распределение яркости для элемента 12; *г* — суммарная яркость для элементов 1 и 12

дом самой лампы и ее цоколем. Контуры равной яркости первичного изображения дуги, образованного коллектором (в данном примере — глубоким квазипараболоидальным отражателем), показаны на рис. 2, *a* концентрическими окружностями. Из рис. 2, *б* видно, что для крайнего линзового элемента 1 правая нижняя область будет существенно ярче (80 %), нежели левая верхняя (40 %). Для диаметрально противоположного элемента 12 картина распределения яркости будет инверсной, т.е. левая верхняя область ярче правой нижней (см. рис. 2, *в*). Как видно из рис. 2, *г*, суммарная яркость для этих двух элементов (после переналожения их изображений коллективом) получится значительно более равномерной. Когда будут просуммированы яркости для большого количества отдельных элементов раstra (в данном случае — для 12 элементов), равномерность освещения модулятора изображения станет очень высокой. Таким образом, в плоскости кадра сформируется множество виртуальных источников, количество которых соответствует количеству линз в массиве.

Однорастровый МЛИ. В простейшем варианте МЛИ может состоять из одного линзового раstra и коллектива (рис. 3). В этом случае пучки, сформированные каждой линзой раstra, перекрываются в бесконечности (см. рис. 3, *a*); путем добавления коллектива (собирающей линзы) бесконечность смещается на конечное расстояние от линзового массива (рис. 3, *б*), где располагается кадр. Размер изображения, которое формируется в фокальной плоскости коллектора, вычисляется по формуле

$$y_{\text{img}} = \frac{b_{\text{lens}} f'_{\text{col}}}{f'_{\text{lens1}}}, \quad (1)$$

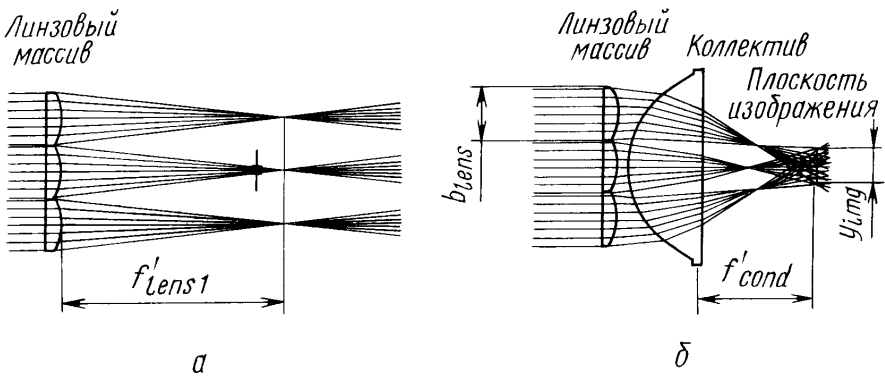


Рис. 3. Работа однорастрового МЛИ в сколлимированном (коллектором) пучке лучей с углом расходимости $\theta = 0^\circ$

где b_{lens} — световой размер линзы растра, f'_{col} — фокусное расстояние коллектива, f'_{lens1} — фокусное расстояние линзы растра.

Как видно из рис. 3, б, при высокой степени коллимации пучка лучей (например, лазера), т.е. при малом угле расходимости, однорастровый МЛИ работает хорошо. Однако наклонные пучки лучей (рис. 4), идущие от периферийных частей источника света при конечных размерах коллектора (обычно — глубокого квазипараболического отражателя) вносят заметное “размытие” в равномерно освещенное изображение, что приводит к значительным световым потерям.

По этой причине обычно используются более сложные МЛИ с двумя растрами.

Двухрастровый МЛИ (добавление массива полевых линз к однорастровому МЛИ). Дополнительный массив полевых линз позволяет устранить “размытие” от наклонных пучков лучей при условии, что угол расходимости не превышает угловую апертуру полевой линзы. В результате при использовании массива полевых линз сколлимированные осевой и наклонный пучки перекрываются в плоскости кадра

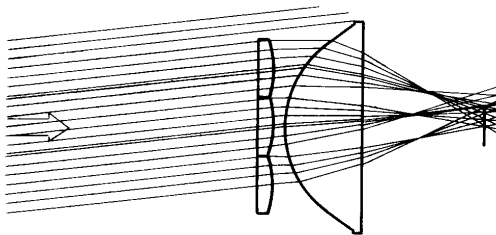


Рис. 4. Работа однорастрового МЛИ в сколлимированном (коллектором) пучке лучей, идущем от периферийной части разрядной дуги под углом 6°

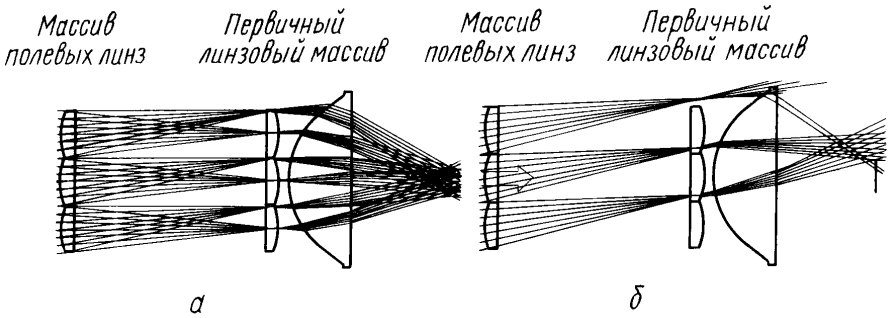


Рис. 5. Работа двухрастрового МЛИ при различных углах расходимости сколлимированного пучка:

a — $\theta = 0^\circ$ и 6° ; *b* — $\theta = 8^\circ$

(рис. 5, *a*). Однако если угол расходимости исходного пучка (от собирающего отражателя — зеркального коллектора) превышает угловую апертуру полевой линзы, то будет освещена также область вне требуемых границ кадра (рис. 5, *b*); это заметно снизит световую эффективность системы.

Таким образом, размеры линз МЛИ должны быть согласованы с углом расходимости сколлимированного пучка от коллектора (например, квазипараболического отражателя с металлогаллоидной лампой). На рис. 6, *a* представлены идеализированная геометрическая модель для тандема МЛИ и ход лучей для одного канала (центрального).

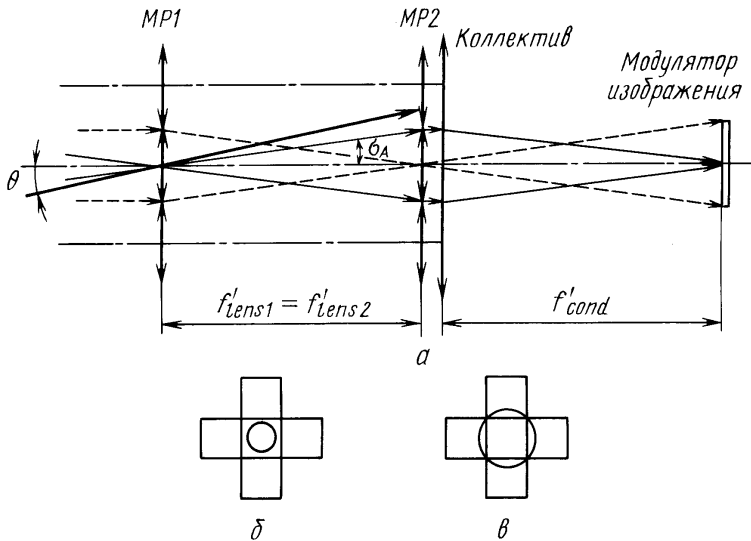


Рис. 6. Идеализированная модель двухрастрового МЛИ (*a*) и два случая заполнения линз второго раstra MP2 (*b* — недозаполненные и *v* — перезаполненные линзы)

Из рис. 6 видно, что если угол θ расходимости сколлимированного пучка больше апертурного угла σ_A , то будут наблюдаться апертурные потери в виде перезаполнения апертуры линз второго линзового массива (рис. 6, в) и побочных эффектов в плоскости модулятора изображения (кадре) в виде, например, крестообразного паразитного изображения (если форма линз растра прямоугольная).

Угол расходимости сколлимированного пучка, в первую очередь, зависит от размера источника света (в случае металлогалогидной лампы — от длины разрядной дуги), который определяется межэлектродным расстоянием, а также от фокусного расстояния собирающей оптической системы (коллектора), которая служит для максимального использования светового потока от источника: чем больше фокусное расстояние при неизменном размере источника или чем меньше размер источника при неизменном фокусном расстоянии, тем меньше расходимость освещающего интегратор пучка. Коллектором обычно является квазипараболический или (реже) квазиэллиптический отражатель; для стандартного параболического отражателя с фокусным расстоянием 7 мм при межэлектродном расстоянии 1,3 мм угол расходимости θ обычно составляет $\pm 3^\circ$.

Если количество линз в массиве слишком мало, то равномерность освещения кадра недостаточно высока. Если же линз слишком много, то световая эффективность уменьшается за счет того, что области между линзами в реальной системе имеют определенную величину (в зависимости от технологического процесса изготовления растра) и представляют собой своего рода паразитные элементы (переходные области); кроме того, усложняется взаимная юстировка линзовых массивов. Типичные размеры переходной области составляют 0,1...0,3 мм. Потери на переходных областях линзовых массивов будут еще больше, если элементы в массиве имеют некоторую децентровку (так называемые линзовые массивы с децентрированными элементами); для них размеры переходных областей могут варьироваться в пределах 0,3...0,4 мм.

С учетом данных факторов, а также накопленного практического опыта количество линз в массиве обычно составляет от 25 до 100.

Усложнение формы линз второго растра. В некоторых МЛИ для повышения световой эффективности второй линзовый массив (ЛМ2) имеет аперриодическую структуру, как, например, в патентах [6, 7].

Вариант МЛИ с аперриодическим ЛМ2 показан на рис. 7. Форма и положение линз в аперриодическом ЛМ2 выбираются так, чтобы они примерно соответствовали размерам и положению наиболее яркой части изображений разрядной дуги, создаваемых первым линзовым массивом (ЛМ1). Таким образом, форма линз в ЛМ2 как бы охватывает

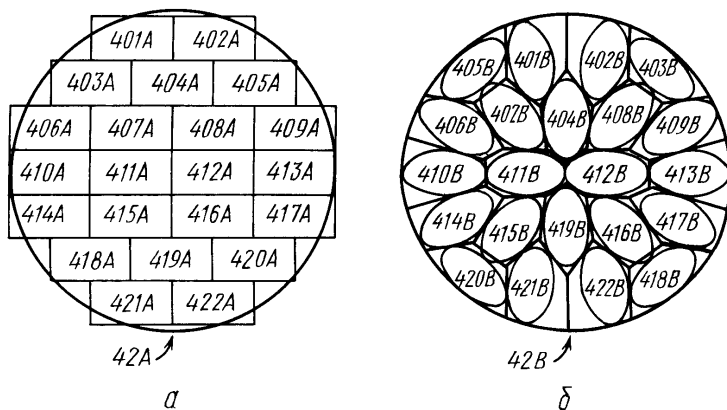


Рис. 7. Пример МЛИ с аperiodическим ЛМ2 [6]

центральную часть вторичного изображения источника света, которое на рис. 7, б показано в виде эллипса. Отметим, что форма и формат линз в ЛМ1 должны соответствовать форме и формату модулятора изображения (кадра). При этом если элементы ЛМ1 децентрированы, то элементы ЛМ2 также децентрируются на соответствующую величину, чтобы сохранить параллельность главных лучей после каждой линзы ЛМ2. Основной целью аperiodического дизайна ЛМ2 является повышение эффективности использования светового потока (путем уменьшения апертурных потерь и потерь на переходных областях) за счет корректировки некоторых aberrаций, таких как кома и астигматизм, присущих параболическим и эллиптическим коллекторам отражательного типа.

Однако при таком усложненном дизайне существуют определенные недостатки системы. Например, в данном случае невозможно использовать компактную периодическую призматическую систему преобразования поляризации, описанную в работе [9], которая располагается в оптической системе после ЛМ2 и в настоящее время применяется в большинстве проекторов с жидкокристаллическими модуляторами изображения. Помимо этого, процессы разработки, изготовления и юстировки МЛИ с использованием аperiodического ЛМ2 требуют больших затрат. Поэтому выбор вида интегратора для конкретной задачи остается за разработчиком.

Применение МЛИ в проекционных системах — результаты моделирования с помощью системы автоматизированного проектирования Code V. Как уже было отмечено, МЛИ, как правило, используются в параллельном (сколлимированном) пучке освещающих лучей, который формируется квазипараболическим отражателем с металлогалогенной лампой. Типичная схема высокоэффективной осветительной

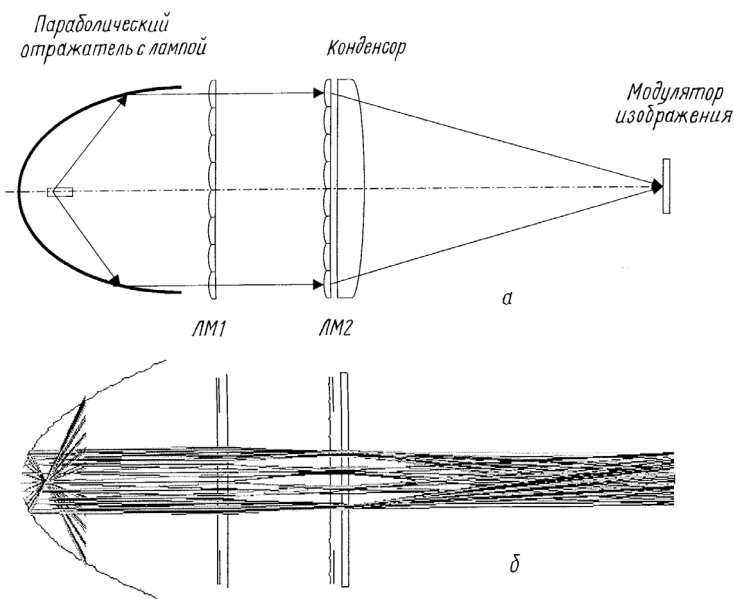


Рис. 8. Оптическая схема осветительной системы с двухрастровым МЛИ (а) и модель для анализа (б)

системы с использованием МЛИ и модель для ее анализа, построенная в системе автоматизированного проектирования (САПР) Code V, представлены на рис. 8.

Источник света — металлогалоидная лампа — расположен вблизи фокуса квазипараболического отражателя (с фокусным расстоянием $f' = 7$ мм, диаметром $D = 60$ мм), который собирает и коллимирует свет от источника. Количество линз в каждом растре МЛИ составляет $8 \times 12 = 96$ с размерами каждой из линз $6,4 \times 4,8$ мм (что соответствует формату 4:3) и фокусным расстоянием $f'_{\text{линс1}} = 28,7$ мм ($R_{\text{линс1}} = 15$ мм, $n = 1,5$). Фокусное расстояние линз МЛИ выбрано таким образом, чтобы при размере разрядной дуги 1,3 мм угол расходимости сколлимированного пучка не превосходил апертуру линз и не было переполнения линз в массиве ЛМ2. Коллектив моделировался идеальной линзой с фокусным расстоянием $f'_{\text{конд}} = 91,1$ мм, что соответствует размерам модулятора изображения (кадра) $20,3 \times 15,24$ мм (диагональ 1"). На рис. 8, б трассировка лучей показана только для угла раскрытия 90° (это связано с особенностями ввода передней апертуры в САПР Code V), поэтому апертура квазипараболического отражателя заполнена не полностью; однако при последующем анализе освещенности в САПР Code V ход лучей рассчитывается для любых углов в пределах сферы, охватывающей источник. Источник света предварительно моделировался поверхностным цилиндрическим излучателем с отношением диаметра к длине 1:2,5, что соответствует стандартной лампе.

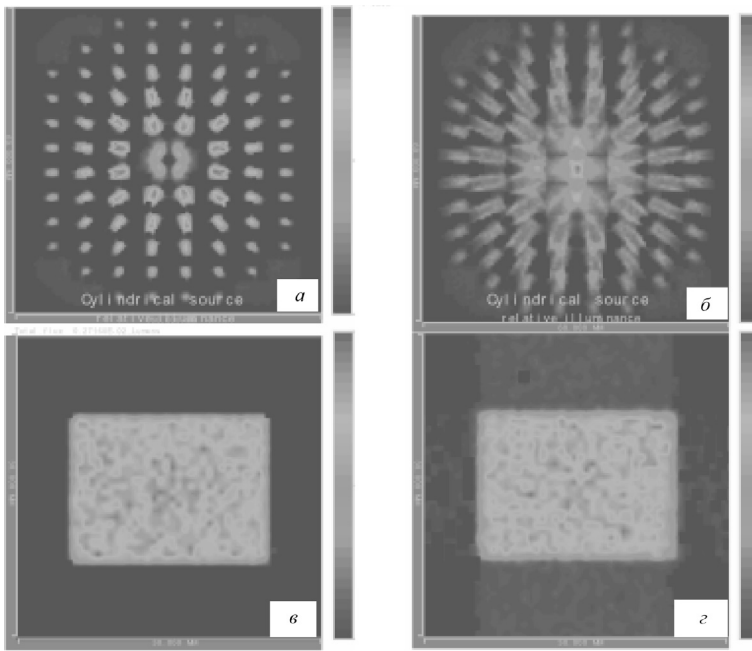


Рис. 9. Распределение освещенности в плоскости ЛМ2 при размерах поля 60×60 мм (а, б) и в плоскости модулятора изображения (кадра) при размерах поля 30×30 мм (в, г); длина разрядных дуг составляет 1,3 мм (а, в) и 3 мм (б, г)

Для того чтобы количественно исследовать эффект перезаполнения линз МЛИ (т.е. роль апертурных потерь), анализ освещенности проводился в основном в двух плоскостях: в плоскости ЛМ2 и в плоскости модулятора изображения (кадра) для разрядных дуг длиной 1,3, 3 и 5 мм. Результаты анализа приведены на рис. 9 и 10, из которых виден эффект перезаполнения линз в МЛИ при увеличении размера источника и, следовательно, угла расходимости (см. рис. 9, б); в результате начинает формироваться “крестообразное” паразитное изображение. Это становится особенно заметно при длине источника 5 мм (см. рис. 10).

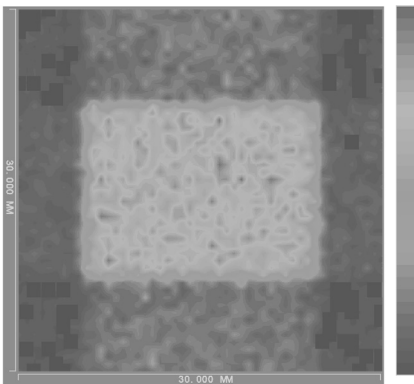


Рис. 10. “Крестообразное” распределение освещенности на модуляторе изображения (в кадре) при длине разрядной дуги 5 мм

Подведем итоги предварительного анализа. Если угол расходимости сколлимированного пучка превышает угловую апертуру NA полевой линзы, то освещается область вне требуемых границ изображения — формируется паразитное изображение; апертурные потери выражаются в виде побочных (квазишумовых) эффектов в плоскости изображения — для прямоугольных линз это “крестообразное” изображение.

Итак, для того чтобы минимизировать апертурные потери на МЛИ, достаточно обеспечить условие, при котором угол расходимости сколлимированного пучка от квазипараболического отражателя (в данном случае) будет меньше апертуры полевой линзы. Однако в реальности допустимый угол θ расходимости сколлимированного пучка ограничивается размерами разрядной дуги (межэлектродным расстоянием) и фокусным расстоянием квазипараболического отражателя, а угловая апертура полевой линзы ограничивается диафрагменным числом F осветительной системы в целом, которое, в свою очередь, определяется рабочим углом раскрытия светового конуса (рабочим апертурным углом) на модуляторе изображения. Типичное значение F для современных проекционных систем отображения информации варьируется в пределах от 2 до 3, что соответствует рабочим апертурным углам на модуляторе изображения от $18,5$ до $9,6^\circ$.

Формулы для расчета геометрических параметров МЛИ в зависимости от диафрагменного числа осветительной системы и детальный анализ модели осветительной системы в САПР Code V. На рис. 11 приведена идеализированная модель осветительной системы с бесконечно тонкими МЛИ и коллективом.

Связь диафрагменного числа F с угловой апертурой описывается формулой

$$F = \frac{f'_{col}}{D_{col}} \approx \frac{1}{2NA} = \frac{1}{2 \sin(\sigma_{col})}, \quad (2)$$

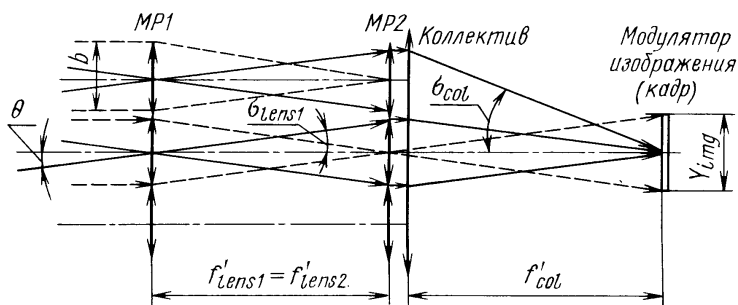


Рис. 11. Идеализированная модель осветительной системы с двухрастровым МЛИ и коллективом

где f'_{col} , D_{col} , σ_{col} — фокусное расстояние, диаметр и апертурный угол коллективной линзы; NA — угловая апертура полевой линзы.

Тогда фокусное расстояние каждой линзы в линзовом массиве выражается следующим образом:

$$f'_{\text{lens}} = \frac{b f'_{\text{col}}}{y_{\text{img}}} = \frac{b}{y_{\text{img}}} D_{\text{col}} F = \frac{D_{\text{col}}^2}{y_{\text{img}} N_{\text{row}}} F, \quad (3)$$

где b — размер линзы в линзовом массиве (как правило, наименьший по высоте линзового массива); y_{img} — размер изображения (также наименьший); N_{row} — количество линз по высоте линзового массива (количество строк).

Диаметр коллектива D_{col} , как правило, определяется диаметром квазипараболического отражателя и, соответственно, является заданной величиной (так же, как диафрагменное число осветительной системы F и размер изображения y_{img}). Таким образом, изменяемой величиной является только размер линзы в линзовом массиве, который, в свою очередь, определяется количеством линз в массиве (в данном случае — по высоте линзового массива). Максимальный угол расходимости сфокусированного пучка от квазипараболического отражателя определяется следующей формулой:

$$\theta_{\text{max}} = \arctg\left(\frac{y_{\text{img}}}{2D_{\text{col}}F}\right). \quad (4)$$

При этом размер изображения существенно зависит от формата кадра. Так, если взять типичное значение диафрагменного числа $F = 2,5$, диагональ модулятора изображения (кадра) $1''$ и диаметр коллектива 60 мм, то при форматах $1:1$, $4:3$ и $16:9$ максимальный угол расходимости будет составлять соответственно $3,426^\circ$, $2,908^\circ$ и $2,377^\circ$. Превышение максимального значения этого угла неизбежно приведет к апертурным потерям и снижению световой эффективности осветительной системы.

Распределение освещенности на модуляторе изображения с диагональю $1''$ (формат $1:1$) модели осветительной системы, построенной в САПР Code V, с МЛИ из $10 \times 10 = 100$ линз показано на рис. 12 (параметры параболического отражателя и источника приведены выше). Анализ распределения освещенности в пределах кадра показал, что равномерность освещения, т.е. отношение освещенности в каждой из девяти исследованных зон к освещенности в центральной зоне, составляет более 95% . При этом эффективность использования светового потока, собираемого параболическим отражателем от дугового источника, равна $89,7\%$; иначе говоря, апертурные потери на МЛИ с учетом потерь на переходных зонах шириной $0,2$ мм в линзовом массиве составляют лишь $10,3\%$.

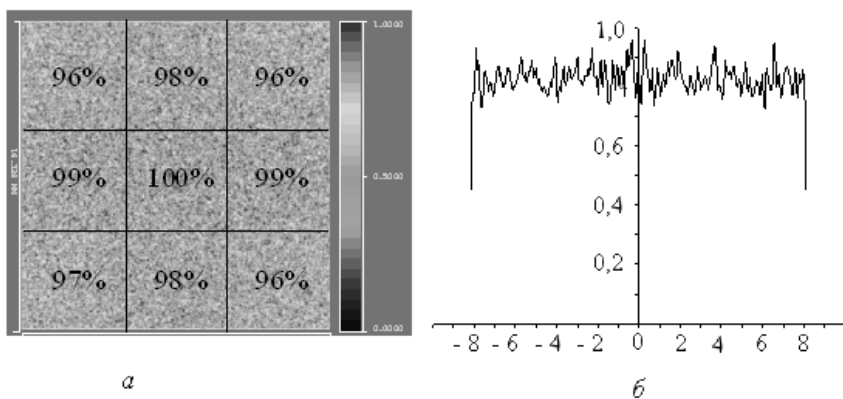


Рис. 12. Распределение освещенности в плоскости модулятора изображения (диагональ кадра 1", формат 1:1) (а) и его центральное горизонтальное сечение (б)

На рис. 13 показано центральное сечение распределения освещенности, создаваемой параболическим отражателем (зеркальным коллектором) для разрядной дуги длиной 1,3 мм, аппроксимированной 12 поверхностными излучателями в виде состыкованных усеченных конусов. Из рис. 13 видно, что угол расходимости изменяется от -5 до $+5^\circ$, т.е. существенно превышает значение рассчитанного ранее максимально допустимого угла расходимости для модулятора изображения с диагональю 1" при различных форматах кадра.

Апертурные потери, которые возникают из-за того, что угол расходимости сколлимированного пучка превышает максимально допустимый для данного МЛИ угол, можно приблизительно оценить, если

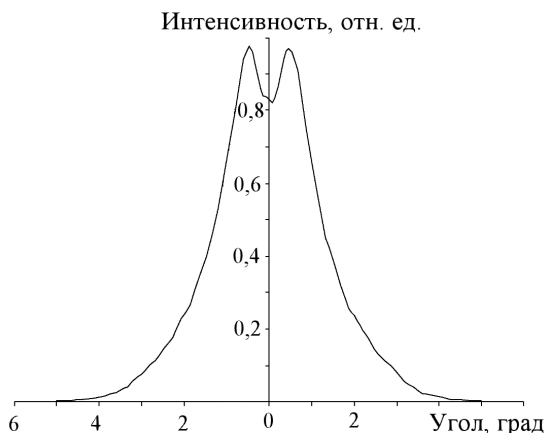


Рис. 13. Центральное сечение распределения освещенности, создаваемой параболическим отражателем ($f' = 7$ мм, $D = 60$ мм) для аппроксимированного 12 поверхностными излучателями источника длиной 1,3 мм

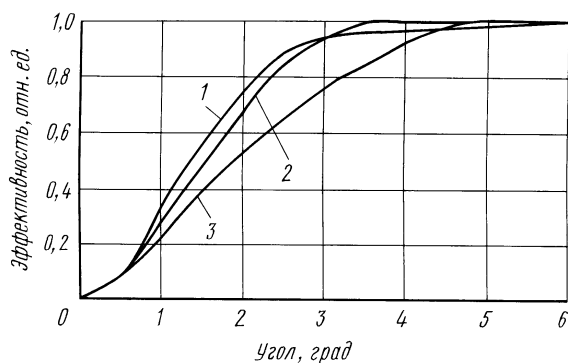


Рис. 14. Зависимость световой эффективности параболического отражателя от угла расходимости сколлимированного пучка для различных значений фокусного расстояния:

9 (1), 7 (2), 5 (3) мм

построить зависимость эффективности параболического отражателя от угла расходимости сколлимированного пучка. Установив в фокальной плоскости апертурную диафрагму с изменяющимся диаметром, нетрудно определить величину светового потока в зависимости от углового размера диафрагмы, соответствующего расходимости сколлимированного пучка от параболического отражателя.

На рис. 14 представлен график, построенный путем трассировки лучей в САПР Code V для различных значений фокусного расстояния параболического отражателя (зеркального коллектора). Из графика видно, что при угле расходимости сколлимированного пучка, равном 3° , для параболического отражателя с фокусным расстоянием 7 мм эффективность будет равна примерно 93 %, а с фокусным расстоянием 5 мм — лишь 77 %. Таким путем можно определить минимальные апертурные потери, которые возникают, если угол расходимости сколлимированного пучка превышает максимально допустимый для МЛИ угол расходимости, определяемый по формуле (4) для осветительной системы с заданным диафрагменным числом F .

Влияние количества линз в линзовом массиве на равномерность освещения кадра. Как уже было отмечено, источник света — газоразрядные проекционные лампы высокого давления (металлогаллоидные лампы или ксеноновые лампы), которые применяются в настоящее время в высокоэффективных проекционных системах, — имеют существенно неравномерное пространственное распределение яркости с двумя максимумами (“горячими точками”) вблизи электродов. На рис. 15 показано характерное пространственное (почти осесимметричное) распределение яркости в виде контуров равных яркостей разрядной дуги на примере лампы OSRAM VIP100W, восстановлен-

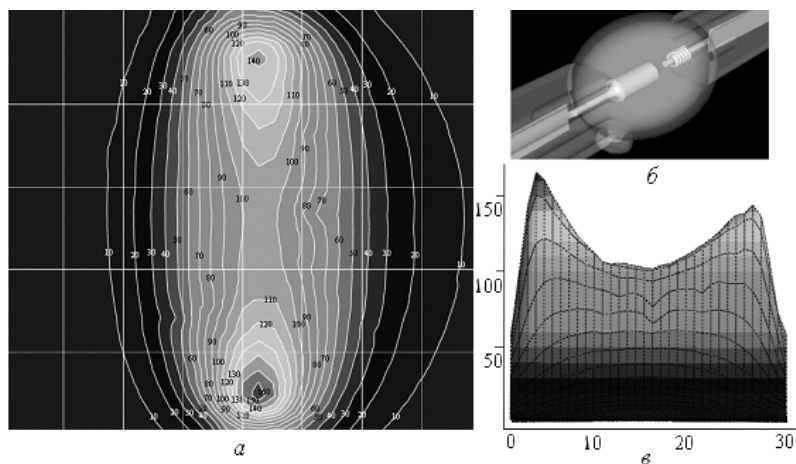


Рис. 15. Пространственное распределение яркости разрядной дуги в виде контуров равной яркости (а); фото дуговой лампы высокого давления (б) и распределение яркости вдоль дуги (в)

ное по результатам измерения, а также распределение яркости в тангенциальном сечении, проходящем через “горячие точки”. На рис. 16 показано пространственное распределение яркости соответствующей модели, построенной в САПР Code V и аппроксимирующей дугу 12 поверхностными излучателями цилиндрической и сферической формы. Полученная модель удовлетворительно описывает разрядную дугу в рамках анализа освещенности и вполне достаточна для того, чтобы можно было корректно учесть неравномерность пространственного и углового распределения яркости металлогаллоидной лампы и более адекватно оценить влияние количества линз в линзовом массиве на равномерность освещения.

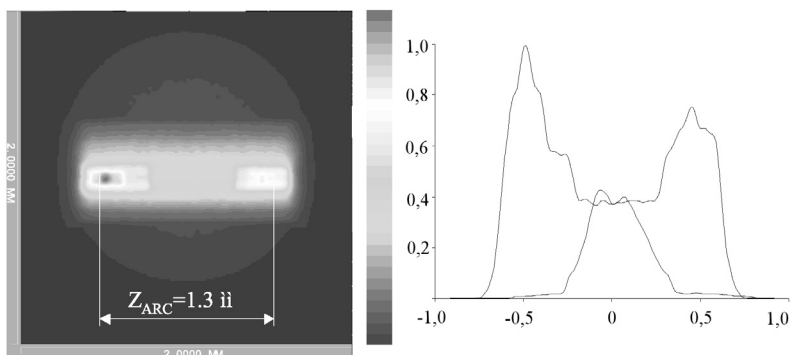


Рис. 16. Пространственное распределение яркости для модели разрядной дуги, построенной в САПР Code V с помощью аппроксимации 12 поверхностными излучателями



Рис. 17. Неравномерность освещения модулятора изображения (кадра) в зависимости от количества линз в линзовом массиве (в столбце), т.е. по вертикали

На рис. 17 представлена зависимость равномерности освещенности от количества линз в МЛИ, построенная в результате трассировки лучей для описанной выше модели. При изменении количества линз в линзовом массиве (в столбце) фокусное расстояние также изменяется согласно формуле (3) так, чтобы диафрагменное число проектора F оставалось неизменным.

Равномерность освещения оценивалась по $5 \times 5 = 25$ зонам. Для каждой зоны находилось процентное отношение суммарной освещенности к освещенности в центральной зоне. Количественно неравномерность оценивалась как разность между максимальным и минимальным отношениями для всех 25 зон активной области модулятора изображения (кадра). Из приведенной на рис. 17 диаграммы видно, что 5 линз в столбце (25×25 в массиве) обеспечивают довольно высокую равномерность освещения. Дальнейшее увеличение количества линз в МЛИ лишь незначительно улучшает равномерность освещения кадра, но усложняет конструкцию линзового раstra с технологической точки зрения и приводит к дополнительным световым потерям на переходных зонах между линзами.

На рис. 18 показано распределение освещенности, формируемое ЛМ1 (10×10 линз) в плоскости ЛМ2, из которого видно, что линейный размер изображения разрядной дуги уменьшается от центральной области к периферии параболического отражателя, что связано с уменьшением коэффициента увеличения и угловой расходимости. Более наглядно этот эффект показан на рис. 19.

Зная распределение освещенности в фокальной плоскости ЛМ1, можно выбрать форму линз и их расположение в ЛМ2 таким образом,

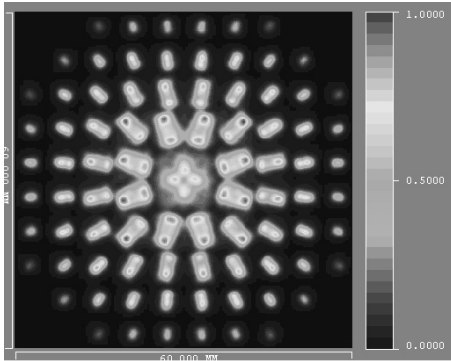


Рис. 18. Распределение освещенности в фокальной плоскости ЛМ1

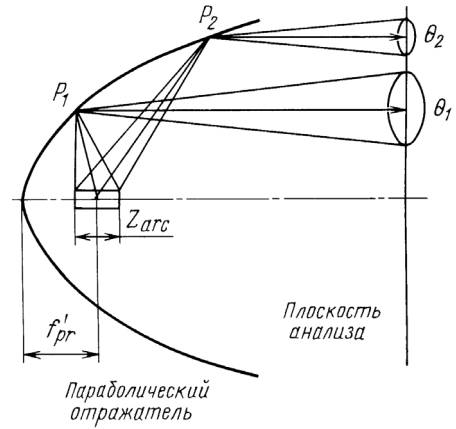


Рис. 19. Уменьшение угловой расходимости сколлимированного пучка лучей от центральной области к периферии (для глубокого параболического отражателя)

чтобы изображения дуги почти целиком (даже с учетом аберраций) вписывались в апертуры соответствующих линз ЛМ2 и потери на переходных областях были минимальными.

Заключение. Знание основных принципов действия многолинзовых интеграторов, а также особенностей их расчета и применения в проекционных устройствах позволяет с помощью САПР построить корректную модель и, правильно оценив результаты анализа, получить максимальную световую эффективность осветительной системы в целом при высокой равномерности освещения кадра, а также оптимальном соотношении цены и качества.

В настоящей работе рассмотрены многолинзовые интеграторы, принципы их действия, их типы и особенности применения в высокоэффективных проекционных системах, а также результаты моделирования и анализа с помощью САПР Code V. Показано:

- однорастровый МЛИ хорошо работает в сколлимированном пучке лучей с малой угловой расходимостью, однако наклонные пучки, идущие от периферийных частей источника света при конечных размерах коллектора, вносят “размытие” в равномерное освещение кадра, что приводит к заметным световым потерям;

- дополнительный массив полевых линз позволяет устранить “размытие” от наклонных пучков лучей при условии, что угол расходимости не превышает угловую апертуру полевой линзы;

- для того чтобы минимизировать апертурные потери на МЛИ, до-

статочно обеспечить условие, при котором угол расходимости сколлимированного пучка от квазипараболического отражателя будет меньше апертуры полевой линзы; однако в реальности допустимый угол θ расходимости сколлимированного пучка ограничен размерами источника света (обычно — межэлектродным расстоянием) и фокусным расстоянием квазипараболического отражателя, а угловая апертура полевой линзы ограничена диафрагменным числом осветительной системы в целом;

— апертурные потери, которые возникают из-за того, что угол расходимости сколлимированного пучка превышает максимально допустимое значение, можно приблизительно оценить, построив зависимость эффективности параболического отражателя от угла расходимости сколлимированного пучка;

— зная распределение освещенности в фокальной плоскости ЛМ1, можно выбрать форму линз и их расположение в ЛМ2 таким образом, чтобы наиболее энергетичная часть изображения дуги почти целиком вписывалась в апертуры соответствующих линз ЛМ2 и потери на переходных областях были минимальными;

— как правило, пять линз в столбце ($5 \times 5 = 25$ в массиве) обеспечивают довольно высокую равномерность освещения кадра (неравномерность менее 10 %) и дальнейшее увеличение количества линз в растре лишь незначительно повышает равномерность освещения, но заметно усложняет конструкцию линзового раstra с технологической точки зрения и приводит к дополнительным световым потерям на переходных зонах между линзами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stupp E. H., Brenneholtz M. S. Projection Displays. – 1999. – P. 121–123.
2. Заказов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1992.
3. Cassarly W. J. Designing Efficient Illumination Systems: The Art of Uniformly Coupling Flux From a Source. – Optical Research Associates.
4. Riser A. P., Cassarly W. J. Analysis of single lens arrays using convolution // Optical Engineering. – 2001. – V. 40. – № 5. – P. 805–813.
5. Dickey F. M., Holswade S. C. Laser Beam Shaping Theory and Techniques. – 2000. – P. 273–311.
6. Pat. 5 662 401 USA. Integrating lens array and image forming method for improved light efficiency / J. Shimizu, P. Jansser. – 1997.
7. Pat. 5 418 583 USA. Optical illumination system and projection display apparatus using the same / Y. Masumoto. – 1995.
8. Вычислительная техника: Справочник / Под ред. М.М. Русинова. – М.: Машиностроение, 1984. – 423 с.

Статья поступила в редакцию 28.05.2003

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 Оптического общества им. Д.С.Рождественского и Международного общества по оптической технике SPIE/RUS. 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, regular 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.

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.