



УДК 778.23

С. В. Куклин, Г. В. Тихомирова, К. К. Гудинов, С. А. Двуреченский
Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения

Компьютерное моделирование светодиодного осветителя с фоконной оптикой для видеопроектора

Выполнено компьютерное моделирование и исследование различных вариантов построения светодиодных осветителей для одноматричного LCD-видеопроектора с использованием непоследовательных оптических компонентов. Применение таких компонентов позволяет сформировать световой пучок с необходимыми параметрами для согласования с последующей оптической системой. Компьютерное моделирование позволило проанализировать и оценить характеристики разрабатываемой системы на этапе проектирования, а в некоторых случаях и оптимизировать ее.

Светодиодный осветитель, фокон, световой поток, поток излучения, ЖК-матрица, проекционный объектив, равномерность освещенности, моделирование

Классические схемы построения светооптических систем, удовлетворяющие условию синусов Аббе [1], позволяют собрать световой поток в пределах апертурного угла $2U \approx 58^\circ$, а при использовании асферических линз или линз Френеля этот угол может быть увеличен до 90° [2], [3]. При этом обеспечивается равномерность освещенности в пределах 75–80 %. Для повышения равномерности до 90 % можно использовать дополнительную растровую оптику [4], [5].

Во всех указанных светооптических системах световые лучи от поверхности излучающего источника проходят через оптические элементы в строгой последовательности. Каждый луч проходит через каждую оптическую поверхность только один раз и только один раз проходит через всю заданную последовательность поверхностей.

Известны системы, для которых характерна "непоследовательная" трассировка лучей, т. е. лучи трассируются в соответствии с фактическим физическим расположением поверхностей вне зависимости от того, в каком порядке они находятся. К элементам с непоследовательной трассировкой лучей относятся фоконны, в которых луч многократно отражается от поверхности [6], [7].

Фокон – оптический или полый (зеркальный) световод с отражающей поверхностью, имеющий форму конуса или близкого к нему тела.

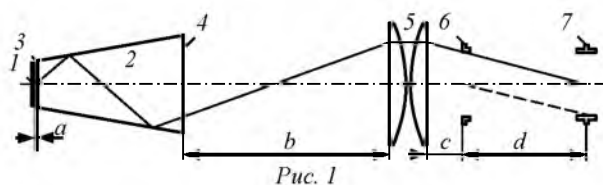
Использование фокона в оптической схеме светодиодного осветителя позволяет собрать практи-

чески весь световой поток, излучаемый светодиодной (LED) матрицей, и направить его на проецируемый кадр и в проекционный объектив. При этом за счет задаваемых углов конусности фокона прямоугольного сечения в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях можно согласовать параметры светодиодного источника света с размерами проецируемого кадра и апертурным углом проекционного объектива, сведя к минимуму световые потери. Кроме того, излучение, попавшее в световод, усредняется по интенсивности за счет многократных внутренних отражений световых лучей от боковых поверхностей, повышая тем самым равномерность освещенности.

В программе расчета оптических систем ZEMAX имеется опция "непоследовательные компоненты", позволяющая рассчитывать подобные оптические системы, содержащие последовательные оптические схемы и непоследовательные компоненты. В ZEMAX они называются "NSC-системы с портами ввода и вывода лучей" (NSC – non-sequential components).

Принципиальная оптическая схема для моделирования светооптической системы показана на рис. 1, где 1 – источник излучения (LED-матрица); 2 – NSC-элемент (фокон) с входным окном 3 и выходным окном 4; 5 – конденсор; 6 – входное окно объектива; 7 – жидкокристаллическая матрица.

Далее в статье в качестве источника излучения рассматривается LED-матрица типа Epistar



3F80 с излучающей поверхностью с размерами 15.4×12.6 мм, состоящей из 80 кристаллов. Угол излучения равен 140° . Световой поток составляет 4800 лм [8].

Количество лучей, исходящих от источника, при моделировании принято равным $5 \cdot 10^6$, мощность источника $P_e = 1$ Вт.

Сечение анализируемого пучка характеризуется:

- размером;
- распределением освещенности в плоскости детектора $I(x, y)$ и максимальным значением освещенности в этой плоскости I_{\max} ;
- полной мощностью, прошедшей через сечение, $P_{\text{пр}}$.

На рис. 2 показана модель светодиодного осветителя, выполненная в программе ZEMAX, где 1 – фокус; 2 – конденсор; 3 – ЖК-матрица. Распределение освещенности анализировалось в выходной плоскости фоконка 4, в плоскости матрицы 5 и во входном зрачке проекционного объектива 6.

Размеры фоконка (рис. 3) подбирались таким образом, чтобы большинство лучей, излучаемых светодиодной матрицей, попали в фокус и выходили из него. Расстояния между элементами оптической схемы (рис. 1) задавались исходя из их характеристик. Расстояние между источником света и входным окном фоконка $a = 0.05$ мм задано минимальным. Расстояние между фокусом и конденсором $b = 116$ мм равно фокусному расстоянию конденсора. Расстояние между конденсором и ЖК-матрицей $c = 20$ мм задано исходя из условий наилучшей освещенности. Расстояние между ЖК-

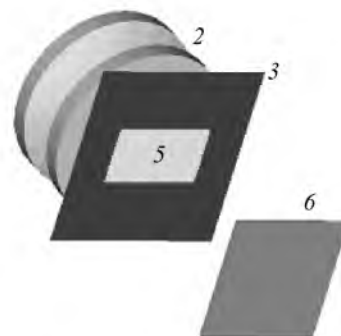
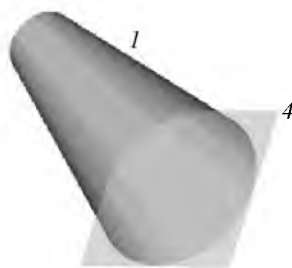


Рис. 2

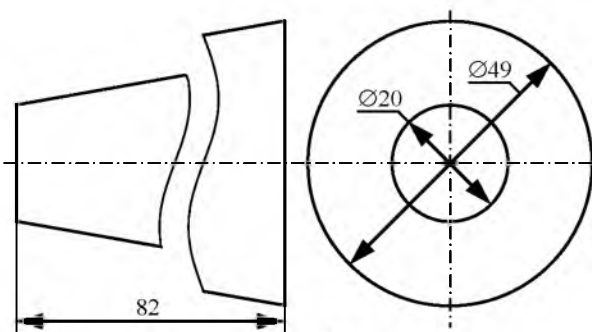


Рис. 3

матрицей и входным зрачком объектива $d = 68$ мм равно фокусному расстоянию объектива.

Проведены трассировка лучей и расчет энергетической эффективности системы¹. На рис. 4 изображены некоторые лучи, проходящие через схему. Как следует из рисунка, лучи, вышедшие из источника света, проходят сквозь фокус, отражаясь от внутренней его поверхности.

На рис. 5 изображены диаграммы распределения энергии в указанных плоскостях (по терминологии ZEMAX – точечные диаграммы): рис. 5, а – в выход

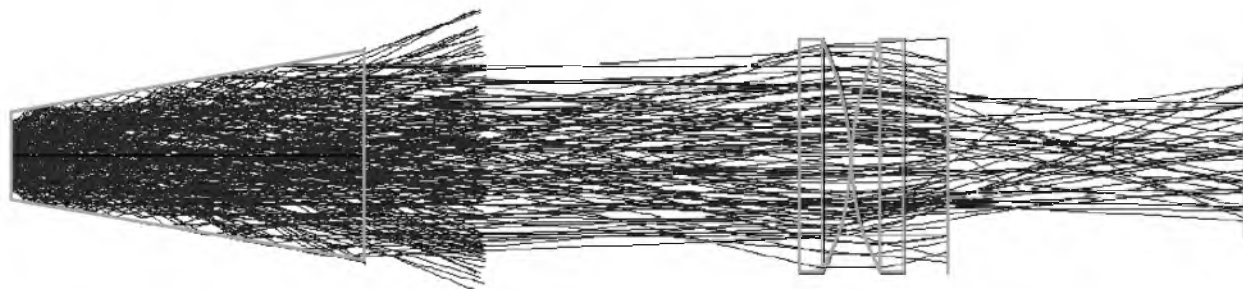


Рис. 4

¹ Лучи, мощность в которых падала ниже установленного порога за счет переотражений, или прерываемые диафрагмами и прочими конструктивными элементами оптической схемы, снимались с трассировки.

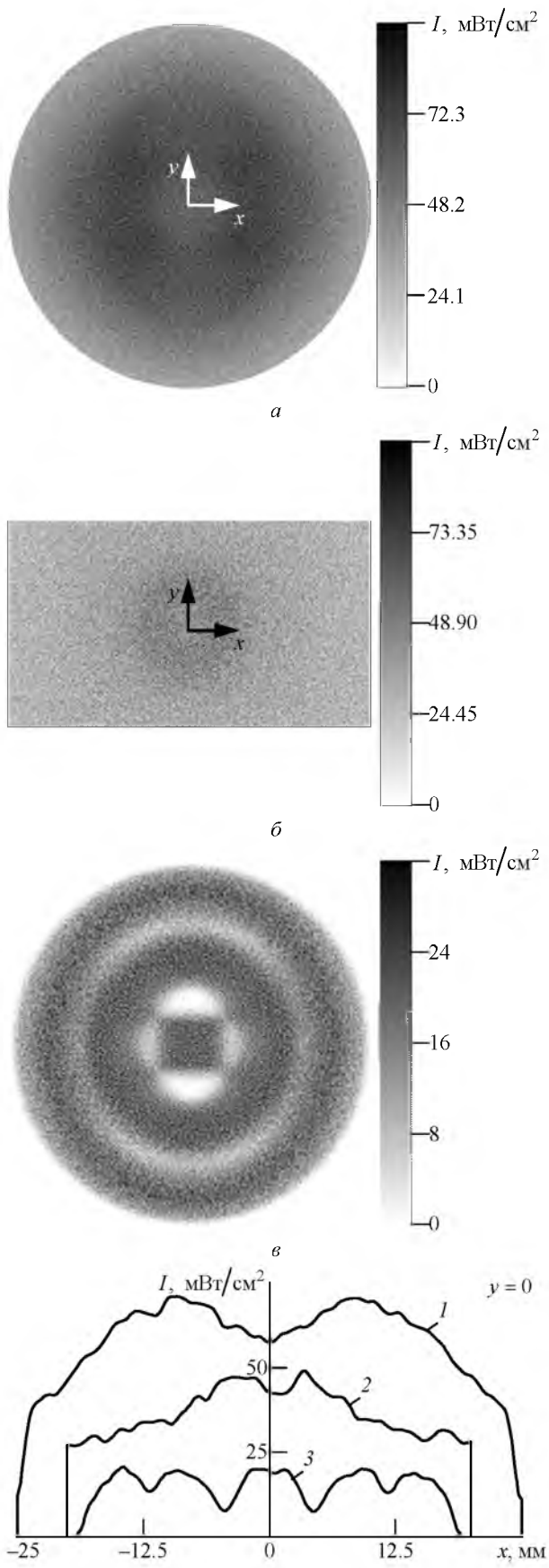


Рис. 5

ной плоскости фокона; рис. 5, б – в плоскости ЖК-матрицы; рис. 5, в – во входном зрачке проекционного объектива. На рис. 5, г приведены сечения этих диаграмм при $y = 0$: кривая 1 соответствует рис. 5, а, кривая 2 – рис. 5, б, кривая 3 – рис. 5, в.

Фокон передает в свою выходную плоскость всю поступающую на его вход энергию, т. е. в плоскости 4 (рис. 2) $P_{\text{пр}} = 1$ Вт. Пиковая освещенность в этой плоскости $I_{\text{max}} = 96.392$ мВт/см². Однако в плоскость ЖК-матрицы (рис. 2, 5) приходит лишь $P_{\text{пр}} = 0.175$ Вт, т. е. большая часть лучей перекрывается диафрагмой, поскольку распространяется под достаточно большими углами относительно продольной оси оптической системы. Пиковая освещенность $I_{\text{max}} = 97.765$ мВт/см², неравномерность освещенности по полю детектора более 60 %.

Во входной зрачок объектива попадает всего лишь $P_{\text{пр}} = 0.161$ Вт. С учетом световых потерь при прохождении лучей через модулятор света (ЖК-матрицу) это значение будет еще меньше.

Промоделированная система обладает рядом достоинств, в частности, сравнительно небольшой стоимостью изготовления и простотой юстировки. Однако есть и серьезные недостатки: низкая эффективность и высокая неравномерность освещенности. Некоторые лучи, выйдя из фокона, не попадают в конденсор, так как выходят под слишком большим углом. Поскольку дальнейшее увеличение конусности и размеров фокона нецелесообразно, для снижения потерь энергии решено установить вплотную к выходному торцу конического фокона дополнительный цилиндрический зеркальный световод. Измененная схема показана на рис. 6 (1 – конический световод, 2 – цилиндрический световод, 3 – конденсор, 4 – ЖК-матрица).

Дополнительный цилиндрический световод представляет собой зеркальную трубу, диаметр которой равен диаметру выходного торца конического фокона. Длина цилиндрического световода задается таким образом, чтобы большинство лучей могло отразиться от стенок и попасть в конденсор. Трассировка избранных лучей приведена на рис. 7. Видно, что некоторые лучи, ранее не попавшие в конденсор, отражаются стенками цилиндрического световода и направляются в сторону конденсора. На рис. 8, а показаны точечные диаграммы в плоскости выходного окна цилиндрического световода (рис. 6, 5), на рис. 8, б – в плоскости ЖК-матрицы (рис. 6, 6), на рис. 8, в –

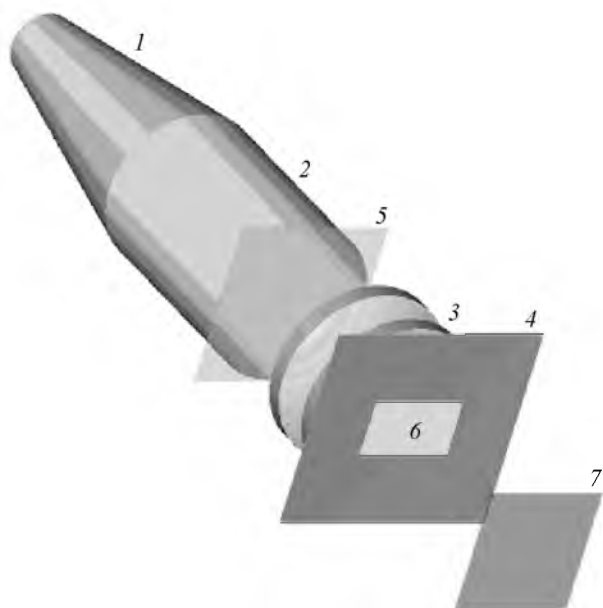


Рис. 6

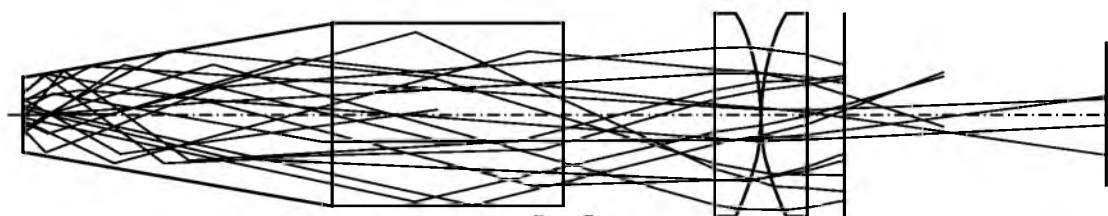


Рис. 7

во входном зрачке объектива (рис. 6, 7). На рис. 8, z приведены сечения диаграмм при $y = 0$: для выходной плоскости цилиндрического световода (кривая 1), плоскости ЖК-матрицы (кривая 2) и входного зрачка объектива (кривая 3).

В пределах системы из конического и цилиндрического световодов потерь энергии не возникает, поэтому в выходной плоскости цилиндра $P_{\text{пр}} = 1$ Вт. Большинство лучей, выйдя из световода, попадают в конденсор, а затем в ЖК-матрицу ($P_{\text{пр}} = 0.41$ Вт, что значительно выше, чем в предыдущем случае). Однако повысилась и неравномерность распределения освещенности. Освещенность центра стала почти на 90 % выше, чем по краям.

Во входном зрачке объектива концентрируется 0.188 Вт, что не намного больше, чем в ранее

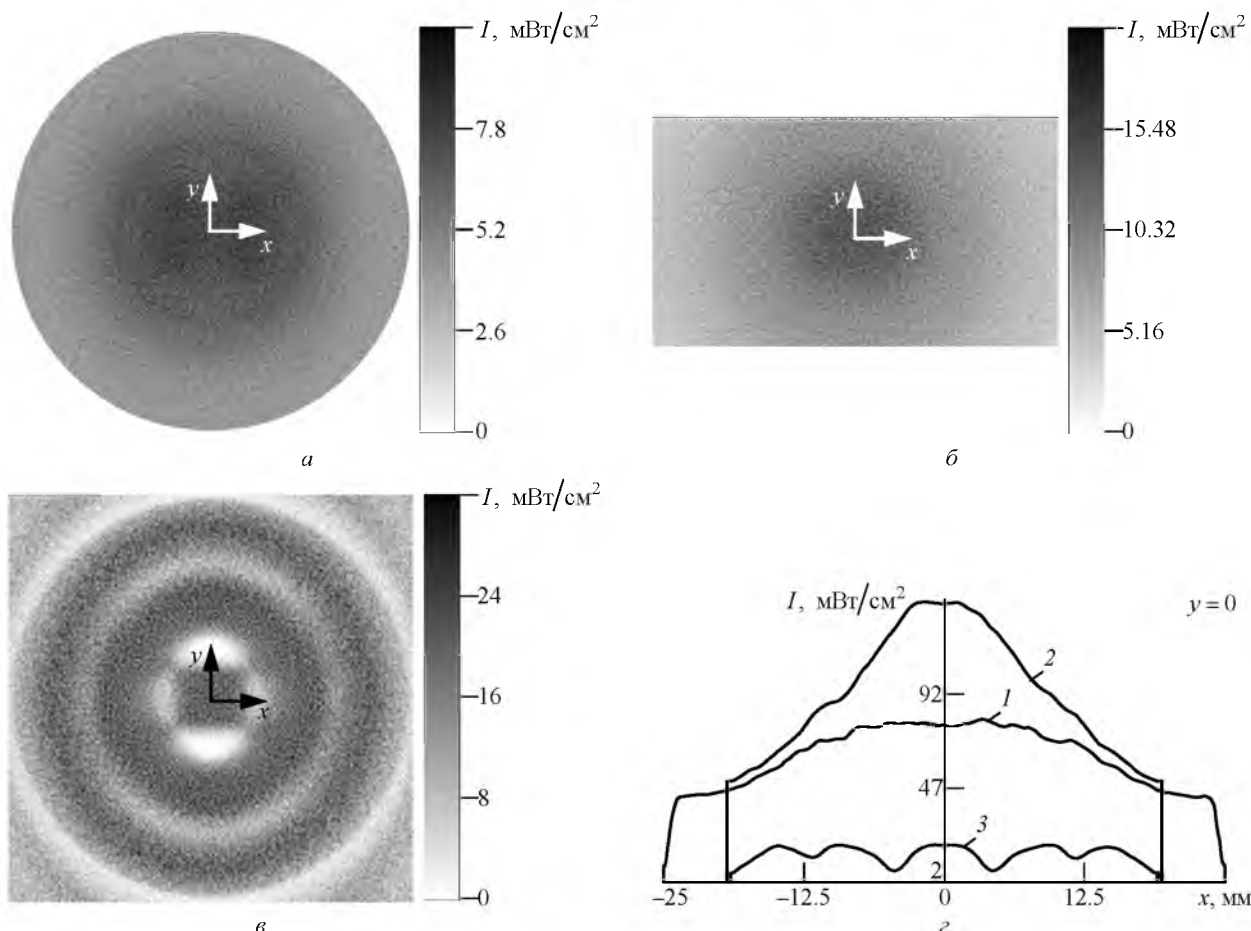


Рис. 8

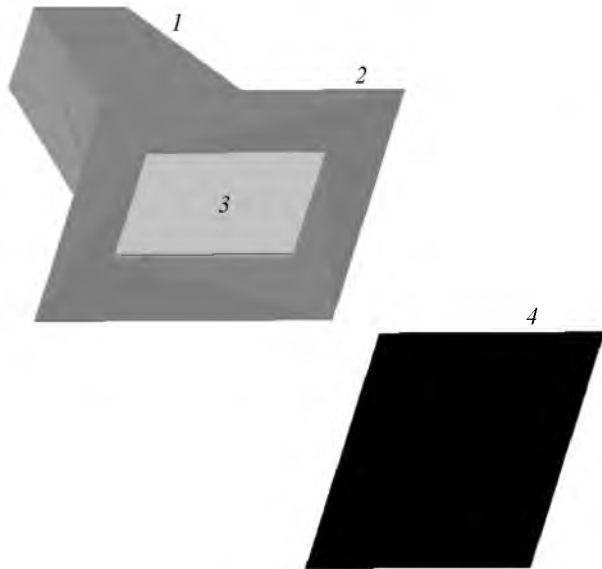


Рис. 9

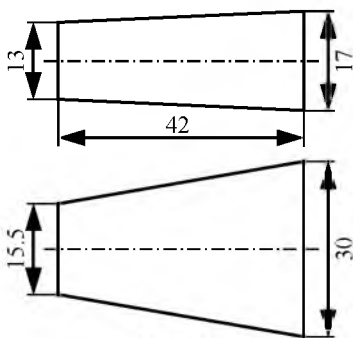


Рис. 10

рассмотренной схеме. Таким образом, введение дополнительного световода в рассмотренную схему не дало преимуществ и даже увеличило неравномерность освещенности ЖК-матрицы.

В целях повышения световой эффективности предложена и исследована схема светодиодного осветителя с пирамидальным фокусом прямоугольного сечения (рис. 9, 1).

Входное сечение фокуса согласовано с размерами излучающей площадки светодиодной матрицы, а выходное сечение – с размерами ЖК-матрицы с диагональю 1.3" (16.5 × 29.4 мм), используемой для получения изображения телевидения высокой четкости (HDTV). Размеры пирамидального фокуса приведены на рис. 10. Трасси-

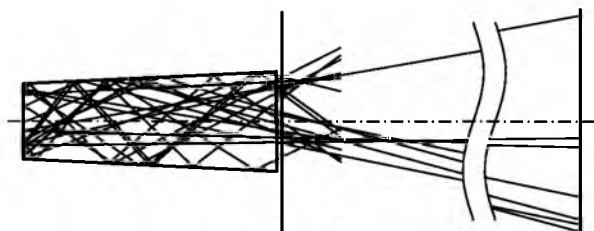
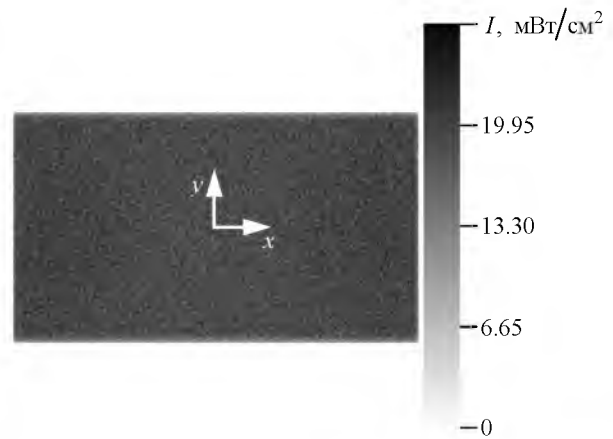
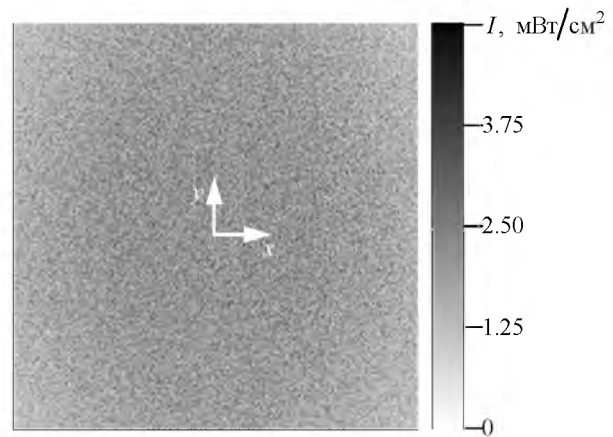


Рис. 11



а



б

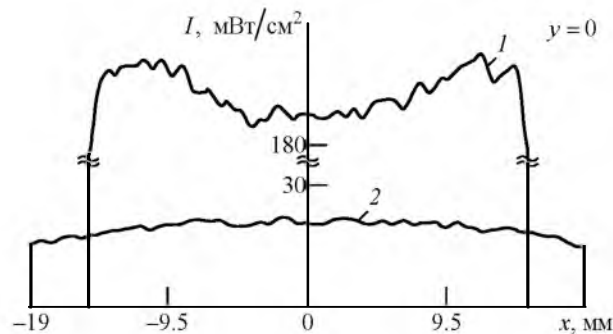


Рис. 12

ровка лучей – на рис. 11, точечные диаграммы – на рис. 12 (рис. 12, а – в выходной плоскости фокуса (рис. 9, 3), рис. 12, б – во входном зрачке объектива), сечения точечных диаграмм – на рис. 12, в (кривая 1 соответствует диаграмме рис. 12, а, кривая 2 – рис. 12, б).

ЖК-матрица равномерно освещена, на нее падает более 96 % светового потока (рис. 12, а).

Во входном зрачке объектива сосредоточивается лишь 26 % светового потока. Такие большие потери светового потока объектива определяются сравнительно небольшой конусностью пирамидального фокуса, которая ограничена размерами LED- и ЖК-матриц. В горизонтальной плоскости

конусность составляет всего 5° , в вертикальной – только 10° . Это не позволяет существенно уменьшить апертуру выхода лучей из фокона и согласовать ее с апертурой проекционного объектива, вследствие чего часть лучей срезается оправой объектива, не попадая в него.

В связи с этим при дальнейших исследованиях необходимо рассмотреть использование параболических фоконов и фоклинов, выходная апертура которых зависит только от задаваемого параметрического угла, что позволяет наиболее просто согласовать параметры светодиодной и ЖК-матриц с параметрами проекционного объектива и существенно повысить световую эффективность светоптической проекционной системы [3], [7], [9].

Проведем светотехнический и энергетический расчет последней схемы. Определим световой поток, воспринимаемый глазом, по формуле [10], [11]

$$\Phi_V = P_e k_{\text{ГЛ}} \cdot 683,$$

где P_e – мощность излучения; $k_{\text{ГЛ}}$ – коэффициент полезного действия глаза, зависящий от цветовой температуры источника излучения.

Мощность излучения светодиодной матрицы Epistar 3F80 со световым потоком 4800 лм и цветовой температурой 6500 К ($k_{\text{ГЛ}} = 0.137$) составляет:

$$P_{e1} = 4800 / (0.137 \cdot 683) = 51.3 \text{ Вт.}$$

Тогда мощность излучения и световой поток на ЖК-матрице составят:

$$P_{e2} = 51.3 \cdot 0.96 = 49.2 \text{ Вт;}$$

$$\Phi_{V2} = 49.2 \cdot 0.137 \cdot 683 = 4604 \text{ лм.}$$

Во входном зрачке проекционного объектива эти мощность и поток будут равны:

$$P_{e3} = 51.3 \cdot 0.26 = 13.3 \text{ Вт;}$$

$$\Phi_{V2} = 13.3 \cdot 0.137 \cdot 683 = 1244.5 \text{ лм.}$$

С учетом световых потерь на ЖК-матрице, коэффициент пропускания которой составляет примерно $\tau_M = 0.25$ [9], полезный световой поток видеопроектора

$$\Phi_{\Pi} = 1244 \cdot 0.25 = 311 \text{ лм.}$$

С другой стороны, требуемый световой поток определяется требуемыми высотой H_3 и шириной W_3 экрана, его коэффициентом яркости η_0 , требуемой яркостью в его центре L_0 и неравномерностью освещенности η :

$$\Phi_{\text{тр}} = \frac{\pi L_0 (1 + 2\eta) H_3 W_3}{3\eta_0}.$$

Приняв значения указанных параметров, характерные для проекционной системы, предназначенной для небольших аудиторий с проекционным расстоянием до 5 м: $L_0 = 80 \text{ кд/м}^2$, $\eta = 0.75$, для экрана типа Perlux 180 [12] с $H_3 = 1.19 \text{ м}$, $W_3 = 2.12 \text{ м}$, $\eta_0 = 1.8$ имеем:

$$\Phi_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot 80 (1 + 2 \cdot 0.75) 1.19 \cdot 2.12}{3 \cdot 1.8} = 293.4 \text{ лм.}$$

Таким образом, предложенный светодиодный осветитель с пирамидальным фоконом позволяет получить требуемый световой поток для рассмотренных условий проекции.

В высокоэффективных LCD-видеопроекторах "Sanyo" используются конверторы поляризации Polarized Beam Splitter (PBS), которые преобразуют теряемую в поляризаторе просветной ЖК-матрицы S-составляющую светового потока в полезную P-составляющую [13]. В этом случае $\tau_M = 0.45$ и $\Phi_{\Pi} = 547 \text{ лм}$, что соответствует параметрам светодиодного DLP-видеопроектора с одной микрозеркальной DMD-матрицей модели L50W LED фирмы NEC [14].

В исследованных светоптических системах применялись непоследовательные компоненты – фоконы. Их использование необходимо для согласования параметров источника света, модулирующей матрицы и проекционного объектива, а также для повышения равномерности освещенности ЖК-матрицы.

Однако габаритные ограничения системы не позволяют в полной мере решить обе задачи, поэтому в светоптическую систему необходимо вводить дополнительные компоненты – линзы и диафрагмы. Конические фоконы прямоугольного сечения просты в изготовлении, обладают малыми световыми потерями, но не всегда способны обеспечить согласование апертурных углов источника излучения и проекционного объектива. В связи с этим следует изучить возможность применения параболических фоконов, форма и размеры которых зависят от задаваемого параметрического угла, согласованного с апертурным углом проекционного объектива.

Использование фоконов не во всех случаях позволяет получить требуемую равномерность освещенности. Для повышения равномерности освещенности могут быть использованы растровые оптические компоненты [4].

В современных видеопроекторах все большее применение находят модуляторы света на основе микрозеркальных матриц (DMD). Они отличаются от ЖК-матриц меньшими световыми потерями и большим контрастом изображения, получаемого на экране.

Однако использование светодиодных матриц белого цвета нерационально в проекторах с DMD-матрицей, так как в этом случае требуется временное разделение цветов при помощи узкополосных светофильтров, установленных на вра-

щающемся диске, что приводит к дополнительным световым потерям. В связи с этим необходимо изучить возможность использования светоптических систем с применением фоконов для трех светодиодных матриц различных цветов (RGB), режим работы которых синхронизирован с моментами переключения микрозеркал матрицы DMD. Использование нескольких светодиодных матриц позволит увеличить не только полезный световой поток проектора, но и повысить качество цветного видеоизображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волосов Д. С., Цивкин М. В. Теория и расчет светоптических систем проекционных приборов. М.: Искусство, 1960. 520 с.
2. Трембач В. В. Световые приборы. М.: Высш. шк., 1990. 432 с.
3. Исаев П. И. Эффективность осветительных систем для проекции. М.: Искусство, 1988. 207 с.
4. Использование линзовых растров в осветителях микроскопов отраженного света / Н. А. Жидкова, О. Д. Калинина, А. А. Кучин, С. Н. Натаровский, О. Н. Немкова, Н. Б. Скобелева // Опτικο-механическая промышленность. 1988. № 8. С. 23–24.
5. Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика. М.: Техносфера, 2006. 424 с.
6. Вейнберг В. Б., Саттаров Д. К. Оптика световодов. Л.: Машиностроение, 1977. 320 с.
7. Баранов В. К. Фоконы и фоклины в качестве концентраторов излучения протяженных объектов // Опτικο-механическая промышленность. 1977. № 2. С. 6–9.
8. <http://www.led22.ru/ledcat.htm> (дата обращения 13.03.2016).
9. Баранов В. К. Свойства параболических фоконов // Опτικο-механическая промышленность. 1965. № 6. С. 1–5.
10. Павлов А. В. Опτικο-электронные приборы (Основы теории и расчета). М.: Энергия, 1974. 360 с.
11. Ишанин Г. Г., Козлов М. Г., Томский К. А. Основы светотехники: учеб. пособие. СПб.: Береста, 2004. 292 с.
12. Куклин С. В. Светоптические проекционные системы: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУКиТ, 2012. 212 с.
13. Самохин В., Ивин Л. Мультимедийные проекторы // 625. 2000. № 2. С. 5–60.
14. NEC Inc. Руководство по эксплуатации NEC L50W LED, 2011.

S. V. Kuklin, G. V. Tichomirova, K. K. Gudinov, S. A. Dvurechensky
Saint Petersburg State University of Film and Television

Computer Modeling of the LED Lighter with Fokony Optics for a Video Projector

Computer modeling and research of various variants of construction of light-diode illuminators for single-matrix LCD-video projector using inconsistent optical components are performed. The use of such components enables to form a light beam with the necessary parameters to align with the subsequent optical system. Computer modeling has allowed presents the analysis and evaluate the performance of the system developed in the design phase, and in some cases, and optimize it.

LED Illuminator, faucon, luminous flux, radiant flux, LCD matrix, projection lens, illumination uniformity, modeling

Статья поступила в редакцию 3 ноября 2015 г.