

К. т. н. Л. А. МИХЕЕНКО, к. т. н. В. Н. БОРОВИЦКИЙ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»  
E-mail: volodymyr\_borovytsky@iss.org.ua

Дата поступления в редакцию  
07.06 2006 г.

Оппонент В. Г. ЮРЬЕВ  
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

## ИЗЛУЧАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОЙ ЯРКОСТИ НА ОСНОВЕ СОПРЯЖЕННЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ СФЕР

*Предложен принципиально новый осветитель для измерений энергетических характеристик цифровых оптико-электронных систем с матричными приемниками изображения.*

В последнее время наблюдается быстрое развитие цифровых оптико-электронных систем (ЦОЭС) с матричными приемниками излучения (МПИ) — цифровых фотоаппаратов, цифровых видеокамер, веб-камер, специализированных цифровых камер для оптической микроскопии, астрономии, дистанционного зондирования, автоматических и полуавтоматических систем наблюдения и сопровождения [1]. Однако дальнейшее совершенствование таких систем в значительной мере сдерживается недостаточным уровнем методов и средств измерения их энергетических характеристик — в первую очередь функции передачи сигнала и неравномерности оптических и электрических характеристик фоточувствительных элементов МПИ.

Важнейшей особенностью измерения энергетических характеристик ЦОЭС с МПИ являются высокие требования к излучателю, который должен соответствовать следующим техническим условиям [1, 2]:

1. Излучатель должен обеспечивать освещение большого количества фоточувствительных элементов МПИ — более 2048×2048 при площади МПИ более 15×15 мм с неравномерностью менее 1—3%.

2. Излучатель должен обладать широким динамическим диапазоном изменения освещенности МПИ — не менее  $10^4$  — без изменения спектрального состава и степени поляризации оптического излучения.

3. Излучатель должен обладать линейностью выходной характеристики с отклонением менее 1—3%.

4. Излучатель должен обеспечивать высокое значение максимальной освещенности входного зрачка ЦОЭС или фоточувствительной площадки МПИ — более 5 Вт/м<sup>2</sup>, что соответствует яркости излучателя не менее  $10^{13}$  Вт/(ср·м<sup>2</sup>).

5. Излучатель должен гарантировать высокую повторяемость результата измерений со среднеквадратичным отклонением менее 0,05, а в отдельных случаях — такую же повторяемость в абсолютных единицах по эталонному излучателю.

Как показал критический анализ, создание излучателей, в полной мере удовлетворяющих перечис-

ленным выше требованиям, является сложной технической задачей. Так, использование ламп накаливания и галогенных ламп позволяет получить высокие яркости, но не обеспечивает выполнения требований по однородности, линейности и повторяемости ввиду их малого срока службы и постепенного выгорания нити накаливания [3]. Применение мощных светодиодов не позволяет выполнить требование по стабильности спектрального состава и повторяемости измерений из-за высокой чувствительности к изменениям температуры и напряжения [4]. А установка интегрирующей сферы хоть и позволяет достигнуть высокой однородности по большой площади, линейности выходной характеристики и повторяемости, но выполнение требования по большой яркости и большому динамическому диапазону связано с существенными техническими трудностями [5].

Таким образом, несмотря на большое количество известных излучателей, в настоящее время отсутствует излучатель, в полной мере удовлетворяющий техническим требованиям для измерения энергетических характеристик ЦОЭС с МПИ. Поэтому целью данной работы является поиск и исследование излучателя переменной яркости, который соответствовал бы современным требованиям по измерению энергетических характеристик ЦОЭС с МПИ.

Как показано в [6], использование интегрирующей сферы позволяет реализовать диффузный излучатель с большой апертурой и высокой однородностью формирования яркостного поля. К сожалению, такое решение не может обеспечить высокий динамический диапазон изменения яркости. Это обусловлено тем, что для изменения яркости приходится изменять напряжение питания ламп, установленных в интегрирующей сфере. А изменение напряжения питания ламп приводит к изменению спектрального состава излучения. Кроме того, взаимосвязь напряжения питания и потока излучения лампы является нелинейной и нестабильной [3].

Такой недостаток интегрирующей сферы можно преодолеть применением двух сопряженных через регулируемое отверстие сфер, в одной из которых размещены излучатели. Такое решение делает возможным изменение яркости выходного зрачка по заданному закону с высокой точностью. Это достигается тем, что размер диафрагмы между первичной и вторичной интегрирующими сферами может изменяться при помощи механического приспособления [7].

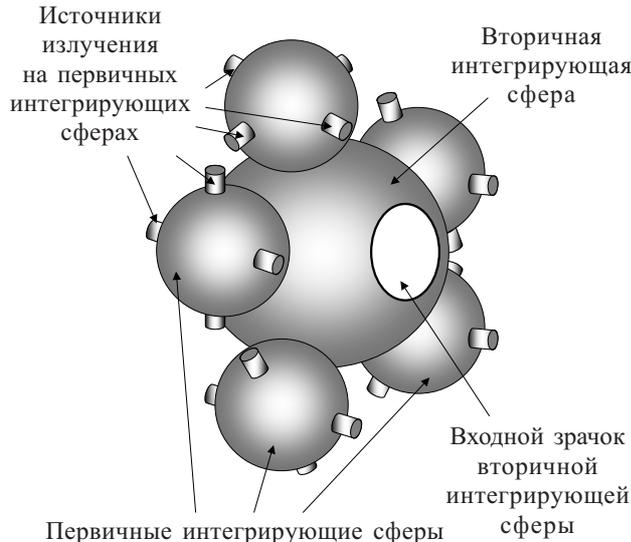


Рис. 1. Обобщенная схема диффузного излучателя переменной яркости, состоящего из нескольких первичных и одной вторичной интегрирующих сфер

Однако и такое решение не позволяет получить необходимую высокую излучательную мощность.

Указанный недостаток в значительной степени устраняется в предложенной авторами схеме излучателя, который состоит из нескольких первичных интегрирующих сфер с источниками излучения, сопряженных с основной вторичной интегрирующей сферой, которая является вторичным излучателем (рис. 1). Достаточно полная теория диффузного излучателя рассмотрена в [6—8], а для инженерных расчетов вполне оправдано использование следующих упрощенных зависимостей.

Освещенность внутренней поверхности первичной сферы определяется следующим выражением:

$$E_1 = \frac{N_s \Phi_s \rho_1}{A_1 \left(1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_{12}}{A_1}\right)} = \frac{N_s \Phi_s \rho_1}{\pi d_1^2 \left(1 - \rho_1 \frac{\pi d_1^2 - A_{12}}{\pi d_1^2}\right)}, \quad (1)$$

где  $N_s$  — количество источников излучения в первичной сфере;  $\Phi_s$  — оптический поток, создаваемый одним источником излучения;

$\rho_1$  — интегральный коэффициент отражения внутренней поверхности первичной сферы;

$A_1, d_1$  — площадь и диаметр первичной сферы, соответственно [9],

$$A_1 = 4\pi \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 = \pi d_1^2;$$

$A_{12}$  — площадь регулируемого отверстия между первичной и вторичной сферами.

Оптический поток, поступающий из первичной сферы во вторичную, может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\Phi_1 = E_1 A_{12}, \quad (2)$$

где  $\Phi_1$  — оптический поток, поступающий из первичной сферы во вторичную.

Следовательно, освещенность внутренней поверхности вторичной сферы, в которую поступает поток от нескольких первичных сфер, может быть рассчитан по формуле, аналогичной (1):

$$E_2 = \frac{N_1 \Phi_1 \rho_2}{A_2 \left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - N_1 A_{12} - A_D}{A_2}\right)} = \frac{N_1 N_s \Phi_s \rho_1 \rho_2}{A_1 A_2 \left(1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_{12}}{A_1}\right) \left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - N_1 A_{12} - A_D}{A_2}\right)} = \frac{N_1 N_s \Phi_s}{(\pi d_1 d_2)^2 \left(1 - \rho_1 \frac{\pi d_1^2 - A_{12}}{\pi d_1^2}\right)} \times \frac{\rho_1 \rho_2}{1 - \rho_2 \frac{\pi d_2^2 - N_1 A_{12} - \frac{\pi}{2} d_D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d_D}{d_2}\right)^2}\right)}{\pi d_2^2}}, \quad (3)$$

где  $N_1$  — количество источников первичных сфер, оптически сопряженных со вторичной сферой;

$\rho_2$  — интегральный коэффициент отражения внутренней поверхности вторичной сферы;

$A_2, d_2$  — площадь и диаметр вторичной сферы, соответственно [9],

$$A_2 = 4\pi \left(\frac{d_2}{2}\right)^2 = \pi d_2^2;$$

$N_1 A_{12}$  — суммарная площадь регулируемых отверстий во вторичной сфере;

$A_D, d_D$  — площадь и диаметр выходного зрачка вторичной сферы, соответственно.

Площадь выходного зрачка может быть рассчитана как площадь сферического сегмента [9]:

$$A_D = 2\pi \left(\frac{d_2}{2}\right) \frac{d_2 - \sqrt{d_2^2 - d_D^2}}{2} = \frac{\pi}{2} d_2 \left(d_2 - \sqrt{d_2^2 - d_D^2}\right) = \frac{\pi}{2} d_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d_D}{d_2}\right)^2}\right).$$

Яркость выходного зрачка вторичной сферы, который можно считать ламбертовским излучателем, рассчитывается по известной формуле [10]

$$L_D = \frac{E_2}{\pi} = \frac{N_1 N_s \Phi_s \rho_1 \rho_2}{\pi A_1 A_2 \left(1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_{12}}{A_1}\right)} \times \frac{1}{\left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - N_1 A_{12} - A_D}{A_2}\right)} = \frac{N_1 N_s \Phi_s}{\pi^3 d_1^2 d_2^2 \left(1 - \rho_1 \frac{\pi d_1^2 - A_{12}}{\pi d_1^2}\right)}$$

$$\times \left( \frac{\rho_1 \rho_2}{1 - \rho_2 \frac{\pi d_2^2 - N_1 A_{12} - \frac{\pi}{2} d_2^2 \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{d_D}{d_2} \right)^2} \right)}{\pi d_2^2}} \right) \quad (4)$$

Спектральная характеристика излучателя определяется спектральной характеристикой используемых источников излучения и спектральными коэффициентами отражения поверхностей первичных и вторичной сфер.

$$L_D(\lambda) = \frac{E_2}{\pi} = \frac{N_1 N_S \Phi_S \rho_1 \cdot \rho_{1N}(\lambda) \cdot \rho_2 \cdot \rho_{2N}(\lambda)}{\pi A_1 A_2 \left( 1 - \rho_1 \cdot \rho_{1N}(\lambda) \frac{A_1 - A_{12}}{A_1} \right)} \times \frac{1}{\left( 1 - \rho_2 \cdot \rho_{2N}(\lambda) \frac{A_2 - N_1 A_{12} - A_D}{A_2} \right)} = \frac{N_1 N_S \Phi_S \rho_1 \rho_2 \cdot \rho_{1N}(\lambda) \cdot \rho_{2N}(\lambda)}{\pi A_1 A_2 \left( 1 - \rho_1 \rho_{1N}(\lambda) \frac{A_1 - A_{12}}{A_1} \right)} \times \frac{1}{\left( 1 - \rho_2 \cdot \rho_{2N}(\lambda) \frac{A_2 - N_1 A_{12} - A_D}{A_2} \right)},$$

где  $L_D(\lambda)$  — яркость выходного зрачка вторичной сферы как функция от длины волны оптического излучения  $\lambda$ ;

$\rho_{1N}(\lambda), \rho_{2N}(\lambda)$  — нормированные по максимальному значению спектральной характеристики отражения поверхности первичной и вторичной сфер, соответственно.

Для исследования предложенного излучателя был выполнен расчет и макетирование излучателя, параметры которого приведены в таблице. Покрытие внутренних поверхностей первичных и вторичной сферы выполнено обработанным алюминием и материалом на основе  $BaSO_4$  с интегральным коэффициентом отражения 0,8 [11]. В качестве источников излучения в первичных сферах использовались галогенные лампы КГМ-30-300 [12].

На рис. 2 приведены рассчитанные нормированные спектральные характеристики яркости выходного зрачка излучателя.

Параметры диффузного излучателя

Параметр	Обозначение	Значение
Диаметр первичной сферы	$d_1$	0,15 м
Количество первичных сфер	$N_1$	3
Количество излучателей в первичной сфере	$N_S$	3
Диаметр вторичной сферы	$d_2$	0,25 м
Диаметр выходного зрачка вторичной сферы	$d_D$	0,05 м

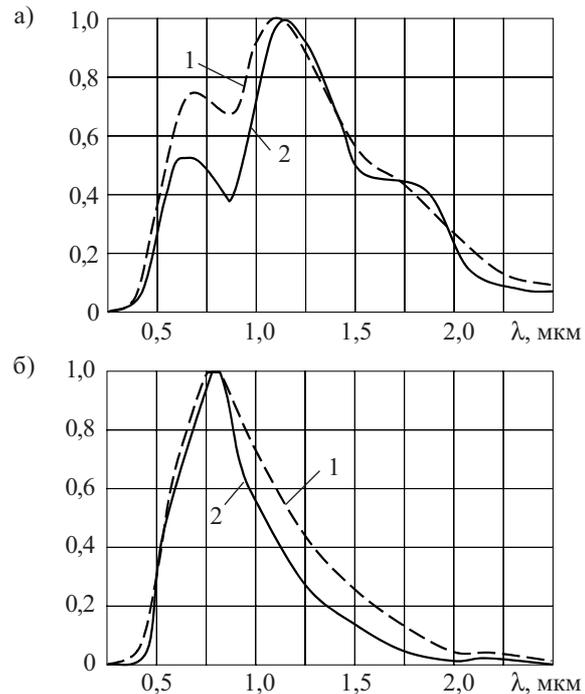


Рис. 2. Нормированная по максимальному значению спектральная характеристика яркости выходного зрачка излучателя:

а — материал покрытия внутренней поверхности — обработанный алюминий; б — материал покрытия — прессованный порошок  $BaSO_4$

1 — излучатель с одной интегрирующей сферой; 2 — предложенный излучатель с первичными и вторичной интегрирующими сферами

го зрачка излучателя, показанного на рис. 1. Анализ полученных результатов показывает, что покрытие внутренней поверхности сфер серноокислым барием  $BaSO_4$  хоть и позволяет достигнуть больших величин яркости выходного зрачка, но приводит к значительной неоднородности спектральной характеристики яркости (рис. 2, б) [11]. Использование обработанного алюминия в качестве покрытия внутренних поверхностей сфер обеспечивает меньшую селективность спектральной характеристики яркости излучателя при меньшей яркости выходного зрачка (рис. 2, а).

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические расчеты: максимальная яркость излучения составляет  $3,5 \cdot 10^3$  Вт/(ср·м<sup>2</sup>), измеренная неравномерность распределения яркости в выходном зрачке не превысила 0,2%. Был достигнут динамический диапазон изменения яркости более 1000 000 при нелинейности 0,5%.

Для сравнения отметим, что максимальная яркость излучателя на законе обратных квадратов составила  $5 \cdot 10^4$  Вт/(ср·м<sup>2</sup>), но на участке диаметром менее 1 мм. При этом следует учесть, что такой излучатель должен использоваться с коллимационной оптической системой, и тогда приведенная к входному зрачку яркость уменьшится еще в 150—200 раз.

### Выводы

Предложен принципиально новый излучатель временной яркости на основе оптически сопряженных

интегрирующих сфер. Этот излучатель обладает преимуществами интегрирующей сферы, но лишен двух ее принципиальных недостатков — малого динамического диапазона и малой максимальной яркости.

Разработана математическая модель и проведено экспериментальное исследование такого излучателя. Проведенные исследования показали, что предложенный излучатель соответствует техническим требованиям для измерения энергетических характеристик современных и перспективных цифровых оптико-электронных систем с матричными приемниками излучения: максимальная яркость составила  $3,5 \cdot 10^3$  Вт/(ср·м<sup>2</sup>), при этом ее неравномерность в выходном зрачке не превысила 0,2%. Был достигнут диапазон изменения яркости более  $10^6$  при нелинейности 0,5%.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Боровицкий В. Н. Выбор цифровой камеры для оптического микроскопа // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2004.— № 1.— С. 21—26.
2. Воробай Е. С., Торпачев П. А. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения.— Минск: Университетское, 1988.

3. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. П. и др. Источники и приемники излучения.— СПб: Политехника, 1991.
4. Power light source Luxeon™ Star. Technical Datasheet DS23 // *Lumileds Lighting Catalogue*, San Jose, USA.— 2003.
5. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред.— Минск: Наука и техника, 1969.
6. Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н. Осветительный канал цифрового микроскопа на базе диффузного излучателя // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2006.— № 1.— С. 20—27.
7. Пат. 1804594 России. Диффузный излучатель / Б. М. Молоков, Л. А. Горбыч, Т. П. Саханская. — 1993.— Бюл. № 1.
8. Сахновский М. Ю., Гуминский С. Г., Кравцов В. Е. и др. Особенности измерения потока излучения светодиодов с помощью фотометрического шара // *Оптика и спектроскопия*.— 1979.— Т. 46, вып. 3.— С. 515—523.
9. Цыпкин А. Г., Цыпкин Г. Г. Математические формулы. Алгебра. Геометрия. Математический анализ: Справочник.— М.: Наука, 1985.
10. Сапожников Р. А. Теоретическая фотометрия.— М.: Энергия, 1977.
11. Кунецкий М. Г., Гуминецкий С. Г., Сахновский М. Ю. и др. Исследование коэффициентов яркости покрытий из краски на основе ВаSO<sub>4</sub> // *Оптико-механическая промышленность*.— 1981.— № 6.— С. 3—4.
12. Лампы накаливания галогенные / Каталог продукции.— М.: Информэлектро, 1988.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

Электроника → Транспорт

2007

20–22 февраля  
Москва, ЦМТ

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА-ФОРУМ

У ВАС ЕСТЬ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТА?  
СПЕШИТЕ ОФОРМИТЬ УЧАСТИЕ!

ПРОВЕРЕНО  
РОССИЙСКИМИ  
ДОРОГАМИ

ЭЛЕКТРОНИКА  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ ТРАНСПОРТА И  
ТРАНСПОРТНЫХ  
КОММУНИКАЦИЙ

Организаторы: ЗАО "ЧипЭКСПО"  
Тел: +7 (495) 221 5015  
<http://transport.chipexpo.ru>

