

Н.В. Гурьев

ННЦ "Институт метрологии", Харьков, Украина

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН СВЕТОВОГО ПОТОКА ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП В УКРАИНЕ

Describes the modern problems in the measurements of the luminous flux of LED lamps associated with their emission spectra, and describes the state primary standard of luminous flux, methods of reproducing the unit of luminous flux and transferring it to the working light sources. The results of theoretical and experimental studies of nodes in the reference standard trap- detector with a correcting filter, spherical photometer and the whole plant. Presented the uncertainty budget of measurements of the luminous flux of light sources. Considered its opportunities and prospects for measurement assurance in the field of LED lighting sources in Ukraine.

Ключевые слова: *трап-детектор, фильтр видности, сферический фотометр, эталон светового потока, коэффициент активности, светодиодные лампы.*

Введение

В настоящее время в связи со всё более ускоряющимся развитием производства осветительной продукции на основе светодиодной техники, который связан с колоссальной энергоэффективностью значительно большей (в 8 раз и более) чем осветительная техника на основе ламп накаливания, возникают проблемы связанные с метрологическим обеспечением этой продукции.

Что касается второй проблемы, то в настоящее время существуют эталоны светового потока, которые разрабатывались и рассчитывались для эталонных ламп типа А — ламп накаливания с цветовой температурой 2800 К.

В качестве измерителей светового потока используются сферические фотометры с фотодиодами (рисунки 1 и 2), установленными на стенке сферы и оснащёнными фильтрами, корректирующими относительную спектральную чувствительность фотометра под кривую дневного зрения в соответствии с ДСТУ ГОСТ 8.332: 2008.

Для калибровки сферических фотометров используют либо эталонные лампы с известным световым потоком (источник типа А), либо измеренный предварительно направленный световой поток от источника типа А. В последствии эти фотометры измеряют лампы накаливания со спектральной характеристикой близкой к источнику типа А. В данном случае проблем с точностью для ламп накаливания не существует, так как активность для всех этих ламп будет одинакова. Но если измерять светодиодные источники, у которых спектральные характеристики сильно отличаются от источника типа А, то погрешность связанная с отличием активностей будет значительной.

Такая проблема существует не только в Украине, но и во всём мире. Как показали последние ис-

следования светодиодных источников в передовых лабораториях мира, отличия в измеренных световых потоках составили более чем 5 %. Это говорит о том, что проблема с метрологией в этом виде измерений есть, и её необходимо решать.

Что касается метрологической точности и единства измерений светового потока светодиодной техники в Украине, то в ННЦ "Институт метрологии" в конце 2012-го года был разработан государственный первичный эталон единицы светового потока люмена. В это время проблема метрологического обеспечения светодиодной техники уже была на горизонте, поэтому в ходе разработки эталона она учитывалась.

Описание эталона

На рисунке 1 представлена фотография эталона, а на рисунке 2 приведена структурно-функциональная схема государственного первичного эталона светового потока для воспроизведения и передачи размера единицы эталонным источникам излучения.



Рис. 1. Фотография государственного первичного эталона единицы светового потока — люмена

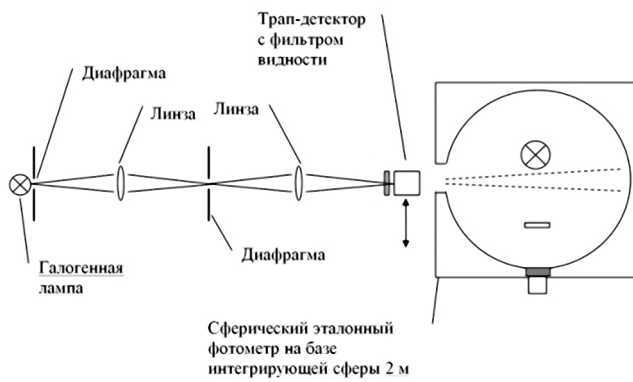


Рис. 2. Функциональная схема установки для воспроизведения и передачи единицы светового потока эталонным источникам излучения

Установка для воспроизведения и передачи единицы светового потока эталонным источникам излучения больших размеров обеспечивает воспроизведение единицы интегрального светового потока с помощью источника оптического излучения на базе галогенной лампы с оптико-механической системой формирования направленного светового потока и эталонного первичного измерительного преобразователя на базе трап-детектора с фильтром видности и системой автоматизированного механического перемещения.

Эта установка обеспечивает передачу размера единицы светового потока рабочим эталонам — светоизмерительным лампам с помощью сферического эталонного фотометра с фильтром видности на базе интегрирующей сферы 2 м.

Для воспроизведения единицы светового потока с помощью источника оптического излучения на базе галогенной лампы и оптико-механической системы формируется направленный световой поток, который приходит в эталонный первичный измерительный преобразователь на базе трап-детектора [1] с фильтром видности и системой автоматизированного механического перемещения (рисунок 2).

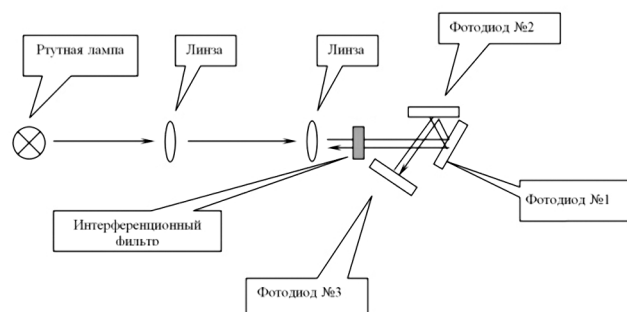


Рис. 3. Схема измерения направленного интегрального светового потока с помощью трап-детектора с фильтром видности

Системой измерения фототока измеряется сигнал эталонного первичного преобразователя на базе трап-детектора, при этом определяются значения световых потоков в люменах.

Для измерения светового потока в трап-детекторе используются фотодиоды фирмы Hamamatsu S1337–1010 ВQ, которые имеют стопроцентную внутреннюю квантовую эффективность для оптического излучения в диапазоне длин волн от 400 до 900 нм [2–5].

Для обеспечения близкой к стопроцентной внешней квантовой эффективности используется схема измерения монохроматического потока излучения, которая приведена на рисунке 3. Принцип работы данной схемы заключается в том, что монохроматический поток излучения под углом 30° приходит в фотодиод № 1 и отраженная часть под тем же углом попадает в фотодиод № 2. Отраженный поток от фотодиода № 2, под прямым углом приходит в фотодиод № 3, в результате чего отраженный от фотодиода № 3 поток осуществляет обратный ход. В связи с тем, что поток 5 раз попадает на фотодиоды, лишь небольшая его часть, менее чем 0,1 % (в видимом диапазоне длин волн), выходит обратно из трап-детектора. При этом коэффициент поглощения излучения прибора является близким к единице, что обеспечивает практически стопроцентную внешнюю квантовую эффективность трап-детектора.

Сферический фотометр имеет внутреннее покрытие из BaSO_4 . На боковой поверхности фотометра размещен фотодиод с молочным стеклом и фильтром видности, который корректирует относительную спектральную чувствительность фотометра под кривую дневного зрения $V(\lambda)$. Внутри сферы также размещается источник излучения, которому передается размер единицы. Между источником излучения и фотоприемником размещена заслонка, которая не позволяет прямым лучам от источника света попадать на молочное стекло. Кроме того, фотометр имеет отверстие, которое позволяет внешнему световому потоку приходиться на стенку сферы таким образом, чтобы световое пятно от потока излучения находилось в поле зрения молочного стекла приёмника с фильтром видности.

Такая конструкция позволяет измерять чувствительность фотометра с помощью известного внешнего светового потока и использовать это значение чувствительности для измерения светового потока от эталонного источника светового потока, который калибруется.

Результаты исследований

Одной из основных метрологических характеристик трап-детектора с фильтром видности есть отличие его относительной спектральной чувствительности от относительной спектральной эффективности монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$ [6].

Исследование спектральной чувствительности трап-детектора было проведено на Государственном

первичном эталоне единиц спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности; мощности излучения и энергетической освещенности (ДЕТУ 11–06–06).

Исследование фильтра видности проводилось на Государственном первичном эталоне спектральных коэффициентов направленного пропускания, зеркального и диффузного отражения в диапазоне длин волн от 0,2 мкм до 25 мкм (ДЕТУ 11–09–08).

Результаты исследований приведены на рисунке 4. На графике показано отличие относительной спектральной чувствительности трап-детектора с фильтром видности $s(\lambda)$ от кривой $V(\lambda)$.

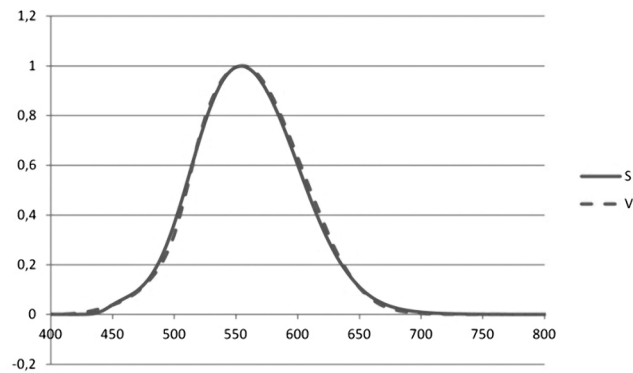


Рис. 4. График зависимости относительной спектральной чувствительности $S(\lambda)$ трап-детектора с фильтром видности и кривой $V(\lambda)$ от длины волны излучения

В результате исследований было определена актиничность трап-детектора с фильтром видности из формулы:

$$A = \frac{\int_{380}^{780} B(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} B(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Где $B(\lambda)$ — относительная спектральная характеристика яркости лампы, $S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность трап-детектора с фильтром видности.

Относительную спектральную чувствительность трап-детектора с фильтром видности можно представить в виде:

$$S(\lambda) = S_{trap}(\lambda) \times \tau(\lambda) / (S_{trap}(\lambda) \times \tau(\lambda))_{max} \quad (2)$$

Где $S_{trap}(\lambda)$ — спектральная чувствительность трапдетектора, $\tau(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания фильтра видности.

Величины $S_{trap}(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ определялись абсолютными методами на двух эталонах по отдельности с точки зрения удобства, так как для достоверного определения актиничности величину $S(\lambda)$ желательно знать с шагом 1 нм.

Определение с таким шагом для конструкции в сборе на эталоне ДЕТУ 11–06–06 практически не возможно (инерционный абсолютный приёмник

и т. д.), но проверка линейности спектральной характеристики трап-детектора без фильтра видности является задачей вполне выполнимой, что и было сделано и мы убедились в совершенной линейности спектральной характеристики трап-детектора без фильтра видности. Измерение пропускания фильтра видности на спектрофотометрической установке эталона ДЕТУ 11–09–08 с шагом 1 нм можно провести за короткий срок и многократно. Всё это позволило нам с высокой точностью определить актиничность.

Для лампы с цветовой температурой 2800 К (источник типа А) актиничность трап-детектора с фильтром видности составила: $A = 1,0077$. При изменении цветовой температуры ± 100 К происходит изменение актиничности $A = 1,0077 \pm 0,0003$.

Из этих результатов можно сделать вывод о том, что актиничность приёмника слабо зависит от цветовой температуры галогенной лампы и позволяет с высокой точностью (с точки зрения актиничности) определить чувствительность приёмника к световому потоку для источника типа А, которая составила $S_{\Phi trap} = 3,5985 \times 10^{-4}$ А/лм.

$$S_{\Phi trap} = S_{trap}(555) / (683 \times A) \quad (3)$$

Где $S_{trap}(555)$ — чувствительность трап-детектора с фильтром видности на длине волны 555 нм определялось абсолютным методом на эталоне ДЕТУ 11–06–06.

Исследования относительной спектральной чувствительности сферического фотометра проводились на Государственном первичном эталоне ДЕТУ 11–06–06 (спектральная характеристика фотодиода с фильтром и молочным стеклом) и на ДЕТУ 11–09–08 (спектральная характеристика покрытия сферы).

Результаты исследований приведены на рисунке 5. На графике показано отличие относительной спектральной чувствительности сферического фотометра $s(\lambda)$ от кривой дневного зрения $V(\lambda)$.

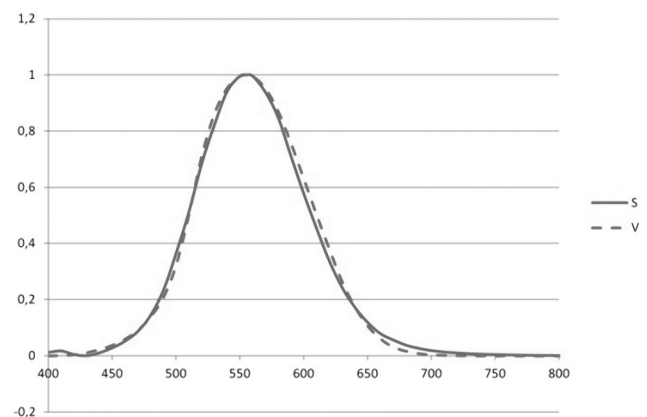


Рис. 5. График зависимости относительной спектральной чувствительности $s(\lambda)$ сферического фотометра с фильтром видности от длины волны

Для сферического эталонного фотометра на базе интегрирующей сферы 2 м актиничность для ламп с цветовой температурой 2800 К составила: $A = 0,9963$. При изменении цветовой температуры ± 100 К происходит изменение актиничности: $A = 0,9963 \pm 0,002$.

Достоверность результатов исследований характеристик сферического фотометра была подтверждена с помощью разработанного экспериментального метода определения актиничности.

Бюджет неопределенностей

В таблице указаны значения относительной стандартной неопределенности от различных источников.

Бюджет неопределенностей измерений светового потока в ННЦ «Институт метрологии»

Источник неопределенности	Значение относительной стандартной неопределенности (%)
Измерение фототоков на выходе трап-детектора	0,023
Измерение фототоков на выходе сферического фотометра	0,023
Определение ампер-люменовый чувствительности трап-детектора с фильтром видности для направленного потока от галогенной лампы	0,116
Неоднородность зонной чувствительности сферического фотометра	0,12
Отличие актиничности сферического фотометра для эталонной лампы от актиничности для галогенной лампы	0,3
Измерение токов ламп с учётом поправки	0,04
Неопределенность по типу В	0,35
Неопределенность по типу А (невоспроизводимость при независимых измерениях)	0,01
Суммарная стандартная неопределенность	0,35

Эти неопределенности были подтверждены результатами международных ключевых сличений в рамках СОМЕТ, результаты которых в настоящее время оформляются.

Заключение

Разработанный в ННЦ «Институт метрологии» государственный первичный эталон люмена позволяет с высокой точностью воспроизводить и передавать размер единицы светового потока рабочим измерительным лампам любых видов, в том числе и светодиодным. Это даёт возможность метрологически обеспечить производство и сертификацию светодиодной техники в Украине, что является в настоящее время наиболее актуальной проблемой, связанной с внедрением энергоэффективных технологий.

Это было достигнуто благодаря комплексу проведенных исследований составных частей эталона и разработанной экспериментальной методики определения актиничности, которая подтверждает их достоверность.

Список литературы

- [1] M. Huriev, A. Kupko, and L. Nazarenko. Double-diode configuration of self-calibrating photodiodes // SPIE Annual Meeting. Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies. Volume 5188. — San Diego, CA, USA. — 2003. — P. 351–357.
- [2] Zalewski E. F. Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration/ E. F. Zalewski, J. Geist//Appl. Opt., 1980, 19, pp. 1214–1216.
- [3] Geist J. Spectral response self-calibration and interpolation of silicon photodiodes/J. Geist, E. F. Zalewski, A. R. Schaefer//Appl. Opt., 1980, 19, pp. 3795–3799.
- [4] Geist J. High accuracy modeling of photodiode quantum efficiency/ J. Geist, H. Baltes//Appl. Opt., 1989, 28, pp. 3929–3939.
- [5] Zalewski E. F. Silicon photodiode device with 100 % external quantum efficiency/ E. F. Zalewski and C. R. Duda//Appl. Opt., 1983, 22, pp. 2867–2873.
- [6] ДСТУ ГОСТ 8.332:2008 ГСИ. Световые измерения. Значения относительной спектральной эффективности монохроматического излучения для дневного зрения.