7. Burkov, A.T. Silicide thermoelectrics: materials for energy harvesting / A.T. Burkov // Physica Status Solidi (a). – 2018. – Vol. 215. – P. 1800105.
8. Zamanipour, Z. Comparison of thermoelectric properties of p-type nanostructured bulk $Si_{0.8}Ge_{0.2}$ alloy with $Si_{0.8}Ge_{0.2}$ composites embedded with $CrSi_2$ nano-inclusisons / Z. Zamanipour, D. Vashaee // Journal of Applied Physics. – 2012. – Vol. 112. – P. 093714.
9. Influence of in situ formed $MoSi_2$ inclusions on the thermoelectrical properties of an *N*-type silicon-germanium alloy / K. Favier [et al.]. // Acta Materialia. – 2014. – Vol. 64. – P. 429–442.
10. Thermoelectric properties of Si/$CoSi_2$ sub-micrometer composites prepared by melt-spinning technique / J. Xie [et al.]. // Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 121. – P. 205107.
11. A new approach for producing of film structures based on $Si_{1-x}Ge_x$ / I.M. Gavrilin [et al.]. // Materials Letters. – 2022. – Vol. 313. – P. 131802.
12. Vegard, L. Die Konstitution der Mischkristalle und die Raumfüllung der Atome / L. Vegard // Z. Physik. – 1921. – Vol. 5. – P. 17–26.
13. Thermal and electrical properties of heavily doped Ge-Si alloys up to 1300°K / J.P. Dismukes [et al.]. // Journal of Applied Physics. – 1964. – Vol. 5. – P. 2899–2907.
14. Sze, S.M. Physics of semiconductor devices / S.M. Sze, K.K. Ng. – Hoboken: Wiley-Interscience, 2007. – 512 p.
15. Faleev, S.V. Theory of enhancement of thermoelectric properties of materials with nanoinclusions / S.V. Faleev, F. Léonard // Phys. Rev. B. – 2008. – Vol. 77. – P. 214304.
16. Enhancement of thermoelectric efficiency in PbTe by distortion of the electronic density of states / J.P. Heremans [et al.]. // Science. – 2008. – Vol. 321. – P. 554–557.

УМЕНЬШЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП, СВЯЗАННОЙ С НЕСТАБИЛЬНОСТЬЮ ПОДВОДИМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

А. Л. Гурский[1], Н. В. Машедо[2]

[1)] Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: gurskii@bsuir.by
[2)] ОАО «Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции «БЕЛЛИС», ул. Красная, 8, 220029, Минск, Беларусь, e-mail: mikalai@bellis.by

Предложена методика уменьшения влияния систематической погрешности измерений величины полного светового потока светодиодных ламп в процессе их старения из-за нестабильности подводимой электрической мощности в процессе измерений. Показано, что применение этой методики позволяет уменьшить разброс экспериментальных данных. Это, в свою очередь, влияет на результаты прогнозирования ресурса ламп, позволяя повысить точность прогнозирования, а также способствует более точному описанию динамики процессов деградации активных сред светодиодных ламп.

Ключевые слова: светодиодная лампа; ресурс; деградация; систематическая погрешность; световой поток; нестабильность; аппроксимация; прогнозирование.

REDUCTION OF SYSTEMATIC ERROR OF MEASUREMENTS OF PARAMETERS OF LED LAMPS RELATED TO INSTABILITY OF THE INPUT ELECTRICAL POWER

A. L. Gurskii[1], M. V. Masheda[2]

[1)] Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki st. 6, 220013, Minsk, Belarus
[2)] BELLIS Testing and Certification of Home Appliances and Industrial Products JSC, Krasnaja str. 8, 220029, Minsk, Belarus
Corresponding author: A. L. Gurskii (gurskii@bsuir.by)

A method of reduction of influence of systematic error of measurements of the value of total luminous flux of LED lamps during ageing caused by an instability of input electrical power in the measurement procedure has been proposed. It was demonstrated that application of this method allows to reduce the experimental data scattering. This, in it's turn, affects the results of lumen maintenance prediction, allowing to increase the forecasting accuracy, and also contributes to a more accurate description of the dynamics of degradation processes of active areas of LED lamps.

Key words: LED lamp; lumen maintenance; degradation; systematic error; luminous flux; instability; approximation; prediction.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач, связанных с широким распространением светодиодных ламп и светильников на их основе, является прогнозирование ресурса их работы [1]. В основе методов прогнозирования лежит, как правило, экстраполяция временных зависимостей параметров ламп, измеренных в ходе испытаний в течение некоторого ограниченного времени (как правило, 6000 часов), в область больших времен [2]. При этом точность измерения этих временных зависимостей будет сильно влиять на точность экстраполяции и, соответственно, на результаты прогнозирования. Отметим, что такое прогнозирование рассматривает только случай постепенной (не катастрофической) деградации.

Ранее было показано, что относительно небольшие воздействия внешних факторов, в частности, подводимой электрической мощности P_{in}, могут оказывать существенное влияние на измеренные временные зависимости таких параметров светодиодных ламп, как полный световой поток (total luminous flux, TLF) и коррелированная цветовая температура (correlated color temperature, CCT) [3]. Кардинальное решение этой проблемы – жесткая стабилизация подводимой электрической мощности. При этом нестабильность выходного напряжения источника питания (использовался источник с нестабильностью менее 0,5 %) должна быть уменьшена как минимум на порядок. В тех случаях, когда такую жесткую стабилизацию реализовать по тем или иным причинам не удается, требуется, очевидно, коррекция результатов измерений для уменьшения систематической погрешности, связанной с нестабильностью питания ламп. Цель данной работы – создание методики коррекции результатов измерений значений полного светового потока и коррелированной цветовой температуры светодиодных ламп с учетом флуктуаций подводимой электрической мощности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного материала при анализе использовался набор данных, полученных в результате испытаний выборок коммерческих светодиодных ламп в течение от 6000 до 10000 часов. Параметры исследованных ламп, экспериментальной установки и методы измерений описаны в [3]. Из всего набора регистрируемых в процессе испытаний параметров ламп был выбран полный световой поток TLF, временные зависимости которого представляют из себя наибольший интерес для прогнозирования. В частности, согласно действующим нормативным документам, прогнозирование ресурса ведется именно по уменьшению величины TLF со временем [2]. Этот параметр характеризует энергетические свойства ламп. В качестве основного влияющего фактора рассматривается нестабильность подводимой к лампам электрической мощности P_{in}. При обработке результатов использовались стандартные методы регрессионного анализа и математической статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны зависимости величин TLF и CCT от времени наработки. Хорошо видны флуктуации значений этих параметров от точки к точке, причем характер этих флуктуаций весьма близок для большинства экземпляров ламп выборки. Очевидно, они являются результатом систематической погрешности, связанной с внешним воздействием. Как показано в [3], они в наибольшей степени коррелируют с флуктуациями P_{in}. Коррекция данных с целью уменьшения этой систематической погрешности осуществлялась следующим образом.

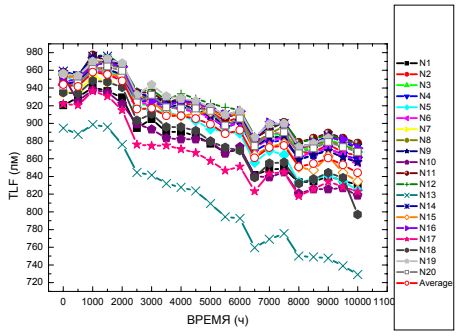

Рис. 1. Зависимости величины полного светового потока от времени наработки для выборки из 20 экземпляров ламп

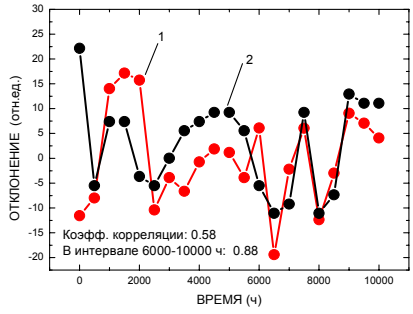

Рис. 2. Нормализованные значения отклонений TLF от аппроксимирующей функции (*1*) и P_{in} от среднего значения (*2*)

Вначале производился выбор аппроксимирующей функции и проверка ее корректности. Для зависимости TLF от времени обычно используется аппроксимирующая функция в виде моно- [2] или мультиэкспоненциального затухания [4]. Однако, как известно, эта зависимость в начальный период времени может отклоняться от экспоненциальной и даже быть немонотонной [5], что порождает проблему выбора аппроксимирующей функции и интервала аппроксимации [6]. Характер зависимости TLF от времени на рис. 1, *а* весьма близок к линейному, поэтому проверялись два варианта аппроксимации – линейный и экспоненциальный. Для них получены значе-

ния коэффициента детерминации $R^2_{\text{lin}} = 0,9551$ и $R^2_{\text{exp}} = 0,9554$ соответственно, что говорит о незначимости отличий в данном случае.

Далее строились графики зависимостей отклонений величины TLF от аппроксимирующей функции и отклонений P_{in} от среднего значения. Пример графиков в нормализованных координатах показан на рис. 2. Из данного рисунка видно наличие корреляции между флуктуациями TLF и P_{in}. Полученный нормирующий множитель, равный примерно 5000 и представляющий собой отношении величины отклонения TLF к отклонению P_{in}, используется затем для коррекции значений TLF в зависимости от величины P_{in}.

Результаты коррекции показаны на рис. 3. Видно, что разброс значений на графиках значительно уменьшился, что позволяет проводить более точную аппроксимацию зависимости TLF от времени и, соответственно, улучшить точность прогнозирования значений TLF в области больших времен.

На рис. 4 показан результат прогнозирования ресурса выборки ламп путем экстраполяции моноэкспоненциальной функцией в область больших времен по стандартному методу [2]. При этом временной ресурс определяется для двух точек, соответствующих уменьшению величины TLF до 70 % и 50 % от начального значения, а отклонения от экспоненциальной зависимости в начальном периоде испытаний не учитываются. Видно, что коррекция исходных данных существенно повлияла на ход экспоненциальных кривых, при этом в результате коррекции значения прогнозируемого ресурса уменьшились. Поскольку в результате коррекции заметно уменьшился разброс данных, можно предполагать, что такая коррекция позволяет более точно прогнозировать ресурс светодиодных ламп по данным испытаний.

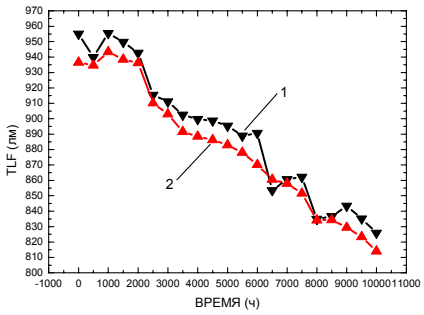

Рис. 3. Зависимости величины полного светового потока от времени наработки до коррекции (*1*) и после коррекции (*2*)

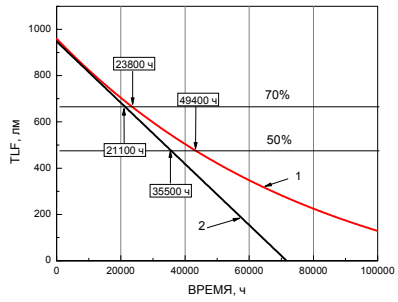

Рис. 4. Результаты экстраполяции значений TLF в область больших времен на основе исходных (*1*) и корректированных данных (*2*)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная методика уменьшения систематической погрешности результатов измерений светового потока из-за нестабильности подводимой электрической мощности в процессе измерений позволяет уменьшить разброс этих данных, что повышает точность их аппроксимации и последующей экстраполяции в область больших времен, способствуя увеличению точности прогнозирования ресурса и более точному описанию динамики процессов деградации активных сред светодиодных ламп.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Advances in Reliability Testing and Standards Development for LED Packages and Systems / Qian C. [et al.] // Solid State Lighting Reliability. Part 2: Components to Systems. Solid State Lighting Technology and Application Series. – 2018. – Vol. 3. – P. 76–114.
2. IES TM-21-11. Projecting long term lumen maintenance of LED light sources. – New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2011 – 33 p.
3. Гурский, А.Л. Влияние внешних факторов на параметры светодиодных ламп, измеряемые в процессе их испытаний / А.Л. Гурский, М.Ю. Дерябина, Н.В. Машедо // Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 нояб. 2023 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: М.М. Кугейко (гл. ред.), А.А. Афоненко, А.В. Баркова. – Минск: БГУ, 2023. – С.268–273.
4. Fan J. J. Lifetime estimation of high-power white LED using degradation-data-driven method / Fan J. J., Yung K. C., Pecht M. // IEEE Trans. Device Mater. Reliab. – 2012. – Vol. 12, № 2. – P. 470–477.
5. A hybrid prediction method on luminous flux maintenance of high-power LED lamps / Cai M. [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 95, № 2. – P. 482–490.
6. Гурский А.Л. Усовершенствование методов прогнозирования ресурса светодиодных ламп по результатам регистрации светового потока в ходе испытаний / А.Л. Гурский, Н.В. Машедо // Квантовая электроника: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–26 ноября 2021 г. / БГУ, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.), А.А. Афоненко, А.В. Баркова]. – Минск: БГУ, 2021. – С.259–262.

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СО СТРУКТУРОЙ ZnO:Al/ZnO-i/CdS/$Cu_2ZnSnSe_4$ /Mo/стекло

В. Д. Живулько[1], А. В. Мудрый[1], О. М. Бородавченко[1], К. В. Усенко[1], И. А. Могильников[2], М. А. Сулимов[2], М. В. Якушев[2], И. Форбс[3]

[1)] Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Беларусь, e-mail: zhivulko@physics.by
[2)] Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, 620108 Екатеринбург, Россия, e-mail: michael.yakushev@strath.ac.uk
[3)] Department of Physics and Electrical Engineering, Northumbria University, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK

Исследована фотолюминесценция тонких пленок соединения $Cu_2ZnSnSe_4$ со структурой кестерита в солнечных элементах, созданных на их основе. По данным рентгеновской дифракции определены параметры элементарной ячейки соединения $Cu_2ZnSnSe_4$ составившие: a = 5,692 Å и c = 11,33 Å. При температуре 4,2 K установлена ширина запрещенной зоны тонких пленок $Cu_2ZnSnSe_4$, составившая