

на (ширина) клеевых прослоек меньше реальной в 3 и 100 раз — кривые 3, 4, соответственно. Для иллюстрации влияния температуропроводности изоляционно-клеявого материала на быстродействие реального ИП приведены расчётные кривые при условии, что температуропроводность этого материала в 50 раз больше, чем клея БФ (поливинилбутироля) за счёт любого параметра (см. рис. 2, кривые 5).

На основании представленных результатов можно сделать выводы о том, что быстродействие ИП на основе эффекта Борелиуса можно увеличить, если уменьшить размеры клеевых изоляционных прослоек или увеличить их температуропроводность, например, применив теплопроводящие пасты.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания № 2014/376 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности (проект № 59).

Л и т е р а т у р а

1. **Студопедия** [Электрон. ресурс] <http://studopedia.info/1-36613.html> (дата обращения: 07.12.2016).

2. **Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В.** Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными датчиками на основе анизотропных монокристаллов висмута // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. Вып. 7. С. 114—120.

3. **Снарский А. А., Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В.** Высокотемпературные гетерогенные градиентные датчики теплового потока и их применение // Термоэлектрики и их применение: Сб. докладов XIV Межгосударственной конф. СПб., 2013. С. 540—546.

4. **Бочегов В. И., Грабов В. М., Парахин А. С.** Технические средства для прямого измерения теплопроводности твёрдых тел // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 22—26.

5. **Свид-во на полезную модель 9959 РСФСР.** Датчик теплового потока / Н. П. Дивин // Полезные модели. 1999. № 5.

6. **Физические величины:** Справочник / Под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. М.: Энергоиздат, 1991.

7. **Thermalinfo.ru** [Официальный сайт]: http://thermalinfo.ru/publ/tverdye_veshhestva/plastmassa_i_plastik/svoystva_polimerov/15-1-0-289 (дата обращения: 07.12.2016).

8. **Грабов В. М., Дивин Н. П., Комаров В. А., Парахин А. С.** Быстродействие анизотропного термоэлемента // Термоэлектрики и их применение: Сб. докладов VII Межгосударственного семинара. СПб., 2000. С. 369—374.

Дата принятия: 05.05.2016.

681.518.3

Измерение теплового импеданса светодиодов и светодиодных матриц

В. И. СМЕРНОВ^{1, 2}, В. А. СЕРГЕЕВ^{1, 2}, А. А. ГАВРИКОВ¹

¹ Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия, e-mail: sva@ulstu.ru

² Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Описан измеритель частотных и токовых зависимостей модуля и фазы теплового импеданса светодиодов и светодиодных матриц мощностью 100 Вт и более. Принцип работы измерителя основан на пропускании через светодиоды последовательности импульсов прямого тока, широтно-импульсно модулированной по гармоническому закону, и определении переменной составляющей температуры р—п-перехода светодиода по изменению напряжения в паузах между импульсами тока. Представлен алгоритм определения компонент полного теплового сопротивления светодиода или светодиодной матрицы по результатам обработки частотных зависимостей модуля и фазы теплового импеданса. Приведены примеры реализации алгоритма.

Ключевые слова: светодиод, светодиодная матрица, тепловой импеданс, широтно-импульсная модуляция, гармонический закон.

An automated measuring complex is presented to measure frequency and current dependence of the module and phase of thermal impedance of light-emitting diodes and LED arrays of 100-Watt and more. The measurement principle of the automated complex is based on passing through a light-emitting diode of sequence of impulses of direct current, pulse-width modulated by the law of harmony, and on measurement of a variable of p-n temperature transition at frequency modulation of change of a voltage drop on p-n transition at a small parallel flow in pauses between thermal impulses. An algorithm is described, defining components of thermal impedance of a light-emitting diode by the results of processing of frequency characteristics of the module and a phase of thermal impedance. Examples of realization of algorithm are given.

Key words: light-emitting diode, LED matrix, thermal impedance, pulse-width modulation, law of harmony.

Эффективность оптического излучения и скорость деградации светодиода в значительной степени зависят от температуры активной области (гетероперехода) кристалла. Ге-

теропереход определяется полным тепловым сопротивлением и электрической мощностью, рассеиваемой светодиодом в эксплуатационном режиме. Полное тепловое сопро-

тивление светодиодов, как и других планарных полупроводниковых приборов, зависит от распределения источников тепловой энергии по площади гетероперехода и теплового сопротивления слоёв конструкции светодиода, включая монтажные теплоотводящие пластины. При этом качество соединения отдельных слоёв заметно влияет на однородность теплового потока.

Тепловое сопротивление и теплоёмкость i -го слоя толщиной d_i , площадью S_i , теплопроводностью λ_i , плотностью γ_i и удельной теплоёмкостью c_{Ti} при однородном по площади слоя тепловом потоке характеризуются формулами

$$R_{Ti} = d_i / (\lambda_i S_i); C_{Ti} = c_{Ti} \gamma_i d_i S_i.$$

В случае произвольного закона изменения мощности, температуру перехода $T(t)$ можно найти в линейном приближении только по закону изменения полной рассеиваемой мощности $P(t)$ и выразить интегралом Дюамеля [1]:

$$T(t) = T_0 + \int_0^t H(t-t') P(t') dt',$$

где T_0 — начальная температура перехода; $H(t-t')$ — функция отклика температуры на δ -подобный импульс мощности в момент времени t' .

Для тепловой модели, состоящей из n RC-цепочек, функция $H(t-t')$ имеет вид

$$H(t-t') = \sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{\tau_{Ti}} \exp\left[-(t-t')/\tau_{Ti}\right],$$

где $\tau_{Ti} = R_{Ti} C_{Ti}$ — тепловая постоянная времени i -го слоя.

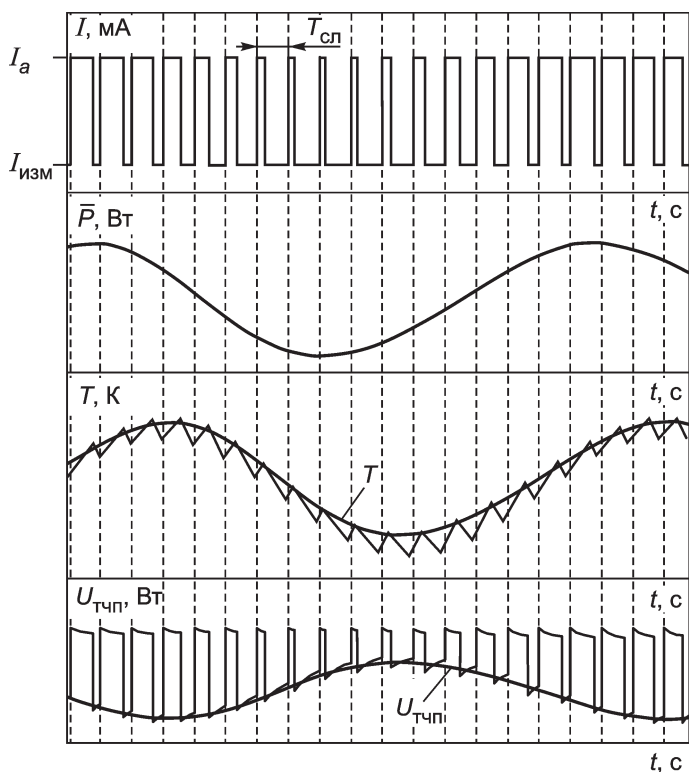


Рис. 1. Временные зависимости: тока I через светодиод; средней за период следования мощности $\bar{P}$; температуры T p — n -перехода светодиода; температурочувствительного параметра $U_{TСП}$

Качество сборки светодиодов и светодиодных матриц контролируют по измерениям отдельных компонентов их полного теплового сопротивления. Такие измерения особенно важны для полупроводниковых светоизлучающих приборов, у которых большая рассеиваемая мощность может вызвать сильный и неоднородный перегрев кристаллов из-за положительной тепловой обратной связи [2].

Метод измерений. Измерения компонентов теплового сопротивления светодиодов возможны двумя методами.

Метод измерений по стандарту JESD51-1 [3] состоит в саморазогреве светодиода постоянным электрическим током заданного значения и измерениях температуры p — n -перехода диода в паузах при нагреве до стационарного теплового режима. Температуру перехода получают косвенным способом по измерениям температурочувствительного параметра (ТЧП), в качестве которого используется прямое падение напряжения на светодиоде при малой силе измерительного тока. Анализ кривой нагрева (зависимость температуры перехода от времени) позволяет рассчитать вклад отдельных элементов структуры и конструкции светодиода в общее тепловое сопротивление. Метод реализован в измерительном комплексе T3Ster (Mentor Graphics, США) [4], с помощью которого можно измерять тепловой импеданс не только полупроводниковых диодов, но также интегральных микросхем [5] и мощных транзисторов [6, 7]. Недостатками метода являются значительные погрешности измерений малых изменений ТЧП при больших квазистационарных значениях напряжения на светодиоде и погрешности, обусловленные переходными процессами при переключении светодиода из режима нагрева в режим измерений.

В альтернативном методе светодиод нагревается импульсами тока с мощностью, изменяющейся по гармоническому закону, и измеряется амплитуда переменной составляющей температуры на частоте модуляции. Модуляция греющей мощности может быть осуществлена различными способами, но применительно к таким объектам измерения, как полупроводниковые диоды (в том числе и светодиоды), наиболее просто реализуется метод с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ) импульсов тока [8]. В этом методе погрешности, обусловленные переходными электрическими процессами, существенно уменьшаются, поскольку паразитные выбросы напряжения становятся время-импульсно модулированными и не вносят вклад в спектр полезного сигнала на частоте модуляции.

Суть метода заключается в следующем. Через светодиод в прямом направлении пропускается последовательность импульсов тока I , длительность τ которых изменяется по гармоническому закону:

$$\tau = \tau_{cp} (1 + a \sin \omega t), \quad (1)$$

где τ_{cp} — средняя длительность импульсов; a — коэффициент модуляции мощности; $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота модуляции. Период следования $T_{сп}$ импульсов и амплитудное значение I_a импульсов тока на светодиоде поддерживаются постоянными (рис. 1).

Учитывая, что вариации напряжения на светодиоде, вызванные циклическим изменением температуры перехода, существенно меньше напряжения при протекании тока, можно принять амплитудное напряжение U_a импульсов постоянным. Тогда средняя за период следования мощность $\bar{P}(t)$

с учётом (1) будет также изменяться по гармоническому закону:

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{T_{\text{сп}}} \int_0^{T_{\text{сп}}} P(t) dt = I_a U_a \frac{\tau}{T_{\text{сп}}} P_{\text{сп}} (1 + a \sin \omega t) = P_{\text{сп}} + P_1 \sin \omega t,$$

где $P_{\text{сп}} = I_a U_a (\tau/T_{\text{сп}})$ — средняя мощность; $P_1 = a P_{\text{сп}}$ — амплитуда колебаний мощности.

Модуляция мощности вызывает колебания температуры p – n -перехода светодиода, сдвинутые по фазе относительно мощности. Разность фаз зависит от частоты модуляции и тепловых постоянных времени элементов конструкции светодиода. Температуру p – n -перехода относительно корпуса или окружающей среды при известном температурном коэффициенте напряжения можно получить, как и в стандарте JESD51-1 [3] по измеренным значениям $U_{\text{ТЧП}}$ на светодиоде при протекании через него малого прямого тока $I_{\text{изм}}$, не превышающего 10 мА.

Измерения ТЧП проводятся в паузах между импульсами с небольшой временной задержкой (см. рис. 1), необходимой для завершения переходных электрических процессов, связанных с переключением светодиода из режима нагрева в режим измерения ТЧП. Напряжение $U_{\text{ТЧП}}(t)$ на p – n -переходе в паузах между импульсами тока будет повторять (с обратным знаком) изменение температуры p – n -перехода.

Модуль теплового импеданса $|Z_T(\omega)|$ на частоте модуляции запишем как отношение первых гармоник температуры $T_1(\omega)$ и мощности $P_1(\omega)$: $|Z_T(\omega)| = T_1(\omega)/P_1(\omega)$.

Для определения первой гармоники температуры $T_1(\omega)$ используем дискретное преобразование Фурье:

$$A_1(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N T(t_i) \cos[2\pi(i/N)]; \quad B_1(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N T(t_i) \sin[2\pi(i/N)];$$

$$T_1(\omega) = \sqrt{A_1^2(\omega) + B_1^2(\omega)},$$

где $A_1(\omega)$, $B_1(\omega)$ — вещественные и мнимые Фурье-трансформанты на частоте модуляции ω ; $T(t_i)$ — температура в моменты времени t_i .

Тангенс фазы φ теплового импеданса определяется отношением мнимой и вещественной Фурье-трансформант $B_1(\omega)$, $A_1(\omega)$ на частоте модуляции $\varphi = \arctg [B_1(\omega)/A_1(\omega)]$.

Структурная схема измерителя. Структурная схема измерителя представлена на рис. 2. Прибор управляется микроконтроллером МК ATmega 128 (Atmel Corporation, США). Формирователь измерительного тока $I_{\text{изм}}$ реализован на основе операционного усилителя ЦП, в обратную цепь которого включён полевой транзистор. Значение $I_{\text{изм}}$ определяется напряжением на неинвертирующем входе ОУ и токозадающим резистором в цепи стока транзистора. По аналогичной схеме реализован и формирователь импульсов тока I_a , однако напряжение на неинвертирующем входе устанавливается программно от микроконтроллера (МК) с помощью цифрового потенциометра ЦП и преобразователя уровней напряжения ПУ. Данная схема позволяет исключить влияние изменений параметров полевого транзистора, вызванных его нагревом при протекании больших токов. С помощью переключателя напряжения Кл осуществляется широтно-импульсная модуляция I_a .

Напряжение, измеренное на объекте (температурочувствительный параметр — $U_{\text{ТЧП}}$) в паузах между импульсами,

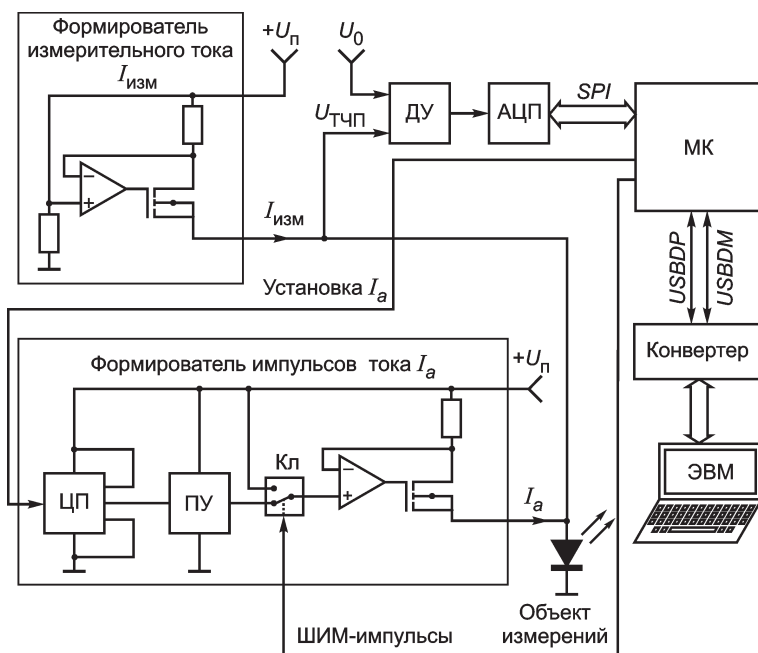


Рис. 2. Структурная схема измерителя теплового импеданса светодиодов: АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ДУ — дифференциальный усилитель; МК — микроконтроллер; ЦП — цифровой потенциометр; ПУ — преобразователь уровней напряжения

может варьироваться в широких пределах. Для светодиодов оно составляет несколько вольт, для светодиодных матриц — десятки вольт. Поэтому с помощью дифференциального усилителя ДУ из напряжения $U_{\text{ТЧП}}$ вычитается постоянная составляющая U_0 . Преобразование измеряемого напряжения в цифровой код, поступающий в МК, осуществляется с помощью 16-разрядного аналого-цифрового преобразователя АЦП с последовательным выходом. Передача результатов преобразования с выхода аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в МК производится с помощью скоростного последовательного интерфейса SPI. Все результаты измерений записываются в оперативную память МК и по окончании измерений поступают в электронно-вычислительную машину ЭВМ для последующей обработки. Взаимодействие МК с ЭВМ осуществляется посредством USB-интерфейса, для реализации которого используется конвертер RS-USB на основе микросхемы FT-232.

Программное обеспечение. Программное обеспечение включает управляющую программу для МК и программный продукт LED Meter (Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия) для электронно-вычислительной машины, осуществляющий обработку результатов измерений, установку режимов работы и управление процессом измерений [9].

Управляющая программа обеспечивает решение следующих задач: формирование последовательности ШИМ-импульсов тока заданной амплитуды, периода следования и частоты модуляции; измерение напряжения на объекте во время протекания через него импульсов тока; измерение $U_{\text{ТЧП}}$ в паузах между импульсами; передачу результатов измерений в ЭВМ; контроль функционирования измерителя теплового импеданса; формирование специальных сигналов в случае возникновения нештатных ситуаций и передача кодов ошибок в ЭВМ для распознавания.

Программный продукт LED Meter позволяет: формировать и передавать в измеритель информационный пакет

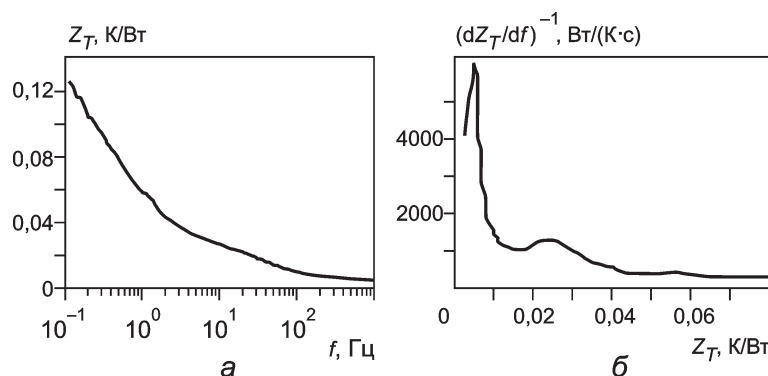


Рис. 3. Частотная зависимость модуля теплового импеданса мощной светодиодной матрицы (а) и результат её обработки (б)

данных с параметрами измерений (амплитуда и период следования импульсов тока, частота модуляции и ряд параметров, определяющих режимы измерений); вычислять модуль и фазу теплового импеданса и определять его компоненты; отображать результаты измерений и их обработки в текстовом и графическом виде, а также предоставляет навигацию по базе данных и ряд других сервисных функций.

Основными режимами работы измерителя являются однократное измерение теплового импеданса и сканирование по частоте модуляции. Первый режим предназначен для измерений теплового импеданса при заданной частоте модуляции мощности. При этом в графические окна интерфейса пользователя выводятся временные зависимости длительности импульсов и температуры $p-n$ -перехода. В текстовые окна интерфейса выводятся устанавливаемые параметры измерений, результаты измерений теплового импеданса и температуры перегрева кристалла, а также информация, позволяющая контролировать ход измерений.

Второй режим позволяет получать зависимость модуля $Z_T(f)$ и фазы $\varphi(f)$ теплового импеданса от частоты модуляции и на основе её анализа — информацию о вкладе отдельных элементов конструкции объекта измерения в его полный тепловой импеданс. Вклады отдельных компонентов теплового импеданса проявляются в виде пологих участков или точек перегиба на частотной зависимости $Z_T(f)$ в полулогарифмическом масштабе.

На рис. 3 а представлены результаты измерений $Z_T(f)$ 100-ваттной светодиодной матрицы отечественного производства. Светодиоды матрицы крепили к монтажной пластине с помощью специального адгезионного материала с высокой теплопроводностью, матрицу размещали на массивном теплоотводе. Измерения осуществляли при силе тока 2,5 А, температурный коэффициент напряжения на $p-n$ -переходах определяли по стандартной методике (18 мВ/К).

В качестве источников освещения светодиодные матрицы, изготавливаемые по технологии «Chip-on-Board», используют относительно недавно — с 2009 г., поскольку ранее, клеевые соединения кристалла с монтажной пластиной не обеспечивали необходимой теплопроводности. Существующие в настоящее время специальные клеи позволяют изготавливать светодиодные матрицы мощностью до 500 Вт, что соответствует световому потоку около 60000 лм. Несмотря на высокий КПД светодиодов, не менее 60 % подводимой к светодиодной матрице мощности уходит на её нагрев. Для того, чтобы такая рассеиваемая мощность не приводила к перегреву кристаллов, необходимо с высокой точностью контролировать компонент теплового сопротивления «кристалл — монтажная пластина».

Для более точного выделения компонентов теплового импеданса разработана методика обработки экспериментальной зависимости $Z_T(f)$, которая включает процедуру сглаживания зависимости $Z_T(f)$ методом «скользящего среднего», вычисление производной dZ_T/df и построение зависимости $(dZ_T/df)^{-1}$ от Z_T . Результат такой обработки показан на рис. 3 б. Компоненты теплового импеданса определяют по положению максимумов относительно оси абсцисс. Два пика на графике соответствуют компонентам импеданса «переход — адгезионный слой» и «переход — монтажная пластина». Для исследованного образца получены следующие значения:

$$Z_{T1} = 0,006 \text{ К/Вт}, \quad Z_{T2} = 0,024 \text{ К/Вт}.$$

Испытания экспериментального образца показали, что с его помощью можно измерять компоненты тепло-

вого импеданса образцов с напряжением 0,5—50 В и силой тока 0,15—5 А. При необходимости выходное напряжение можно увеличить до 70 В. Погрешность измерений модуля теплового импеданса оценивается в 3 % [10]. Частота модуляции мощности может достигать 1250 Гц, что позволяет измерять тепловой импеданс элементов конструкции светодиодов с тепловой постоянной времени на уровне 100 мкс.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 2014/232 Минобрнауки России УлГТУ (проект № 1514) при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-47-732151 и № 16-47-732159).

Л и т е р а т у р а

1. Давидов П. Д. Анализ и расчёт тепловых режимов полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1967.
2. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
3. IC Thermal Measurement Method — Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1 standard. [Электр. ресурс] <http://www.jedec.org/standards-documents/results/JESD51-1> (дата обращения 14.11.2015).
4. T3Ster — Thermal Transient Tester. [Электр. ресурс] <http://www.mentor.com/micred>. (дата обращения 14.11.2015).
5. Siegal B. Thermal Load Board Design Considerations // Electronics Cooling. 2009. V. 18. N. 3. P. 213—219.
6. Schweitzer D. Transient Dual Interface Measurement of the Rth-JC of Power Semiconductor Packages. Electronics Cooling. 2010. V. 16. N. 3. P. 184—189.
7. Hamidi A., Coquery G., Lallemand R., Vales P., Dorkel J.M. Temperature measurements and thermal modeling of high power IGBT multichip modules for reliability investigations in traction applications // Microelectronics Reliability. 1998. V. 38. P. 1353—1359.
8. Пат. 2402783 РФ. Способ измерения теплового импеданса полупроводниковых диодов / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, В. В. Юдин, А. А. Гавриков // Изобретения. Полезные модели. 2001. № 30.
9. Сергеев В. А., Смирнов В. И., Гавриков А. А., Фролов И. В. Измерение теплового импеданса мощных светодиодов с применением широтно-импульсной модуляции мощности // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012. № 3 (95). С. 64—68.
10. Смирнов В. И., Сергеев В. А., Гавриков А. А., Корунев Д. И. Аппаратно-программный комплекс для измерений тепловых характеристик полупроводниковых приборов // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 1. С. 135—136.

Дата принятия 13.01.2016.