

УДК 621.383.4/5

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp,  
85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

## Расчет теплопритоков в узлах матричных фотоэлектронных модулей ИК-диапазона спектра

Р. К. Белоковаленко, М. В. Банников

*Впервые проведен анализ и расчет теплопритоков в узлах матричного фотоэлектронного модуля (ФЭМ) с помощью программного комплекса Autodesk CFD. При помощи программного обеспечения Autodesk Inventor была создана трехмерная модель прибора, на основе которой в дальнейшем построена модель распределения тепла внутри матричного фотоэлектронного модуля. Исходя из полученных данных, проанализирована конструкция ФЭМ с точки зрения распределения и отвода тепла. Из результатов расчета сделано заключение об эффективности работы ТЭО и его вкладе в паразитное излучение.*

*Ключевые слова:* матричные фотоэлектронные модули, теплопритоки, метод конечных элементов.

### Введение

С повышением температуры быстро снижается надежность полупроводниковых элементов, соответственно, требования к надежности некоторых элементов становятся жестче и при их создании необходим тщательный расчет тепловых параметров [1–3]. Знание распределения температуры в устройстве является важным аспектом во многих задачах. Количество тепла, подводимого к устройству или теряемого им, может быть вычислено, если известно распределение температуры в нем [4].

Основной тенденцией в разработке полупроводниковых приборов является повышение выходной мощности и расширение частотного диапазона прибора [5]. Многие характеристики полупроводниковых материалов (концентрация неосновных носителей заряда, подвижность, время жизни и др.) в значительной степени зависят от температуры. Значит, и электрические параметры приборов, такие, как прямое падение напряжения на  $p-n$ -переходе, обратный ток коллектора, пробивное напряжение лавинно-пролетных диодов, предельная частота, также зависят от температуры. Повышение температуры активной области выше предельно допустимой приводит к выходу

прибора за пределы, допустимые для нормальной работы.

Тепловые расчеты полупроводниковых приборов должны учитывать особенности топологии  $p-n$ -переходов [6]. Если прибор предназначен для работы в импульсном режиме, то тепловым расчетом должны определяться предельная импульсная мощность для определенных длительностей импульсов и скважностей. Такие расчеты невозможно проводить по упрощенным тепловым моделям, не отражающим специфику данной топологии или данного корпуса.

Целью данной работы являлось проведение анализа и выполнение расчета теплопритоков в узлах матричного фотоэлектронного модуля (ФЭМ) с помощью программного комплекса Autodesk CFD. Основной задачей при этом стало создание трехмерной модели прибора при помощи программного обеспечения Autodesk Inventor, что позволило, в конечном итоге, сформировать модель распределения тепла внутри ФЭМ.

### Расчет теплопритоков ФЭМ

Матричный фотоэлектронный модуль, представленный на рис. 1, состоит из следующих конструктивных узлов:

1. сапфировое окно;
2. корпус из кавара;
3. крышка из кавара для корпуса;
4. термоэлектрический охладитель;
5. провода;
6. золотые выводы электрических контактов;
7. фоточувствительный блок.

**Белоковаленко Роман Константинович**, инженер, аспирант.  
**Банников Максим Викторович**, начальник отдела АСКУ.  
АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2016 г.

© Белоковаленко Р. К., Банников М. В., 2017

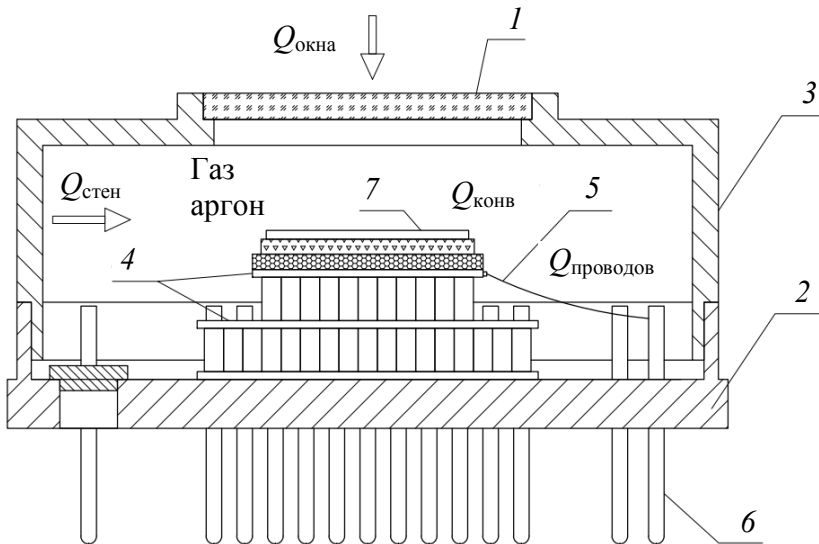


Рис. 1. Теплопритоки матричного фотоприемного модуля:  $Q_{\text{окна}}$  – теплоприток за счет излучения через сапфировое окно;  $Q_{\text{стен}}$  – теплоприток за счет излучения стенок корпуса;  $Q_{\text{конв}}$  – теплоприток за счет конвекции аргона;  $Q_{\text{проводов}}$  – теплоприток от проводов.

Для определения всех потерь связанных с теплопритоками, необходимо рассматривать каждый элемент конструкции отдельно. Разобьем все теплопритоки на следующие группы:

- конвективный теплообмен;
- теплоприток за счет излучения;
- собственное тепловыделение.

Полный теплоприток вакуумной конструкции определяется следующим соотношением:

$$Q = Q_{\lambda} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{соб}} \quad (1)$$

где  $Q_{\lambda}$  – тепловой поток за счет теплопроводности охлаждаемого элемента;  $Q_{\text{изл}}$  – тепловой поток за счет теплового излучения;  $Q_{\text{соб}}$  – собственное тепловыделение элемента.

При расчетах были приняты следующие допущения:

- распределение температур по длине конструкции линейное;
- коэффициент теплопроводности линейно зависит от температуры.

Тепловой поток за счет теплопроводности охлаждаемых элементов определяется соотношением (закон Фурье):

$$Q_{\lambda} = \lambda S \left( \frac{T_{\text{ос}} - T_{\text{кр}}}{l} \right) \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности охлаждаемого элемента, Вт/мК;  $S$  – площадь поперечного сечения элемента, м<sup>2</sup>;  $l$  – длина элемента, м;  $T_{\text{ос}}$  – температура окружающей среды, К;  $T_{\text{кр}}$  – температура криостатирования, К.

По формуле (2) определяем конвективный теплообмен через провода.

Мощность, рассеиваемая проводниками, рассчитывается с учетом значения площади одного провода, а именно,  $7,069 \times 10^{-10}$  м<sup>2</sup>. Значение теплопритока за счет конвективного теплообмена по проводам (мощность рассеивания проводниками) зависит от их количества  $n$ , т. е. имеем выражение:

$$Q_{\text{провод}} = n \lambda S_{(\text{пр})} \left( \frac{\Delta T}{l} \right) = 0,023 \text{ Вт.}$$

В ходе исследования проведен расчет значений теплопритоков за счет падающего излучения. Механизм взаимодействия излучения с поверхностью связан с возбуждением свободных электронов в поверхностном слое, поэтому чистые и гладкие поверхности с упорядоченной кристаллической структурой в поверхностном слое имеют меньшие значения степени черноты. Коэффициент черноты определяется экспериментально и зависит от температуры и состояния поверхности материала. Это позволяет оценить перенос энергии от теплой поверхности к более холодной. Для расчета подобного теплопритока используется уравнение Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{изл}} = E_{\text{пр}} \sigma (T_1^4 - T_2^4) F_2 \quad (3)$$

где  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>) – постоянная излучения Больцмана для абсолютно черного тела;  $T_1$  – температура горячей поверхности, К;  $T_2$  – температура холодной поверхности, К;  $F_2$  – площадь поверхности на которую падает излучение, см<sup>2</sup>;  $E_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент серости, который можно определить соотношением.

$$E_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_1$  – степень черноты горячей поверхности,  $\varepsilon_2$  – степень черноты холодной поверхности,  $F_1$  – площадь корпуса.

Теплоприток за счет излучения в данной конструкции происходит между следующими элементами:

- 1) стенки корпуса – матрица фоточувствительного элемента;
- 2) из окружающей среды через сапфировое окно.

Площадь корпуса  $F_1$  и площадь  $F_2$  матрицы фоточувствительных элементов, расположенной на сапфировом растре, составляют соответственно  $1,115 \times 10^{-5} \text{ м}^2$  и  $7,819 \times 10^{-5} \text{ м}^2$ . При этом достигается значение приведенной степени черноты 0,11, а расчетное значение теплопритока за счет излучения между стенками корпуса и матрицей фоточувствительного элемента, расположенной на сапфировом растре, составляет 0,00017 Вт (по уравнению Стефана-Больцмана).

В расчете теплопритока через сапфировое окно также используется уравнение Стефана-Больцмана. Для определения теплопритока между рассматриваемыми элементами используются значения площади сапфирового окна  $2,011 \times 10^{-4} \text{ м}^2$  и площади матрицы фоточувствительных элементов, расположенной на сапфировом растре, равной  $2,164 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ . При этом используется значение приведенного коэффициента серости 0,368. Рассчитанное значение теплопритока через оптическое окно составляет:

$$Q_{\text{изокна}} = E_{\text{пр}} \sigma (T_1^4 - T_2^4) F_2 = 0,012 \text{ Вт}.$$

В расчетной модели принимается во внимание влияние конвекции аргона. По числу Рэлея выбираем значение числа Нуссельта и имеем следующие соотношения:

$$Nu = 0,23Rh^{1/4} = 1,687,$$

$$h = \frac{\lambda Nu}{\delta} = 3,275 \text{ Вт / м}^2\text{К}.$$

Рассчитанное значение теплопритока составило:

$$Q_{\text{конв арг}} = h(T_1 - T_2)F_2 = 7,687 \times 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Общее значение теплопритока, рассчитанное по представленной модели, является суммой всех составляющих теплопритоков и составило величину 0,0722 Вт. Данное значение включает в себя значение собственных тепловыделений 0,05 Вт.

Сравнение общего теплопритока фотоприемного устройства с исходной холодопроизводительностью 0,5 Вт термоэлектрического охладителя (ТЭО) показало, что общие теплопритоки меньше, чем заданная холодопроизводительность, что полностью удовлетворяет заданным параметрам ФЭМ. Если бы значение общего теплопритока не удовлетворило заданной холодопроизводительности, то необходимо было бы провести оптимизационный расчет, в котором подбирались бы новые параметры системы ФЭМ (материалы конструкции, геометрические параметры системы, выбор и способ расположения конструкции и т. д.).

### Условия расчета трехмерной модели

За граничные условия принимаются давление внутри корпуса на уровне 0,1 МПа, температура газа аргон 293 К, земная гравитация, солнечное излучение (считается программой автоматически). В модели введены термические нагрузки: тепловыделение электронной сборки 0,05 Вт и нагрев до 316 К, нагрев горячей стороны ТЭО 50 °С, охлаждение холодной стороны ТЭО 0 °С, тепло, выделяемое золотыми проводами и микроконтактами 0,0023 Вт, а также напряжение 4 В для тока, проходящего через них, теплоприток через сапфировое оптическое окно 0,012 Вт и мощность ТЭО 7 Вт.

### Разбивка трехмерной модели на конечные элементы

В программном комплексе Autodesk Simulation CFD [7–10] используется трехмерное моделирование и метод конечных элементов. Кроме того, имеется возможность как автоматического, так и ручного разбиения модели на конечные элементы (КЭ), а также задается шаг разбиения, делается проверка пересечений плоскостей, есть возможность сгущения сетки по регионам и исключения ненужных объектов.

На рис. 2 приведена конечноэлементная модель прибора ФУК20М.

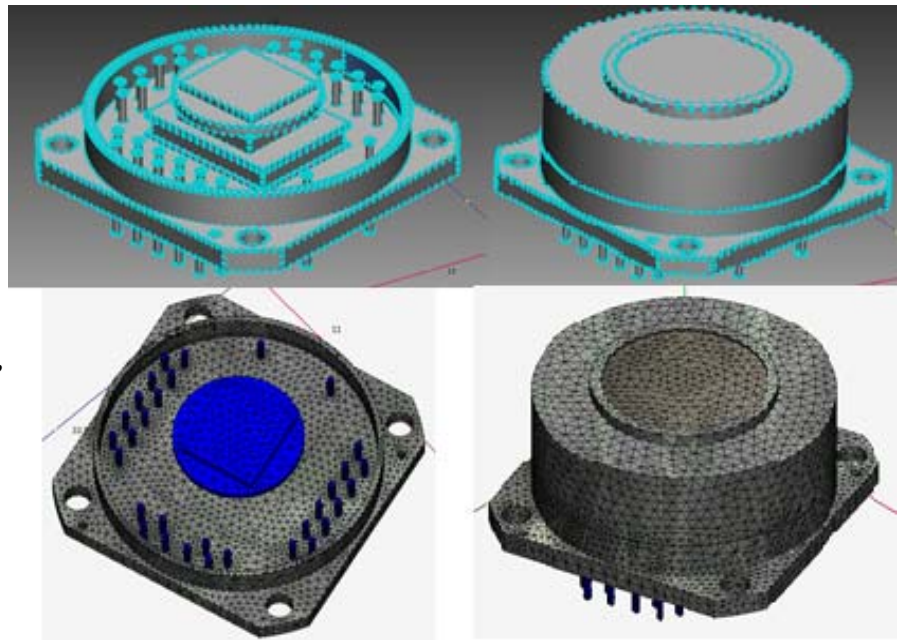


Рис. 2. Конечно-элементная модель прибора ФУК20М.

**Результаты расчета устройства в AUTODESK SIMULATION CFD**

По полученным результатам расчета мы сможем судить о правильности выбранной конструкции ФЭМ, а также о влиянии собственных излучений (шумов) прибора на фоточувствительный

элемент. Расчет происходит в 50 итераций (количество итераций настраивается). После выполнения расчета мы получаем распределение температур в исследуемом приборе.

На рис. 3 представлено распределение температур по коваровому корпусу и контактам прибора ФУК20М.

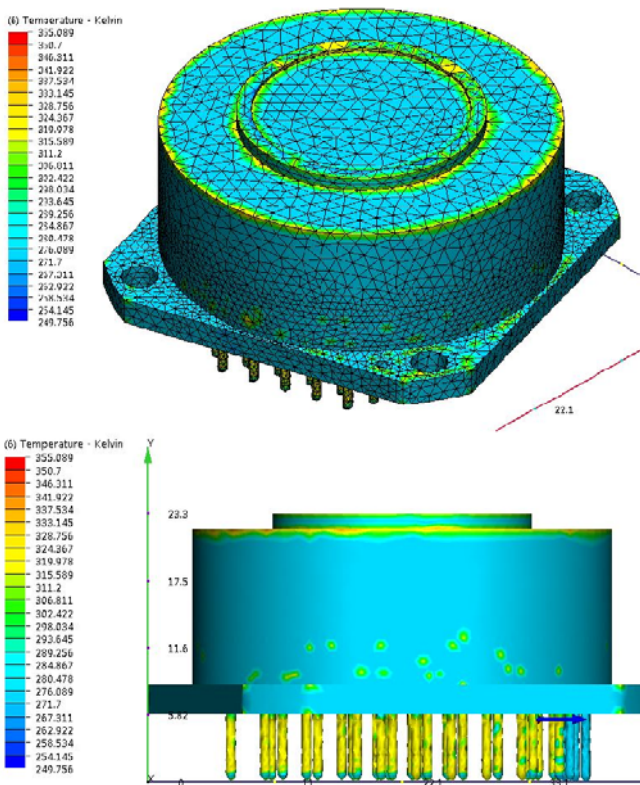


Рис. 3. Распределение температур по корпусу прибора.

На рис. 4 представлено распределение температур внутри прибора. Видно, что используемый ТЭО полностью справляется со своей функцией, а именно, фоточувствительная сборка и другие элементы охлаждены до нужной температуры 263 К. Вокруг нижней границы ТЭО мы наблюдаем выделение тепла. Благодаря вакууму внутри корпуса, теплопередача происходит в основном за счет излучения и через контакт материалов.

На рис. 5 представлено распределение температур по сечению прибора. Эти данные подтверждают, что фоточувствительная сборка охлаждена до нужных температур. Выделяемое горячей поверхностью ТЭО тепло передается на нижнюю часть коварового корпуса, что позволяет отвести его с помощью устанавливаемого внешнего теплоотводящего устройства.

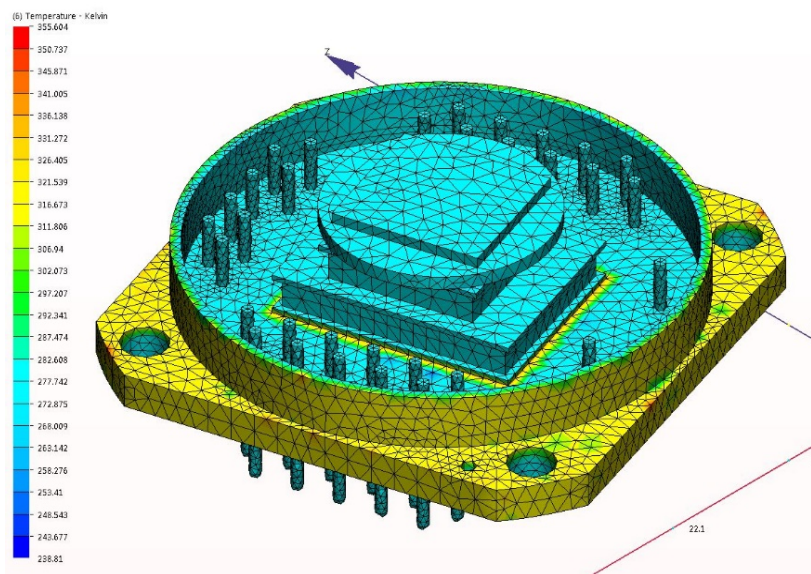


Рис. 4. Распределение температур внутри прибора.

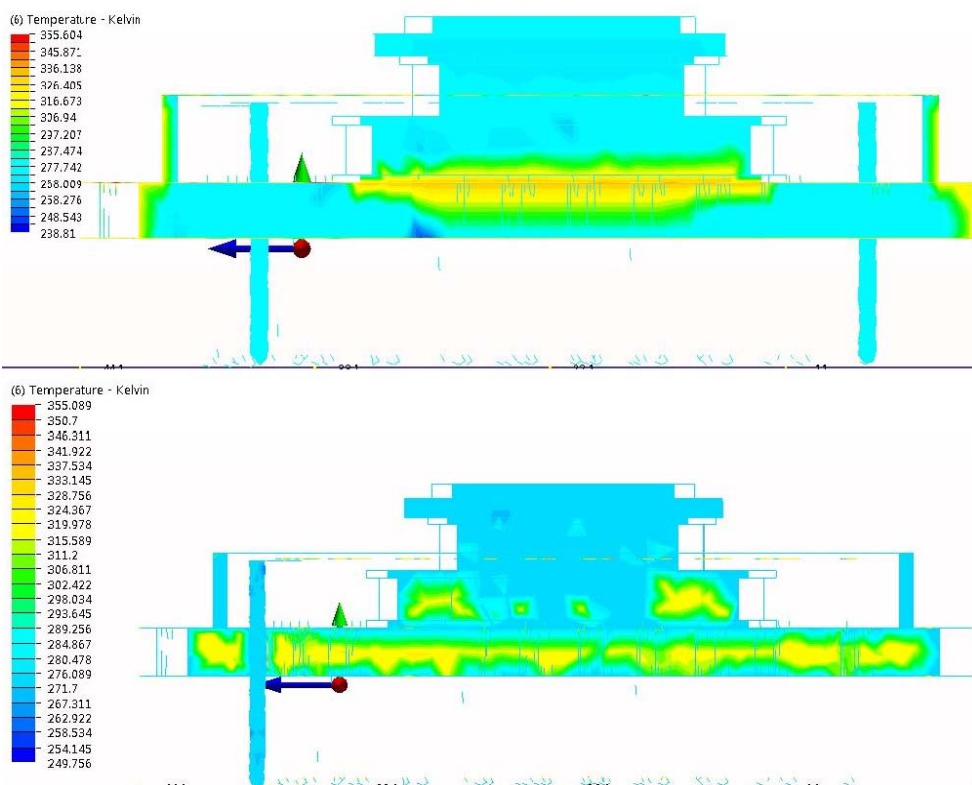


Рис. 5. Распределение температуры по сечению прибора.

Из рис. 5 видно, что фоточувствительная сборка охлаждена до нужных температур. Выделяемое горячей поверхностью ТЭО тепло передается на нижнюю часть коварового корпуса, что позволяет отвести его с помощью устанавливаемого внешнего теплоотводящего устройства.

Обобщая результаты моделирования, можно сказать, что выполняются все условия для корректной работы прибора, ТЭО эффективно справляется со своей задачей, и тепловое излучение не влияет значительно на фоточувствительность прибора.

### Заключение

Разработанная с помощью программного комплекса Autodesk CFD модель теплопритоков ФЭМ позволила оценить корректность его конструкции. Результаты исследований показали, что опциональным является возможность использования менее мощного ТЭО для снижения теплопередачи на корпус и, как следствие, уменьшения габарита теплоотводящего устройства.

Расчет узловых температур предоставляет возможность вычисления напряжений и количест-

во выделяемого тепла. Алгоритм расчета является перспективным для вычисления критических значений температур и напряжений для выходных контактов и проводов.

Использование подобного программного обеспечения позволяет заранее выбрать наиболее подходящую конструкцию прибора без затрат на изготовление нескольких тестовых образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.

2. Захаров А. Л., Асвадунова Е. И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов. – Москва, «Радио и связь», 1983.

3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М. Мир, 1979.

4. Серебров А. П., Лямкин В. А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 20. С. 96.

5. Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 45.

6. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 2. № 3. С. 344.

7. Кутуков А. С. // CADmaster. 2011. № 5. С. 76.

8. Лепестов А. Е. // CADmaster. 2012. № 2. С. 36.

9. Лепестов А. Е. // CADmaster. 2013. № 6. С. 70.

10. Буддыгин А. Н., Лепестов А. Е. // CADmaster. 2012. № 5. С. 46.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp,  
85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

## Calculation of a heat leakage at the nodes of matrix photoelectric modules for the infrared spectrum

*R. K. Belokovalenko and M. V. Bannikov*

Orion R&P Association  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*Received December 15, 2016*

***The analysis and calculation of a heat leakage at the nodes of a matrix photoelectric module by means of the Autodesk CFD program complex were done for the first time. Using the Autodesk Inventor software a three-dimensional model of the device was created. On this basis, the model of a heat distribution inside the matrix of the photoelectric module was built. Based on the data, the FEM design had been analysed in terms of the heat distribution and heat dissipation. The conclusion was made from the calculation results about working efficiency of the Thermoelectric Cooler (TEC) and its contribution to stray radiation.***

*Keywords:* matrix photoelectric modules, heat transfer, finite elements method.

#### REFERENCES

1. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, Prikl. Fiz. No. 2, 47 (2011).
2. A. L. Zaharov and E. I. Asvadurova, *Calculation of thermal parameters of semiconductor devices*. (Radio and Svyaz', Moscow, 1983) [in Russian].
3. L. Segerlind, *Application of the finite elements method*. (Mir, Moscow, 1979) [in Russian].
4. A. P. Serebrov and V. A. Liamkin, Technical Physics Letters **41** (20), 96 (2015).
5. K. O. Boltar and N. I. Yakovleva, Prikl. Fiz. No. 2, 45 (1999).
6. K. O. Boltar and I. D. Burlakov, Usp. Prikl. Fiz. **1**, 344 (2013).
7. A. S. Kutukov, CADmaster, No. 5, 76 (2011).
8. A. E. Lepestov, CADmaster, No. 2, 36 (2012).
9. A. E. Lepestov, CADmaster, No. 6, 70 (2013).
10. A. N. Buldygin and A. E. Lepestov, CADmaster, No. 5, 46 (2012).