

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-05

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНТАКТА К ОСНОВАНИЮ КОРПУСА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА****А. Р. Шахмаева<sup>1,a</sup>, С. У. Увайсов<sup>2,b</sup>, Э. Казалиева<sup>3,c</sup>**<sup>1</sup> Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Российская Федерация<sup>2</sup> МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация<sup>3</sup> Институт физики им. Амирханова ДФИЦ РАН, г. Махачкала, Российская Федерация<sup>a</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2372-9043>, ✉ [ifpk12@mail.ru](mailto:ifpk12@mail.ru)<sup>b</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1943-6819>, [uvajsov@mirea.ru](mailto:uvajsov@mirea.ru)<sup>c</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6866-5357>, [kazanova.em@mail.ru](mailto:kazanova.em@mail.ru)

*Аннотация:* проведено математическое моделирование теплофизических процессов при сборке мощного биполярного транзистора в корпус прибора. Рассмотрена структура транзистора и характеристики ее элементов. Определено температурное поле транзистора. Для математического моделирования теплофизических процессов представлена система дифференциальных уравнений, описывающая температурное поле транзистора с начальными и граничными условиями. Решение системы дифференциальных уравнений получено численным методом конечных элементов, реализованным в пакете прикладных программ Elcut. Методика численного расчета температурного поля представлена решением дифференциальных уравнений частным производным, а также интегральных уравнений. В работе проведен численный эксперимент по модели мощного биполярного транзистора с учетом теплофизических параметров его областей. Для количественного анализа теплофизических процессов в структуре транзистора получены одномерные графики изменения температуры в областях биполярного транзистора. Результаты расчетов представлены в виде двумерных температурных полей в поперечном сечении при изменении токов питания от 3 до 9 А для предлагаемого слоя металлизации обратной стороны структуры транзистора в виде композиции из металлов хром–никель–олово–серебро и для слоя хром–никель, применяемого по базовой технологии при изготовлении исследуемого транзистора. Представлены графики изменения температуры вдоль оси слоя металлизации для вариантов напыления хром–никель–олово–серебро и хром–никель при различных значениях токов питания. Расчет теплового сопротивления показал меньшие значения для металлизации композиции хром–никель–олово–серебро в сравнении с металлизацией хром–никель по базовой технологии.

*Ключевые слова:* мощный транзистор, кристалл, корпус, температура, припой, металлизация, контакт.

*Для цитирования:* Шахмаева А. Р., Увайсов С. У., Казалиева Э. Математическое моделирование теплофизических процессов при формировании контакта к основанию корпуса полупроводникового прибора. *Успехи кибернетики*. 2024;5(3):42–49. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-05.

*Поступила в редакцию:* 02.08.2024.

*В окончательном варианте:* 03.09.2024.

**SIMULATION OF THERMOPHYSICAL PROCESSES DURING THE MANUFACTURING OF A SEMICONDUCTOR DEVICE HOUSING CONTACT****A. R. Shakhmaeva<sup>1,a</sup>, S. U. Uvaysov<sup>2,b</sup>, E. Kazalieva<sup>3,c</sup>**<sup>1</sup> Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russian Federation<sup>2</sup> MIREA — Russian University of Technology, Moscow, Russian Federation<sup>3</sup> Amirkhanov Institute of Physics, DFRC RAS, Makhachkala, Russian Federation<sup>a</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2372-9043>, ✉ [ifpk12@mail.ru](mailto:ifpk12@mail.ru)<sup>b</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1943-6819>, [uvajsov@mirea.ru](mailto:uvajsov@mirea.ru)<sup>c</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6866-5357>, [kazanova.em@mail.ru](mailto:kazanova.em@mail.ru)

*Abstract:* this paper presents a simulation of thermophysical processes during the assembly of a high-power bipolar transistor into its housing. The structure of the transistor and the characteristics of its structural elements are examined, and the temperature field of the transistor is determined. A system

of differential equations describing the temperature field, along with initial and boundary conditions, is formulated for the simulation of these thermophysical processes.

The solution to this system of differential equations is obtained using the numerical finite element method implemented in the Elcut application software package. The numerical calculation of the temperature field involves solving partial differential equations as well as integral equations. A numerical experiment based on a model of a high-power bipolar transistor is conducted, taking into account the thermophysical parameters of its regions.

For a quantitative analysis of the thermophysical processes in the transistor structure, one-dimensional graphs illustrating temperature variations in the regions of the bipolar transistor are presented. The results are displayed as two-dimensional temperature fields in cross-section, with supply currents varying from 3 to 9 A, for the proposed metallization layer on the reverse side of the transistor structure, which consists of a chromium-nickel-tin-silver composition, as well as for the chromium-nickel layer used in the conventional manufacturing process of the studied transistor. Graphs depicting temperature changes along the axis of the metallization layer for both the chromium-nickel-tin-silver and chromium-nickel deposition methods at different supply currents are included. The simulation of thermal resistance demonstrates lower values for the chromium-nickel-tin-silver metallization compared to the conventional chromium-nickel approach.

*Keywords:* high-power transistor, crystal, housing, temperature, solder, metallization, contact.

*Cite this article:* Shakhmaeva A. R., Uvaysov S. U., Kazalieva E. Simulation of Thermophysical Processes During the Manufacturing of a Semiconductor Device Housing Contact. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(3):42–49. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-3-05.

*Original article submitted:* 02.08.2024.

*Revision submitted:* 03.09.2024.

## Введение

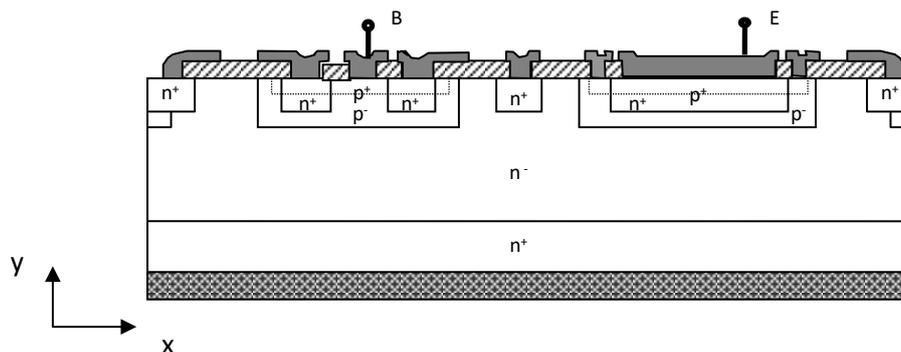
Современная электроника сталкивается с задачей создания оптимальных тепловых условий для функционирования полупроводниковых приборов, поскольку с ростом выделяемой энергии этот аспект становится особенно актуальным с точки зрения безотказности в работе. Увеличение энерговыделения полупроводниковых приборов при работе в условиях высоких температур и других факторов негативно сказывается на параметрах надежности прибора [1–4].

Современные полупроводниковые приборы играют ключевую роль в генерации, усилении и преобразовании сигналов, особенно в мощных устройствах. Их используют в усилителях и источниках питания, где к ним предъявляются строгие требования по максимально допустимому напряжению, токам и мощности.

Если предельные значения тока и напряжения ограничены физическими свойствами кристалла, то максимальное выделение мощности зависит от температур, возникающих в кристалле и на границе «кристалл–корпус»

Задачей исследования является математическое моделирование теплофизических процессов при формировании контакта к основанию корпуса полупроводникового прибора с целью уменьшения теплового сопротивления.

Для исследования выбран мощный полупроводниковый прибор — биполярный мощный транзистор КТ829, структура которого представлена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Структура кристалла (боковой разрез) биполярного мощного транзистора КТ829

Для его производства используются кремниевые пластины  $\rho$ - и  $n$ -типа, полученные эпитаксиальным способом, а металлизация обратной стороны структуры для формирования контакта к коллекторной области реализована на основе слоя из композиции металлов — хром–никель.

Нестационарное температурное поле биполярного транзистора в процессе его работы определяется системой дифференциальных уравнений, имеющей следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & \lambda_{n^+} \left( \frac{\partial^2 T_{n^+}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{n^+}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{n^+}}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{Дж.}n^+} = \rho_{n^+} C_{n^+} \frac{\partial T_{n^+}}{\partial \tau}, \\
 & \lambda_{n^-} \left( \frac{\partial^2 T_{n^-}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{n^-}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{n^-}}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{Дж.}n^-} = \rho_{n^-} C_{n^-} \frac{\partial T_{n^-}}{\partial \tau}, \\
 & \lambda_{\rho^+} \left( \frac{\partial^2 T_{\rho^+}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\rho^+}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\rho^+}}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{Дж.}\rho^+} = \rho_{\rho^+} C_{\rho^+} \frac{\partial T_{\rho^+}}{\partial \tau}, \\
 & \lambda_{\rho^-} \left( \frac{\partial^2 T_{\rho^-}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\rho^-}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\rho^-}}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{Дж.}\rho^-} = \rho_{\rho^-} C_{\rho^-} \frac{\partial T_{\rho^-}}{\partial \tau}, \\
 & \lambda_{m1} \left( \frac{\partial^2 T_{m1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{m1}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{m1}}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{Дж.}m1} = \rho_{m1} C_{m1} \frac{\partial T_{m1}}{\partial \tau}, \\
 & \lambda_{m2} \left( \frac{\partial^2 T_{m2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{m2}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{m2}}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{Дж.}m2} = \rho_{m2} C_{m2} \frac{\partial T_{m2}}{\partial \tau}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Начальные условия:

$$T_{n^+} = T_{n^-} = T_{\rho^+} = T_{\rho^-} = T_{m1} = T_{m2} = T_{\text{ср}} \text{ при } \tau = 0.$$

Граничные условия определяют наличие конвективного теплообмена по внешней поверхности биполярного транзистора, помимо его нижней поверхности, с окружающей средой в соответствии с законом Ньютона–Рихмана и равенство тепловых потоков на границах соприкосновения областей транзистора ( $n^+$ ,  $n^-$ ,  $\rho^+$ ,  $\rho^-$ , металлизации) в соответствии с рисунком 1. Нижняя поверхность биполярного транзистора контактирует с посадочной площадкой выводной рамки корпуса через припой ПОС 5 (5% олово, 95% свинец).

Температурное поле в слое припоя и выводной рамки определяется на основе дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 & \lambda_{\text{пр}} \left( \frac{\partial^2 T_{\text{пр}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{пр}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{пр}}}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{Дж.пр}} = \rho_{\text{пр}} C_{\text{пр}} \frac{\partial T_{\text{пр}}}{\partial \tau}, \\
 & \lambda_{\text{в.р}} \left( \frac{\partial^2 T_{\text{в.р}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{в.р}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{в.р}}}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{Дж.в.р}} = \rho_{\text{в.р}} C_{\text{в.р}} \frac{\partial T_{\text{в.р}}}{\partial \tau}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Начальные условия аналогичны (1), т. е.:

$$T_{\text{пр}} = T_{\text{в.р}} = T_{\text{ср}} \text{ при } \tau = 0,$$

а граничные условия определяют конвективный теплообмен по всей внешней поверхности структуры и равенство тепловых потоков на границе раздела областей припоя, металлизации и выводной рамки корпуса биполярного транзистора.

В соотношениях (1)–(2) обозначено:  $T$  — температура;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $C$  — теплоемкость;  $\rho$  — плотность;  $x, y, z$  — координаты;  $\tau$  — время;  $Q_{\text{Дж}}$  — количество теплоты, выделяемое в единице объема в единицу времени в областях биполярного транзистора за счет теплоты Джоуля; индексы  $n^+$ ,  $n^-$ ,  $\rho^+$ ,  $\rho^-$ ,  $m1$ ,  $m2$ ,  $\text{пр}$ ,  $\text{в.р}$  — определяют область биполярного транзистора из полупроводников  $n$ - и  $p$ - типов, металлизации, припоя и выводной рамки;  $T_{\text{ср}}$  — температура окружающей среды.

При расчете температурного поля силового биполярного транзистора по вышеприведенным соотношениям учитывается следующее:

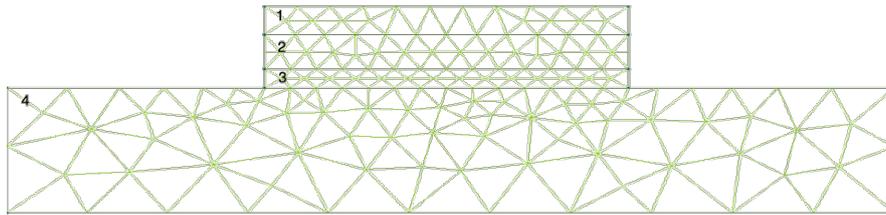
- каждая из областей транзистора характеризуется постоянными значениями коэффициентов теплопроводности, теплоемкостью и плотностью, не зависящими от температуры;
- окружающая среда имеет одинаковую температуру во всех точках, а процесс теплообмена поверхности транзистора с ней осуществляется при постоянном коэффициенте теплоотдачи;
- все области биполярного транзистора имеют четкую границу раздела;
- удельное электрическое сопротивление областей биполярного транзистора определяется по формуле  $\rho = \frac{2m\upsilon_T}{e^2 k_e \ell}$ , где  $m$  — масса носителя заряда (электрона),  $\upsilon_T$  — средняя скорость теплового движения носителя заряда в материале,  $e$  — заряд электрона,  $k_e$  — концентрация носителей заряда в материале,  $\ell$  — длина свободного пробега носителя заряда в материале, при этом теплота Джоуля вычисляется в соответствии с законом Джоуля–Ленца;
- влияние на теплообмен соседних к биполярному транзистору компонентов, входящих в состав электронной аппаратуры, в которой он используется, не учитывается.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) с заданными начальными и граничными условиями было получено при помощи численного метода конечных элементов [5–10], внедренного в программный пакет Elcut (разработчик — компания ООО «Тор», г. Санкт-Петербург), который выделяется высокой производительностью и быстротой обработки данных для подобных задач.

### Результаты численного эксперимента

Численный эксперимент проводился по модели транзистора, изображенной на рисунке 2.

В ней обозначены 1 — область полупроводника, 2 — металлизация, 3 — припой, 4 — выводная рамка корпуса. Для упрощения расчетов и представления вычислительного материала область полупроводника представлена в виде объема, характеризующегося усредненными значениями плотности, электро- и теплофизических параметров.



**Рис. 2.** Модель мощного биполярного транзистора

В рассматриваемой модели длина выводной рамки составляет 10 мм, полупроводника, металлизации и припоя — 4,1 мм, толщина выводной рамки — 2 мм, припоя — 0,3 мм, металлизации — 0,534 мм, полупроводника — 0,46 мм. Ширина всех структурных элементов равна 4,1 мм. Теплофизические характеристики материалов, используемых для формирования биполярного транзистора как в базовой технологии, так и в исследуемой в данной работе, представлены в таблице.

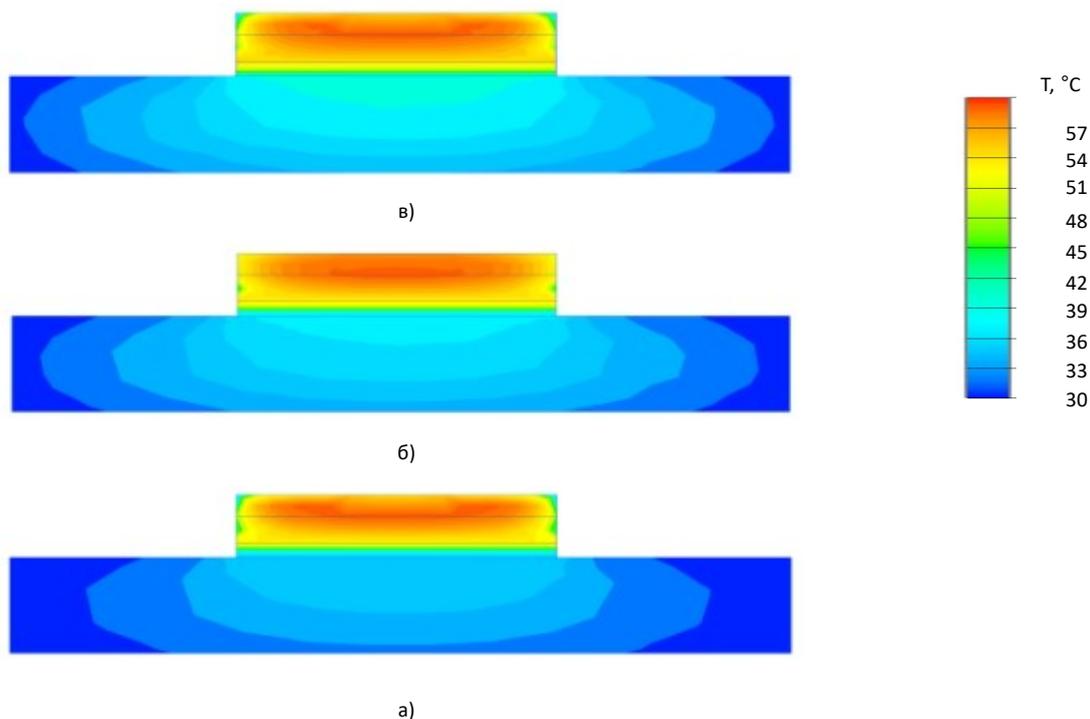
Температура окружающей среды принята равной 20°С, а коэффициент теплоотдачи — 5 Вт/(К·м<sup>2</sup>).

Таблица

*Теплофизические параметры областей биполярного транзистора*

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(К·моль)	Плотность, г/см <sup>3</sup>
кремний	159	712	2,33
хром	67,1	443	7,19
никель	92,5	440	8,902
олово	65,8	230	7,31
серебро	423	234	10,5
припой	35	130	11,3
медь	407	420	8,5

Результаты произведенных расчетов представлены на рисунках 3–8. На рисунках 3–4 показано двумерное температурное поле биполярного транзистора в поперечном сечении для токов питания 3 А, 6 А и 9 А соответственно для исследуемого в работе транзистора со слоем металлизации в виде структуры хром–никель–олово–серебро (рис. 3) и для слоя хром–никель (рис. 4) в стационарном режиме. Рисунки показывают увеличение температуры от поверхностей к центру, которое обусловливается температурным обменом с окружающим пространством. При этом самая высокая температура на области кристалла, имеющей наибольшее электрическое сопротивление, а минимальная — выводной рамки, изготовленной из меди, имеющей низкую величину электрического сопротивления и относительно большие по сравнению с остальными составляющими биполярного транзистора областями габаритные размеры. Температура в слоях металлизации и припоя равномерно уменьшается в направлении выводной рамки.

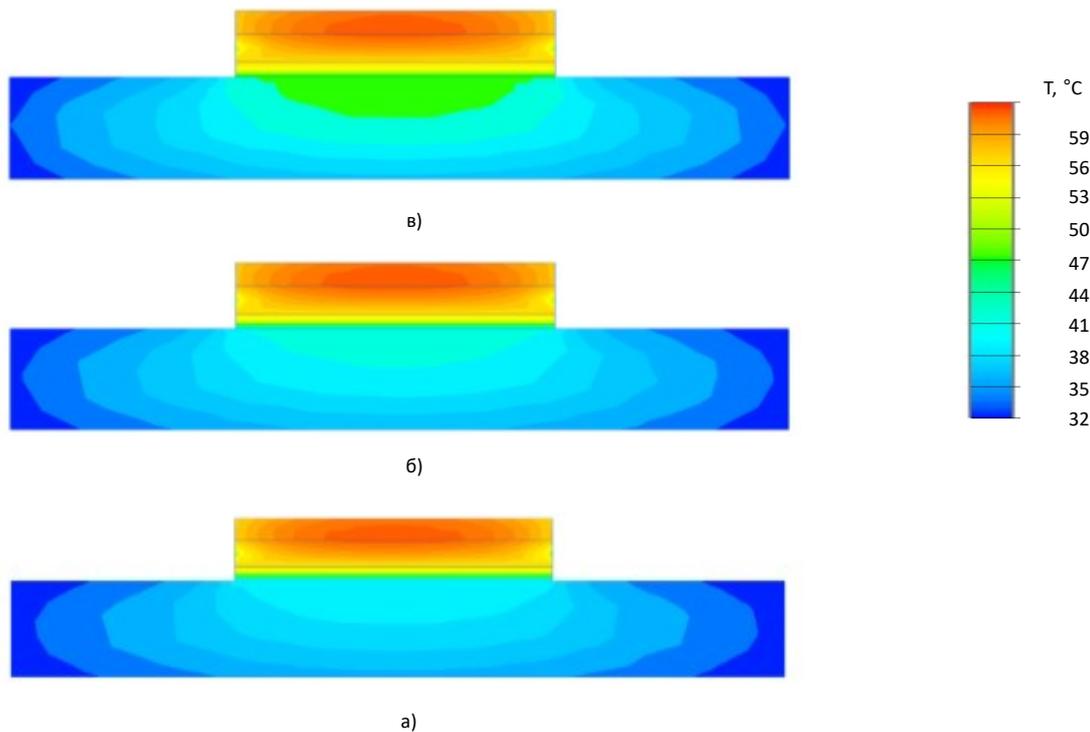


**Рис. 3.** Двумерное температурное поле биполярного транзистора в поперечном сечении для различных токов питания при использовании слоя металлизации в виде структуры хром–никель–олово–серебро: а — 3 А, б — 6 А, в — 9 А

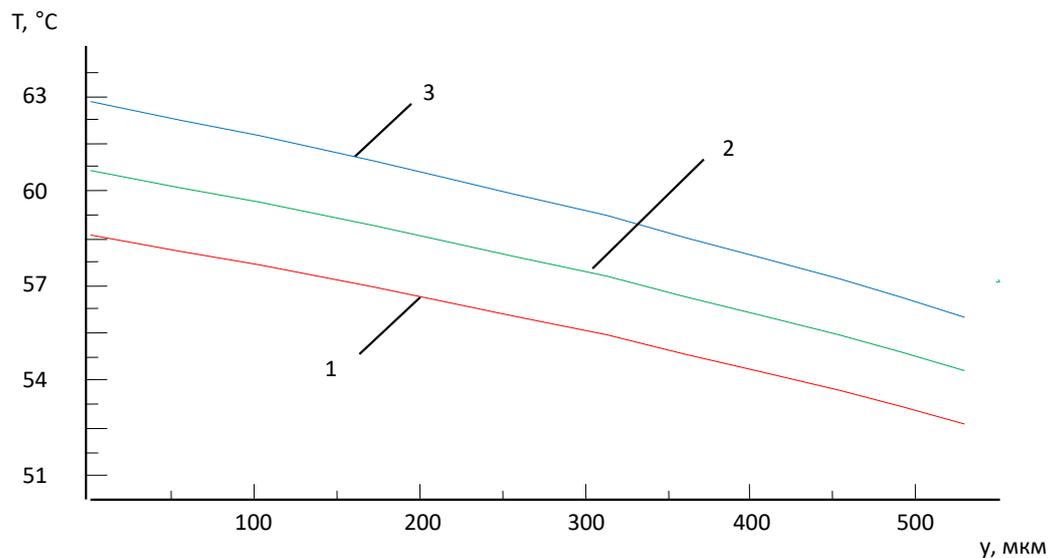
Согласно приведенным рисункам 3–4 температурных полей, температура во всех точках биполярного транзистора увеличивается с ростом силы тока питания. Данное обстоятельство очевидно и связано с ростом значения джоулевой теплоты, выделяемой в единице его объема, прямо пропорциональной квадрату силы тока питания.

Для количественного анализа теплофизических процессов в структуре биполярного транзистора получены одномерные графики изменения температуры в областях транзистора. Особенно важны зависимости изменения температуры по толщине слоя металлизации для различных вариантов его исполнения. На рисунках 5–6 представлены графики изменения температуры вдоль центральной оси слоя металлизации для исследуемых в работе вариантов металлизации (хром–никель–олово–серебро и хром–никель). Зависимости получены при силе тока питания мощного биполярного транзистора, равной 3 А, 6 А и 9 А.

Согласно представленным графикам, максимальный перепад температур по толщине слоя металлизации для слоев хром–никель и хром–никель–олово–серебро в диапазоне токов от 3 А до 9 А равняется соответственно 2,7 °С и 2,1 °С. Это связано, прежде всего, с различием в коэффициенте теплопроводности материалов, из которых сформированы слои металлизации, максимальный из которых приходится на структуру хром–никель–олово–серебро, а также значениями теплоемкости, плотности и удельного электрического сопротивления. Последние три показателя в совокупности также являются



**Рис. 4.** Двумерное температурное поле биполярного транзистора в поперечном сечении для различных токов питания при использовании слоя металлизации в виде структуры хром–никель: а — 3 А, б — 6 А, в — 9 А

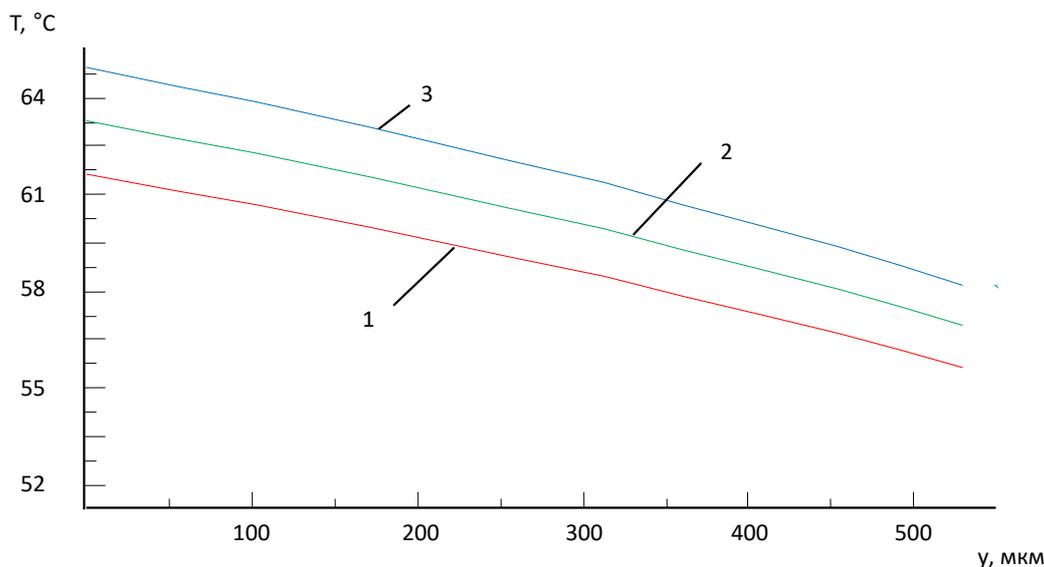


**Рис. 5.** Изменения температуры по толщине слоя металлизации при использовании структуры хром–никель для различных токов питания: 1 — 3 А, 2 — 6 А, 3 — 9 А

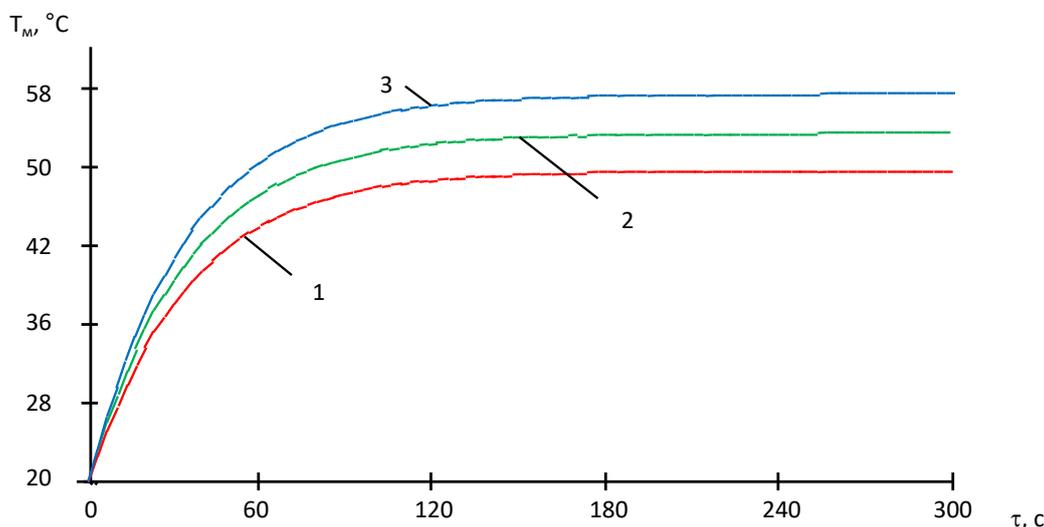
более предпочтительными с точки зрения обеспечения наименьшего теплового сопротивления между кристаллом полупроводника и выводной рамкой с учетом наличия слоя припоя для слоя металлизации, изготовленного из структуры хром–никель–олово–серебро.

В общем по результатам расчетов тепловое сопротивление мощного биполярного транзистора рассматриваемого типа в диапазоне токов питания от 3 А до 9 А для слоя металлизации, изготовленного из структуры хром–никель–олово–серебро, составило  $0,64$  °C/Вт, для слоя хром–никель —  $0,87$  °C/Вт.

Для анализа динамики изменения температуры биполярного мощного транзистора во времени получены графики изменения температуры его различных точек во времени при различных величинах



**Рис. 6.** Изменения температуры по толщине слоя металлизации при использовании структуры хром–никель–олово–серебро для различных токов питания: 1 — 3 А, 2 — 6 А, 3 — 9 А



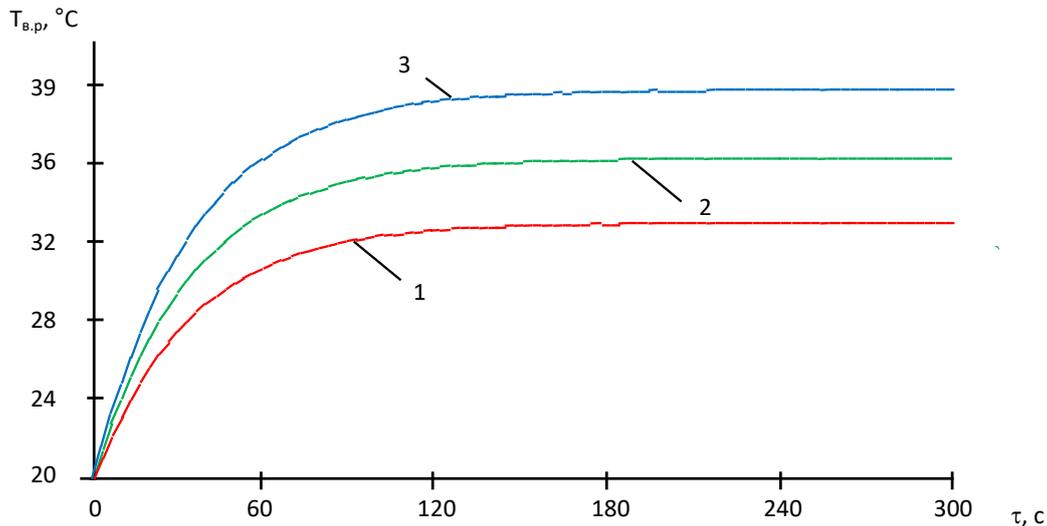
**Рис. 7.** Изменения температуры в центре области металлизации (Cr-Ni-Sn-Ag) во времени для различных токов питания: 1 — 3 А, 2 — 6 А, 3 — 9 А

тока питания.

На рисунках 7–8 изображены зависимости изменения температуры в центре полупроводникового кристалла со слоем металлизации, выполненным на основе структуры хром–никель–олово–серебро и выводной рамки для токов питания 3 А, 6 А и 9 А.

### Заключение

Согласно представленным зависимостям, при выходе температурного режима биполярного транзистора в стационарный режим максимальная температура в области металлизации составляет  $57,8 ^\circ\text{C}$ , выводной рамки —  $39 ^\circ\text{C}$ . Продолжительность стабилизации температуры на рассматриваемых областях примерно одинакова и составляет порядка 130 с. При этом увеличение тока питания на 3 А повышает температуру в каждой рассматриваемой области примерно на  $3 ^\circ\text{C}$ . Данное обстоятельство объясняется относительно близкими теплофизическими параметрами всех областей биполярного транзистора и принятыми при математическом моделировании ограничениями. В результате полученных данных металлизация обратной стороны структуры транзистора слоем хром–никель–олово–серебро показало улучшенные тепловые параметры прибора.



**Рис. 8.** Изменения температуры в центре выводной рамки во времени для различных токов питания: 1 – 3 А, 2 – 6 А, 3 – 9 А

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нечаев А. М., Синкевич В. Ф., Козлов Н. А. Расчет стационарных тепловых полей в структурах мощных транзисторов. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. 1989;1:19–24.
2. Шахмаева А. Р., Казалиева Э. Способ присоединения кристаллов транзисторов к основанию выводной рамки в процессе сборки полупроводникового прибора. *Датчики и системы*. 2024;1:32–37. DOI: 10.25728/datsys.2024.1.7.
3. Shakhmayeva A. R., Kazalieva E. Technology of Metallization of the Structure of a Semiconductor Device by a Composition of Nanosized Metal Layers. *Russian Microelectronics*. 2023;52:228–231. DOI: 10.1134/S1063739723600772.
4. Закс Д. И. *Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем*. М.: Радио и связь; 1983. 128 с.
5. Жуков Н. П., Майникова Н. Ф., Никулин С. С. и др. *Решение задач теплопроводности методом конечных элементов*. Томск: Изд-во ТГТУ; 2014. 80 с.
6. Наседкин А. В., Наседкина А. А. *Моделирование связанных задач: математические постановки и конечно-элементные технологии*. Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета; 2019. 176 с.
7. Леонтьев А. И. *Теория тепломассообмена*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2018. 464 с.
8. Румянцев А. В. *Метод конечных элементов в задачах теплопроводности*. Калининград: КГУ; 2010. 95 с.
9. Румшицкий Л. З. *Математическая обработка результатов эксперимента*. М.: Наука; 1971. 192 с.
10. Шахмаева А. Р., Казалиева Э. Разработка технологии посадки кристалла мощного транзистора на основание корпуса с улучшенными характеристиками. *Научно-технические технологии*. 2023;24(8):5–11. DOI: 10.18127/j19998465-202308-01.