

**ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**

**СЕРИЯ 2**

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ**

Научно-технический журнал

**Выпуск 3 (250) 2018**

---

**ELECTRONIC ENGINEERING**

**SERIES 2**

**SEMICONDUCTOR DEVICES**

Scientific & technical journal

**Issue 3 (250) 2018**

*Москва, 2018*

- O.M., Orekhov A.S. Vasilyev A.L. Presnyakov M.Yu., Trunkin I.N. High-resolution X-ray diffractometry and transmission electron microscopy methods for studying the structure of multi-layer transistor nano-heterostructures. «Surface. X-ray, synchrotron and neutron research». 2016. No.5. pp.32-47.
6. Andrews A.M., Speck J.S., Romanov A.E., Bobeth M., Pompe W. Modeling cross-hatch surface morphology in growing mismatched layers // J. Appl. Phys. 2002. V. 91, N. 4. P. 1933-1943.
  7. Tersoff J. Dislocations in strain relief compositionally graded layers // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62, N 7. P. 693-695.
  8. Dunstan D.J., Kidd P., Howard L.K., Dixon R.H. Plastic relaxation of InGaAs grown on GaAs // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59, N 26. P. 3390-3392.
  9. Dunstan D.J., Kidd P., Beanland R., Sacedon A., Calleja E., Gonzalez L., Gonzalez Y., Pacheco F.J. Predictability of plastic relaxation in metamorphic epitaxy // Materials science and technology. 1996. V. 12. P. 181-186.
  10. Matthews J.W., Blakeslee A.E. Defects in epitaxial multilayers. I. Misfit dislocations // J. Cryst. Growth. 1974. V. 27. P. 118-125.
  11. Dunstan D.J., Young S., Dixon R.H. Geometrical theory of critical thickness and relaxation in strained-layer growth // J. Appl. Phys. 1991. V. 70, N 6. P. 3038-3045.
  12. Aleshin A.N., Bugaev A.S., Ermakova M.A., Ruban O.A. Research of MBE-grown MHEMT  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  heterostructure on GaAs substrate, using reciprocal space mapping. «Semiconductor Physics and Engineering». 2015. T.49. Issue 8. pp.1065-1070.
  13. A.N. Aleshin, A.S. Bugaev, M.A. Ermakova, O.A. Ruban. Structural analysis of MHEMT-heterostructure elements, with quantum well  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ , grown by molecular-beam epitaxy on GaAs substrate, based on reciprocal space mapping. «Crystallography». T.61. pp.300-305 (2016).
  14. Ayers J.E., Ghandhi S.K., Schowalter L.J. Crystallographic tilting of heteroepitaxial layers // J. Cryst. Growth. 1991. V. 113. P. 430-440.
  15. Abrosimova G.E. Evolution of amorphous alloys structure. «Successes of Physical Sciences». 2011. T.181. No.12. pp.1265-1281.
  16. Chauveau J.-M., Androussi Y., Lefebvre A., Di Persio J., Cordier Y. Indium content measurements in metamorphic high electron mobility transistor structures by combination of X-ray reciprocal space mapping and transmission electron microscopy // J. Appl. Phys., 2003. V. 93. № 7. P. 4219 – 4225.
  17. Khapachev Yu.P., Dyshenkov A.A., Kiselev D.S. The theory of X-ray diffraction analysis of elastic-strain states in epitaxial films // Phys. Stat. Sol. B. 1984. V. 126. P. 37-42.
  18. Straumanis M.E., Kim C.D. Phase extent of gallium arsenide determined by the lattice constant and density method // Acta Cryst. 1965. V. 19. P. 256-259.
  19. Tu K.N., Mayer J.W., Feldman L.C. Electronic thin film science. For electrical engineers and materials scientists, New York, Macmillan Publishing Company, 1992, 428 p.
  20. Cordier Y., Ferre D. InAlAs buffer layers grown lattice mismatched on GaAs with inverse steps // J. Cryst. Growth. 1999. V. 201/202. P. 263-266.
  21. Dunstan D.J. Mathematical model for strain relaxation in multilayer metamorphic epitaxial structures // Phil. Mag. A. 1996. V. 73, N 5. P. 1323-1332.
  22. Gonzalez D., Araujo D., Aragon G., Garcia R. A work hardening based model of the strain relief in multilayer graded buffer structures // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71, N 21. P. 3099-3101.

УДК 621.382.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ПТБШ НА ЕГО ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ

И.М. Аболдуев, А.А. Дорофеев, К.А. Иванов, В.М. Миннебаев,  
 Ан.В. Редька, А.В. Царев

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27

В статье представлены результаты исследования влияния геометрии конструкции активной области кристалла мощного СВЧ транзистора на его тепловой режим работы. Рассмотрены пять вариантов геометрии активной области ПТБШ. С помощью решения математической задачи получены зависимости теплового сопротивления канал–основание корпуса от уровня мощности тепловыделения.

**Ключевые слова:** полевой транзистор с барьером Шоттки (ПТБШ), гетероэпитаксиальная структура, затвор, сток, канал, тепловой расчёт, математическая модель, тепловое сопротивление

**Сведения об авторах:** Аболдуев Игорь Михайлович, к.т.н., [abolduev\\_im@pulsampp.ru](mailto:abolduev_im@pulsampp.ru); Дорофеев Алексей Анатольевич, [dorofeev@pulsampp.ru](mailto:dorofeev@pulsampp.ru); Иванов Кирилл Андреевич, [tsarev@pulsampp.ru](mailto:tsarev@pulsampp.ru); Миннебаев Вадим Минхатович, к.т.н., [minnebaev\\_vm@pulsampp.ru](mailto:minnebaev_vm@pulsampp.ru); Редька Андрей Владимирович, [redka\\_anv@pulsampp.ru](mailto:redka_anv@pulsampp.ru); Царев Александр Владимирович, [tsarev@pulsampp.ru](mailto:tsarev@pulsampp.ru)

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE SCHOTTKY FET ACTIVE REGION DESIGN ON ITS THERMAL BEHAVIOR

I.M. Abolduev, A.A. Dorofeev, K.A. Ivanov, V.M. Minnebaev,  
 An.V. Redka, A.V. Tsarev

S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okružhnoy pr., 27

The article presents research results of the effect of a microwave power transistor die active region design on its thermal behavior. Five variants of the Schottky FET active region layout were considered. By solving the mathematical problem, was obtained the behavior of the channel-base thermal resistance depending on the heat generation level.

**Keywords:** Schottky field-effect transistor (Schottky FET), heteroepitaxial structure, gate, drain, channel, thermal model, mathematical model, thermal resistance

**Authors:** Abolduev Igor Michailovich, Ph.D., [abolduev\\_im@pulsampp.ru](mailto:abolduev_im@pulsampp.ru); Dorofeev Aleksey Anatolyevich, [dorofeev@pulsampp.ru](mailto:dorofeev@pulsampp.ru); Ivanov Kirill Andreevich, [tsarev@pulsampp.ru](mailto:tsarev@pulsampp.ru); Minnebaev Vadim Minkhatovich, Candidate of Engineering Sciences, [minnebaev\\_vm@pulsampp.ru](mailto:minnebaev_vm@pulsampp.ru); Redka Andrey Vladimirovich, [redka\\_anv@pulsampp.ru](mailto:redka_anv@pulsampp.ru); Tsarev Aleksandr Vladimirovich, [tsarev@pulsampp.ru](mailto:tsarev@pulsampp.ru)

### Введение

Потребность в выходных усилителях мощности с более высокими уровнями выходной СВЧ мощности привела к последовательным усовершенствованиям в области твердотельных технологий. Гетероэпитаксиальные структуры нитрида галлия, выращенные на карбид-кремниевых подложках (GaN-on-SiC), сегодня стали превосходными полупроводниковыми структурами, позволяющими обеспе-

чить серийное производство СВЧ транзисторов с высокой удельной мощностью, обычно превышающей 5 Вт/мм ширины затвора, развитой периферией затвора и рабочим напряжением «сток–исток» до 60 В. При этом GaN НЕМТ сравним с традиционным СВЧ транзистором на арсениде галлия (GaAs) с высокой подвижностью электронов (pHEMT) по коэффициенту усиления и КПД стока в непрерывном режиме и значительно превосходит его в импульсных приложениях.



Аппаратурное требование увеличения уровня выходной СВЧ мощности при меньших размерах изделий приводит к разработке усилителей мощности на основе AlGaIn/GaN/SiC гетероструктур. Однако при этом ввиду высокой удельной мощности транзистора остро встаёт задача обеспечения безопасного теплового режима эксплуатации, что, в свою очередь, приводит к необходимости проектирования теплоотводов как на уровне отдельного СВЧ транзистора, так и на уровне усилителя мощности в целом [1–4].

В статье приводится расчёт тепловых сопротивлений для пяти вариантов модельных топологий исполнения активной области полевого транзистора с барьером Шоттки (ПТБШ) и их сравнение, описываются постановка математической задачи теплового моделирования и алгоритмы, положенные в основу решения задачи.

#### Постановка математической задачи

Внешний вид тепловой модели GaN ПТБШ в корпусе представлен на рис. 1.

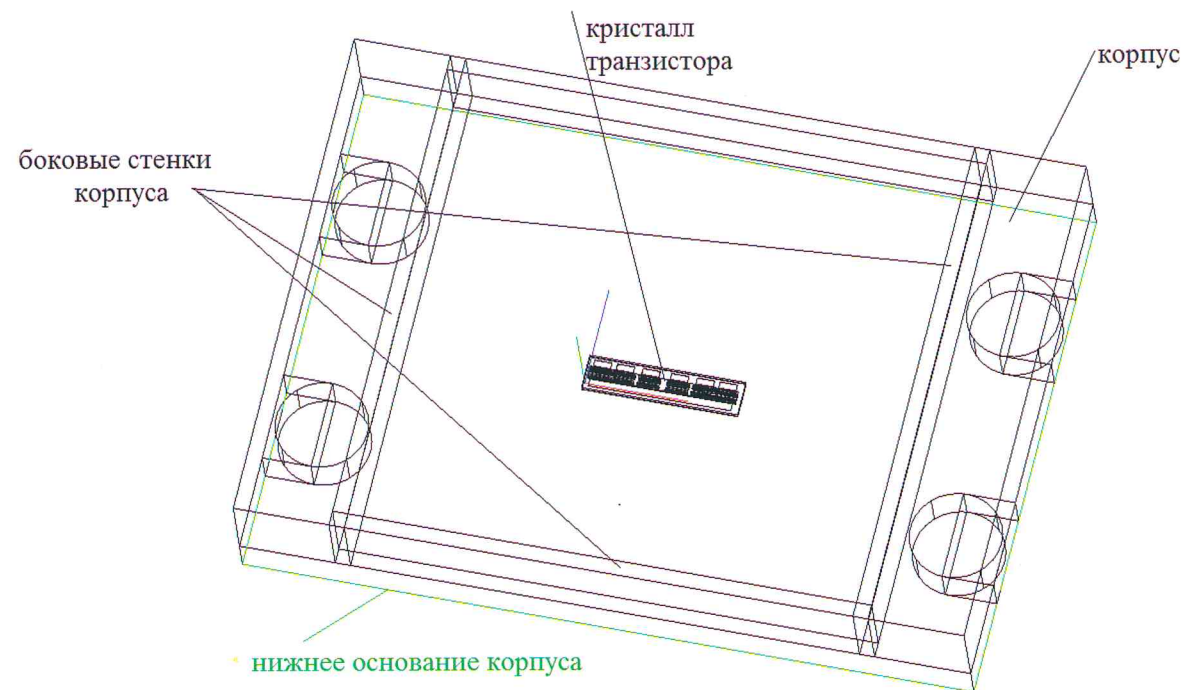


Рис. 1

#### Внешний вид тепловой модели

Задача описывается трёхмерным уравнением теплопроводности в твёрдом теле в стационарной постановке:

$$\nabla(\lambda(x, y, z, T) \cdot \nabla T) = s_c + s_p \cdot T, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, зависящая от пространственных координат и самого решения (температуры),  $T$  – поле температур ( $T = T(x, y, z)$ ),  $s$  – линейаризованный источниковый член ( $s_p \leq 0$ ),  $\nabla$  – оператор Гамильтона.

Граничные условия и правая часть уравнения (1):

1. на нижнем основании корпуса устанавливается условие Дирихле (задаётся температура)  $T = 50^\circ\text{C}$ ;

2. область тепловыделения представляет собой набор из 60 элементарных источников тепла каждый размерами  $vol = 4 \text{ мкм} \times 0.1 \text{ мкм} \times 448.5 \text{ мкм}$ . В объёме каждого источника тепла задаётся значение объёмной плотности тепловой мощности:

$$S_c = p/vol \text{ Вт/м}^3,$$

где  $p = P_{diss}/60 \text{ Вт}$  – мощность тепловыделения,  $vol$  – объём, занимаемый источником тепла,  $S_p \equiv 0$ ;

3. на остальных внешних границах расчётной области задаётся однородное условие Неймана по температуре (теплоизоляция):

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0,$$

где  $\partial$  – символ частной производной,  $n$  – внешняя нормаль к участку границы,  $T$  – температура.

На границе контакта двух тел (двух различных материалов) выполняется условие непрерывности температур и тепловых потоков:

$$T_1 = T_2, \quad (2)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial n}, \quad (2)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – теплопроводности слева и справа от границы раздела,  $T_1$  и  $T_2$  – температуры слева и справа от границы раздела,  $n$  – нормаль к границе раздела двух тел (материалов).

Подложка тепловой модели состоит из слоёв, представленных в табл. 1.

Таблица 1

#### Свойства используемой подложки

Материал	Толщина [мкм]	Теплопроводность <sup>1)</sup> [Вт/(м*К)]
GaN	3	130
SiC	100	370
Au	5	298
AuSn	25	57
МД40	1300	210

<sup>1)</sup> наименьшее для трёх осей значение (в случае ортотропности материала) при  $T = 300 \text{ K}$

В расчёте используются температурно-зависимые и пространственно-зависимые теплопроводности материалов на основе справочных данных [5].

#### Алгоритм решения задачи

Для решения задачи (1), (2) использу-

ется метод контрольного объёма (МКО) [5], преобразующий задачу теплопередачи из непрерывного представления в конечно-разностное. Расчётная сетка для рассматриваемой задачи представлена на рис. 2.

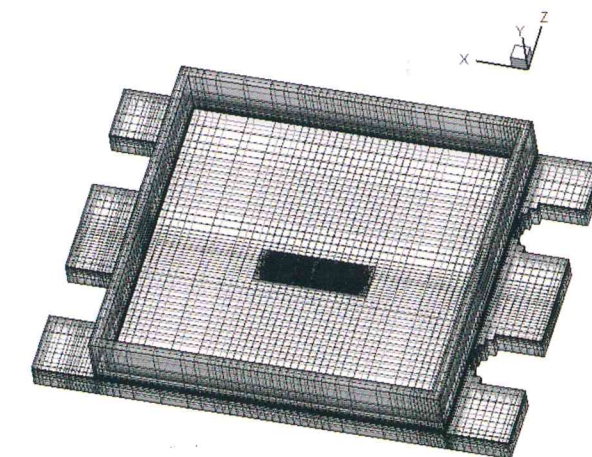


Рис. 2

#### Блочнo-структурированная расчётная сетка

МКО, предложенный С. Патанкармом и Б. Сполдингом в [6], подразумевает, что уравнение энергобаланса (1) выполняется не только для всей расчётной области

в целом, как в методе конечных разностей (МКР) и методе конечных элементов (МКЭ), а также и для каждой ячейки сетки. Задача нахождения поля температур на конечном



множестве точек сводится в этом случае к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Для решения СЛАУ  $Ax=f$  используется гиб-

кий вариант обобщённого метода минимальных невязок Ю. Садда и Мартина Г. Шульца 1986 г. [7] (рис. 3) с предобуславливанием алгебраическим многосеточным методом.

$$r_0 \leftarrow f - Au_0, \beta = \|r_0\|, q_0 \leftarrow r_0/\|r_0\|, \xi \leftarrow (1, 0, \dots, 0)^T$$

For  $n \in \{0, 1, \dots\}$  while  $\|r_n\| > \varepsilon\beta$

$$z_n \leftarrow B_n^{-1}q_n$$

$$\tilde{q}_{n+1} \leftarrow Az_n$$

For  $k \in [0, \dots, n]$

$$H_{k,n} \leftarrow (\tilde{q}_{n+1}, q_k)$$

$$\tilde{q}_{n+1} \leftarrow \tilde{q}_{n+1} - H_{k,n}q_k$$

EndFor

$$H_{n+1,n} \leftarrow \|\tilde{q}_{n+1}\|, q_{n+1} \leftarrow \tilde{q}_{n+1}/H_{n+1,n}$$

For  $k \in \{0, \dots, n-1\}$

$$\begin{bmatrix} H_{k,n} \\ H_{k+1,n} \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} c_k & s_k \\ -\bar{s}_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{k,n} \\ H_{k+1,n} \end{bmatrix}$$

EndFor

$$c_n \leftarrow |H_{n,n}|/\sqrt{|H_{n,n}|^2 + |H_{n+1,n}|^2}$$

$$\bar{s}_n \leftarrow c_n H_{n+1,n}/H_{n,n}$$

$$\begin{bmatrix} \xi_n \\ \xi_{n+1} \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} c_n & s_n \\ -\bar{s}_n & c_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_n \\ \xi_{n+1} \end{bmatrix}$$

$$H_{n,n} \leftarrow c_n H_{n,n} + s_n H_{n+1,n}, H_{n+1,n} \leftarrow 0$$

$$\|r_{n+1}\| \leftarrow \beta|\xi_{n+1}|$$

EndFor

$$y_n \leftarrow \beta H^{-1}\xi$$

$$x_n \leftarrow x_0 + [z_0 \dots z_{n-1}]y_n.$$

Рис. 3

Гибкий вариант обобщённого метода минимальных невязок Ю. Садда и Мартина Г. Шульца

#### Результаты моделирования

Здесь  $B_n^{-1}$  – переобуславливание – один V цикл алгебраического многосеточного метода [7]. Учёт зависимости коэффициента теплопроводности от температуры осуществляется за счёт итерационного подхода на глобальном уровне.

Были рассмотрены пять вариантов тепловых моделей кристаллов GaN ПТБШ с суммарной шириной затвора  $W_z = 27$  мм при удельной тепловой мощности 5.4 Вт/мм.

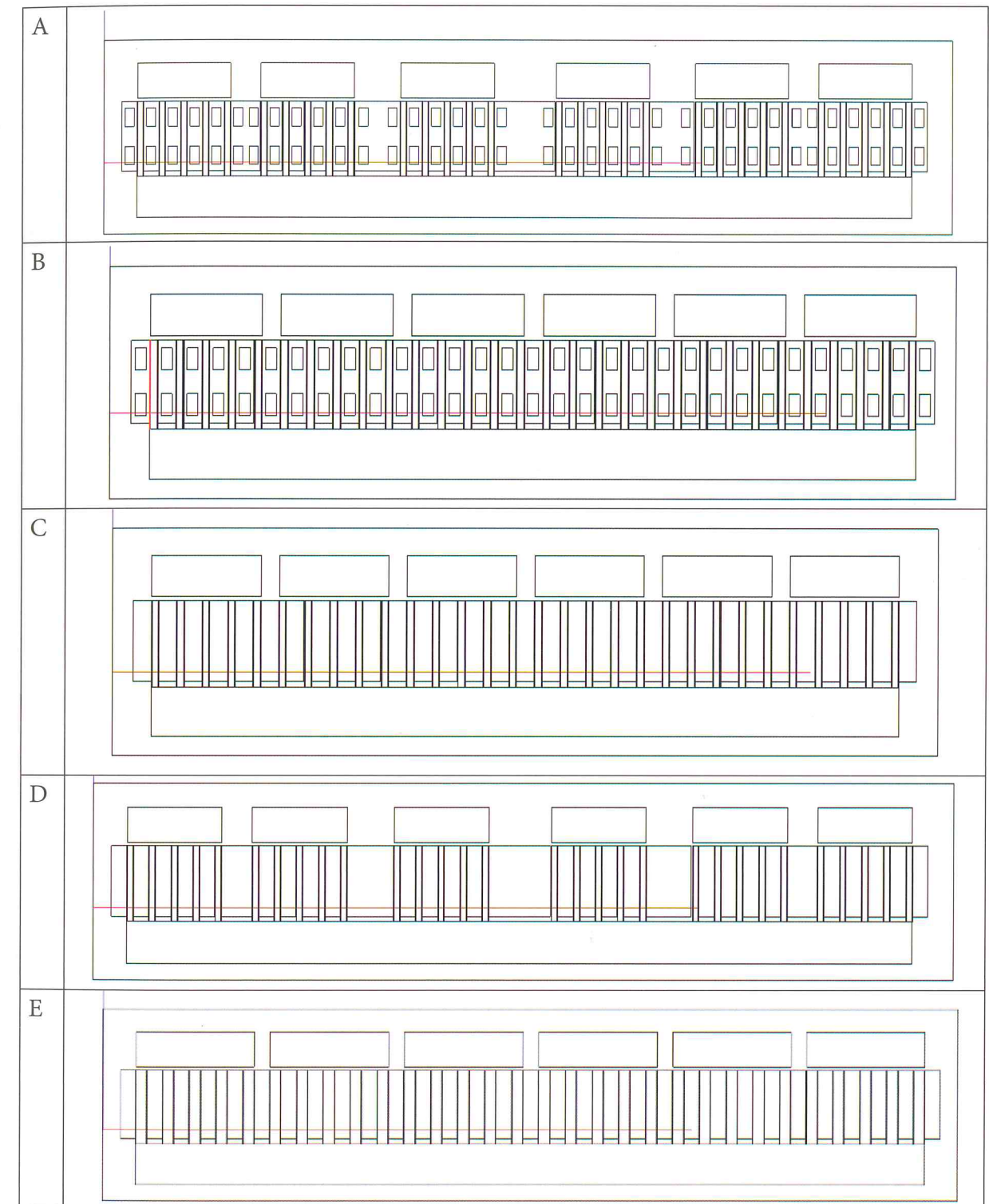


Рис. 4

#### Внешний вид анализируемых геометрических конструкций GaN ПТБШ

Модель состоит из 6 ячеек, в каждой из которых содержится 10 затворов. Тепловая мощность выделяется между затвором и стоком в областях, представляющих собой параллелепипеды с размерами 4 мкм\*448.5 мкм и толщиной 0.1 мкм. В ходе

оптимизации конструкции ПТБШ варьировались следующие параметры: расстояние между ячейками и расстояние затвор–затвор.

В модели А расстояние между первой и второй ячейками составляет 179 мкм,



между второй и третьей ячейками – 274 мкм, а между центральными ячейками – 366 мкм. В модели В расстояние между каждыми парами затворов составляет 33 мкм, а ячейки располагаются друг за другом без внесения дополнительного расстояния. Модель С представляет собой аналог модели В, но без отверстий. Модель D – аналог модели А, но также без отверстий. Модель Е получена

следующим образом: разность между геометрической шириной кристалла модели А и В поделена на 59 (количество межзатворных расстояний) и просуммирована с расстоянием затвор–затвор. Таким образом, величина расстояния затвор–затвор для модели Е увеличена с 33 до 66 мкм. В результате моделирования приборов получены следующие температурные профили.

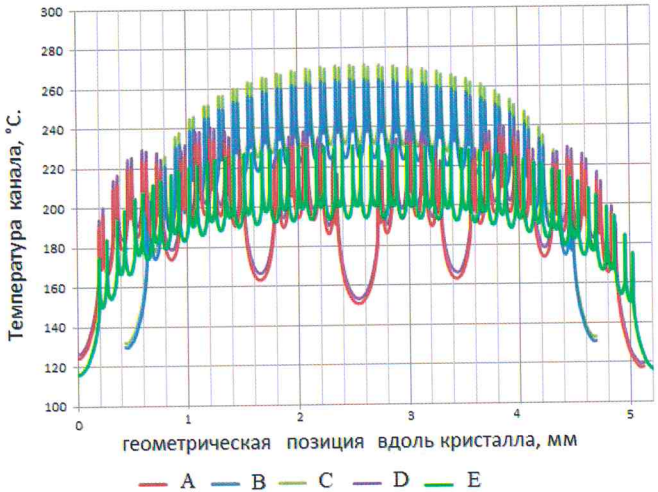


Рис. 5

Распределение температуры вдоль активной области кристалла

В табл. 2 приводится зависимость теплового сопротивления канал–основание корпуса для рассмотренных вариантов геометрического исполнения активной области

при различных уровнях мощности тепловыделения. Расчёты произведены при температуре основания корпуса +50 °С.

Таблица 2

Зависимость теплового сопротивления от мощности тепловыделения

Мощность тепловыделения, Вт	Тепловое сопротивление канал–основание корпуса $\theta$ , К/Вт				
	Модель А	Модель В	Модель С	Модель D	Модель Е
56	1,1526	1.3434	1,3736	1.1703	1.1414
74	1,1719	1.3674	1,4014	1.1924	1.1603
92	1,1914	1.3914	1,4300	1.2149	1.1792
100	1,2000	1.4022	1,4424	1.2251	1.1877
128	1,2310	1.4402	1,4879	1.2613	1.2179
146	1,2512	1.4650	1,5178	1.2852	1.2378
164	1,2716	1.4899	1,5483	1.3096	1.2579
182	1,2922	1.5150	1,5796	1.3345	1.2783
200	1,3131	1.5406	1,6110	1.3599	1.2991

На основе числовых данных табл. 2 были построены графики зависимости теплового

сопротивления канал–основание корпуса от уровня мощности тепловыделения (рис. 6).

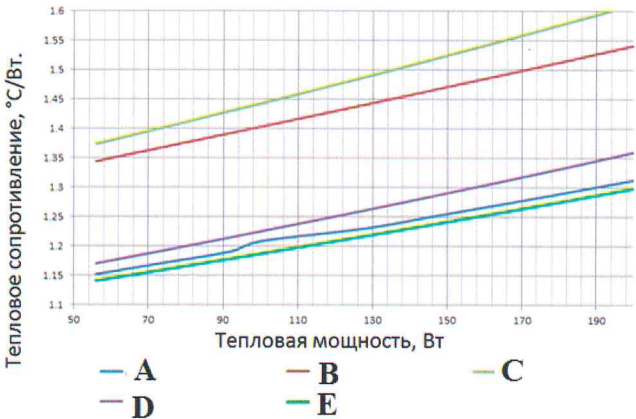


Рис. 6

Зависимость теплового сопротивления канал–основание корпуса от уровня мощности тепловыделения

Из полученных результатов видно, что наименьшим тепловым сопротивлением обладают транзисторы с модельными топологиями А и Е. Наличие или отсутствие металлизированных заземляющих отверстий под истоками слабо сказывается на величине теплового сопротивления, что обусловлено высокой теплопроводностью подложки из SiC.

Выводы

Наименьшим тепловым сопротивлением среди рассмотренных моделей обладают модели А и Е, что обусловлено увеличением расстояния между затворами.

Наличие металлизированных отверстий для заземления истоков или их отсутствие слабо влияют на величину теплового сопротивления «активная область транзистора – основание корпуса».

Литература

1. Герасимов А.О., Перевезенцев А.В., Шишков М.А., Шишков Д.В. Шестиканальный ППМ для АФАР X-диапазона: передающий тракт // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – Вып. 2-3 (236-237). – № 2. – С. 12-20.  
2. GaN Thermal Analysis for High-Performance Systems <https://www.qorvo.com/resources/d/qorvo-gan-thermal-analysis-for-high-performance-systems-white-paper>.  
3. Герасимов А.О., Синкевич В.Ф., Редька Ал.В. Импульсный усилитель мощности X-диапазона на GaN транзисторах: опыт изготовления // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1 (228). – С. 30-37.  
4. Борисов О.В., Зубков А.М., Иванов К.А., Миннебаев В.М., Редька Ал.В. Широкополосный

70-ваттный GaN усилитель мощности X-диапазона // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2014. – Вып. 2 (233). – С. 4-9.  
5. Программная документация программы SYMMIC на английском языке.  
6. С.Патанкар, Б.Сполдинг. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости // М.: Энергоатомиздат, 1986.  
7. Ю. Саад. Итерационные методы для разреженных линейных систем. В двух томах. // М.: МГУ, 2013-2014.

References

1. A.O. Gerasimov, A.V. Perevezentsev, M.A. Shishkov, D.V. Shiakov. 6-channel TRM for X-band AESA: transmitting channel. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. Issue 2-3 (236-237). 2015. No.2. pp.12-20.  
2. GaN Thermal Analysis for High-Performance Systems <https://www.qorvo.com/resources/d/qorvo-gan-thermal-analysis-for-high-performance-systems-white-paper>.  
3. Gerasimov A.O., Sinkevich V.F., Redka Al.V. Pulsed X-band GaN power amplifier: manufacturing experience. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2012. Issue 1 (228). pp.30-37.  
4. Borisov O.V., Zubkov A.M., Ivanov K.A., Minnebaev V.M., Redka Al.V. Wideband 70-W X-band GaN power amplifier. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2014. Issue 2 (233). pp.4-9.  
5. Software documentation for SYMMIC software in English.  
6. S. Patankar, B. Spolding. Numerical methods for solving issues of heat transfer and fluid dynamics. M.: Energoatomizdat. 1986.  
7. Saad Y. Iterative Methods for Sparse Linear Systems. N.Y.: PWS Publ., 1996.