



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-74-82>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.323

НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫЙ ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР С СИСТЕМОЙ ТЕПЛОТВОДА НА ОСНОВЕ КАНАВКИ В СЛОЕ ПАССИВАЦИИ, ЗАПОЛНЕННОЙ МАТЕРИАЛОМ С ВЫСОКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

В.С. ВОЛЧЁК, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 4 июня 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Эффект саморазогрева представляет собой главную проблему для мощных электронных и оптоэлектронных приборов на основе нитрида галлия. Неравномерное распределение рассеиваемой мощности и повышение средней температуры в структуре нитрид-галлиевого гетероструктурного полевого транзистора приводят к появлению области с очень высокой температурой в окрестности проводящего канала, деградации тока стока и выходной мощности, а также ухудшению надежности прибора. Целью данной работы является разработка конструкции гетероструктурного полевого транзистора на основе нитрида галлия с эффективной системой теплоотвода и исследование с помощью численного моделирования особенностей тепловых процессов, протекающих в структуре этого прибора. Объектами исследования служат созданные на сапфировой подложке приборные структуры, отличительными особенностями которых являются теплоотводящий элемент на основе графена, располагающийся на поверхности транзистора, и канавка в слое пассивации, заполненная материалом с высокой теплопроводностью. Предметом исследования являются электрические и тепловые характеристики указанных приборных структур. Результаты моделирования подтверждают эффективность внедрения в конструкцию гетероструктурного полевого транзистора на основе нитрида галлия разработанной системы теплоотвода, позволяющей уменьшить влияние эффекта саморазогрева и улучшить эксплуатационные характеристики прибора. Преимущество предлагаемой концепции состоит в том, что теплоотводящий элемент конструктивно соединен с теплопоглощающим элементом и предназначен для отведения тепла непосредственно от области максимальной температуры через канавку в слое пассивации, в которой осажден слой материала с высокой теплопроводностью. Полученные результаты могут быть использованы предприятиями электронной промышленности Республики Беларусь при создании элементной базы силовой электроники на основе нитрида галлия.

Ключевые слова: гетероструктурный полевой транзистор, графен, нитрид галлия, саморазогрев, силовая электроника, слой пассивации, теплоотвод, теплопроводность, температура.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования проводятся в рамках выполнения задания 3.1 государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций». Авторы выражают благодарность М.С. Барановой и Д.Ч. Гвоздовскому за предоставление данных о температурной зависимости теплопроводности нитридов элементов III группы и нитрида кремния.

Для цитирования. Волчѐк В.С., Стемпицкий В.Р. Нитрид-галлиевый гетероструктурный полевой транзистор с системой теплоотвода на основе канавки в слое пассивации, заполненной материалом с высокой теплопроводностью. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 74-82.

GALLIUM NITRIDE HETEROSTRUCTURE FIELD-EFFECT TRANSISTOR WITH A HEAT-REMOVAL SYSTEM BASED ON A TRENCH IN THE PASSIVATION LAYER FILLED BY A HIGH THERMAL CONDUCTIVITY MATERIAL

VLADISLAV S. VOLCHECK, VIKTOR R. STEMPIISKY

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 4 June 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The self-heating effect poses a main problem for high-power electronic and optoelectronic devices based on gallium nitride. A non-uniform distribution of the dissipated power and a rise of the average temperature inside the gallium nitride heterostructure field-effect transistor lead to the formation of a hot spot near the conducting channel and result in the degradation of the drain current, output power and device reliability. The purpose of this work is to develop the design of a gallium nitride heterostructure field-effect transistor with an effective heat-removal system and to study using numerical simulation the thermal phenomena specific to this device. The objects of the research are the device structures formed on sapphire, each of whom features both a graphene heat-eliminating element on its top surface and a trench in the passivation layer filled by a high thermal conductivity material. The subject of the research is the electrical and thermal characteristics of these device structures. The simulation results verify the effectiveness of the integration of the heat-removal system into the gallium nitride heterostructure field-effect transistor that can mitigate the self-heating effect and improve the device performance. The advantage of our concept is that the graphene heat-eliminating element is structurally connected with a heat sink and is designed for removing the heat immediately from the maximum temperature area through the trench in which a high thermal conductivity material is deposited. The results can be used by the electronics industry of the Republic of Belarus for developing the hardware components of gallium nitride power electronics.

Keywords: heterostructure field-effect transistor, graphene, gallium nitride, self-heating simulation, power electronics, passivation layer, heat-removal system, thermal conductivity, temperature.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. This work is supported by the grant 3.1 of Belarusian National Scientific Research Program “Photonics and Electronics for Innovations”. The authors would like to express special thanks to Baranova M.S. and Hvazdouski D.C. for providing the data on the temperature dependence of the thermal conductivity of the group III nitrides and silicon nitride.

For citation. Volcheck V.S., Stempitsky V.R. Gallium nitride heterostructure field-effect transistor with a heat-removal system based on a trench in the passivation layer filled by a high thermal conductivity material. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 74-82.

Введение

Эффект саморазогрева представляет собой главную проблему для мощных электронных и оптоэлектронных приборов, изготавливаемых на основе нитрида галлия. Неравномерное распределение рассеиваемой мощности и повышение средней температуры в структуре нитрид-галлиевого гетероструктурного полевого транзистора (транзистора с высокой подвижностью электронов, ТВПЭ) приводят к появлению области с очень высокой температурой в окрестности проводящего канала, деградации тока стока и выходной мощности, а также ухудшению надежности прибора [1]. Для уменьшения влияния эффекта саморазогрева предлагается ряд технологических решений, таких как монтаж приборной структуры методом перевернутого кристалла на подложку с высокой теплопроводностью, например, нитрид алюминия [2]; атомарное присоединение поликристаллического алмаза, выращенного методом осаждения

из газовой фазы (англ. chemical vapor deposition, CVD), к эпитаксиальной структуре вместо стравленной подложки кремния [3]; рост эпитаксиальной структуры на монокристаллической подложке алмаза методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы [4]; создание в подложке кремния канавки и осаждение на ее стенки комбинации AlN/Cu [5]; интеграция в конструкцию ТВПЭ теплоотводящих элементов на основе алмазоподобных соединений [6]. Ширина запрещенной зоны нитрида галлия равна 3,4 эВ, что обуславливает высокое значение напряжения электрического пробоя. Кроме того, скорость насыщения электронов в нитриде галлия минимум в два раза выше, чем у кремния. Благодаря этим свойствам нитрид-галлиевые транзисторы могут выдерживать очень большие плотности мощности, порядка нескольких десятков ватт на миллиметр ширины канала. Однако при таких уровнях мощности омический нагрев приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик прибора и, несмотря на предлагаемые решения, эффект саморазогрева по-прежнему остается насущной проблемой.

В статье [7] представлены результаты приборного моделирования нитрид-галлиевого ТВПЭ с теплоотводящим элементом на основе графена. В продолжение этих исследований проведена серия расчетов электрических и тепловых характеристик усложненной приборной структуры ТВПЭ на основе нитрида галлия. В настоящей работе конструкция транзистора включает в свой состав систему теплоотвода, состоящую из графенового теплоотводящего элемента, конструктивно соединенного с теплопоглощающим элементом и предназначенного для отведения тепла непосредственно от области максимальной температуры через канавку в слое пассивации, в которой осажден материал с высокой теплопроводностью. Эффективность предлагаемой системы теплоотвода оказывается выше, чем у системы, состоящей лишь из теплоотводящего элемента, расположенного на поверхности слоя пассивации.

Приборная структура

Объектом исследования является приборная структура нитрид-галлиевого ТВПЭ с системой теплоотвода на основе сформированной в слое пассивации канавки, в которой осажден слой материала с высокой теплопроводностью (рис. 1).

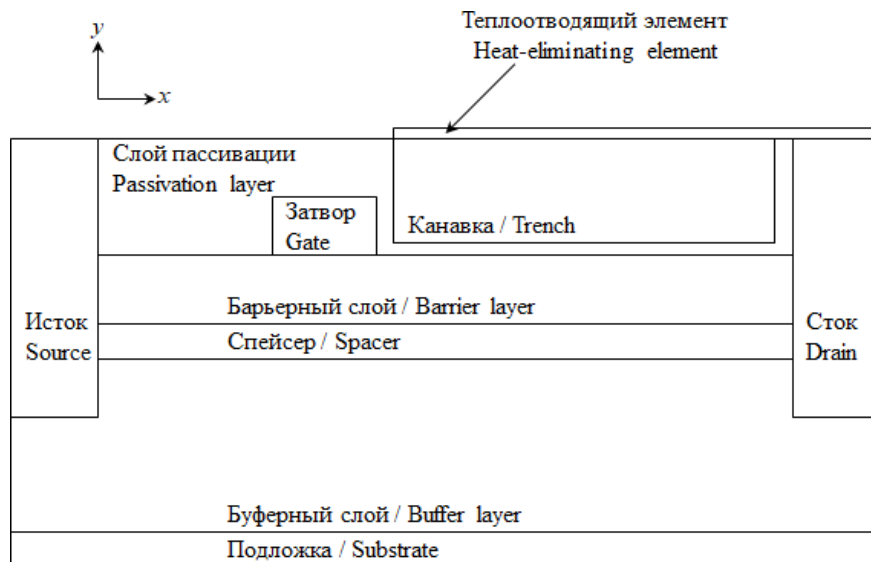


Рис. 1. Приборная структура нитрид-галлиевого ТВПЭ с системой теплоотвода на основе канавки в слое пассивации, заполненной материалом с высокой теплопроводностью

Fig. 1. Device structure of the gallium nitride high electron mobility transistor with a heat-removal system based on a trench in the passivation layer filled by a high thermal conductivity material

В качестве материала подложки исследуемой приборной структуры выбран сапфир. Толщина области моделирования подложки составляет 20 мкм. Толщины буферного слоя (GaN), спейсера (AlN), барьерного слоя ($Al_{0,2}Ga_{0,8}N$) и слоя пассивации (Si_3N_4) равны 1,5 мкм, 2 нм, 20 нм и 0,2 мкм соответственно. В качестве материалов с высокой теплопроводностью,

используемых для осаждения в канавке, исследуются арсенид бора (вариант конструкции С), нитрид бора (вариант D) и CVD-алмаз (вариант E). Длина и толщина канавки равны 4,8 мкм и 0,19 мкм, расстояния между ее левой стенкой и затвором, а также между правой стенкой и стоком – 0,1 мкм. Длина и толщина теплоотводящего элемента на основе графена составляют 5,9 мкм и 10 нм соответственно. Длина и толщина затвора – 0,5 мкм и 0,1 мкм. Ширина приборной структуры равна 0,1 мм.

Для сравнения электрических и тепловых характеристик также выполнен расчет двух приборных структур, в одной из которых (вариант конструкции В) отсутствует канавка в слое пассивации, заполненная материалом с высокой теплопроводностью, а в другой – и канавка, и теплоотводящий элемент (вариант А).

Формирование канавки в слое нитрида кремния может быть осуществлено, например, с помощью метода реактивного ионного травления на основе смеси CCl_2F_2/O_2 , позволяющей получить канавку с практически вертикальными стенками и плоским дном [8]. Благодаря идентичным коэффициентам теплового расширения, нитрид кремния теоретически является идеальной подложкой для осаждения CVD-алмаза [9]. Технологическая сложность создания графенового теплоотводящего элемента на поверхности структуры транзистора заключается в том, что технология механического расщепления высокоориентированного пиролитического графита неприменима для этой цели вследствие случайного характера процесса получения графена. По этой причине предлагается альтернативный метод, в основе которого лежит использование полиметилметакрилата в роли вспомогательных мембран [1].

Уравнения и модели

Приборное моделирование исследуемых вариантов конструкции ТВПЭ на основе нитрида галлия выполнялось в рамках классической диффузионно-дрейфовой теории с моделью подвижности класса Коэ – Томаса [10]. Моделирование тепловых процессов, протекающих в транзисторе во время его работы, осуществляется путем самосогласованного решения системы дифференциальных уравнений, включающей уравнение Пуассона, уравнения непрерывности и уравнение теплового потока. В динамически равновесном состоянии уравнение теплового потока принимает вид

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T) + H = 0, \quad (1)$$

где C – теплоемкость, T – температура, κ – теплопроводность, H – скорость тепловыделения.

Модель для определения теплопроводности AlN, GaN, Si_3N_4 , BAs [11], BN [12] и CVD-алмаза [11] от температуры имеет следующий вид:

$$\kappa(T) = \kappa(300 \text{ K}) \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha, \quad (2)$$

где α – коэффициент температурной зависимости.

Значения теплопроводности AlN, GaN и Si_3N_4 в диапазоне температур 20–1000 К были получены посредством моделирования из первых принципов и решения линеаризованного фононного уравнения переноса Больцмана. На базе рассчитанных данных были подобраны степенные функции вида (2), наиболее точно описывающие температурную зависимость теплопроводности указанных материалов.

Теплопроводность AlGaIn определяется согласно формуле

$$\kappa(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = \left(\frac{x}{\kappa(\text{AlN})} + \frac{1-x}{\kappa(\text{GaN})} + (3,649 \cdot 10^{-5} T - 2,21 \cdot 10^{-3}) x(1-x) \right)^{-1}, \quad (3)$$

где x – содержание алюминия.

Теплопроводность Al_2O_3 определяется по формуле [13]

$$\kappa(\text{Al}_2\text{O}_3) = 51292 T^{-1,2868} + 1,7688 \cdot 10^{-3} T. \quad (4)$$

Параметры модели для определения теплопроводности представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры модели для определения теплопроводности
Table 1. Thermal conductivity model parameters

Параметр / Parameter	Материал / Material					
	AlN	GaN	Si ₃ N ₄	BAs	BN	CVD-алмаз
κ (300 K) (Вт/(м·К))	389	258	86	1433	837	2174
α	-1,28	-1,03	-1,2	-1,63	-0,97	-1,17

Результаты моделирования

Серия расчетов электрических и тепловых характеристик выполнялась при следующих условиях:

- донорная примесь в барьерном слое отсутствует;
- в буферный слой внедрены акцепторные ловушечные центры, энергетический уровень которых лежит на 0,7 эВ ниже дна зоны проводимости, а профиль распределения плотности состояний соответствует профилю, обозначенному как «low-Fe» в работе [14];
- контактное тепловое сопротивление между подложкой и окружающей средой, а также между правой стороной теплоотводящего элемента и окружающей средой принято равным нулю, чтобы температура на нижней поверхности подложки и на правом крае теплоотводящего элемента была фиксированной;
- поскольку в используемой системе компьютерного проектирования графен не поддерживается (значения его параметров отсутствуют в базе данных), материал теплоотводящего элемента рассмотрен как проводник (является электродом – стоком) с соответствующим графену коэффициентом теплопроводности, равным 5000 Вт/(м·К) [15].

На рис. 2 приведены сток-затворная характеристика и зависимость передаточной проводимости (крутизны) от напряжения затвор-исток ($V_{зи}$) ТВПЭ на основе нитрида галлия при напряжении сток-исток ($V_{СИ}$), равном 0,1 эВ.

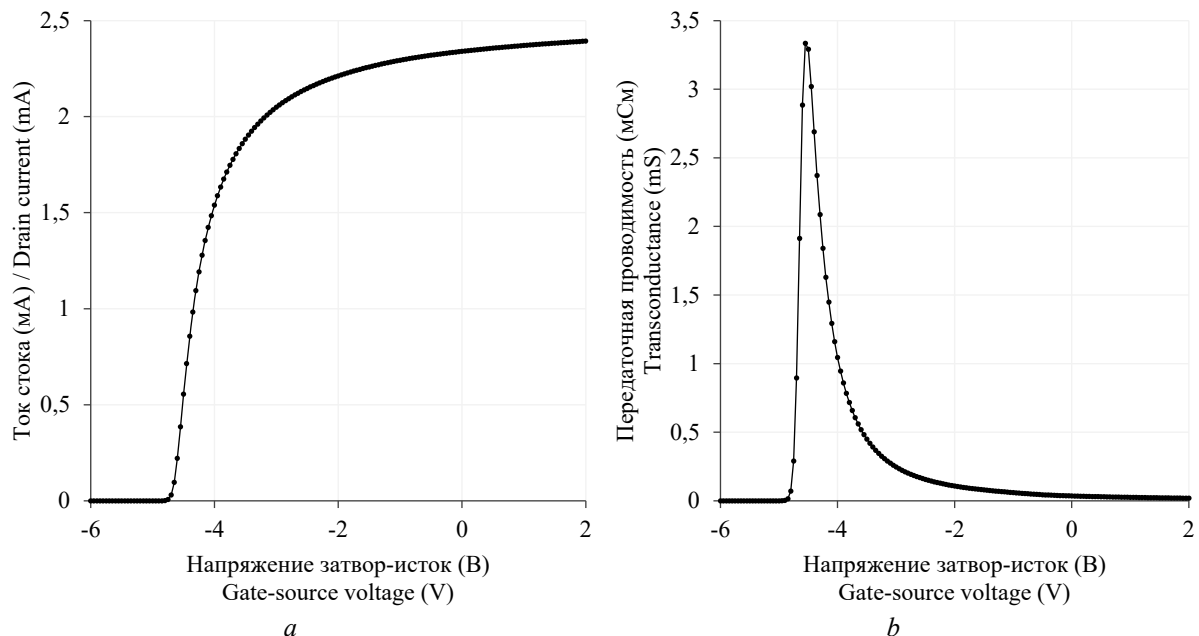


Рис. 2. Входные характеристики ($V_{СИ} = 0,1$ В): *a* – сток-затворная характеристика; *b* – зависимость передаточной проводимости от напряжения затвор-исток

Fig. 2. Input characteristics (drain-source voltage (V_{DS}) is 0.1 V): *a* – drain current vs. gate-source voltage (V_{GS}); *b* – transconductance vs. gate-source voltage

При достаточно малом напряжении сток-исток температура транзистора практически совпадает с температурой окружающей среды и, следовательно, входные электрические характеристики будут идентичны для всех рассматриваемых вариантов его конструкции.

На рис. 3 показаны сток-стоковые характеристики и зависимости выходной мощности от напряжения сток-исток ($V_{зи} = 2$ В) исследуемых вариантов конструкции ТВПЭ на основе нитрида галлия. В случае использования CVD-алмаза в качестве материала, осаждаемого в канавке в слое пассивации, наблюдается увеличение тока стока и выходной мощности, которое при $V_{зи} = 2$ В и $V_{си} = 15$ В составляет 28,5 % относительно величин для прибора без какой-либо системы теплоотвода. Ток стока возрастает со значения 0,057 до 0,073 А, а выходная мощность – со значения 0,852 до 1,095 Вт. Аналогичные показатели при осаждении слоев арсенида бора и нитрида бора находятся на уровне 24,3 и 21,8 % (токи стока равны 0,071 и 0,069 А, выходные мощности – 1,059 и 1,038 Вт соответственно). Если система теплоотвода включает лишь теплоотводящий элемент на основе графена, ток стока и выходная мощность повышаются на 14,6 %.

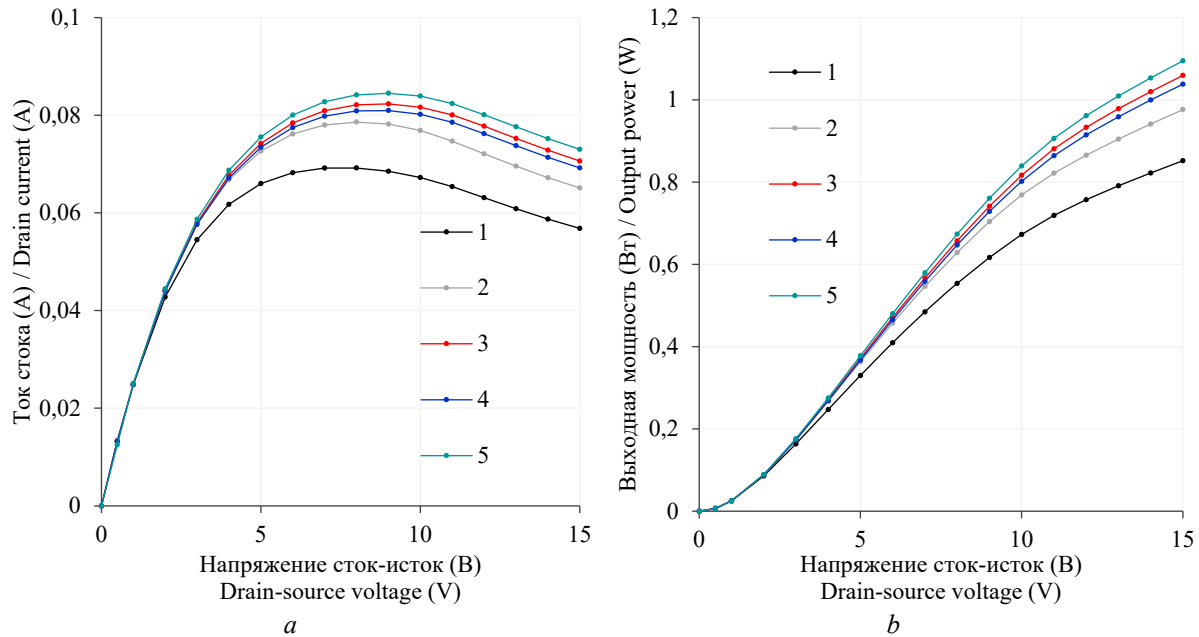


Рис. 3. Выходные характеристики ($V_{зи} = 2$ В) (1 – вариант конструкции А; 2 – вариант В; 3 – вариант С; 4 – вариант D; 5 – вариант E): *a* – сток-стоковые характеристики; *b* – зависимости выходной мощности от напряжения сток-исток

Fig. 3. Output characteristics ($V_{GS} = 2$ V) (1 – variant A of the structure; 2 – variant B; 3 – variant C; 4 – variant D; 5 – variant E): *a* – drain current vs. drain-source voltage; *b* – output power vs. drain-source voltage

Тепловые характеристики, включающие профили распределения тепловыделения вдоль канала и зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток, исследуемых вариантов конструкции ТВПЭ на основе нитрида галлия показаны на рис. 4. Для удобства восприятия графического материала представлены только фрагменты профилей распределения тепловыделения, рассчитанные в окрестности затвора при $V_{зи} = 2$ В и $V_{си} = 15$ В. При этом правой границе затвора соответствует координата $x = 3,5$ мкм. Зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток получены при $V_{зи} = 2$ В.

На рис. 4, *a* отчетливо видны пики тепловыделения, расположенные у границы затвора со стороны стока. В случае использования CVD-алмаза в качестве материала, осаждаемого в канавке в слое пассивации, максимальный локальный омический нагрев увеличивается на 52,5 % относительно соответствующей величины для прибора без системы теплоотвода (со значения $3,906 \cdot 10^{12}$ до $5,957 \cdot 10^{12}$ Дж/см³). Однако при этом наблюдается снижение максимальной температуры на 50,2 К (со значения 474,3 до 424,1 К). При осаждении слоев арсенида бора и нитрида бора максимальный омический нагрев увеличивается на 42,8 и 38,7 % (до значений $5,578 \cdot 10^{12}$ и $5,419 \cdot 10^{12}$ Дж/см³ соответственно). В этих случаях уменьшение максимальной температуры составляет 44,7 и 41,1 К (до значений 429,6 и 433,2 К соответственно). Если система теплоотвода включает лишь теплоотводящий элемент на основе графена, максимальный омический нагрев повышается на 29,8 % (до значения $5,072 \cdot 10^{12}$ Дж/см³), а максимальная температура снижается на 27,5 К (до значения 446,8 К).

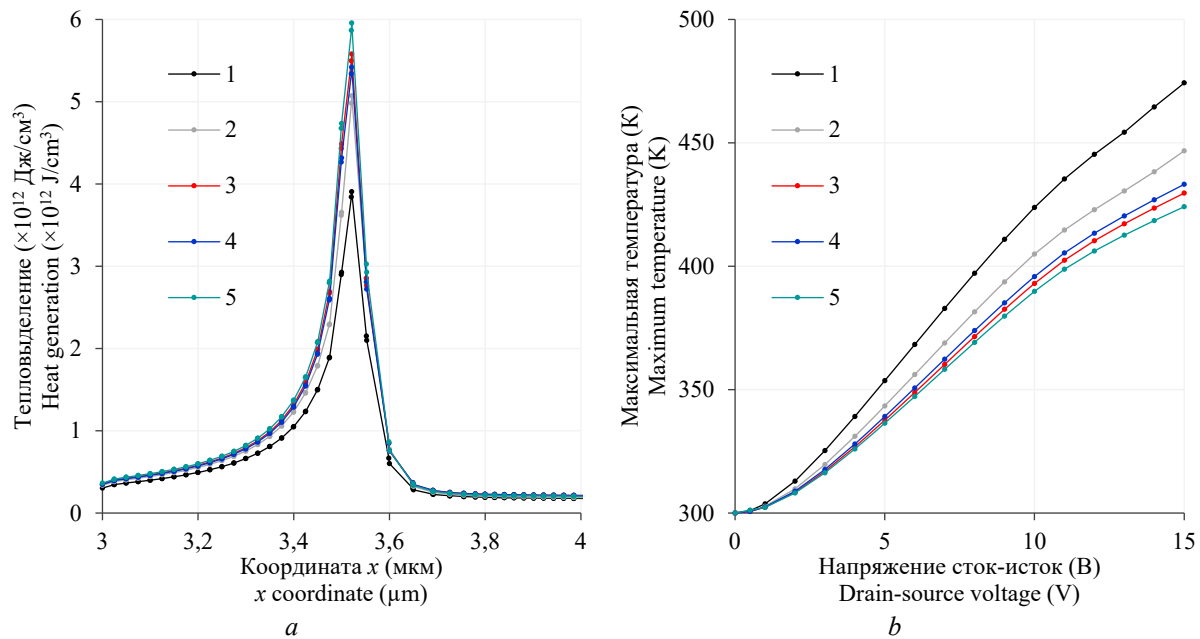


Рис. 4. Тепловые характеристики (1 – вариант А; 2 – вариант В; 3 – вариант С; 4 – вариант D; 5 – вариант Е): *a* – профили распределения тепловыделения вдоль канала ($V_{зи} = 2$ В, $V_{СИ} = 15$ В); *b* – зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток ($V_{зи} = 2$ В)
Fig. 4. Thermal characteristics (1 – variant A; 2 – variant B; 3 – variant C; 4 – variant D; 5 – variant E): *a* – heat generation profiles along the channel ($V_{GS} = 2$ V, $V_{DS} = 15$ V); *b* – maximum temperature vs. drain-source voltage ($V_{GS} = 2$ V)

Заклучение

В статье предложена конструкция нитрид-галлиевого ТВПЭ с системой теплоотвода на основе сформированной в слое пассивации канавки, в которой осажден материал с высокой теплопроводностью. С помощью численного моделирования выполнена оценка электрических и тепловых характеристик трех вариантов конструкции, в которых в качестве материала, заполняющего канавку, применяются арсенид бора, нитрид бора и CVD-алмаз. Результаты расчетов подтверждают эффективность разработанной системы теплоотвода, позволяющей уменьшить влияние эффекта саморазогрева и улучшить характеристики транзистора. При этом выяснено, что наибольшую эффективность система теплоотвода имеет в случае использования CVD-алмаза (при $V_{зи} = 2$ В и $V_{СИ} = 15$ В выходная мощность повышается на 28,5 %, а максимальная температура снижается на 50,2 К).

Список литературы / References

1. Yan Z., Liu G., Khan J.M., Balandin A.A. Graphene Quilts for Thermal Management of High-Power GaN Transistors. *Nature Communications*. 2012;3:827. DOI: 10.1038/ncomms1828.
2. Sun J., Fatima H., Koudymov A., Chitnis A., Hu X., Wang H.-M., Zhang J., Simin G., Yang J., Asif Khan M. Thermal Management of AlGaIn-GaN HFETs on Sapphire Using Flip-Chip Bonding with Epoxy Underfill. *IEEE Electron Device Letters*. 2003;24(6):375-377. DOI: 10.1109/LED.2003.813362.
3. Felbinger J.G., Chandra M.V.S., Sun Y., Eastman L.F., Wasserbauer J., Faili F., Babic D., Francis D., Ejeckam F. Comparison of GaN HEMTs on Diamond and SiC Substrates. *IEEE Electron Device Letters*. 2007;28(11):948-950. DOI: 10.1149/2.0441712jss.
4. Hirama K., Taniyasu Y., Kasu M. AlGaIn/GaN High-Electron Mobility Transistors with Low Thermal Resistance Grown on Single-Crystal Diamond (111) Substrates by Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2011;98(16):162112. DOI: 10.1063/1.3574531.
5. Pavlidis G., Kim S.H., Abid I., Zegaoui M., Medjdoub F., Graham S. The Effects of AlN and Copper Back Side Deposition on the Performance of Etched Back GaN/Si HEMTs. *IEEE Electron Device Letters*. 2019;40(7):1060-1063. DOI: 10.1109/LED.2019.2915984.

6. Grishakov K.S., Elesin V.F., Kargin N.I., Ryzhuk R.V., Minnebaev S.V. Effect of a Diamond Heat Spreader on the Characteristics of Gallium-Nitride-Based Transistors. *Russian Microelectronics*. 2016;45(1):41-53. DOI: 10.1134/S1063739716010054.
7. Волчѣк В.С., Ловшенко И.Ю., Шандарович В.Т., Дао Динь Ха. Нитрид-галлиевый транзистор с высокой подвижностью электронов с эффективной системой теплоотвода на основе графена. *Доклады БГУИР*. 2020;18(3):72-80. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-3-72-80. Volcheck V.S., Lovshenko I.Yu., Shandarovich V.T., Dao Dinh Ha. [Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor with an Effective Graphene-Based Heat Removal System]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020;18(3):72-80. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-3-72-80. (In Russ.)
8. Pant B.D., Tandon U.S. Etching of Silicon Nitride in CCl_2F_2 , CHF_3 , SiF_4 , and SF_6 Reactive Plasma: A Comparative Study. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 1999;19(4):545-563. DOI: 10.1023/A:1021886511288.
9. Bland H.A., Thomas E.L.H., Klemencic G.M., Mandal S., Morgan D.J., Papageorgiou A., Jones T.G., Williams O.A. Superconducting Diamond on Silicon Nitride for Device Applications. *Scientific Reports*. 2019;9:2911. DOI: 10.1038/s41598-019-39707-z.
10. Farahmand M., Garetto C., Bellotti E., Brennan K.F., Goano M., Ghillino E., Ghione G., Albrecht J.D., Ruden P.P. Monte Carlo Simulation of Electron Transport in the III-Nitride Wurtzite Phase Materials System: Binaries and Ternaries. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2001;48(3):535-542. DOI: 10.1109/16.906448.
11. Feng T., Lindsay L., Ruan X. Four-Phonon Scattering Significantly Reduces Intrinsic Thermal Conductivity of Solids. *Physical Review B*. 2017;96:161201(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.161201.
12. Chen K. Ultrahigh Thermal Conductivity in Isotope-Enriched Cubic Boron Nitride. *Science*. 2020;367(6477):555-559. DOI: 10.1126/science.aaz6149.
13. Hofmeister A.M. Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Single-Crystal MgO and Al_2O_3 and Related Compounds as a Function of Temperature. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2014;41:361-371. DOI: 10.1007/s00269-014-0655-3.
14. Dao Dinh Ha, Trung Tran Tuan, Volcheck V.S., Stempitsky V.R. Iron-Induced Acceptor Centers in the Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor: Thermal Simulation and Analysis. *2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*. 2019:308-312. DOI: 10.1109/ATC.2019.8924506.
15. Balandin A.A. Thermal Properties of Graphene and Nanostructured Carbon Materials. *Nature Materials*. 2011;10:569-581. DOI: 10.1038/NMAT3064.

Вклад авторов

Волчѣк В.С. осуществил настройку моделей, используемых при моделировании; выполнил серию расчетов электрических и тепловых характеристик исследуемых вариантов конструкции нитрид-галлиевого ТВПЭ с системой теплоотвода на основе канавки в слое пассивации, в которой осажден материал с высокой теплопроводностью; подготовил рукопись статьи.

Стемпичский В.Р. сформулировал цель и задачи исследований, определил составные элементы конструкции транзистора с указанной системой теплоотвода.

Authors' contribution

Volcheck V.S. has adjusted the models used in the simulation; has calculated the electrical and thermal characteristics of the variants of the gallium nitride high electron mobility transistor with a heat-removal system based on a trench in the passivation layer filled by a high thermal conductivity material; has prepared the manuscript.

Stempitsky V.R. has formulated the purpose and the problems of the work; has chosen the components of the transistor with the heat-removal system indicated above.

Сведения об авторах

Волчѣк В.С., научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Стемпіцкі В.Р., к.т.н., доцент, начальник НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375 17 293 84 09;
e-mail: vlad.volchek@bsuir.by
Волчѣк Владислав Сергеевич

Information about the authors

Volcheck V.S., Researcher at the R&D Laboratory 4.4 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Stempitsky V.R., PhD, Associate Professor, Head of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
тел. +375 17 293 84 09;
e-mail: vlad.volchek@bsuir.by
Volcheck Vladislav Sergeevich