



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-72-80>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.323

НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫЙ ТРАНЗИСТОР С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОТВОДА НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

ВОЛЧЁК В.С., ЛОВШЕНКО И.Ю., ШАНДАРОВИЧ В.Т., ДАО ДИНЬ ХА

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

Поступила в редакцию 24 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Эффект саморазогрева представляет собой основную проблему для мощных электронных, оптоэлектронных и фотонных приборов на основе нитрида галлия. Среднее увеличение температуры и чрезвычайно неравномерное распределение рассеиваемой мощности в структуре транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия, следствием чего является образование области с очень высокой температурой в окрестности проводящего канала, приводит к деградации тока стока, выходной мощности, коэффициента усиления и ухудшению надежности прибора. Цель работы – разработка конструкции с помощью численного моделирования и исследование особенностей тепловых процессов, протекающих в структуре транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия с системой теплоотвода на основе графена. Объектом исследования являются структуры, созданные на подложках сапфира, кремния и карбида кремния. Предметом исследования являются электрические, частотные и тепловые характеристики транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия с системой теплоотвода на основе графена. Результаты расчетов показывают эффективность внедрения в конструкцию транзистора с высокой подвижностью электронов графенового теплоотводящего элемента, позволяющего уменьшить влияние эффекта саморазогрева и улучшить эксплуатационные характеристики прибора. Преимущество предлагаемой концепции состоит в том, что теплоотводящий элемент на основе графена конструктивно соединен с теплопоглощающим элементом и предназначен для отведения тепла непосредственно от области максимальной температуры. Полученные результаты могут быть использованы предприятиями электронной промышленности Республики Беларусь при создании элементной базы силовой электроники на основе нитрида галлия.

Ключевые слова: проектирование, высокочастотный транзистор, гетероструктура, полупроводник.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования проводились в рамках проекта «Разработка конструкции нитрид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов с эффективной системой теплоотвода на основе графена» при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ Т18М-108). Авторы выражают благодарность Барановой М.С. и Гвоздовскому Д.Ч. за предоставление данных о температурной зависимости теплопроводности нитрида кремния.

* Статья рекомендована для опубликования организационным комитетом Белорусско-Китайского конкурса научно-технического творчества студентов (г. Минск, 22 ноября – 27 декабря 2019 г.).

Для цитирования. 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.

GALLIUM NITRIDE HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTOR WITH AN EFFECTIVE GRAPHENE-BASED HEAT REMOVAL SYSTEM

VLADISLAV S. VOLCHECK, IVAN YU. LOVSHENKO, VERANIKA T. SHANDAROVICH,
DAO DINH HA

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

Submitted 24 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The self-heating effect is a major problem for gallium nitride electronic, optoelectronic and photonic devices. Average temperature increase and non-uniform distribution of dissipated power in the gallium nitride high electron mobility transistor lead to the forming of a hot spot in the vicinity of the conducting channel and to degradation of the drain current, output power and gain, as well as poor reliability. The purpose of this work is to develop the design using numerical simulation and to study the thermal phenomena that occur in the gallium nitride high-electron mobility transistor with a graphene-based heat removal system. The objects of the research are the structures fabricated on sapphire, silicon and silicon carbide substrates. The subject of the research is the electrical, frequency and thermal characteristics of the gallium nitride high-electron mobility transistor with a graphene-based heat removal system. The calculation results show that the integration of a graphene-based heat removal element into the design of the high electron mobility transistor can effectively mitigate the self-heating effect and thus improve the device performance. The advantage of the proposed concept is that the graphene-based heat removal element is structurally connected with a heat sink and aims at removing heat immediately from the maximum temperature region, providing an additional heat escape channel. The obtained results can be used by the electronics industry of the Republic of Belarus for developing the hardware components of gallium nitride power electronics.

Keywords: design, high-frequency transistor, heterostructure, semiconductor.

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

Gratitude. This work was supported by the grant T18M-108 of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research. 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 silicon nitride.

For citation. 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. 2020; 18(3): 72-80.

Введение

Эффект саморазогрева является важнейшей проблемой для мощных электронных, оптоэлектронных и фотонных приборов на основе нитрида галлия (GaN). Среднее увеличение температуры и крайне неравномерное распределение рассеиваемой мощности в структуре транзистора с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) на основе GaN, следствием чего является образование области с очень высокой температурой рядом с проводящим каналом, приводит к деградации тока стока, выходной мощности, коэффициента усиления и ухудшению надежности прибора [1]. Для уменьшения влияния эффекта саморазогрева предлагается ряд технологических решений, таких как монтаж приборной структуры методом перевернутого

*The manuscript has been recommended for publication by the Organizing Committee of the Belarusian-Chinese Competition of Scientific and Technical Creativity of Students (Minsk, November 22 - December 27, 2019).

кристалла на подложку из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, например, нитрида алюминия (AlN) [2]; атомарное присоединение поликристаллического алмаза, выращенного методом осаждения из газовой фазы, к эпитаксиальной структуре вместо стравленной подложки кремния (Si) [3]; формирование эпитаксиальной структуры методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы на монокристаллической изолирующей подложке алмаза [4]; создание в подложке Si канавки и осаждение на ее стенки комбинации AlN-медь [5]; интеграция в конструкцию ТВПЭ теплоотводящих элементов (ТОЭ) на основе алмазоподобных соединений [6]. Ширина запрещенной зоны GaN равна 3,4 эВ, обуславливая высокое значение напряжения электрического пробоя. Кроме того, скорость насыщения электронов в GaN минимум в два раза выше, чем у Si. Благодаря этим свойствам транзисторы на основе GaN могут выдерживать очень большие плотности мощности, порядка нескольких десятков ватт на миллиметр ширины канала [7]. Однако при таких уровнях мощности омический нагрев приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик транзистора и, несмотря на предлагаемые решения, эффект саморазогрева продолжает оставаться главной проблемой.

В статье исследуется конструкция ТВПЭ на основе GaN с графеновым ТОЭ, обеспечивающим снижение температуры в активной области, уменьшая тем самым влияние эффекта саморазогрева на характеристики прибора. Теоретические значения теплопроводности графена находятся в диапазоне от 10 до 100 Вт/см·К [8], значительно превышая значения этого параметра для любого другого материала, используемого при создании ТВПЭ. Предлагаемая концепция отличается от представленных технологий тем, что графеновый ТОЭ, который соединен конструктивно с теплопоглощающим элементом, предназначен для отведения тепла напрямую от области повышенной температуры у затвора [9].

Структура

Объектом исследования является приборная структура ТВПЭ на основе GaN, которая схематически изображена на рис. 1. В качестве материала подложки используется сапфир (Al_2O_3), Si или карбид кремния (6H-SiC). Толщины подложки, слоя зарождения AlN, буферного слоя $Al_{0,5}Ga_{0,5}N/GaN$, спейсера AlN, барьерного слоя $Al_{0,2}Ga_{0,8}N$, слоя оксида лантана (La_2O_3), применяемого в качестве подзатворного диэлектрика, пассивационного слоя нитрида кремния (Si_3N_4) и графенового ТОЭ составляют соответственно 20 мкм, 20 нм, 0,6/0,9 мкм, 2 нм, 20 нм, 10 нм, 5 мкм и 10 нм. Толщина и длина затвора равны 0,3 и 0,5 мкм соответственно. Расстояния затвор-исток и затвор-сток составляют 1 мкм и 2,5 мкм. Ширина приборной структуры равна 100 мкм.

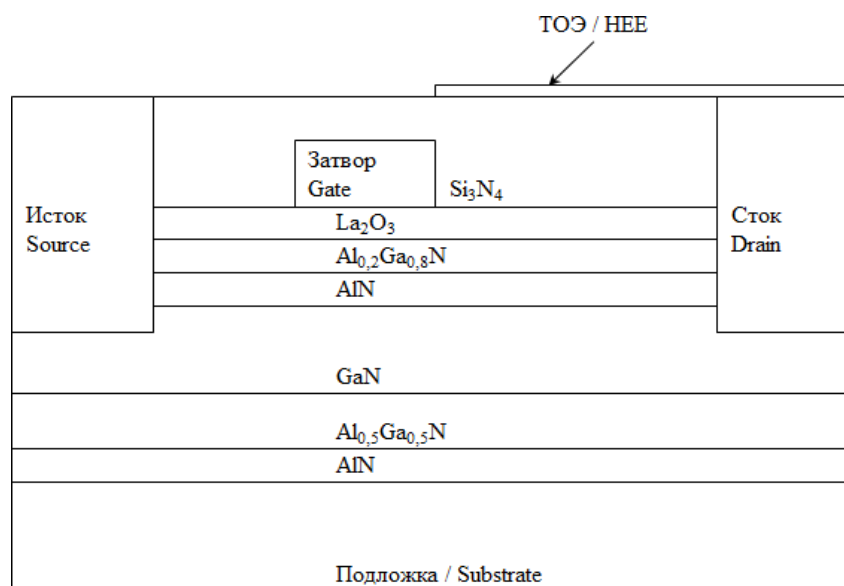


Рис. 1. Приборная структура ТВПЭ на основе GaN с графеновым ТОЭ
Fig. 1. GaN high electron mobility transistor (HEMT) with the graphene heat-eliminating element (HEE)

Технологическая сложность создания графенового ТОЭ на поверхности транзисторной структуры на основе GaN заключается в том, что технология механического расщепления высокоориентированного пиролитического графита неприменима для этой цели вследствие случайного характера процесса получения графена. По этой причине в работе [9] предлагается метод, в основе которого лежит использование полиметилметакрилата (ПММА) в роли вспомогательных мембран. Сначала на подложку методом центрифугирования при частоте вращения ротора центрифуги 3500 об/мин наносится фоторезист, который затем запекается в течение 1,5 мин при температуре 110 °С. Далее выполняется экспонирование подложки ультрафиолетом, после чего методом центрифугирования при частоте вращения ротора центрифуги 3500 об/мин наносится и запекается в течение 1,5 мин при температуре 130 °С слой ПММА. На следующей стадии проводится механическое отшелушивание графена от графита на поверхность ПММА. После растворения фоторезиста подложка погружается на дно, а гидрофобные мембраны ПММА с графеном оказываются на плаву. Из жидкости мембраны вынимаются, используя предметное стекло с отверстием, которое закрепляется на держателе микроманипулятора. Отверстие в предметном стекле позволяет использовать оптический микроскоп во время настройки положения подложки, необходимой для осаждения графена в определенной области на поверхности приборной структуры. Процедура формирования графенового ТОЭ заканчивается после растворения слоя ПММА в ацетоне.

Уравнения и модели

Приборное моделирование исследуемой структуры проводится в рамках классической диффузионно-дрейфовой теории с моделью подвижности класса Коэ – Томаса, описывающей подвижность носителей заряда в нитридах элементов III группы в условиях слабого и сильного электрических полей и учитывающей влияние температуры, концентрации донорной примеси и напряженности поля [10]. Моделирование тепловых процессов, протекающих в структуре прибора во время его работы, осуществляется путем самосогласованного решения системы дифференциальных уравнений, включающей уравнение Пуассона, уравнения непрерывности и уравнение теплового потока. Согласно модели саморазогрева [11], в динамически равновесном состоянии уравнение теплового потока принимает следующий вид:

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

где C – теплоемкость, T – температура, λ – коэффициент теплопроводности и H – скорость тепловыделения.

Коэффициент теплопроводности является величиной, зависимой от температуры. Этот факт следует учитывать при приборном моделировании, так как распределение температуры в структуре, получаемое вследствие эффекта саморазогрева, очень чувствительно к значениям теплопроводности в отдельных областях прибора.

Температурная зависимость теплопроводности AlN, GaN, Si, Si₃N₄ и La₂O₃ имеет вид

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

где α – коэффициент температурной зависимости.

Значения теплопроводности Si₃N₄ в диапазоне температур от 20 до 1000 К получены посредством моделирования из первых принципов и решения линеаризованного фононного уравнения переноса Больцмана. На базе рассчитанных данных подобрана степенная функция вида (2), наиболее точно описывающая температурную зависимость теплопроводности Si₃N₄.

Для 6H-SiC в качестве исходной используется температура 293 К [12]:

$$\lambda(T) = 3,87 \left(\frac{T}{293} \right)^{-1,49}. \quad (3)$$

Теплопроводность Al₂O₃ рассчитывается согласно формуле [13]

$$\lambda(T) = 512,92T^{-1,2868} + 1,7688 \times 10^{-5}T. \quad (4)$$

Параметры, используемые для расчета коэффициентов теплопроводности AlN, GaN, Si, Si₃N₄ и La₂O₃, представлены в таблице. Для AlGaN соответствующие параметры определяются согласно закону Вегарда.

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

Параметр / Parameter	Материал / Material				
	AlN	GaN	Si	Si ₃ N ₄	La ₂ O ₃
$\lambda(300 \text{ K})$ (Вт/(см·К))	2,85	1,3	1,31	0,86	0,05817
α	-1,64	-0,28	-1,03	-1,2	-0,797
Источник	[14]	[14]	[14]	–	[15]

Результаты моделирования

Приборное моделирование проводится при следующих условиях:

Концентрация донорной примеси в барьерном слое составляет 10^{15} см^{-3} .

Температура окружающей среды равна 300 К.

Контактное тепловое сопротивление между подложкой и окружающей средой принимается равным нулю (задано значение $10^{-24} \text{ см}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$), чтобы температура на нижней поверхности подложки была фиксированной.

Поскольку в используемой системе компьютерного проектирования графен не поддерживается (значения его параметров отсутствуют в базе данных), материал ТОЭ рассматривается как диэлектрик с соответствующим графену коэффициентом теплопроводности равным $50 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$ [8].

Кроме нижней поверхности подложки температурное граничное условие $T_0 = 300 \text{ К}$ устанавливается также на правой стороне ТОЭ.

На рис. 2 показаны сток-затворная характеристика и зависимость передаточной проводимости (крутизны) от напряжения затвор-исток ($V_{ЗИ}$) ТВПЭ на основе GaN с графеновым ТОЭ при напряжении сток-исток ($V_{СИ}$), равном 0,1 В.

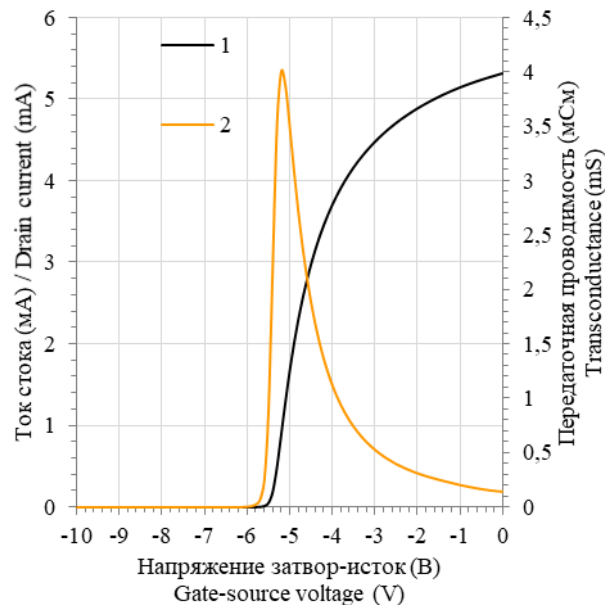


Рис. 2. Входные характеристики ($V_{СИ} = 0,1 \text{ В}$): 1 – сток-затворная характеристика; 2 – зависимость передаточной проводимости от напряжения затвор-исток

Fig. 2. Input characteristics (drain-source voltage (V_{DS}) is 0.1 V): 1 – drain current vs. gate-source voltage (V_{GS}); 2 – transconductance vs. gate-source voltage

При очень малом напряжении на стоке температура транзистора практически совпадает с температурой окружающей среды и, следовательно, входные вольт-амперные характеристики будут идентичны на разных подложках.

На рис. 3 показаны сток-стоковые характеристики и зависимости выходной мощности от напряжения сток-исток ($V_{зи} = 0$ В) ТВПЭ на основе GaN, сформированном на подложках Al_2O_3 , Si и 6H-SiC, без и с графеновым ТОЭ. В случае использования подложки Al_2O_3 ток стока и выходная мощность при $V_{зи} = 0$ В и $V_{си} = 30$ В увеличиваются на 17,511 % (со значений 0,046 А и 1,382 Вт до значений 0,054 А и 1,624 Вт соответственно), если в конструкцию ТВПЭ внедрен графеновый ТОЭ. В случае применения подложки Si ток стока и выходная мощность повышаются на 13,544 % (со значений 0,054 А и 1,630 Вт до значений 0,062 А и 1,851 Вт). Если же используется подложка 6H-SiC, ток стока и выходная мощность увеличиваются на 9,441 % (со значений 0,066 А и 1,980 Вт до значений 0,072 А и 2,167 Вт).

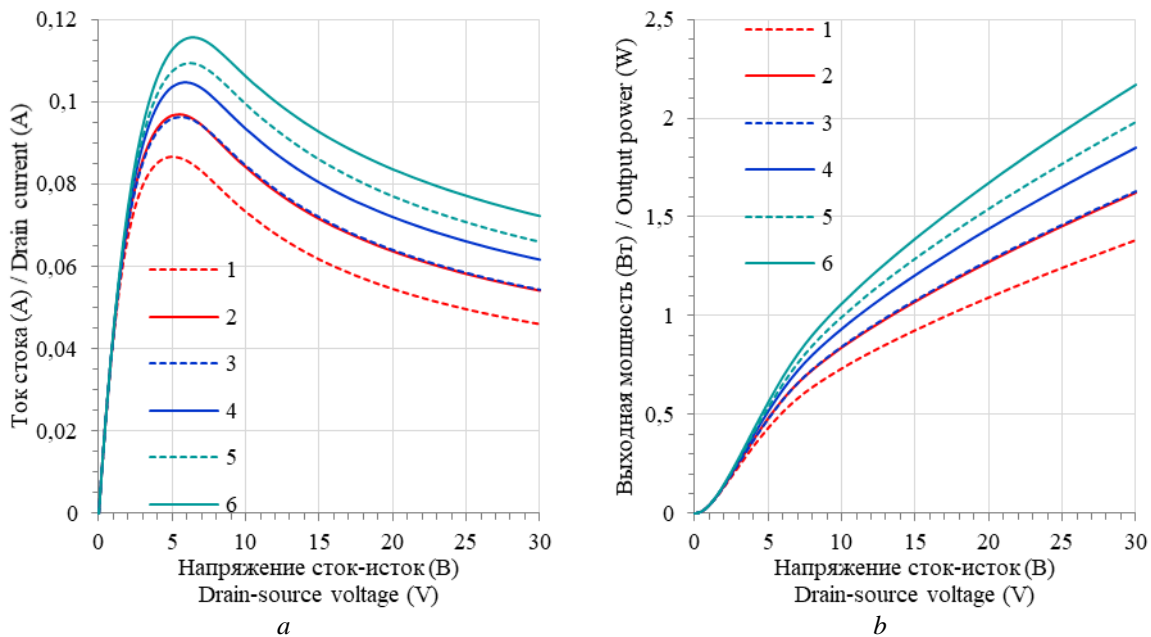


Рис. 3. Выходные характеристики ($V_{зи} = 0$ В) ТВПЭ на подложках Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) и 6H-SiC (5, 6) без (1, 3, 5) и с (2, 4, 6) ТОЭ: *a* – сток-стоковые характеристики; *b* – зависимости выходной мощности от напряжения сток-исток

Fig. 3. Output characteristics ($V_{GS} = 0$ V) of the HEMT on the Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) and 6H-SiC (5, 6) substrates without (1, 3, 5) and with (2, 4, 6) the HEE: *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, ТВПЭ на основе GaN, созданном на подложках Al_2O_3 , Si и 6H-SiC, без и с графеновым ТОЭ, представлены на рис. 4. Для удобства показаны лишь фрагменты профилей распределения тепловыделения, полученные в окрестности границы затвора со стороны стока, которой соответствует координатам $x = 2,5$ мкм, при $V_{зи} = 0$ В и $V_{си} = 30$ В. Зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток рассчитываются при $V_{зи} = 0$ В.

На рис. 4, *a* отчетливо видны пики тепловыделения, расположенные у границы затвора со стороны стока. В случае использования подложки Al_2O_3 максимальный омический нагрев увеличивается на 32,194 % (со значения 7,669 Дж/см³ до значения 10,138 Дж/см³), если в конструкцию ТВПЭ внедрен ТОЭ на основе графена. При этом максимальная температура снижается на 38,6 К (6,633 %) со значения 582,0 К до значения 543,3 К. В случае применения подложки Si максимальное локальное тепловыделение повышается на 24,484 % (со значения 10,080 Дж/см³ до значения 12,548 Дж/см³) и максимальная температура уменьшается на 26,7 К (4,848 %) со значения 550,6 К до значения 523,9 К. Если же используется подложка 6H-SiC, максимальное локальное тепловыделение повышается на 16,759 % (со значения 13,828 Дж/см³ до значения 16,145 Дж/см³) и максимальная температура снижается на 16,4 К (3,151 %) со значения 519,2 К до значения 502,8 К.

После выполнения моделирования по постоянному току при напряжениях $V_{зи} = 0$ В и $V_{си} = 30$ В проведен анализ по переменному синусоидальному току в режиме малого сигнала. Для характеристики транзистора в режиме малого сигнала обычно используются следующие величины: коэффициент усиления по току и коэффициент однонаправленного усиления по мощности, которые определяются с помощью элементов матрицы рассеяния (S -параметров). Частотные зависимости этих величин для ТВПЭ на основе GaN, созданном на подложках Al_2O_3 , Si и 6H-SiC, без и с графеновым ТОЭ, приведены на рис. 5.

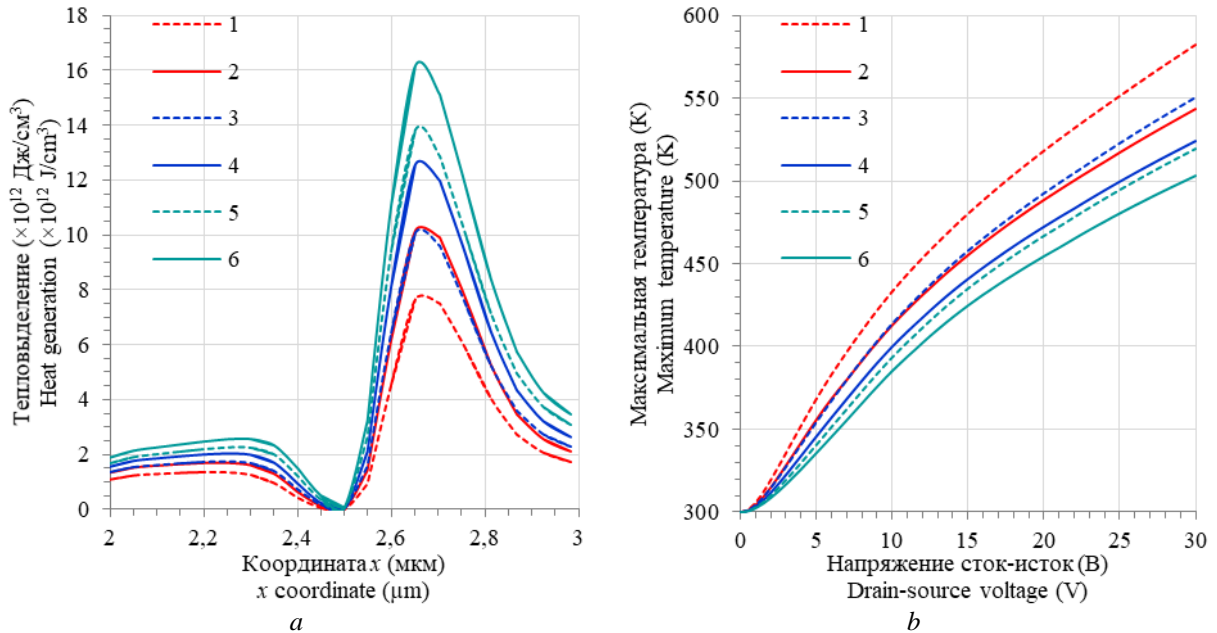


Рис. 4. Тепловые характеристики ТВПЭ на подложках Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) и 6H-SiC (5, 6) без (1, 3, 5) и с (2, 4, 6) ТОЭ: a – профили распределения тепловыделения вдоль канала ($V_{зи} = 0$ В, $V_{си} = 30$ В); b – зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток ($V_{зи} = 0$ В)

Fig. 4. Thermal characteristics of the HEMT on the Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) and 6H-SiC (5, 6) substrates without (1, 3, 5) and with (2, 4, 6) the HEE: a – heat generation profiles along the channel ($V_{GS} = 0$ V, $V_{DS} = 30$ V); b – maximum temperature vs. drain-source voltage ($V_{GS} = 0$ V)

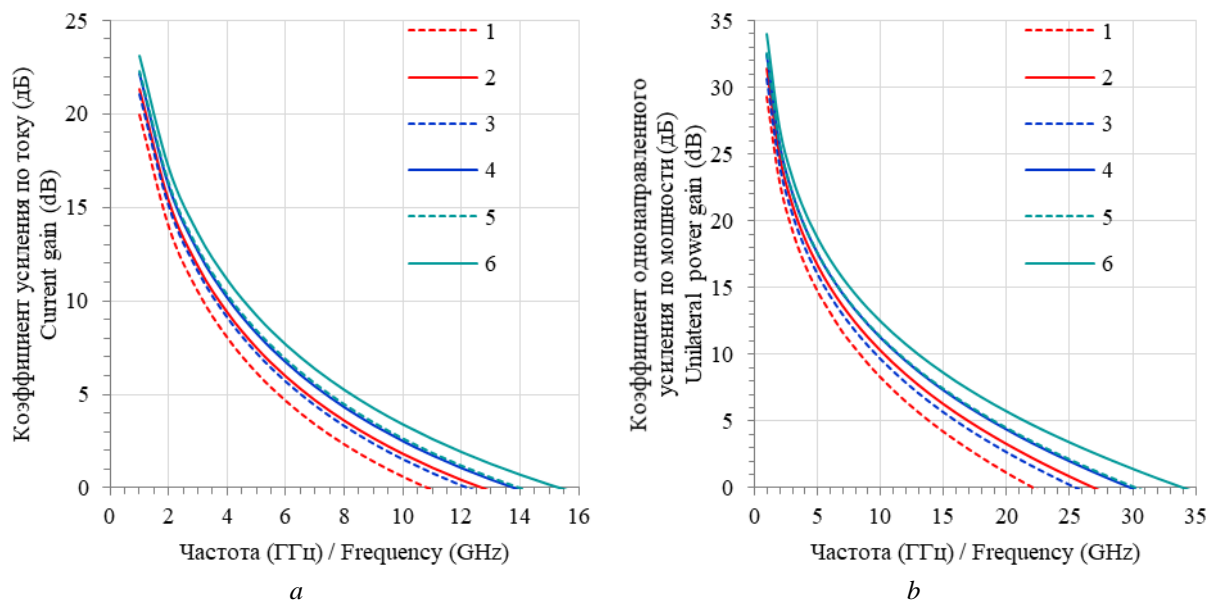


Рис. 5. Частотные характеристики ТВПЭ на подложках Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) и 6H-SiC (5, 6) без (1, 3, 5) и с (2, 4, 6) ТОЭ: a – зависимости коэффициента усиления по току от частоты; b – зависимости коэффициента однонаправленного усиления по мощности от частоты

Fig. 5. Frequency characteristics of the HEMT on the Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) and 6H-SiC (5, 6) substrates without (1, 3, 5) and with (2, 4, 6) the HEE: a – current gain vs. frequency; b – unilateral power gain vs. frequency

В случае применения подложки Al_2O_3 граничная частота, определяемая как частота, при которой коэффициент усиления по току стремится к нулю, повышается на 17,593 % (со значения 10,8 ГГц до значения 12,7 ГГц) после интеграции в конструкцию ТВПЭ ТОО на основе графена. Максимальная частота генерации – частота, при которой коэффициент однонаправленного усиления по мощности стремится к нулю, – повышается на 21,171 % (со значения 22,2 ГГц до значения 26,9 ГГц). Если используется подложка Si, граничная частота увеличивается на 13,115 % (со значения 12,2 ГГц до значения 13,8 ГГц), а максимальная частота генерации – на 16,863 % (со значения 25,5 ГГц до значения 29,8 ГГц). В случае же использования подложки 6H-SiC увеличение граничной частоты составляет 9,286 % (со значения 14,0 ГГц до значения 15,3 ГГц), максимальной частоты генерации – 12,211 % (со значения 30,3 ГГц до значения 34,0 ГГц).

Заключение

В статье предложена конструкция ТВПЭ на основе GaN с эффективной системой теплоотвода на основе графена. Посредством численного моделирования выполнена оценка электрических, частотных и тепловых характеристик разработанной структуры, созданной на подложках Al_2O_3 , Si и 6H-SiC. Результаты расчетов показывают эффективность внедрения в конструкцию ТВПЭ на основе GaN графенового теплоотводящего элемента, позволяющего уменьшить влияние эффекта саморазогрева и улучшить эксплуатационные характеристики прибора. При этом выяснено, что наибольшую эффективность система теплоотвода имеет в случае использования подложки Al_2O_3 (при $V_{\text{зи}} = 0$ В и $V_{\text{си}} = 30$ В увеличение тока стока и выходной мощности составляет 17,511 %).

Список литературы / References

1. Kuzmik J., Bychikhin S., Pichonat E., Gaquiere C., Morvan E., Kohn E., Teyssier J.-P., Pogany D. Self-Heating Phenomena in High-Power III-N Transistors and New Thermal Characterization Methods Developed Within EU Project TARGET. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2009;1(2):153-160. DOI: 10.1017/S1759078709990444.
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: <https://doi.org/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):162112-1-162112-3. 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. Rajan S., Waltereit P., Poblenz C., Heikman S.J., Green D.S., Speck J.S., Mishra U.K. Power Performance of AlGaIn-GaN HEMTs Grown on SiC by Plasma-Assisted MBE. *IEEE Electron Device Letters*. 2004;25(5):247-249. DOI: 10.1109/LED.2004.826977.
8. Balandin A.A. Thermal Properties of Graphene and Nanostructured Carbon Materials. *Nature Materials*. 2011;10:569-581. DOI: 10.1038/NMAT3064.
9. Yan Z., Liu G., Khan J.M., Balandin A.A. Graphene Quilts for Thermal Management of High-Power GaN Transistors. *Nature Communications*. 2012;3:827:1-8. DOI: 10.1038/ncomms1828.
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. Wachutka G.K. Rigorous Thermodynamic Treatment of Heat Generation and Conduction in Semiconductor Device Modeling. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design*. 1990;9(11):1141-1149. DOI: 10.1109/43.62751.
12. Burgemeister E.A., von Muench W., Pettenpaul E. Thermal Conductivity and Electrical Properties of 6H Silicon Carbide. *Journal of Applied Physics*. 1979;50(9):5790-5794. DOI: 10.1063/1.326720.
13. Hofmeister A.M. Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Single-Crystal MgO and Al₂O₃ 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. Piprek J. *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*. San Diego, California: Academic Press; 2003.
15. Fornarini L., Conde J.C., Alvani C., Olevano D., Chiussi S. Experimental Determination of La₂O₃ Thermal Conductivity and Its Application to the Thermal Analysis of a-Ge/La₂O₃/c-Si Laser Annealing. *Thin Solid Films*. 2008;516:7400-7405. DOI: 10.1016/j.tsf.2008.02.032.

Вклад авторов

Волчѣк В.С. определил составные элементы конструкции ТВПЭ на основе GaN с системой теплоотвода на основе графена; осуществил выбор и настройку методов и моделей, используемых при моделировании; выполнил серию расчетов электрических и тепловых характеристик ТВПЭ на основе GaN с системой теплоотвода на основе графена.

Ловшенко И.Ю. выполнил серию расчетов частотных характеристик.

Шандарович В.Т. выполнила анализ современного состояния по теме работы и поиск предлагаемых технологических решений проблемы саморазогрева ТВПЭ на основе GaN.

Дао Динь Ха сформулировал цель и задачи исследований.

Authors' contribution

Volcheck V.S. has chosen the components of the GaN HEMT structure with the graphene-based heat removal system; defined and adjusted the methods and models used in the simulation; calculated the electrical and thermal characteristics of the GaN HEMT with the graphene-based heat removal system.

Lovshenko I.Yu. has calculated the frequency characteristics.

Shandarovich V.T. has analyzed the current state and carried out the search for the proposed technology solutions to the self-heating problem that affects the GaN HEMT.

Dao Dinh Ha has formulated the purpose and the problems of the work.

Сведения об авторах

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

Ловшенко И.Ю., заведующий НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шандарович В.Т., младший научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дао Динь Ха, к.т.н., исследователь Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона.

Information about the authors

Volcheck V.S., research assistant of the R&D laboratory 4.4 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lovshenko I.Yu., Head of the R&D laboratory 4.4 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shandarovich V.T., research assistant of the R&D laboratory 4.4 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dao Dinh Ha, PhD, researcher of Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam.

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

Address for correspondence

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