

07.2

GaN-полевой транзистор с эффективным теплоотводом на Si-подложке

© В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, И.В. Пашковская

АО „НПП „Исток“ им. Шокина“, Фрязино, Московская обл., Россия
E-mail: solidstate10@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 июля 2022 г.

В окончательной редакции 23 сентября 2022 г.

Принято к публикации 9 ноября 2022 г.

Предложена простая конструкция полевого транзистора на основе GaN на Si-подложке с эффективным теплоотводом по слоям полиалмаза, сформированным на стенках заземляющих отверстий. По расчетам в результате введения такого теплоотвода при одинаковом среднем расстоянии между секциями затворов максимальная температура в канале GaN-транзистора на Si-подложке существенно уменьшается и становится сравнимой с максимальной температурой в канале GaN-транзистора на SiC-подложке.

Ключевые слова: GaN-полевой транзистор, заземляющее отверстие, температура канала, полиалмаз.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.02.54278.19327

В последние годы в области создания полевых транзисторов на основе нитрид-галлиевых гетероструктур достигнут огромный прогресс благодаря ряду их неоспоримых достоинств [1–4]. Одним из важнейших достоинств данной гетероструктуры является возможность ее выращивания на SiC-подложках, имеющих по сравнению с другими полупроводниковыми материалами очень высокую теплопроводность, которая при температуре 300 К оценивается в районе 350–490 W/(m·K). Единственным физическим ограничением, которое не позволяет полностью использовать все возможности подложки, является собственная относительно низкая теплопроводность нитрида галлия — около 140 W/(m·K). За счет этого даже при относительно малой толщине слоя GaN, равной 0,5 μm, максимальная температура в канале транзистора заметно возрастает (на 30–40%). Однако главное достоинство комплекса гетероструктура AlGaIn/GaN плюс SiC-подложка — SiC-подложка, которая имеет замечательную теплопроводность, — становится единственной серьезной проблемой, мешающей полному триумфу приборов на основе таких структур: подложки на основе SiC имеют высокую стоимость, а также определенные технологические сложности обработки. На первый взгляд эта проблема без существенных потерь в характеристиках может быть решена переходом с SiC-подложек толщиной 100 μm на Si-подложки толщиной 50 μm. Однако такой переход без существенного увеличения расстояния между секциями затворов практически невозможен. Дело в том, что кремний имеет теплопроводность около 150 W/(m·K), что примерно в 2,3–3,2 раза меньше, чем у карбида кремния. Уменьшение толщины подложки от 100 до 50 μm в зависимости от топологии транзистора дает уменьшение теплового сопротивления всего на 10–20%, а не на 50%, что принципиальным образом меняет перспективы применения кремниевых подложек.

В настоящей работе предлагается простой и эффективный способ улучшения отвода тепла из области тепловыделения в транзисторе, позволяющий в перспективе создавать GaN-транзисторы на Si-подложках с тепловым сопротивлением, существенно приближенным к тепловому сопротивлению транзисторов на SiC-подложках.

Предполагается, что мощный транзистор имеет топологию, стандартную для приборов миллиметрового диапазона длин волн (рис. 1). На рис. 1 показана одна секция транзистора, имеющая четыре секции затвора и две секции стока. В расчетную модель включены две такие секции и соответственно пять заземляющих отверстий. Как показывают расчеты, дальнейшее увеличение числа секций существенно не увеличивает температуру прибора.

В данной конструкции группы секций затворов и стоков разделены октаэдрическими секциями металлизации истоков. Под металлизацией секций истоков в гетероструктуре сформированы сквозные отверстия с боковыми стенками, покрытыми заземляющей металлизацией. При этом группы секций затворов и стоков, расположенные между заземленными истоками, включают в себя только две секции затвора и одну секцию стока. Соответственно в транзисторе с такой конструкцией между двумя заземляющими отверстиями расположены только два источника тепловой мощности.

Сквозные заземляющие отверстия в гетероструктуре имеют боковые стенки, покрытые слоем Au толщиной 1–5 μm, что обеспечивает электрический контакт секций истоков с основанием корпуса транзистора. Очевидно, что Au-металлизация боковых стенок отверстий обеспечивает не только электрический контакт с основанием корпуса, она же (вместе с областью передачи тепла по Si-подложке) является элементом теплоотвода, но из-за близости коэффициента теплопроводности Au к теплопроводности Si эффективность Au-теплового моста

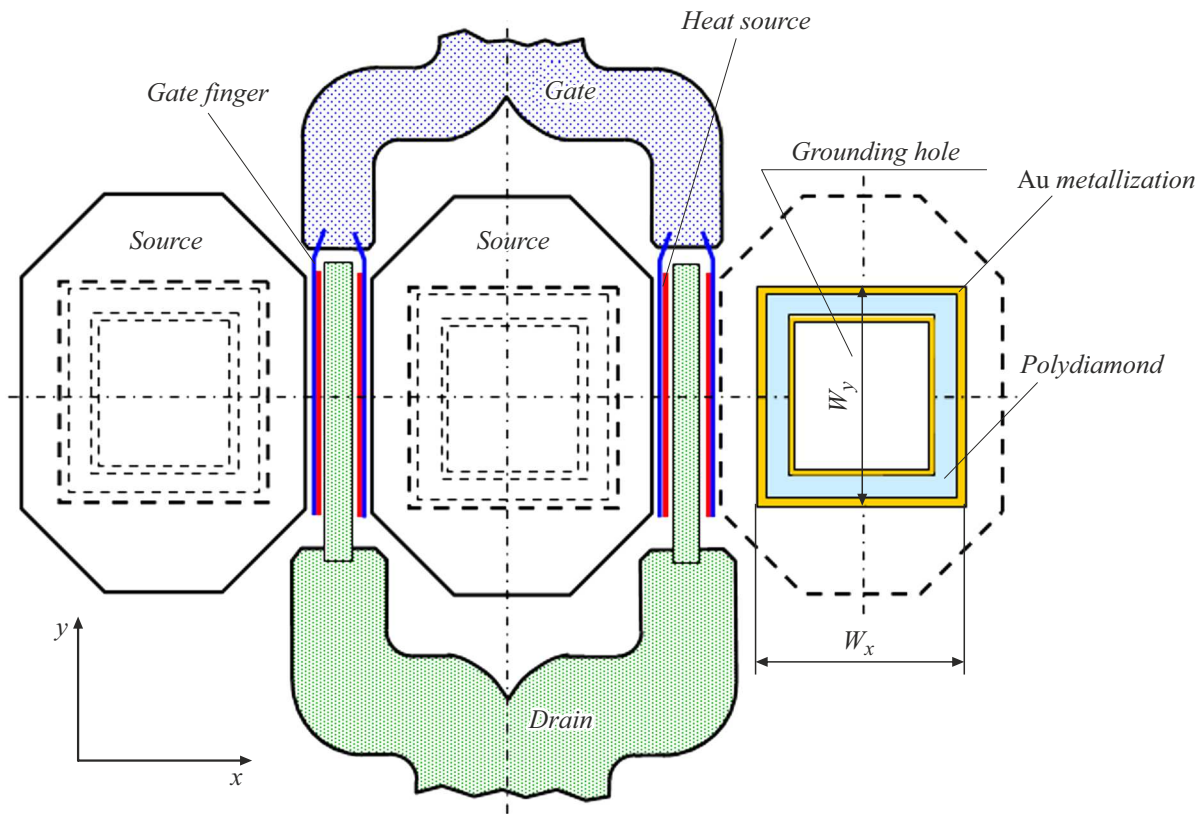


Рис. 1. Схематическое изображение группы секций транзистора с GaN-каналом (вид сверху).

не слишком велика. Однако, если дополнительно покрыть золото алмазоподобным покрытием (АПП) [5–7] с теплопроводностью $500\text{--}1600\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, картина может существенно измениться. Следует отметить, что использование алмазных покрытий [8] и подложек [9] для охлаждения транзисторов ранее неоднократно предлагалось, однако из-за технологических сложностей промышленного применения пока не получило, несмотря на то что перенос гетероструктур на алмазные подложки принципиально решает проблему теплоотвода.

В расчетах задавались две конструкции транзистора: с периодом структуры $H = 60\text{ }\mu\text{m}$ и расстоянием между затворами $15\text{ }\mu\text{m}$; с периодом структуры $H = 45\text{ }\mu\text{m}$ и расстоянием между затворами $10\text{ }\mu\text{m}$. Ширина секции затвора $W = 150\text{ }\mu\text{m}$, выделяемая тепловая мощность $5\text{ W}/\text{mm}$, что соответствует такой же величине выходной мощности $5\text{ W}/\text{mm}$ при работе транзистора в непрерывном режиме с КПД 50%. Температура на нижней грани Si-подложки в расчетах полагалась равной 0°C . Поскольку основной интерес представляет поведение прибора в диапазоне температур, в котором деградация несущественна, коэффициенты теплопроводности выбирались не зависящими от температуры.

На рис. 2 показаны результаты проведенного на основании численного решения трехмерного стационарного уравнения теплопроводности расчета максимальной температуры в канале транзистора в зависимости от

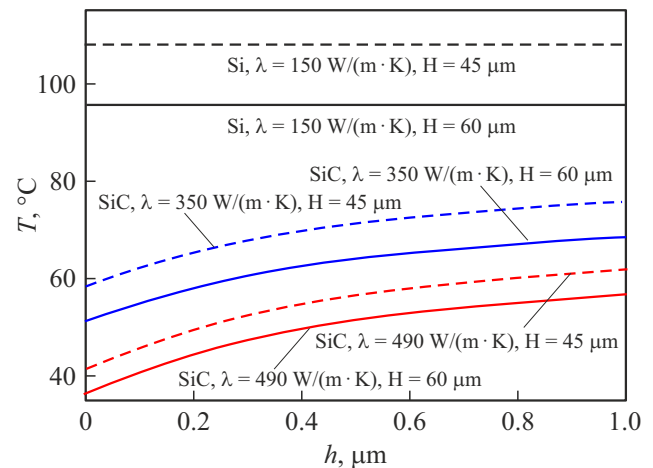


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры в канале транзистора от суммарной толщины выращенных на подложке слоев GaN/AlGaIn.

толщины выращенной на подложке гетероструктуры для этих двух топологий при толщине SiC-подложки $100\text{ }\mu\text{m}$, теплопроводностях $\lambda = 490$ и $350\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ и толщине Si-подложки $50\text{ }\mu\text{m}$ и теплопроводности кремния $150\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

При расчете зависимостей на рис. 2 заземляющие отверстия не вводились. Видно, что для конструкции

Величины максимальных температур T в канале транзистора (ширины источников (затворов) $150\ \mu\text{m}$, мощность каждого источника $750\ \mu\text{W}$)

№ п/п	Шаг, μm	Подложка			Отверстие $W_x \times W_y$, μm	Покрытие			T , °C
		Материал	Толщина, μm	Теплопроводность, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		Материал	Толщина, μm	Теплопроводность, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	
1	60	SiC	100	490 350	Нет	–	–	–	51.27 63.91
2	45	SiC	100	490 350	Нет	–	–	–	56.43 66.62
3	60	Si	50	150	Нет	–	–	–	95.76
4	45	Si	50	150	Нет	–	–	–	108.0
5	60	SiC	100	490 350	25×50	Au	5	200	55.24 68.73
6	45	SiC	100	490 350	15×50	Au	5	200	60.49 75.88
7	60	Si	50	150	35×130	Au АПП	1 5	200 1500	71.97
8	45	Si	50	150	25×130	Au АПП	1 5	200 1500	74.39
9	45	Si	50	150	25×130	Au АПП	1 5	200 1000	81.78
10	45	Si	50	150	25×130	Au АПП	1 5	200 500	97.519
11	45	Si	50	150	25×130	Au АПП	1 10	200 500	83.09
12	45	Si	50	150	25×130	Au АПП	1 10	200 1000	71.03
13	45	Si	50	150	25×130	Au АПП	1 10	200 1500	65.99
14	45	SiC	100	490 350	25×130	Au АПП	1 5	200 1500	56.26 64.97

транзистора, схематично показанной на рис. 1, в транзисторах на SiC-подложках максимальная температура сильно зависит от итоговой (совместно с буфером) толщины гетероструктуры (рост температуры на 30–55%). При этом она всегда оказывается значительно (в 1.5–2 раза) ниже максимальной температуры в транзисторе с такой же топологией, но на Si-подложке. Максимальная температура в последнем, естественно, от толщины гетероструктуры практически не зависит ввиду близости величин теплопроводностей Si и GaN. Создание заземляющих отверстий, покрытых золотом ($\lambda = 200\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), несколько, но совсем не кардинально изменяет ситуацию (№ 1–6 в таблице). Максимальная температура в транзисторах на SiC-подложках немного (приблизительно на 10%) возрастает. Существенно ситуация меняется, когда в заземляющих от-

верстиях транзисторов на Si-подложках поверх тонкого слоя золота (в расчетах $1\ \mu\text{m}$) наносится (осаждается) однородное по толщине алмазоподобное покрытие с высокой теплопроводностью (№ 7,8). В этом случае максимальная температура прибора заметно снижается, оказываясь на уровне максимальной температуры в приборах на SiC-подложках с заземляющими отверстиями (№ 5,6).

Следует отметить, однако, что подобное улучшение теплоотвода в приборах на Si-подложках накладывает довольно жесткие требования на качество АПП: уменьшение их теплопроводности существенно повышает максимальную температуру транзистора (№ 8–10). Однако этот недостаток можно компенсировать, увеличивая толщину покрытия (№ 11–13). В то же время из-за высокой теплопроводности карбида кремния вве-

дение АПП в заземляющих отверстиях транзисторов на SiC-подложках не слишком эффективно (№ 6, 14), максимальная температура снижается незначительно.

Для формирования алмазоподобных покрытий на Au-металлизации стенок заземляющих отверстий при обеспечении достаточно низкой температуры процесса, не превышающей 300°C, подходит метод магнетронного напыления углерода либо метод плазмохимического осаждения из газовой фазы [5,10]. Для нанесения АПП используют CVD-процесс, основанный на разложении углеводородов в смеси с водородом и последующем осаждении алмаза на нагретую подложку [6]. Рабочая смесь газов диссоциирует в вакуумной камере под действием СВЧ-плазмы, давление газа в камере 30–100 Торг, скорость осаждения 10–20 $\mu\text{m/h}$. Характерный температурный коэффициент линейного расширения алмаза $(9-5) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ почти на порядок меньше аналогичного коэффициента для золота $(14 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$. По этой причине контакт АПП с Au осуществляется через адгезионный слой (титан, тантал, карбид титана) с высоким сродством к углероду, образующий с ним высокоадгезионные соединения в вакууме или в инертной атмосфере [7]. Далее в АПП, закрывающем обратную сторону подложки, методом фотолитографии вскрывается окно для обеспечения контакта припоя с металлизацией обратной стороны подложки.

Полученные результаты показывают, что использование алмазоподобных покрытий на стенках заземляющих отверстий в ряде случаев может быть эффективным способом снижения максимальной температуры в канале полевых транзисторов на основе нитрид-галлиевых гетероструктур, выращенных на Si-подложках. Температура в канале таких приборов может быть близка к температуре в канале транзисторов на SiC-подложках.

Однако если будет найден способ создания более тонких гетероструктур на SiC-подложках для изготовления GaN-транзисторов без уменьшения подвижности и поверхностной плотности электронов, то по эффективности отвода тепла такие структуры будут вне конкуренции независимо от топологии транзистора.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Wang, F. Wang, S. Li, T.Y. Huang, A.S. Ahmed, N.S. Mannem, J. Lee, E. Garay, D. Munzer, C. Snyder, S. Lee, H.T. Nguyen, M.E.D. Smith, *Power amplifiers performance survey 2000-present* [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html
- [2] B. Romanczyk, S. Wienecke, M. Guidry, H. Li, E. Ahmadi, X. Zheng, S. Keller, U.K. Mishra, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **65** (1), 45 (2018). DOI: 10.1109/TED.2017.2770087
- [3] Nidhi, S. Dasgupta, S. Keller, J.S. Speck, U.K. Mishra, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **32** (12), 1683 (2011). DOI: 10.1109/LED.2011.2168558
- [4] Y. Tang, K. Shinohara, D. Regan, A. Corrion, D. Brown, J. Wong, A. Schmitz, H. Fung, S. Kim, M. Micovic, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **36** (6), 549 (2015). DOI: 10.1109/LED.2015.2421311
- [5] В. Ланин, Е. Телеш, *Силовая электроника*, № 3, 120 (2008).
- [6] В. Ральченко, В. Конов, *Электроника: наука, технология, бизнес*, № 4, 58 (2007).
- [7] В.Л. Ланин, А.П. Достанко, Е.В. Телеш, *Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники* (Изд. центр БГУ, Минск, 2007).
- [8] O. Seok, Y.-H. Choi, M. Kim, J. Kim, B. Hong, M.-K. Han, in *CS MANTECH Conf.* (Portland, Oregon, USA, 2010), p. 229.
- [9] P.C. Chao, K. Chu, J. Diaz, C. Creamer, S. Sweetland, R. Kallaher, C. McGray, G.D. Via, J. Blevins, *MRS Adv.*, **1** (2), 147 (2016). DOI: 10.1557/adv.2016.176
- [10] А.А. Гиппиус, Ж.Р. Паносян, К.Д. Турьян, Ю.А. Концевой, Д.Ф. Перн, Е.В. Енгибарян, С.С. Восканян, А.В. Степанян, *Способ получения алмазоподобных пленок для инкапсуляции солнечных фотоэлектрических элементов*, патент № 2244983 С1 (RU) (начало действия 14.07.2003, опубл. 20.01.2005).