07

Тепловые ограничения для гетероструктурных AlGaN/GaN-транзисторов на алмазных подложках

© И.В. Пашковская, А.Б. Пашковский, Е.В. Терешкин

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

Поступило в Редакцию 29 октября 2025 г.
В окончательной редакции 29 декабря 2025 г.
Принято к публикации 4 февраля 2026 г.

Проведен анализ влияния толщины и состава буферных слоев на тепловые свойства гетероструктурных AlGaN/GaN-транзисторов на алмазных подложках. Показано, что, несмотря на гораздо более высокую теплопроводность алмазных подложек, необходимость использования более толстых буферных слоев, чем в случае подложек из карбида кремния, в частности слоя AlGaN толщиной порядка десятых долей микрометра, может при существенном уменьшении средней температуры транзистора приводить практически к тем же температурам перегрева активной области прибора.

Ключевые слова: GaN полевой транзистор, температура канала, алмазная подложка.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.10.62734.20548

В последние годы в области создания полевых транзисторов на основе нитрид-галлиевых гетероструктур достигнут огромный прогресс [1–5]. Одним из важнейших достоинств AlGaN/GaN-гетероструктуры является возможность ее выращивания на SiC-подложках, имеющих по сравнению с другими полупроводниковыми материалами очень высокую теплопроводность, которая при температуре 300 K в зависимости от политипа SiC оценивается в районе $350-490\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$. Единственным физическим ограничением, которое не позволяет полностью использовать все возможности подложки, является собственная относительно низкая теплопроводность тонких слоев нитрида галлия — в районе $110-150\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$ [6,7]. Хотя есть данные, что она может быть существенно выше: $220-260\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$ [8,9]. За счет этого даже при относительно малой толщине слоя GaN, равной $0.5\,\mu$m, максимальная температура в канале транзистора заметно возрастает (на 40–50 %) даже без учета переходных сопротивлений (сопротивлений Капицы) на гетерограницах или просто резких границах разных материалов. Несмотря на замечательную теплопроводность SiC-подложек, они имеют высокую стоимость, и их широкое практическое применение затруднено определенными технологическими сложностями при обработке. Предполагается, что избежать этих проблем и существенно улучшить отвод тепла от активной области транзистора можно путем переноса AlGaN/GaN-гетероструктур на подложки из алмаза [10,11], и это направление в последние годы интенсивно развивается, хотя существенный прогресс в характеристиках приборов пока не достигнут. Также предполагается, что изначально гетероструктура, переносимая на алмаз, будет выращиваться на кремниевых подложках и иметь все характерные особенности буфера. В свою очередь на SiC-подложке можно выращивать очень хорошие по электрофизическим характеристикам гетероструктуры с тонким GaN-буфером. Более того, в работе [12] GaN/AlN-гетероструктура была выращена вообще с пренебрежимо малой толщиной буфера. В то же время при выращивании AlGaN/GaN-гетероструктур на кремниевых подложках буфер обычно приходится делать толщиной около $2\,\mu$m, используя при этом слои AlGaN с заведомо более низкой теплопроводностью [7], хотя есть данные и по применению очень тонких буферных слоев [13]. Целью настоящей работы являются теоретические оценки влияния особенностей конструкций буфера на тепловые свойства AlGaN/GaN-транзисторов.

Расчеты проводились для идеализированной (без электродов и заземляющих отверстий) планарной конструкции транзистора, активная область которого содержит восемь источников тепла и удалена от боковых граней кристалла на $200\,\mu$m, что соответствует стандартной топологии мощного транзистора сантиметрового диапазона длин волн с восемью затворами. Для удобства оценок температура на нижней грани кристалла задавалась равной нулю. В этом случае получаемая в расчетах температура совпадает с перегревом транзистора. Как показывают расчеты [14], основной вклад в разогрев как гомо-, так и гетероструктурных полевых транзисторов вносит узкая область между затвором и стоком прибора, в которой интенсивность выделения тепла на порядок превосходит интенсивность выделения тепла в других областях транзистора. Для гетероструктурных AlGaN/GaN-приборов размеры этой области тепловыделения составляют примерно $0.1-0.25\,\mu$m.

Размер области максимального тепловыделения и ее положение между затвором и стоком могут зависеть от режима работы прибора и особенностей транзисторной структуры. Кроме того, и в самой области тепловыделения распределение тепловых источников крайне

неоднородно. При этом пренебрежение существенным отличием размеров области максимального тепловыделения от расстояния исток–сток может приводить к значительным погрешностям при определении критических режимов работы прибора (см., например, [11]). Отдельным и очень важным вопросом является влияние на тепловые свойства переходных тепловых сопротивлений. Этому вопросу посвящена подробная работа [15], однако, к сожалению, автор в ней пренебрег учетом реальных размеров области тепловыделения.

В настоящей работе при решении стационарного уравнения теплопроводности размеры области тепловыделения (источника тепла) в трехмерных расчетах имели следующие значения: высота $h = 0.05\,\mu$m, длина $l = 0.20\,\mu$m, а ширина W соответствовала ширине единичного затвора транзистора. При этом источники тепла располагались непосредственно под поверхностью кристалла на расстоянии, соответствующем расстоянию между единичными затворами в транзисторе (периоду структуры). Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры не учитывалась.

Удельная мощность источников тепла при расчетах задавалась равной $Q_0 = 5$ W/mm, что в случае GaN-прибора, работающего с КПД $\eta = 50\,\%$, соответствует его выходной СВЧ-мощности $P_{out} = 5$ W/mm.

Температуры, соответствующие другим режимам работы транзистора (η, P_{out}), ввиду линейности уравнения теплопроводности и с учетом принятых приближений могут быть получены из приведенных в настоящей работе значений T с помощью выражения $T_\eta = TP_{out}(100\,\% - \eta)/(\eta Q_0)$.

Так, например, для транзистора, работающего с КПД 33 %, при мощности на выходе $P_{out} = 5$ W/mm температура перегрева увеличится вдвое.

На рис. 1 приведены зависимости максимальной температуры в активной области (канале) исследуемого транзистора со стандартной для мощного прибора сантиметрового диапазона длин волн шириной единичного затвора $W = 150\,\mu$m для AlGaN/GaN-гетероструктуры на различных подложках в зависимости от толщины идеального GaN-буфера с теплопроводностью $\lambda_{\mathrm{GaN}} = 140\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$. Рассмотрены также случаи с различными значениями переходного теплового сопротивления между буфером и подложкой.

Следует отметить, что участкам кривых с резкими изменениями температуры перегрева соответствуют малые (менее $0.5\,\mu$m) толщины буфера.

Проанализируем полученные зависимости для случая отсутствия переходного теплового сопротивления между буфером и подложкой. Как и следовало ожидать, максимальный перегрев прибора на кремниевой подложке $\left(\lambda_{\mathrm{Si}} = 150\,\mathrm{W/(m\cdot K)}\right)$ не зависит от толщины буфера. Для прибора на SiC-подложке $\left(\lambda_{\mathrm{SiC}} = 490\,\mathrm{W/(m\cdot K)}\right)$ при увеличении толщины буфера с 0.1 до $3\,\mu$m наблюдается увеличение температуры перегрева на 60 %. Для транзистора на алмазной подложке с максимально возможной, а скорее завышенной для полиалмаза теплопроводностью $\lambda_{\mathrm{C}} = 2000\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$ температура перегрева при увеличении толщины GaN-буфера с 0.1 до $3\,\mu$m возрастает более чем в 2.5 раза.

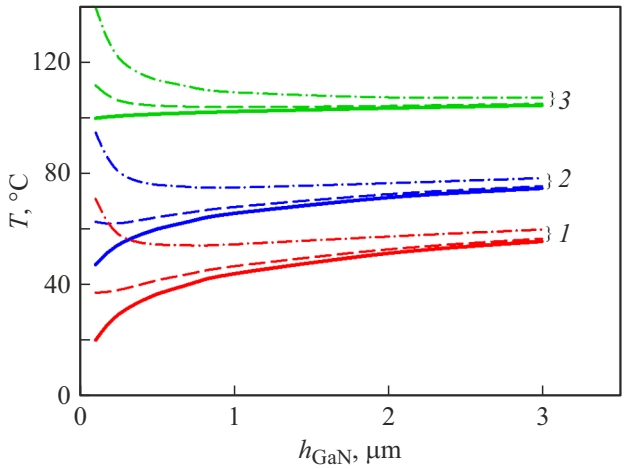

Рис. 1. Зависимость максимальной температуры перегрева в канале (перегрева канала) от толщины GaN-буфера в транзисторах на различных подложках. *1* — алмаз, теплопроводность $\lambda_{\mathrm{C}} = 2000\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$, *2* — карбид кремния, теплопроводность $\lambda_{\mathrm{SiC}} = 490\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$, *3* — кремний, теплопроводность $\lambda_{\mathrm{Si}} = 150\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$. Сплошные линии — переходное тепловое сопротивление между буфером и подложкой отсутствует ($R_t = 0$), штриховые — $R_t = 2\cdot 10^{-9}$ K/W, штрих-пунктирные — $R_t = 10^{-8}$ K/W. Толщина алмазной и карбид-кремниевой подложек $100\,\mu$m, кремниевой $50\,\mu$m. Ширина затвора транзистора $150\,\mu$m, расстояние между затворами $30\,\mu$m.

Картина заметно меняется, когда между подложкой и буфером появляется переходное тепловое сопротивление. Даже при значениях $R_t = 2\cdot 10^{-9}$ K/W, что соответствует переходному слою на границе буфер–подложка толщиной 2 nm с теплопроводностью $\lambda = 1\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$, из рис. 1 видно, как существенно увеличивается температура перегрева при малых толщинах GaN-буфера. Если в случае тонких буферных слоев в расчетах без учета переходного сопротивления преимущество прибора на алмазной подложке в перегреве составляло более 100 %, то даже при небольшом тепловом сопротивлении на границе буфер–подложка оно составляет менее 70 %, а увеличение переходного теплового сопротивления до величины $R_t = 10^{-8}$ K/W приводит к тому, что максимальная температура перегрева при переходе с алмазной подложки на карбид-кремниевую возрастает менее чем на 40 %. По сути дела, уже этот простейший расчет ставит вопрос о перспективности работ по переносу нитрид-галлиевых гетероструктур на алмазные подложки.

Транзисторы на кремниевых подложках часто делают на структурах с толстым сложным буфером, содержащим слои AlGaN с низкой теплопроводностью [16]. Ввиду отсутствия точных данных примем для дальнейших расчетов теплопроводность слоя AlGaN рав-

ной 14 W/(m · K), что ровно в 10 раз меньше, чем у GaN. В таком случае, даже если не учитывать отражение фононов от резких границ раздела, полагая сами слои идеальными, максимальная температура в канале транзистора на алмазной подложке, составной буфер которого содержит слои GaN и AlGaN с толщинами 1.5 и 0.5 μm соответственно, становится практически такой же, как температура в канале прибора на карбид-кремниевой подложке с однородным GaN-буфером, а при наличии граничных тепловых сопротивлений даже чуть выше (рис. 2). При этом средняя температура такого транзистора на алмазной подложке будет заметно ниже средней температуры прибора на подложке SiC (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что транзистор на алмазной подложке имеет одно неоспоримое реальное преимущество перед прибором на карбид-кремниевой подложке: при уменьшении расстояния между затворными пальцами максимальная температура в нем меняется слабо (следствие распределений на рис. 2), что, возможно, позволит создавать более компактные высокочастотные мощные приборы.

Периодически, особенно для демонстрации эффективности теплоотвода, в транзисторах на алмазных подложках применяют тепловизор [11,16]. Однако анализируемая тепловизором область имеет размер несколько микрометров [11], что, вообще говоря, больше не только характерных размеров области тепловыделения, а зачастую и расстояния исток–сток транзистора. Это может приводить к тому (особенно, если учесть, что в область

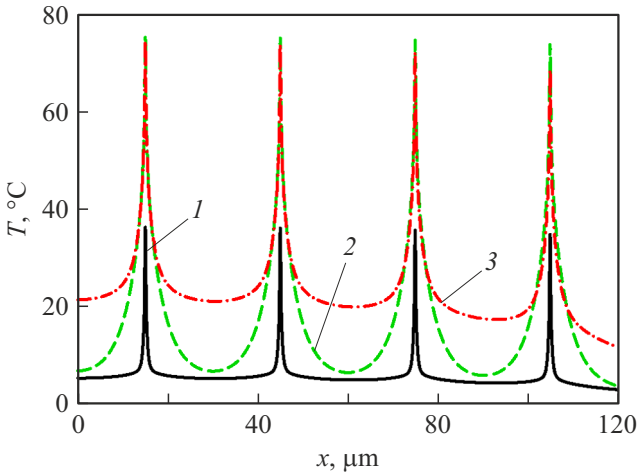

Рис. 2. Распределение температуры перегрева в канале транзистора (у поверхности гетероструктуры) в центральном сечении. *1* — алмазная подложка и GaN-буфер толщиной 0.5 μm, переходное тепловое сопротивление отсутствует, *2* — алмазная подложка, GaN-буфер толщиной 1.5 μm и слой AlGaN толщиной 0.5 μm в обрамлении двух слоев толщиной по 0.01 μm с тепловым сопротивлением $R_t = 10^{-8}$ K/W каждый, *3* — карбид-кремниевая подложка, GaN-буфер толщиной 1.0 μm и слой с тепловым сопротивлением $R_t = 10^{-8}$ K/W. Ширина затвора транзистора 150 μm, расстояние между затворами 30 μm.

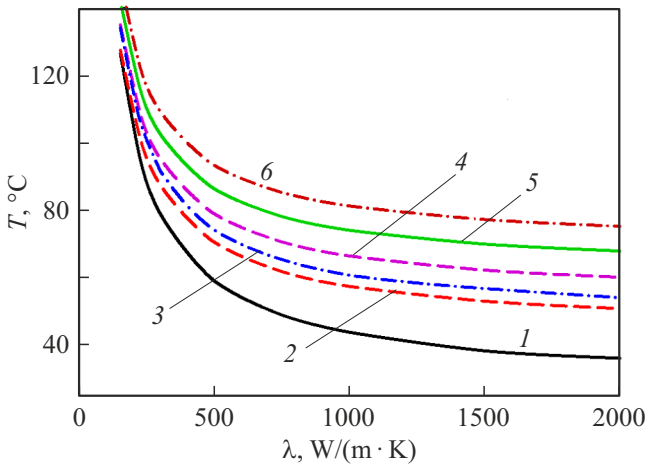

Рис. 3. Зависимость максимальной температуры перегрева в канале (перегрева канала) от теплопроводности подложки толщиной 100 μm. Кривые *1–6* пояснены в таблице.

пятна тепловизора попадают металлические контакты), что при анализе тепловизором у транзистора на алмазной подложке максимальная температура (а на самом деле усредненная по размерам области анализа) будет заметно ниже, чем в приборе на SiC-подложке. В действительности же в области с размерами порядка долей микрометра максимальная температура, которая и определяет деградацию, в транзисторе на алмазной подложке может быть выше, чем в приборе на SiC-подложке, или практически такой же. Следует также учесть, что при любом анализе температуры канала по измерениям на поверхности транзистора результаты будут искажаться защитными покрытиями на поверхности прибора.

Приведенные выше оценки были сделаны для идеализированного полиалмаза с несколько завышенной по сравнению с реальной теплопроводностью, однако это слабо влияет на результаты, поскольку как при толстом составном буфере, так и при тонком GaN-буфере рост теплопроводности подложки начиная с некоторых значений (примерно 750–1000 W/(m · K)) слабо влияет на перегрев прибора (см. рис. 3 и таблицу).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при изготовлении AlGaN/GaN гетероструктурных полевых транзисторов на алмазных подложках или их переносе на эти подложки необходимо создание буферных GaN-слоев толщиной не более 0.5–1 μm с низким (менее $2 \cdot 10^{-9}$ K/W) переходным сопротивлением буфер–подложка. В противном случае эти транзисторы не будут иметь существенных преимуществ по тепловым характеристикам перед приборами на подложках из карбида кремния. Следует отметить, что если такая революционная технология будет разработана, то она должна быть по каким-то причинам неприменима к приборам на карбид-кремниевых подложках, иначе вопрос целесообразности перехода на алмазные подложки останется открытым.

Пояснение к кривым, представленным на рис. 3 (ширина затвора транзистора 150 μm, расстояние между затворами 30 μm)

Номер кривой	Толщина слоя GaN, μm	Толщина слоя AlGaN, μm	Переходное тепловое сопротивление, K/W
1	0.5	–	–
2	2.0	–	–
3	1.0	–	10^{-8}
4	1.75	0.25	–
5	1.5	0.5	–
6	1.5	0.5	$2 \cdot 10^{-8}$

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]. 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] N. 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] M. Ćwikliński, P. Brückner, S. Leone, S. Krause, C. Friesicke, H. Maßler, R. Quay, O. Ambacher, in *2020 IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp. (IMS)* (IEEE, 2020), p. 1117–1120. DOI: 10.1109/IMS30576.2020.9224041

[6] S. Adaschi, *Properties of semiconductor alloys: group-IV, III–V and II–VI semiconductors* (John Wiley & Sons, 2009).

[7] W. Liu, A.A. Balandin, J. Appl. Phys., **97**, 073710 (2005). DOI: 10.1063/1.1868876

[8] N. Killat, M. Montes, J.W. Pomeroy, T. Paskova, K.R. Evans, J. Leach, X. Li, Ü. Özgür, H. Morkoç, K.D. Chabak, A. Crespo, J.K. Gillespie, R. Fitch, M. Kossler, D.E. Walker, M. Trejo, G.D. Via, J.D. Blevins, M. Kuball, IEEE Electron Dev. Lett., **33** (3), 366 (2012). DOI: 10.1109/LED.2011.2179972

[9] L. Mitterhuber, R. Hammer, T. Dengg, K. Fladischer, J. Spitaler, in *2019 25th Int. Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)* (IEEE, 2019), p. 1. DOI: 10.1109/THERMINIC.2019.8923823

[10] J.C. Mendes, M. Liehr, C. Li, Materials, **15** (2), 415 (2022). DOI: 10.3390/ma15020415

[11] K. Fan, J. Guo, Z. Huang, Y. Xu, Z. Huang, W. Xu, Q. Wang, Q. Lin, X. Li, H. Liu, X. Liu, Moore More, **2**, 8 (2025). DOI: 10.1007/s44275-024-00022-z

[12] J. Lu, J.T. Chen, M. Dahlqvist, R. Kabouche, F. Medjdoub, J. Rosen, O. Kordina, L. Hultman, Appl. Phys. Lett., **115** (22), 221601 (2019). DOI: 10.1063/1.5123374

[13] S. Rennesson, M. Leroux, M.A. Khalfioui, M. Nemoz, S. Chenot, J. Massies, L. Largeau, E. Dogmus, M. Zegaoui, F. Medjdoub, F. Semond, Phys. Status Solidi A, **215** (9), 1700640 (2018). DOI: 10.1002/pssa.201700640

[14] T. Sadi, R.W. Kelsall, N.J. Pilgrim, IEEE Trans. Electron Dev., **53** (12), 2892 (2006). DOI: 10.1109/TED.2006.885099

[15] D.I. Babić, IEEE Trans. Electron Dev., **61** (4), 1047 (2014). DOI: 10.1109/TED.2014.2306936

[16] Е.М. Колобкова, И.С. Езубченко, М.Л. Занавескин, в сб. *15-я Междунар. науч.-практ. конф. „Мокеровские чтения“* (НИЯУ МИФИ, М., 2024), с. 129–130.