

УДК 621.382.3

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-57-73>

EDN TTUFNR



ОБЗОР

Тепловые и механические механизмы деградаций в гетероструктурных полевых транзисторах на нитриде галлия

В.М. Миннебаев[@]

АО «Микроволновые системы», Москва, 105122 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: vm@mwsystems.ru

Резюме

Цели. Гетероструктурные полевые транзисторы на нитриде галлия (GaN HFET, heterostructural field-effect transistor) являются наиболее перспективными полупроводниковыми устройствами для силовой и сверхвысокочастотной электроники. За последние 10–15 лет GaN HFET прочно заняли место в аппаратуре радиоэлектронных средств передачи, приема и обработки информации, а также в изделиях силовой электроники за счет существенных преимуществ в энергетических и тепловых параметрах. При этом вопросы обеспечения их долговременной надежности стоят не менее остро, чем для приборов на других полупроводниковых материалах. Целью исследования является обзор тепловых и механических механизмов деградаций в GaN HFET, обусловленных физико-химическими особенностями применяемых материалов, ростовыми и пост-ростовыми процессами, и способов купирования этих механизмов при разработке, производстве и эксплуатации.

Методы. Основным методом исследования является аналитический обзор результатов публикаций широкого круга специалистов в области физики полупроводников, технологии производства гетероэпитаксиальных структур и активных приборов на их основе, моделирования и проектирования модулей и аппаратуры, надежности и эксплуатации.

Результаты. Описаны причины снижения показателей качества GaN HFET, вызываемые тепловыми перегревами, механическими деградациями, проблемами с горячими электронами и фононами в нитриде галлия, а также представлен обзор исследований, посвященных этим явлениям и методам снижения их воздействия на технические параметры транзисторов и показатели качества.

Выводы. По итогам исследования отмечено, что сильные электрические поля и высокая удельная тепловая нагруженность мощных GaN HFET вызывают физические, поляризационные, пьезоэлектрические и тепловые явления, способные приводить к перераспределению механических напряжений в активной области, деградации электрических характеристик и снижению надежности транзистора в целом. Установлено, что наличие полевой платы и пассивирующего слоя из нитрида кремния SiN приводят к снижению значений механических напряжений в области затвора в 1.3–1.5 раз, эффекты тепловой деградации в усилителях класса АВ выражены сильнее, чем эффекты воздействия сильных полей в усилителях класса Е, при температуре активной зоны GaN HFET более 320–350 °С резко снижается время средней наработки до отказа.

Ключевые слова: GaN HFET, гетероструктура, двухканальный HFET, HFET со связанными каналами, ток, саморазогрев, теплопроводность, деградация, легирование

• Поступила: 14.05.2024 • Доработана: 12.07.2024 • Принята к опубликованию: 11.02.2025

Для цитирования: Миннебаев В.М. Тепловые и механические механизмы деградаций в гетероструктурных полевых транзисторах на нитриде галлия. *Russian Technological Journal*. 2025;13(2):57–73. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-57-73>, <https://elibrary.ru/TTUFNR>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Thermal and mechanical degradation mechanisms in heterostructural field-effect transistors based on gallium nitride

Vadim M. Minnebaev @

Microwave Systems, Moscow, 105122 Russia

@ Corresponding author, e-mail: vm@mwsystems.ru

Abstract

Objectives. Gallium nitride heterostructural field-effect transistors (GaN HFET) are among the most promising semiconductor devices for power and microwave electronics. Over the past 10–15 years, GaN HFETs have firmly established their position in radio-electronic equipment for transmitting, receiving, and processing information, as well as in power electronics products, due to their significant advantages in terms of energy and thermal parameters. At the same time, issues associated with ensuring their reliability are no less acute than for devices based on other semiconductor materials. The aim of the study is to review the thermal and mechanical mechanisms of degradation in GaN HFETs due to the physicochemical characteristics of the materials used, as well as their corresponding growth and post-growth processes. Methods for preventing or reducing these mechanisms during development, production, and operation are evaluated.

Methods. The main research method consists in an analytical review of the results of publications by a wide range of specialists in the field of semiconductor physics, production technology of heteroepitaxial structures and active devices based on them, as well as the modeling and design of modules and equipment in terms of their reliable operation.

Results. As well as describing the problems of GaN HFET quality degradation caused by thermal overheating, mechanical degradation, problems with hot electrons and phonons in gallium nitride, the article provides an overview of research into these phenomena and methods for reducing their impact on transistor technical parameters and quality indicators.

Conclusions. The results of the study show that strong electric fields and high specific thermal loading of high-power GaN HFETs can cause physical, polarization, piezoelectric and thermal phenomena that lead to redistribution of mechanical stresses in the active region, degradation of electrical characteristics, and a decrease in the reliability of the transistor as a whole. It is shown that the presence of a field-plate and a passivating SiN layer leads to a decrease in the values of mechanical stress in the gate area by 1.3–1.5 times. The effects of thermal degradation in class AB amplifiers are more pronounced than the effects of strong fields in class E amplifiers; moreover, the mean time to failure sharply decreases at GaN HFET active zone temperatures over 320–350°C.

Keywords: GaN HFET, heterostructure, dual-channel HFET, coupled-channel HFET, current, self-heating, thermal conductivity, degradation, doping

• Submitted: 14.05.2024 • Revised: 12.07.2024 • Accepted: 11.02.2025

For citation: Minnebaev V.M. Thermal and mechanical degradation mechanisms in heterostructural field-effect transistors based on gallium nitride. *Russian Technological Journal*. 2025;13(2):57–73. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-57-73>, <https://elibrary.ru/TTUFNR>

Financial disclosure: The author has no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Достижения последних лет в создании силовых и мощных устройств сверхвысоких частот (СВЧ) в основном связаны с III-нитридными материалами, приборами и устройствами на их основе [1–3]. Полевые гетероструктурные транзисторы на нитриде галлия (GaN) являются наиболее перспективными для мощных СВЧ и силовых применений вследствие достаточно высокой подвижности в них электронов, большой плотности носителей заряда и высоких пробивных напряжений, что особенно ярко проявляется при их работе в импульсных режимах [4].

В конце 1960-х гг. впервые была предложена идея накопления зарядов на интерфейсе гетероперехода, приводящая к возможности создания усилительного устройства. Однако лишь после разработки в 1970-х гг. методов высококачественного высокоточного эпитаксиального роста задача превращения полевого транзистора (field-effect transistor, FET) в гетероструктурный полевой транзистор (heterostructural field-effect transistor, HFET), также известный как транзистор с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, HEMT), могла быть решена [5].

В 1978 г. впервые продемонстрировано достижение высокой подвижности электронов, полученной с помощью модулирующего допирования, а в 1980 г. Университет Иллинойса показал и прибор, названный модулированно-легированным полевым транзистором (modulated-doped field-effect transistor, MODFET). В течение 1980–2000-х гг. усилия инженеров и ученых разных стран привели к появлению более сложных устройств, таких как полевые транзисторы с двойным гетеропереходом [6]. Простейшая структура GaN/AlGaN HFET, включающая нитрид алюминия-галлия AlGaN, показана на рис. 1 [7]. Многослойные гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN/AlGaN стали основой новой компонентной базы твердотельной СВЧ-электроники.

Эта структура – не единственная для GaN HFET. Например, структура InAlN/AlN/GaN, включающая нитрид индия-алюминия InAlN, – еще одна конструкция, используемая для этой цели. Хотя обе структуры обладают поляризацией, разновидность AlGaN имеет более сильную пьезоэлектрическую поляризацию, эффект от которой может быть усилен

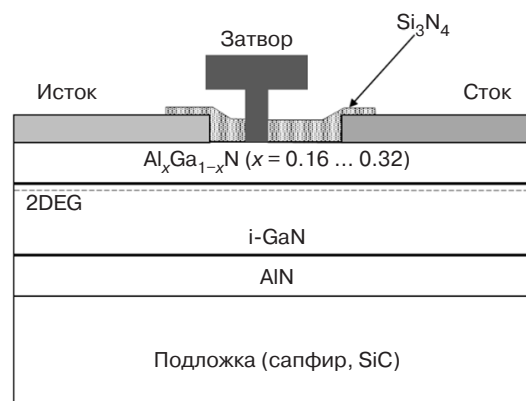


Рис. 1. Простейшая структура GaN/AlGaN HFET. 2DEG (two-dimensional electron gas) – двумерный электронный газ, AlN – буферный слой нитрида алюминия, минимизирующий различия в параметрах кристаллической решетки гетероструктуры и подложки, SiC – подложка из карбида кремния

вследствие структурных характеристик. Например, в случае GaN/AlGaN пьезоэлектрический эффект проявляется сильнее, чем в случае InAlN/AlN из-за несоответствия решеток между слоями [8]. В то же время спонтанная поляризация для структуры InAlN/AlN/GaN играет единственную роль за исключением случаев, когда используется интерфейсный слой нитрида алюминия AlN [9].

В зависимости от структуры GaN/AlGaN HFET можно разделить на три основных типа (рис. 2). Первая структура, которая является классической типичной, состоит из одного канала двумерного электронного газа (2DEG), при этом классической она является лишь потому, что другие структуры HFET обычно сравнивают с ней для оценки улучшения свойств.

Типовая структура HFET начинается со слоя AlN, выращенного на подложке (Al_2O_3 , SiC, Si), за которым следует толстый буферный слой GaN. Первые слои буфера должны действовать как полуизолирующие, и это является причиной использования GaN на AlN (рассогласование решеток). После выращивания GaN продолжают рост разделительного слоя AlN. Обнаружено, что высокочастотные характеристики AlGaN/GaN HFET ухудшаются из-за переноса электронов с высокой энергией от GaN к барьеру AlGaN. Слой AlN нужно выращивать между ними для предотвращения перемещения электронов с высокой

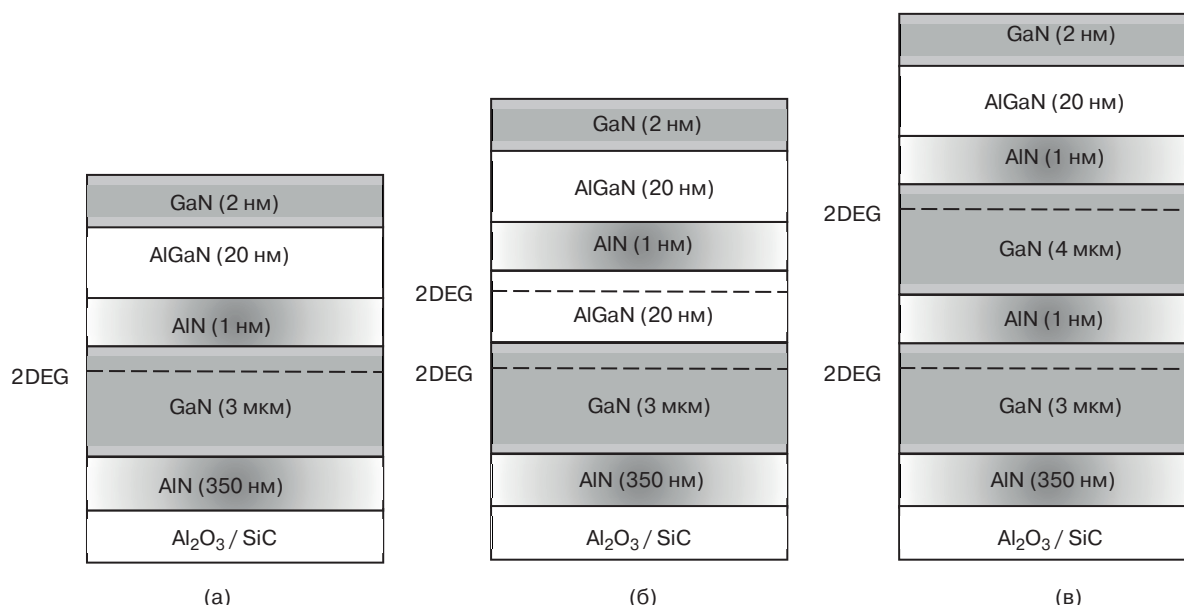


Рис. 2. Условное схематическое изображение гетероструктуры GaN HFET:
(а) одноканальная (классическая), (б) двухканальная, (в) связанная

энергией в слой AlGaIn, удерживая электроны в GaN и создавая 2DEG высокой плотности. Однако этот слой не должен быть толстым (обычно порядка 2 нм) из-за несоответствия решеток GaN и AlN, что вызывает релаксацию деформации и растрескивание [10]. Проникновение электронов в материал барьера фактически изменяет эффективную массу и скорость рассеяния электронов, поэтому он используется для лучшего ограничения канала 2DEG вследствие более широкой запрещенной зоны. Затем AlGaIn выращивают таким образом, чтобы заставить электроны формировать канал в GaN вследствие разницы поляризации между ним и слоем GaN ниже. Последний слой GaN толщиной 2 нм используется для защиты AlGaIn от окисления. Кроме того, лучший металлический контакт получается к GaN, чем к AlGaIn. Эта структура и показана на рис. 2а.

Еще один тип структуры, используемый для HFET – двухканальный HFET (рис. 2б), имеющий более высокую плотность электронов. Третьим типом структуры HFET, показанной на рис. 2в, является HFET со связанными каналами. В этой структуре, в отличие от двухканальной, два канала находятся на одном уровне энергии, поэтому они могут быть связаны, образуя канал, называемый трехмерным электронным газом или 3DEG.

1. ИСТОЧНИКИ И МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ GAN HFET

Из-за сильных электрических полей, присутствующих в GaN HFET, а также взаимодействия тепловых, физических, поляризационных явлений и т.д., в HFET существует несколько путей

(направлений) деградации, вызываемых перегревом, приводящим к снижению удельного тока, а также к росту тока утечки затвора и ограничению надежности. Рассеивание мощности, связанное с взаимодействиями горячих электронов и горячих фононов, может быть вызвано несколькими механизмами. В целом ряде работ были исследованы эти механизмы деградации и описаны способы снижения их воздействия. В зависимости от времени работы полупроводникового прибора существуют три основных периода отказов (рис. 3) [11]. Как видно, наличие отказа устройства не зависит от времени его работы, и все разработчики стремятся к исключению отказов на стадиях I и II, а также максимальному их снижению на периоде старения.

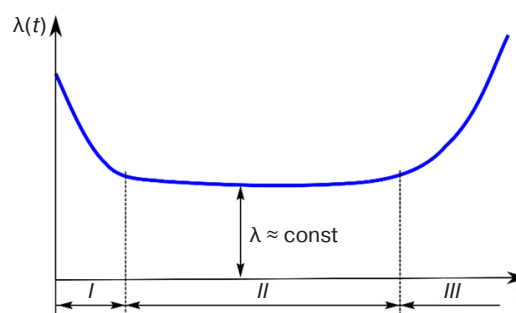


Рис. 3. Типовая зависимость интенсивности отказов λ от времени работы t :
I – период приработки и отказов некачественных изделий;
II – период нормальной эксплуатации (интенсивность отказов приблизительно постоянна);
III – период старения (отказы вызваны износом и/или старением материалов)

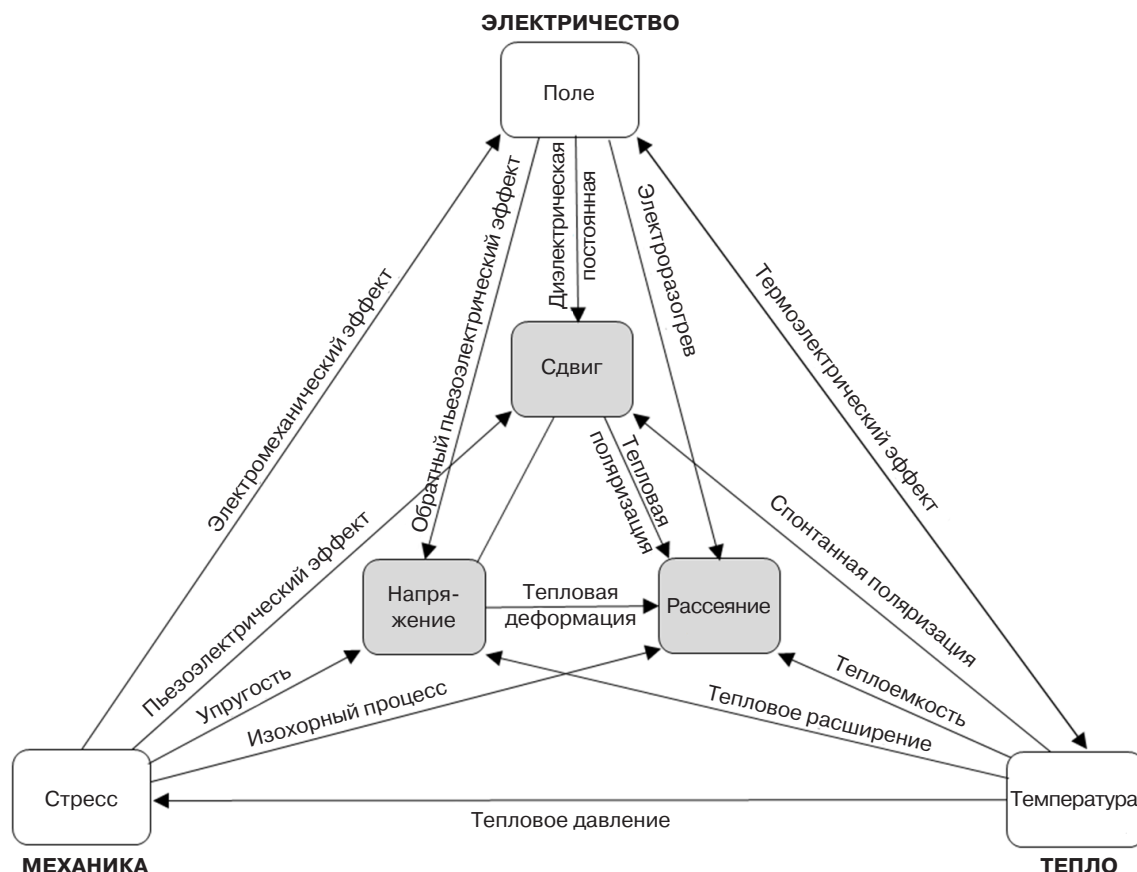


Рис. 4. Полный «волшебный треугольник взаимодействий»

Для описания вышеупомянутых деградаций определимся с их механизмами. Хотя классифицировать все механизмы деградации достаточно сложно, для лучшего понимания разделим их на три основных группы: электрические, тепловые и механические. Эти механизмы и их взаимосвязь показаны в так называемом «волшебном треугольнике взаимодействий», демонстрирующем связи между электрическим, механическим и тепловым взаимодействиями (рис. 4) [7].

На примере простейшей структуры GaN/AlGaN HFET покажем расположение основных источников отказов транзисторов, наиболее часто проявляющихся при работе (рис. 5).

Рис. 4 и 5 показывают, что механизмы отказов в GaN HFET тесно взаимосвязаны. При этом источники 1 и 4 свойственны GaN-приборам вследствие наличия в гетероструктурах AlGaN/GaN поляризационных полей – спонтанной и пьезоэлектрической, источники отказов 2 и 3 обусловлены наличием горячих электронов, возникающих при высоких уровнях напряжения питания, а источники 5–8 активируются при повышении температуры [13].

Вопросы, связанные с повышением надежности, и способы их решения требуют понимания механизмов деградаций GaN HFET, способных создавать серьезную проблему из-за особенностей физики устройств GaN, несовершенства исходных материалов, ростовых

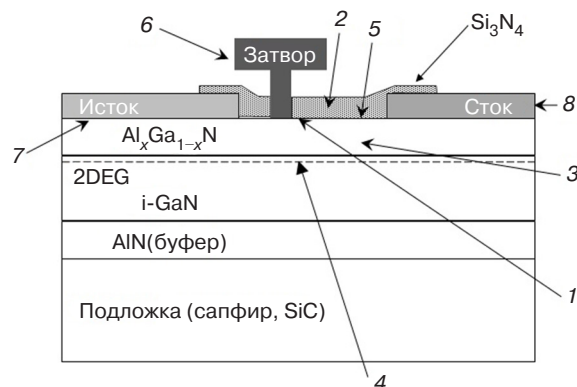


Рис. 5. Основные выявленные механизмы отказов [12]:

- 1 – электрическое поле, вызывающее деградацию края затвора и ранее существовавшие температурные дефекты,
- 2 – захват электронов в пассивирующем слое,
- 3 – генерация ловушек горячими электронами,
- 4 – генерация ловушек вследствие электротермомеханического повреждения (температура, электрическое поле, механические деформации),
- 5 – термоиндуцированное отслоение пассивации,
- 6 – деградация металлического соединения с затвором вследствие электротермомеханического повреждения, вызванного ловушками,
- 7 – деградация межслойных соединений,
- 8 – деградация омических контактов

и пост-ростовых процессов изготовления приборов. В [14–18] отмечено, что некоторые эффекты деградации проявляются даже когда устройства находятся в выключенном состоянии (без подачи напряжений смещения) или во время двухпозиционных смещений затвора Шоттки [14–18]. В этом случае основным проявлением деградации является катастрофический рост утечки тока затвора. Существование критического напряжения, при превышении которого происходит деградация параметров GaN HFET, привело к предложению механизма деградации, основанного на формировании дефектов вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта [13]. Механизмы отказов 5–8 относятся к теплоактивированным механизмам деградации, которые ранее наблюдались и в устройствах, созданных на иных полупроводниковых материалах (Si, GaAs, InP, SiC и т.п.). Это говорит о том, что эти механизмы отказов больше связаны с технологиями и материалами металлизации, а не относятся к самому нитриду галлия [13], но вследствие особенностей ростовых и пост-ростовых технологий могут проявляться более ярко.

Электрические механизмы деградации GaN HFET подробно рассмотрены в [19]. Теперь перейдем к анализу тепловых и механических механизмов отказа, а также их взаимосвязи с электрическими механизмами.

2. ТЕПЛОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ GAN HFET

А. Проблема саморазогрева

В случае, когда кристаллическая решетка полупроводникового материала не может полностью рассеивать тепло, генерируемое горячими электронами через излучение горячих LO-фононов¹, это излишнее количество теплоты накапливается в структуре, взаимодействует с более горячими электронами и вызывает еще больше тепла, в то время как эффективный механизм рассеивания отсутствует. Следовательно, температура прибора повышается, что приводит к ухудшению его характеристик. Этот механизм, называемый саморазогревом, является важной проблемой для GaN HFET, работающих при больших токах и мощностях.

В [20] явление саморазогрева AlGaIn/GaN HFET исследовано при использовании сапфира или SiC в качестве подложки. Отмечается, что в AlGaIn/GaN HFET, выращенных на подложках 6H-SiC, допустимая максимальная рассеиваемая мощность как минимум в 3 раза выше, чем у выращенных на сапфире в тех же условиях. Это результат более высокой теплопроводности

6H-SiC по сравнению с сапфиром. Однако проблема использования SiC в качестве подложки заключается в его высокой стоимости. Чтобы лучше понять эффект саморазогрева, приведем результаты моделирования изменения температуры в AlGaIn/GaN HFET с различной геометрией, конструкцией гетероструктуры, плотностью легирования и типом подложки, полученные в [21].

Чтобы рассчитать повышение температуры, авторы начали с уравнения нелинейного потока и продолжили моделирование в легированном и нелегированном AlGaIn/GaN HFET-каналах на SiC. Структура, используемая для моделирования, и результат моделирования показаны на рис. 6, 7 соответственно [20]. Из рисунка видно, что образец с нелегированным канальным слоем GaN 2DEG рассеивает тепло в существенно меньшей степени по сравнению с образцом с легированным канальным слоем GaN.

Из физики твердого тела известно, что существуют два механизма, способствующие теплопроводности. Теплопроводность может быть результатом вибрации узлов решетки, а также электронной проводимости. Решеточный вклад в теплопроводность чистых кристаллов определяется выражением:

$$k_{\text{реш}}(T) = \frac{1}{3} V_s C_{\text{реш}}(T) L(T), \quad (1)$$

где T – температура, V_s – скорость звука в полупроводнике, $C_{\text{реш}}(T)$ – теплоемкость решетки, $L(T)$ – средняя длина свободного пробега фононов.

Вклад электронной проводимости в теплопроводность незначителен при концентрации легирования менее 10^{19} см^{-3} . С другой стороны, поскольку понижающие дислокации снижают V_s и увеличивают рассеяние фононов, теплопроводность материала уменьшается за счет увеличения плотности дислокаций (GaN как чистый материал имеет гораздо более высокую теплопроводность по сравнению с эпитаксиальными слоями GaN). При этом увеличение рассеяния фононов из-за увеличения концентрации легирования преобладает над увеличением вклада электронной проводимости.

Следовательно, теплопроводность снижается за счет увеличения концентрации легирования ($k_{\text{реш}}$ уменьшается примерно в 2 раза на каждую декаду увеличения концентрации n), что согласуется с выводами [20, 22].

В [21] показано, что при большем увеличении температуры подвижность электронов начинает уменьшаться, кроме того, при уменьшении размеров транзистора отрицательное влияние легирования становится еще более выраженным из-за увеличения плотности дислокаций и увеличения относительного количества дефектов вследствие уменьшения размеров.

¹ LO-фонон относится к продольным оптическим фононам в полупроводниковых кристаллах. [LO Phonon – longitudinal optical phonon in semiconductor crystals.]

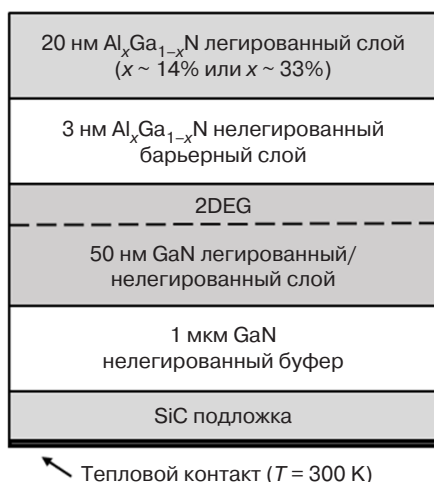


Рис. 6. Структура легированного/нелегированного HFET, использованная при моделировании [20]

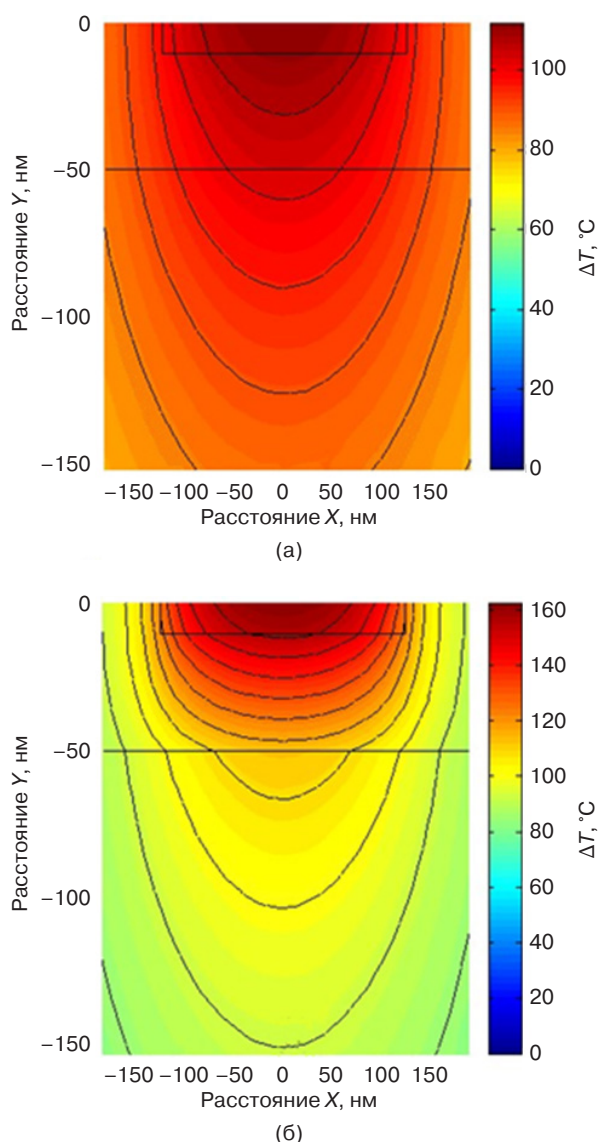


Рис. 7. Профиль повышения температуры в нелегированном (а) и легированном (б) каналах AlGaIn/GaN HFET, выращенных на подложке SiC [20]

Б. Деградации, связанные с тепловым воздействием

Чтобы выявить конкретный эффект деградации устройства, необходимо определить условия испытаний таким образом, чтобы другие механизмы деградации не влияли на полученные результаты. Когда затвор смещен в обратном направлении (транзистор «заперт»), ток стока очень мал и поэтому при увеличении температуры можно считать, что в канале нет никаких других эффектов, кроме приложенной тепловой энергии. Таким образом, можно отслеживать эффекты деградации, вызванные термическим воздействием. Применяв это условие испытаний к GaN HFET, можно понять, как тепловая энергия рассеивается в канале.

Тепловое рассеяние связано с теплопроводностью материала. Известно, что чем больше акустических фононных мод занято в структуре полупроводника, тем больше его теплопроводность. В [23] показано, что групповая скорость акустических фононов намного выше, чем оптических. Следовательно, при низких температурах моды оптических фононов не заняты, а заняты только акустические моды. Однако это верно только для малых электрических полей, чего обычно не бывает в мощных HFET, если измерения не проводятся при очень малых смещениях стока и затвора. Можно также сказать, что согласно (1), при низких температурах длина свободного пробега L является относительно большой, и в ней преобладают конечный размер кристалла (размерный эффект), количество дефектов (в случае чистого кристалла он незначителен) и тепловая проводимость

решетки $C_{\text{реш}}(T) \sim \left(\frac{T}{\theta_D} \right)$, где θ_D – температура

Дебая. С ростом температуры теплопроводность $C_{\text{реш}}(T)$ сначала начинает насыщаться, а при очень высоких температурах теплопроводность падает из-за процессов фонон-фононного и фонон-электронного рассеяния [20] (рис. 8).

В исследовании [24] для лучшего понимания тепловых свойств AlGaIn/GaN HFET были применены различные методы исследования, такие как рамановская микро-термография, микро-фотолуминесцентная спектроскопия и тепловое моделирование. Подтверждено, что в объемном GaN теплопроводность выше, чем в эпитаксиальных слоях, из-за того, что объемный материал имеет меньшую плотность дислокаций. При этом, если качество объемного GaN достаточно хорошее, эпитаксиальные слои также будут более качественными при прочих равных условиях. Доказано, что тепловое сопротивление в GaN-на-SiC очень близко к тепловому сопротивлению GaN-на-GaN, хотя GaN имеет несколько меньшую теплопроводность $C_{\text{GaN}} \sim 260 \text{ Вт/(м·К)}$ для

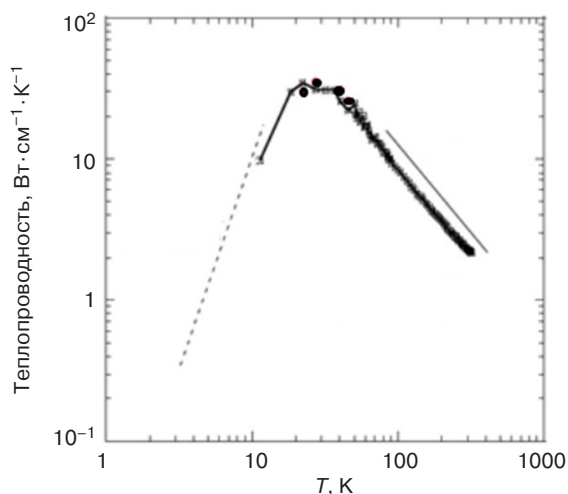


Рис. 8. Зависимость теплопроводности GaN HFET с шириной затвора $W_3 = 200$ мкм от температуры: пунктирная линия – предел рассеяния при длине свободного пробега фононов 500 мкм из-за размерного эффекта, сплошная линия – зависимость $T^{-1.22}$ [20]

объемного GaN по сравнению с $C_{\text{SiC}} \sim 480$ Вт/(м·К) для SiC. Причина может быть связана с отсутствием теплового граничного сопротивления между слоями прибора и подложкой [24]. На рис. 9 показаны температура поверхности и профиль глубины в центре AlGaIn/GaN HFET размером 30×80 мкм, рассчитанные в 3D-симуляторе, а также измеренные с помощью фотолюминесцентной и рамановской микро-спектроскопии. Используя этот рисунок и допущение о нулевом термическом граничном сопротивлении (TBR_{eff})² на границе GaN–GaN и однородной теплопроводности GaN, а также аппроксимируя измеренную кривую с помощью тепловой модели 3D-T со стандартной температурной зависимостью теплопроводности $T^{-1.22}$, получаем теплопроводность $C_{\text{GaN}} \sim 260$ Вт/(м·К), в отличие от тонкого эпитаксиального слоя, обладающего величиной $C_{\text{epiGaN}} \sim 150$ Вт/(м·К).

В [25] представлена разработанная совмещенная электронная модель ML-TCAD³, позволяющая прогнозировать снижение коэффициента усиления и коэффициент полезного действия GaN HEMT, индуцированные эффектами горячих электронов, и не требующая знания физики надежности и результатов долгосрочных экспериментальных испытаний.

² Thermal boundary resistance.

³ ML-TCAD – электронная модель транзистора, созданная на основе машинного обучения (machine learning – ML), для существенного ускорения расчетов в среде TCAD за счет минимизации прямых физических вычислений. [ML-TCAD is an electronic model of a transistor created on machine learning (ML) basis to significantly speed up calculations in the TCAD (Technology Computer-Aided Design) environment by minimizing physical calculations.]

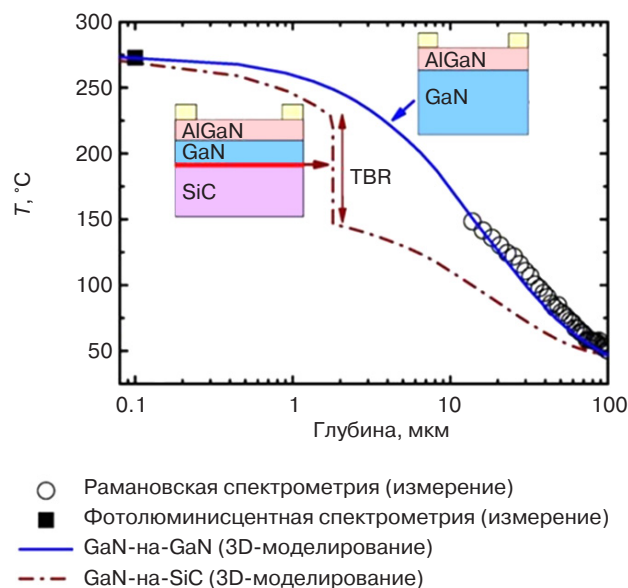


Рис. 9. Зависимость температуры T на поверхности от толщины подложки [24]

Полученная модель с высокой достоверностью предсказывает результаты изменения тока стока в GaN HEMT под действием напряжения горячих электронов. Кроме того, модель позволяет по кривым деградации вольтамперной характеристики (ВАХ) определить расположение, распределение, концентрации и уровни энергии ловушек в GaN HEMT, что безусловно полезно для дальнейшего изучения механизма физической деградации GaN HEMT в условиях воздействия горячих электронов.

В. Дегерация омических контактов и пассивирующих покрытий

В HFET на основе AlGaIn/GaN используют омические контакты со стандартной металлизацией с применением золота, что, по-видимому, гарантирует достаточную стабильность при испытаниях на повышенную температуру до определенного предела. В [24] GaN HFET с омическими контактами Ti/Al/Pt/Au подвергали ступенчатому напряжению в течение 48 ч. Было обнаружено, что омические контакты начинают деградировать при температуре перехода более 300°C – саморазогрев транзистора приводит к ухудшению характеристик приборов и блоков за счет деградации омического контакта [13, 24].

В [26] исследовалась деградация AlGaIn/GaN/SiC HFET с длиной затвора 25 мкм и различными пассивирующими покрытиями, связанная с температурным режимом функционирования транзистора. Было показано, что деградация порогового напряжения начинается в диапазоне температур $310\text{--}330^\circ\text{C}$. Анализ изменений в структуре транзистора проводился

путем измерения электролюминесценции и при использовании просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Было обнаружено образование пустот и диффузия золота в AlGaIn/GaN. Эти процессы ответственны за деградацию приборов при обычных технологиях пассивации.

При этом повышение температуры активной области и самого кристалла транзистора зависит, в т.ч., и от выбора рабочей точки, и от уровня входной СВЧ-мощности. На рис. 10 представлено тепловое распределение по поверхности кристалла в сечении «от входа к выходу» AlGaIn/GaN/SiC HFET с габаритными размерами $480 \times 800 \times 100$ мкм, длиной затвора $L_3 = 25$ мкм и периферией затвора $W_3 = 6 \times 200$ мкм. Испытания проведены при температуре основания корпуса 120°C .

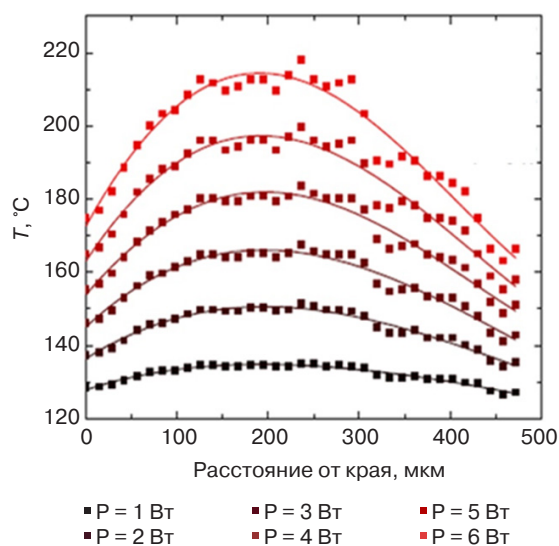


Рис. 10. Распределение температуры T на поверхности кристалла при разных уровнях мощности входного СВЧ-сигнала [26]

Видно, что при увеличении мощностной нагрузки P резко меняется распределение температуры по площади транзистора. Возникающая неравномерность температуры, безусловно, будет являться причиной последующих отказов транзистора. Дополнительные исследования подтверждают, что прирост температуры поверхности кристалла зависит и от температуры корпуса, и от рассеиваемой мощности (рис. 11).

В результате исследования установлено, что при воздействии повышенной температуры возрастает ток затвора, а пороговое напряжение затвора смещается в отрицательную сторону, и это связано с пассивирующими слоями.

В [27] представлены результаты исследования микроскопического происхождения уязвимости материалов из состава GaN HFET и устройств на их основе к высоким температурам

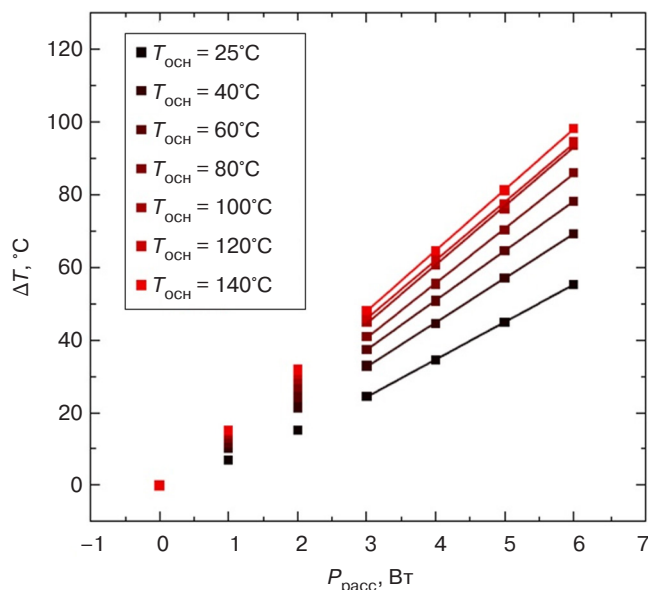


Рис. 11. Зависимость прироста температуры поверхности транзистора ΔT от рассеиваемой мощности $P_{\text{расс}}$ при разных температурах основания [26]

путем мониторинга начала структурной деградации в различных температурных условиях в режиме реального времени. Исследования проведены с помощью ПЭМ. Электронно-прозрачные образцы изготавливали из объемного материала и нагревали вплоть до 800°C . ПЭМ высокого разрешения (high-resolution transmission electron microscopy), сканирующая ПЭМ (scanning transmission electron microscopy), энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (energy-dispersive X-ray spectroscopy) и геометрический фазовый анализ (geometric phase analysis – GPA) выполнялись для оценки качества кристаллов, исследования диффузии материалов и процессов распространения деформации в образце перед и после нагрева. Отмечено, что уменьшение площади контакта затвора заметно, начиная с температуры 470°C , и оно сопровождается перемешиванием Ni/Au вблизи границы раздела «затвор/AlGaIn». Повышенные температуры вызывают значительное расширение решетки вне плоскости на границе раздела SiN_x/GaN/AlGaIn, как показывают карты деформации GPA с геометрической фазой, в то время как деформации в плоскости остаются относительно постоянными. В этом исследовании показано, что воздействие температур, превышающих 500°C , приводит к увеличению тока утечки в GaN HFET на 2 порядка. Результаты этого исследования дают визуальную информацию в режиме реального времени для определения первоначального места деградации и подчеркивают влияние температуры на структуру GaN HFET, его электрические свойства и деградацию материалов.

Г. Испытания на безотказность и срок службы

Тепловое воздействие – одна из основных проблем, снижающих технические характеристики и надежность полупроводникового прибора. Это наиболее распространенный механизм, поскольку AlGaN/GaN HFET в основном работает при относительно высоких температурах.

Надежность устройства – очень важный вопрос. В настоящее время на каждом предприятии есть отдельные подразделения, в которых основное внимание уделяется качеству и надежности своих устройств. Для любых производимых устройств требуется определение области безопасной работы, средней наработки до отказа и срока сохранения приборов и устройств. Поэтому промышленность уделяет большое внимание надежности своих изделий – образцы подвергаются многочисленным тестам, в т.ч. на кратковременную и длительную безотказность и сохраняемость. Как можно понять из названия, эти тесты проводятся для оценки срока службы устройства. Так как нельзя ждать 10 или 25 лет, чтобы увидеть, что произойдет с полупроводниковым прибором, применяются специальные условия для проведения относительно коротких по времени испытаний для оценки среднего времени наработки до отказа (mean time to failure, MTTF).

Эти ускоренные испытания на срок службы в основном проводят для трех различных температур, и для каждой измеряется MTTF. Экстраполяцией полученных значений к температуре, при которой функционирует прибор (при этом температура активной области прибора выше температуры корпуса), можно получить MTTF для устройства. На рис. 12 показано, как оценивается MTTF в испытании на отказ: измеряется среднее время работы до отказа при трех температурах активной области прибора: 260, 285 и 310 °C и путем экстраполяции определяется, что при рабочей температуре активной области 150 °C среднее время наработки до отказа составит более 10^7 ч, энергия активации $E_a = 2.0$ эВ. Обычно испытывается минимально возможное количество устройств, но таким образом, чтобы измерения не теряли точности [7].

При допустимой рабочей температуре p - n -перехода T_j активной зоны кристалла GaN HFET, равной 200 °C, средняя наработка до отказа составляет 10^5 ч (11.57 лет). Продемонстрирована также стойкость приборов к рассогласованию нагрузки до коэффициента стоячей волны напряжения, равного 10 в режиме большого сигнала. Быстрое (в течение нескольких часов) разрушение возникает в современных GaN-гетеротранзисторах при температурах активной зоны 320–350 °C [13].

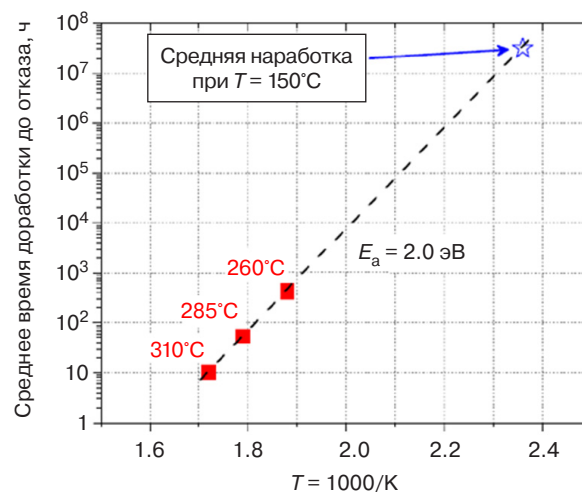


Рис. 12. Определение среднего времени наработки до отказа методом измерения при трех температурах

В [28] экспериментально исследованы эффекты деградации, наблюдаемые в GaN HFET с длиной затвора 0.15 мкм при работе в реальных условиях усилителя мощности, т.е. при подаче на вход СВЧ-мощности высокого уровня. Измерения проводились для серии приборов в режиме loud-pull измерений. Следовательно, данный режим эксперимента предоставляет информацию, соответствующую работе с СВЧ-сигналом, и позволяет преимущественно выявлять изменения электрических величин, которые невозможно непосредственно обнаружить на ВАХ или высоких частотах. Такие величины, как сопротивление затвора, в настоящее время играют фундаментальную роль в анализе надежности технологий. Эксперименты выполнялись на GaN HFET с одной и той же периферией затвора при работе в режиме класса АВ – режим насыщения, в котором подчеркиваются эффекты деградации, вызванные высокими температурами вследствие увеличения рассеиваемой мощности и в режиме класса Е, в котором деградации усиливаются под воздействием сильных электрических полей. Эксперименты проведены при $T_1 = 23$ °C и $T_2 = 100$ °C. В результате установлено, что:

- уровень ухудшения состояния GaN HFET зависит от фактического радиочастотного режима;
- эффекты термической деградации, усиливающиеся в режиме класса АВ, более выражены, чем эффекты воздействия сильных полей, в режиме класса Е;
- характеристика GaN HFET в условиях реальных СВЧ-нагрузок должна использоваться для точного и глубокого исследования механизмов деградации и отказов с целью определения MTTF в практических СВЧ-приложениях.

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ GaN HFET

А. Обратный пьезоэлектрический эффект

Механические воздействия также важны как часть треугольника взаимодействий (рис. 4). Механические напряжения оказывают важное влияние на параметры и надежность СВЧ GaN HFET. Нитрид галлия является полярным материалом, т.е. валентные электроны не распределяются между двумя соседями равномерно – это вызывает локальную поляризацию кристалла полупроводника. Однако глобально вектор поляризации GaN равен нулю. Следовательно, при приложении механического давления кристаллическая структура может изгибаться или расширяться (в зависимости от направления силы) и вызывать результирующую поляризацию, которая может действовать как электрическое поле. Это явление называется пьезоэлектрическим эффектом.

С другой стороны, если мы приложим к этому кристаллу электрическое поле, кристалл снова может изгибаться или расширяться (в зависимости от направления электрического поля). В этом случае электрическое поле вызывает механическую силу – этот эффект называется обратным пьезоэлектрическим полем. При приложении напряжения затвор-исток $U_{з.и.}$ обратного смещения затвора канал все больше и больше истощается. Если приложить слишком большое электрическое поле в направлении, противоположном направлению релаксации кристалла, это вызовет большую механическую силу и может вызвать механическое повреждение кристалла. Такой эффект и называется обратным пьезоэлектрическим эффектом. Именно это происходит с GaN при приложении слишком большого напряжения $U_{з.и.}$.

Процессы изготовления и условия эксплуатации также влияют на механические напряжения. В [29], в частности, обсуждается связь механических напряжений с надежностью нитрид-галлиевых гетеротранзисторов. В работе исследовались структуры $Al_{0.2}Ga_{0.8}N(20nm)/GaN(2\mu m)$ на подложке толщиной 75 мкм. Проведенные расчеты показывают, что пассивирующий слой SiN толщиной 100 нм создает в месте примыкания к затвору механическое напряжение до 300 МПа [13]. Растягивающие напряжения являются критическими с точки зрения надежности транзистора ввиду того, что они способствуют образованию «ямок» на поверхности гетероструктуры. На рис. 13 показана расчетная величина механических биаксиальных напряжений в области затвора в зависимости от удельной рассеиваемой мощности $P_{расс.уд}$ для двух конструкций GaN HFET:

- традиционной – без пассивирующего покрытия SiN и полевой платы (field-plate);

- улучшенной – при наличии SiN и field-plate, применяемых обычно для увеличения пробивных напряжений в HFET.

Приведенные данные показывают, что наличие полевой платы и слоя SiN приводят к снижению значений механических напряжений в области затвора в 1.3–1.5 раз в зависимости от удельной рассеиваемой мощности. Безусловно, механические напряжения зависят и от температуры подложки, и от температуры p - n -перехода.

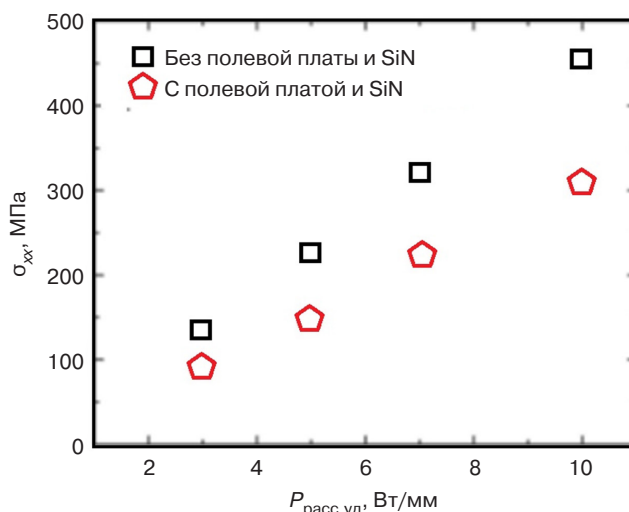


Рис. 13. Зависимость величины механических биаксиальных напряжений σ_{xx} от удельной рассеиваемой мощности $P_{расс.уд}$ в GaN HFET [13]

Также в [29] проведены расчеты значений механических биаксиальных напряжений σ_{xx} в GaN HFET, возникающих вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта (рис. 14), следствием которого является возникновение электрического поля. Для сравнения на рис. 14 очерчена область, соответствующая значениям напряженности электрического поля ($V_{с.и.}$), возникающего в транзисторе при напряжениях между стоком и истоком $U_{с.и.} = 50$ –70 В.

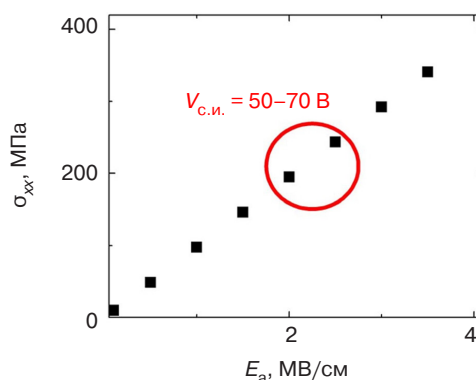


Рис. 14. Зависимость величины механических биаксиальных напряжений σ_{xx} от напряженности электрического поля в GaN HFET [29]

Из приведенных в [29] данных следует, что значения указанных выше механических напряжений, вызываемых рассеиваемой в транзисторе мощностью, сравнимы по величине с напряжениями, возникающими вследствие обратного пьезоэффекта.

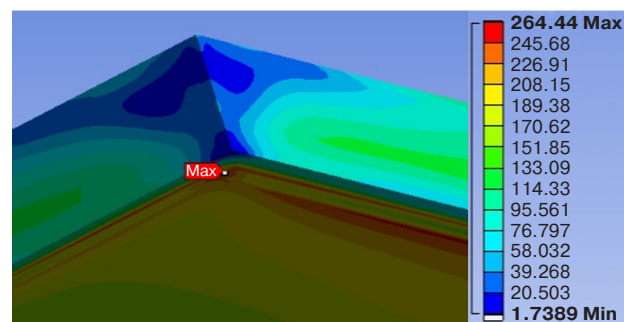
Омические контакты также создают механические напряжения. Таким образом, механические напряжения в GaN-гетеротранзисторах являются одной из причин снижения их надежности.

Б. Взаимосвязь тепловых и механических деградаций

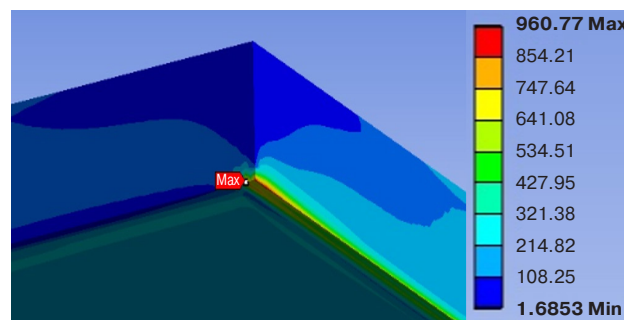
В [30] показано, что высокая удельная тепловая нагрузка мощных AlGaIn/GaN/SiC-транзисторов требует особо тщательного подхода к обеспечению теплосъема в рабочих режимах. Предупредительные меры, направленные на исключение любых дефектов сборки мощных AlGaIn/GaN-транзисторов, крайне важны. Например, дефект вертикального наклона кристалла после пайки его на основание приводит к неодинаковой толщине слоя припоя по периферии между кристаллом и основанием. Оценка напряжений, возникающих в кристалле при разогреве в зависимости от различных вариантов расположения кристалла в пространстве, а также их влияние на потенциальную надежность структуры кристалла показаны в [30], где значения и характер распределения механических напряжений в кристалле определялись с помощью расчета напряженно-деформированного состояния модели кристалла с дефектом смещения по грани или по углу методом конечных элементов. Смещением по грани в данном случае называется равномерное увеличение/уменьшение толщины припоя между двумя параллельными гранями кристалла транзистора, а смещением по углу – изменение толщины припоя по диагонали плоскости припайки.

На рис. 15 показано трехмерное распределение основных термических напряжений в слое SiC. На основании полученных значений эквивалентных напряжений для вариантов положения кристалла рассчитан коэффициент надежности (safety factor). Коэффициент надежности определяет, насколько фактически проектируемая структура сможет выдерживать индуцированное тепловое напряжение.

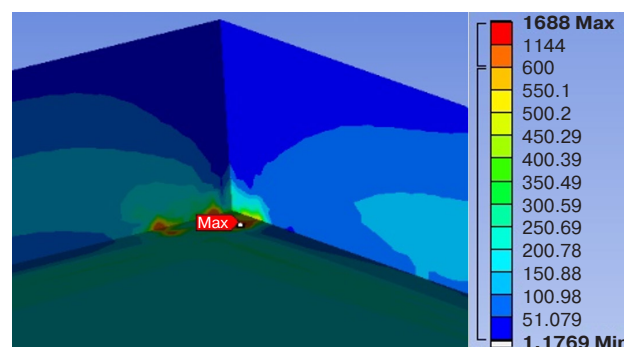
В [30] показано, что надежность кристалла AlGaIn/GaN/SiC-транзисторов ухудшается в 6.5 раз при максимальном наклоне угла и в 3.6 раза при максимальном наклоне грани. Таким образом, показано, что смещение плоскости кристалла значительно увеличивает механические напряжения в теле кристалла в областях с утончающимся слоем припоя, что, в свою очередь, означает потенциальное развитие механических разрушений структуры, особенно, при циклических термических нагрузках.



(a)



(б)



(в)

Рис. 15. Распределение основных напряжений в кристалле при непрерывном рассеивании мощности для случая:

- (а) равномерной постоянной толщины припоя;
- (б) непостоянной толщины по грани,
- (в) непостоянной толщины по углу [30]

В. Взаимосвязь электрических и механических повреждений

Деградация может иметь обратимый или необратимый характер. Если изделие после завершения стрессового воздействия возвращается в свое нормальное состояние, можно говорить об обратимой деградации. Однако иногда после окончания деградации устройство необратимо изменяется, что и трактуется как повреждение или необратимая деградация.

Электрическая деградация характеризуется значением критического приложенного напряжения, ниже которого деградация является обратимой. Применение напряжений, больших чем критическое,

вызывает необратимую деградацию. В [31] показаны значительные кристаллографические повреждения, вызываемые сильными электромагнитными полями, а также корреляция между электрической деградацией (резкое падение тока потребления, коллапс тока, рост тока утечки затвора, лавинная инжекция и т.п.) и деградацией материала как механическим эффектом. Чтобы найти корреляцию между электрическими и физическими повреждениями, измеряют глубину и ширину ямок для различных образцов по изображениям, полученным методом ПЭМ. Затем строят график деградации в процентных отношениях значений тока насыщения $I_{с.и.нас}$ между стоком и истоком и тока коллапса $I_{с.и.кол}$ в зависимости от глубины дефектной области, чтобы получить количественное сравнение между электрическими и механическими повреждениями. Это показано на рис. 16 [32] и означает, что эти механизмы взаимосвязаны и кристаллографические повреждения ответственны за электрическую деградацию.

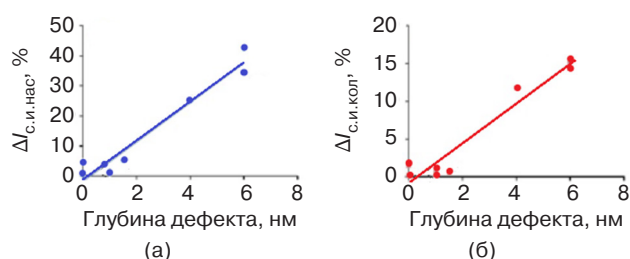


Рис. 16. Корреляция между величинами $I_{с.и.нас}$, $I_{с.и.кол}$ и глубиной дефектов [32]

На рис. 17 схематически показано распределение механических напряжений в области затвора при подаче на затвор отрицательного напряжения относительно стока и истока [33].

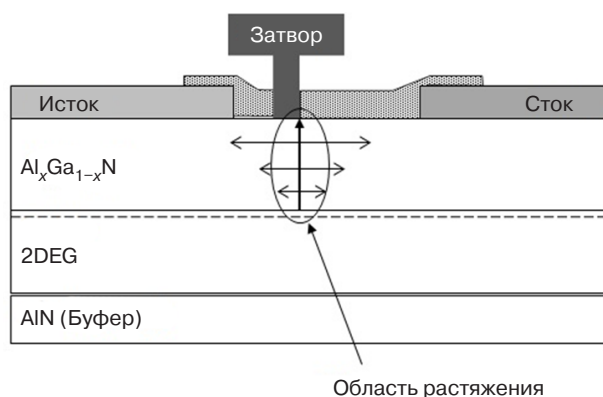


Рис. 17. Области растяжения слоя AlGa_N, возникающие вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта

При работе транзистора в импульсном режиме указанные на рис. 17 механические напряжения то увеличиваются, то уменьшаются. Если усилители

на основе СВЧ GaN HFET должны работать в течение 15–20 лет, то в транзисторе возникают миллиарды или даже триллионы таких циклов. В конечном счете возникает трещина в области затвора со стороны стока. Это связано с тем, что растягивающие механические напряжения со стороны стока относительно затвора в рабочем режиме при подаче напряжения на сток больше, чем со стороны истока. В начальной стадии процесса образуются дефекты в виде ямок – со стороны истока менее глубокие и редкие, со стороны стока – более глубокие и частые. На рис. 18 показано развитие процесса по времени [34].

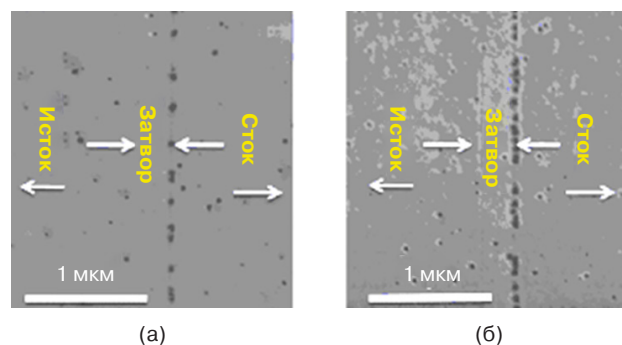


Рис. 18. Эволюция формирования трещины из дефектов в виде ямок во времени [34]: (а) через 10 мин, (б) через 1000 мин

Исследованы механизмы деградации усилителя мощности в виде 3-каскадной монолитной интегральной схемы (МИС) W-диапазона на основе нитрида галлия при воздействии входного СВЧ-сигнала высокого уровня мощности⁴. Те же эксперименты проведены и на дискретном транзисторе с периферией затвора, равной периферии затвора выходного каскада МИС. Исследования не выявили какого-либо сдвига порогового напряжения ($U_{пор}$) после воздействия мощного СВЧ-сигнала, однако, смоделированные линии динамической нагрузки показали, что колебания выходного напряжения превышают пробивное напряжение ($U_{с.и.проб}$) в условиях воздействия входного СВЧ-сигнала с высоким уровнем мощности. Таким образом, из эксперимента можно сделать вывод, что обратный пьезоэлектрический эффект будет являться основным фактором деградации характеристик, приводя к возникновению дефектов и дислокаций в кристалле на стороне стока.

Авторы [35] подтверждают, что довольно быстрое развитие усилителей мощности на основе нитрида галлия, ориентированного на высокие выходную мощность и коэффициент полезного действия, создало критическую проблему для управления температурой устройств в целом. В результате проведенного

⁴ Jimenez J. *Advanced Reliability Aspects of GaN FETs*. Presented at European Microwave Week (EuMW), 2010.

теплового проектирования и анализа транзисторов и МИС на основе карт тепловых режимов, измеренных инфракрасной камерой в непрерывных и импульсных режимах работы, установлено, что тепловое сопротивление R_t «переход–корпус GaN-кристалла» при работе на постоянном токе составляет $1.63\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, а в импульсном режиме $R_t = 1.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Таким образом, экспериментально доказано, что для обеспечения требуемых показателей надежности при проектировании GaN МИС должна использоваться только тепловая модель, достоверно подтвержденная функциональным тестированием.

Наличие дислокационных ямок на поверхности исходной подложки ведет к последующему образованию трещин [33]. Тонкая химическая обработка ее поверхности приводит к исключению или, по крайней мере, к уменьшению образования ямок травления («pitting»). Посторонние примеси (загрязнения) также стимулируют процесс деградации. Двойной верхний слой GaN («сар») над барьером AlGaIn уменьшает вероятность последующей деградации. Указанные явления, снижающие надежность GaN СВЧ-транзисторов, были учтены в разработках компаний Cree⁵ (США) и UMS⁶ (Германия) при разработке СВЧ GaN HFET для космических применений [36].

В отчетном докладе European Social Innovation Competition (Европейские пластины GaN на SiC подложках высокого качества для применения в космической технике) отражено следующее⁷:

- с целью повышения надежности и уменьшения напряжений, показанных на рис. 17, была уменьшена концентрация алюминия в барьерном слое; барьерный слой толщиной 22 нм состоит из Al(16%)Ga(84%)N-барьера и верхнего защитного GaN слоя толщиной 3 нм;
- слоевая концентрация носителей в 2DEG канале была немного ниже $6 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$ (Cree) и ниже $3 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$ (SiCrystal). Эти значения являются типичными значениями для HEMT-структур с 18% Al (Cree) и 16% Al (SiCrystal) при 22 нм AlGaIn барьерного слоя, соответственно.
- среднее значение кривизны составляет 10.4 мкм, среднее значение изгиба – 4.96 мкм.

В [37] показано, что ультрафиолетовое (УФ) освещение очень сильно снижает пробивное напряжение в GaN-на-Si, но для GaN-на-SiC этот эффект незначителен. Считая, что качество выращенного материала достаточно хорошее (что может быть

не так, особенно для GaN-на-SiC), можно предположить, что УФ-засветка заставляет электроны расщепляться и попадать в ловушки вследствие наличия электрического поля, вызванного обратным пьезоэлектрическим эффектом. Поэтому в GaN-на-Si этот эффект более выражен из-за большего количества ловушек. И это еще один из эффектов, подтверждающих корреляционную связь между величиной пробивного напряжения GaN HFET и количеством ловушек в GaN, иными словами, между электрической деградацией и физическими изменениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сильные электрические поля, присутствующие в GaN HFET, вызывают тепловые, физические и поляризационные явления, что приводит к деградациям характеристик активного элемента в виде уменьшения удельного тока стока, роста тока утечки затвора, смещения порогового напряжения, снижения пробивных напряжений, уменьшения удельной выходной мощности и снижения надежности в целом.

Высокая удельная тепловая нагруженность мощных AlGaIn/GaN-транзисторов вызывает перераспределение механических напряжений в кристалле и, как следствие, обратный пьезоэлектрический эффект, что приводит к развитию механических разрушений структуры и снижению надежности. Наличие полевой платы и слоя SiN приводят к снижению значений механических напряжений в области затвора в 1.3–1.5 раз в зависимости от удельной рассеиваемой мощности.

Ухудшение состояния GaN HFET зависит от фактических режимов питания, уровня входной мощности и класса работы усилителя. При этом эффекты термической деградации, усиливающиеся в режиме класса АВ, более выражены, чем эффекты воздействия сильных полей в режиме класса Е. Поэтому с целью определения среднего времени наработки до отказа в практических СВЧ-приложениях характеристика GaN HFET должна проводиться в условиях реальных напряжений питания, СВЧ-мощности и класса работы усилителя мощности.

Резкое снижение времени средней наработки до отказа и быстрое (в течение нескольких часов) разрушение возникает в современных GaN-гетеротранзисторах при температуре активной зоны более 320–350 °С.

Вследствие наличия описанных механизмов деградации можно утверждать, что, хотя GaN HFET превосходят по своим техническим и эксплуатационным характеристикам другие полупроводники, применяемые в настоящее время в промышленности (такие как GaAs, Si, InP и др.), при проектировании и производстве необходимо учитывать физические ограничения для исключения возможностей возникновения деградаций в эксплуатации и, кроме того, контролировать тепловые и электрические режимы GaN HFET при эксплуатации.

⁵ www.wolfspeed.com. Дата обращения 12.01.2024. / Accessed January 12, 2024.

⁶ www.ums-rf.com. Дата обращения 12.01.2024. / Accessed January 12, 2024.

⁷ Final Report Summary – EUSIC (High Quality European GaN-Wafer on SiC Substrates for Space Applications). <https://cordis.europa.eu/project/id/242360/reporting/pl>. Дата обращения 12.01.2024. / Accessed January 12, 2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акинин В.Е., Борисов О.В., Иванов К.А., Колковский Ю.В., Миннебаев В.М., Редька Ал.В. 350-Ваттный твердотельный усилитель мощности X-диапазона частот с воздушным охлаждением. *Наноиндустрия*. 2020;13;S4(99):465–467. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.465.467>
2. Белолипецкий А.В., Борисов О.В., Колковский Ю.В., Легай Г.В., Миннебаев В.М., Редька А.В., Редька А.В. Антенный электронный блок для спутниковой АФАР X-диапазона. *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2017;3(246):15–25.
3. Борисов О.В., Зубков А.М., Иванов К.А., Миннебаев В.М., Редька А.В. Широкополосный 70-ваттный GaN усилитель мощности X-диапазона. *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2014;2(233):4–9.
4. Аболдурев И.М., Гарбер Г.З., Зубков А.М., Иванов К.А., Колковский Ю.В., Миннебаев В.М., Редька А.В., Ушаков А.В. Импульсный режим работы мощных СВЧ гетерополевых AlGaIn/GaN транзисторов. *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2012;1(228):48–53.
5. Ghovanloo M. *Dual-Heterojunction High Electron Mobility Transistors on GaAs Substrate*. University of Michigan. Ann Arbor MI 48109-2122. 2008. 18 p.
6. Hamaguchi C., Miyatsuji K., Hihara H. Proposal of single quantum well transistor (SQWT) self-consistent calculations of 2D electrons in a quantum well with external voltage. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1984;23(3):132–134. <https://doi.org/10.1143/JJAP.23.L132>
7. Morkoc H. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices*. V. 3. *GaN-based Optical and Electronic Devices*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 2008. 902 p. <http://doi.org/10.1002/9783527628445>
8. Butte R., Carlin J.-F., Feltin E., Gonschorek M., Nicolay S., Christmann G., Simeonov D., Castiglia A., Dorsaz J., Buehlmann H.J., Christopoulos S., von Hogerthal B.H., Grundy G.A.J.D., Mosca M., Pinquier C., Py M.A., Demangeot F., Frandon J., Lagoudakis P.G., Baumberg J.J., Grandjean N. Current status of AllnN layers lattice-matched to GaN for photonics and electronics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007;40(20):6328–6344. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/20/S16>
9. Ramonas M., Matulionis A., Liberis J., Eastman L.F., Chen X., Sun Y.-J. Hot-phonon effect on power dissipation in a biased AlGaIn/AlN/GaN channel. *Phys. Rev. B*. 2005;71(7):075324. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.075324>
10. Kasahara K., Miyamoto N., Ando Y., Okamoto Y., Nakayama T., Kuzuhara M. Ka-band 2.3W power AlGaIn–GaN heterojunction FET. *IEDM Tech. Dig.* 2002:667–680. <http://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175929>
11. Половко А.М. *Основы теории надежности*. М.: Наука; 1964. 446 с.
12. Meneghesso G., Meneghini M., Tazzoli A., et al. Reliability issues of Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors. *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* 2010;2(1):39–50. <https://doi.org/10.1017/S1759078710000097>
13. Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. Проблемы надёжности GaN СВЧ гетеротранзисторов. Обзор. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. 2022;4(267):27–41. <https://doi.org/10.36845/2073-8250-2022-267-4-27-41>, <https://elibrary.ru/kacktk>
14. Joh J., del Alamo J.A. Critical voltage for electrical degradation of GaN high electron mobility transistors. *IEEE Elect. Device Lett.* 2008;29(4):287–289. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.917815>
15. Joh J., del Alamo J.A. Mechanisms for electrical degradation of GaN high-electron mobility transistors. In: *Proc. of the IEEE Int. Elect. Device Meeting (IEDM), Tech. Dig.* 2006. P. 415–418. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2006.346799>
16. Joh J., Xia L., del Alamo J.A. Gate current degradation mechanisms of GaN high electron mobility transistors. In: *Proc. of the IEEE Int. Elect. Device Meeting (IEDM)*. 2007. P. 385–388. <http://doi.org/10.1109/IEDM.2007.4418953>
17. Meneghesso G., Verzellesi G., Danesin F., et al. Reliability of GaN high-electron-mobility transistors: state of the art and perspectives. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 2008;8(2):332–343. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2008.923743>
18. Zanoni E., Meneghesso G., Verzellesi G., et al. A review of failure modes and mechanisms of GaN-based HEMTs. In: *Proc. of the IEEE Int. Elect. Device Meeting (IEDM)*. 2007. P. 381–384. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2007.4418952>
19. Миннебаев В.М. Электрические механизмы деградации полевых гетероструктурных транзисторов на основе нитрида галлия. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. 2021;3(262):4–24. <https://doi.org/10.36845/2073-8250-2021-262-3-57-60>, <https://elibrary.ru/catpkn>
20. Kittel Ch. *Introduction to Solid State Physics*. 8th ed. N.Y.: John Wiley & Sons Inc.; 2005. 703 p.
21. Filippov K.A., Balandin A.A. Self-Heating Effects in GaN/AlGaIn Heterostructure Field-Effect Transistors and Device Structure Optimization. In: *TechConnet. Briefs. V. 3. Proceed. of the ACRS Nanotech. Conf.* 2003;3:333–336.
22. Manoi A., Pomeroy J.W., Killat N., Kuball M. Benchmarking of thermal boundary resistance in AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrates: Implications of the nucleation layer microstructure. *IEEE Elect. Device Lett.* 2010;31(12):1395–1397. <https://doi.org/10.1109/LED.2010.2077730>
23. Killat N., Montes M., Pomeroy J.W., et al. Thermal Properties of AlGaIn/GaN HFETs on Bulk GaN Substrates. *IEEE Elect. Device Lett.* 2012;33(3):366–368. <https://doi.org/10.1109/LED.2011.2179972>
24. Rampazzo F., Pierobon R., Pacetta D., et al. Hot carrier aging degradation phenomena in GaN based MESFETs. *Microelectron. Reliability*. 2004;44(9–11):1375–1380. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2004.07.017>
25. Wang K., Jiang H., Liao Y., Xu Y., Yan F., Ji X. Degradation Prediction of GaN HEMTs under Hot-Electron Stress Based on ML-TCAD Approach. *Electronics*. 2022;11(21):3582. <https://doi.org/10.3390/electronics11213582>
26. Stopel A., Khramtsov A., Katz O., et al. *Proc. Of the Int. Conf. on GaAs Manufact. Technol.* New Orleans. 2005;14–19. URL: <https://cris.tau.ac.il/en/publications/direct-monitoring-of-hot-carrier-accumulated-charge-in-gan-hemt-a>

27. Rasel M.A.J., Zhang D., Chen A., Thomas M., House S.D., Kuo W., Watt J., Islam A., Glavin N., Smyth M., Haque A., Wolfe D.E., Pearton S.J. Temperature-Induced Degradation of GaN HEMT: An *In situ* Heating Study. *J. Vacuum Sci. Technol. B.* May 2024;42(3):032209. <https://doi.org/10.1116/6.0003490>
28. Bosi G., Raffo A., Vadalà V., Giofrè R., Crupi G., Vannini G. A Thorough Evaluation of GaN HEMT Degradation under Realistic Power Amplifier Operation. *Electronics.* 2023;12(13):2939. <https://doi.org/10.3390/electronics12132939>
29. Dammann M., Baeumler M., Brückner P., et al. Degradation of 0.25 μm GaN HEMTs under high temperature stress test. *Microelectron. Reliability.* 2015;55(9–10):1667–1671. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.06.042>
30. Joglekar A., Lian C., Baskaran R., et al. Finite Element Analysis of Fabrication- and Operation-Induced Mechanical Stress in AlGaIn/GaN Transistors. *IEEE Trans. Semiconduct. Manufact.* 2016;29(4):349–354. <https://doi.org/10.1109/TSM.2016.2600593>
31. Климов А.О. Исследование термомеханического отклика кристалла ПТБШ при изменении его вертикальной ориентации в припое. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы.* 2019;2(253):64–71.
32. Joh J., del Alamo J.A., Langworthy K., Xie S., Zheleva T. Role of stress voltage on structural degradation of GaN high-electron-mobility transistors. *Microelectron. Reliability.* 2011;51(2):201–206. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2010.08.021>
33. Morkoc H. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. V. 3. Materials Properties, Physics and Growth.* Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co; 2008. 850 p. ISBN 978-3-527-40838-2
34. Ancona M.G., Binari S.C., Meyer D.J. Fully coupled thermoelectromechanical analysis of GaN high electron mobility transistor degradation. *J. Appl. Phys.* 2012;111(7):074504. <https://doi.org/10.1063/1.3698492>
35. Tsao Y.-F., Wang Y., Chiu P.-H., Hsu H.-T. Reliability Assessment of 60-GHz GaN Power Amplifier Under High-Level Input RF Stress. *IEEE Trans. Elect. Devices.* 2024;71(7):4087–4092. <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3397634>
36. Han Y., Tang G., Lau B.L Thermal Characterization and Management of GaN-on-SiC High Power Amplifier MMIC. In: *IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC).* IEEE; 2023. P. 1989–1993. <http://doi.org/10.1109/ectc51909.2023.00342>
37. Demirtas S., del Alamo J.A. Effect of Trapping on the Critical Voltage for Degradation in GaN High Electron Mobility Transistors. In: *IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS).* IEEE; 2010. P. 134–138. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2010.5488838>

REFERENCES

1. Akinin V.E., Borisov O.V., Ivanov K.A., Kolkovskiy Yu.V., Minnebaev V.M., Redka A.I.V. 350-Watt solid-state amplifier of X-band frequencies with air cooling. *Nanoindustriya = Nanoindustry.* 2020;13;S4(99):465–467 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.465.467>
2. Belolipeckiy A.V., Borisov O.V., Kolkovsky Yu.V., Legal G.V., Minnebaev V.M., Redka A.I.V., Redka A.N.V. Electronic antenna unit for X-band space application AESA. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye pribory = Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices.* 2017;3(246):15–25 (in Russ.).
3. Borisov O.V., Zubkov A.V., Ivanov K.A., Minnebaev V.M., Redka A.V. X-band 70-W GaN broadband power amplifier. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye pribory = Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices.* 2014;2(233):4–9 (in Russ.).
4. Abolduyev I.M., Garber G.Z., Zubkov A.V., Ivanov K.A., Kolkovsky Yu.V., Minnebaev V.M., Redka A.V., Ushakov A.V. The pulse mode operation of the microwave power AlGaIn/GaN HFE. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye pribory = Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices.* 2012;1(228):48–53 (in Russ.).
5. Ghovanloo M. *Dual-Heterojunction High Electron Mobility Transistors on GaAs Substrate.* University of Michigan. Ann Arbor MI 48109-2122. 2008. 18 p.
6. Hamaguchi C., Miyatsuji K., Hihara H. Proposal of single quantum well transistor (SQWT) self-consistent calculations of 2D electrons in a quantum well with external voltage. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2.* 1984;23(3):132–134. <https://doi.org/10.1143/JJAP.23.L132>
7. Morkoc H. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. V. 3. GaN-based Optical and Electronic Devices.* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 2008. 902 p. <http://doi.org/10.1002/9783527628445>
8. Butte R., Carlin J.-F., Feltin E., Gonschorek M., Nicolay S., Christmann G., Simeonov D., Castiglia A., Dorsaz J., Buehlmann H.J., Christopoulos S., von Hogerthal B.H., Grundy G.A.J.D., Mosca M., Pinquier C., Py M.A., Demangeot F., Frandon J., Lagoudakis P.G., Baumberg J.J., Grandjean N. Current status of AlInN layers lattice-matched to GaN for photonics and electronics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007;40(20):6328–6344. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/20/S16>
9. Ramonas M., Matulionis A., Liberis J., Eastman L.F., Chen X., Sun Y.-J. Hot-phonon effect on power dissipation in a biased AlGaIn/AlN/GaN channel. *Phys. Rev. B.* 2005;71(7):075324. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.075324>
10. Kasahara K., Miyamoto N., Ando Y., Okamoto Y., Nakayama T., Kuzuhara M. Ka-band 2.3W power AlGaIn–GaN heterojunction FET. *IEDM Tech. Dig.* 2002:667–680. <http://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175929>
11. Polovko A.M. *Osnovy teorii nadezhnosti (Fundamentals of Reliability Theory).* Moscow: Nauka; 1964. 446 p. (in Russ.).
12. Meneghesso G., Meneghini M., Tazzoli A., et al. Reliability issues of Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors. *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* 2010;2(1):39–50. <https://doi.org/10.1017/S1759078710000097>
13. Kolkovskiy Yu.V., Kontcevoi Yu.A. Problems of reliability of GaN microwave heterotransistors. (Review)]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye pribory = Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices.* 2022;4(267): 27–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.36845/2073-8250-2022-267-4-27-41>, <https://elibrary.ru/kacktk>
14. Joh J., del Alamo J.A. Critical voltage for electrical degradation of GaN high electron mobility transistors. *IEEE Elect. Device Lett.* 2008;29(4):287–289. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.917815>

15. Joh J., del Alamo J.A. Mechanisms for electrical degradation of GaN high-electron mobility transistors. In: *Proc. of the IEEE Int. Elect. Device Meeting (IEDM), Tech. Dig.* 2006. P. 415–418. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2006.346799>
16. Joh J., Xia L., del Alamo J.A. Gate current degradation mechanisms of GaN high electron mobility transistors. In: *Proc. of the IEEE Int. Elect. Device Meeting (IEDM)*. 2007. P. 385–388. <http://doi.org/10.1109/IEDM.2007.4418953>
17. Meneghesso G., Verzellesi G., Danesin F., et al. Reliability of GaN high-electron-mobility transistors: state of the art and perspectives. *IEEE Trans. Device Mater. Reliabil.* 2008;8(2):332–343. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2008.923743>
18. Zanon E., Meneghesso G., Verzellesi G., et al. A review of failure modes and mechanisms of GaN-based HEMTs. In: *Proc. of the IEEE Int. Elect. Device Meeting (IEDM)*. 2007. P. 381–384. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2007.4418952>
19. Minnebaev V.M. Electrical Degradation of GaN heterostructure field-effect transistors. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye pribory = Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*. 2021;3(262):4–24 (in Russ.). <https://doi.org/10.36845/2073-8250-2021-262-3-57-60>, <https://elibrary.ru/catpkn>
20. Charles Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. 8th ed. N.Y.: John Wiley & Sons Inc.; 2005. 703 p.
21. Filippov K.A., Balandin A.A. Self-Heating Effects in GaN/AlGaN Heterostructure Field-Effect Transistors and Device Structure Optimization. In: *TechConnet. Briefs. V. 3. Proceed. of the ACRS Nanotech. Conf.* 2003;3:333–336.
22. Manoi A., Pomeroy J.W., Killat N., Kuball M. Benchmarking of thermal boundary resistance in AlGaN/GaN HEMTs on SiC substrates: Implications of the nucleation layer microstructure. *IEEE Elect. Device Lett.* 2010;31(12):1395–1397. <https://doi.org/10.1109/LED.2010.2077730>
23. Killat N., Montes M., Pomeroy J.W., et al. Thermal Properties of AlGaN/GaN HFETs on Bulk GaN Substrates. *IEEE Elect. Device Lett.* 2012;33(3):366–368. <https://doi.org/10.1109/LED.2011.2179972>
24. Rampazzo F., Pierobon R., Pacetta D., et al. Hot carrier aging degradation phenomena in GaN based MESFETs. *Microelectron. Reliability*. 2004;44(9–11):1375–1380. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2004.07.017>
25. Wang K., Jiang H., Liao Y., Xu Y., Yan F., Ji X. Degradation Prediction of GaN HEMTs under Hot-Electron Stress Based on ML-TCAD Approach. *Electronics*. 2022;11(21):3582. <https://doi.org/10.3390/electronics11213582>
26. Stopel A., Khramtsov A., Katz O., et al. *Proc. Of the Int. Conf. on GaAs Manufact. Technol.* New Orleans. 2005;14–19. Available from URL: <https://cris.tau.ac.il/en/publications/direct-monitoring-of-hot-carrier-accumulated-charge-in-gan-hemt-a>
27. Rasel M.A.J., Zhang D., Chen A., Thomas M., House S.D., Kuo W., Watt J., Islam A., Glavin N., Smyth M., Haque A., Wolfe D.E., Pearton S.J. Temperature-Induced Degradation of GaN HEMT: An *In situ* Heating Study. *J. Vacuum Sci. Technol. B*. May 2024;42(3):032209. <https://doi.org/10.1116/6.0003490>
28. Bosi G., Raffo A., Vadalà V., Giofrè R., Crupi G., Vannini G. A Thorough Evaluation of GaN HEMT Degradation under Realistic Power Amplifier Operation. *Electronics*. 2023;12(13):2939. <https://doi.org/10.3390/electronics12132939>
29. Dammann M., Baeumler M., Brückner P., et al. Degradation of 0.25 μm GaN HEMTs under high temperature stress test. *Microelectron. Reliability*. 2015;55(9–10):1667–1671. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.06.042>
30. Joglekar A., Lian C., Baskaran R., et al. Finite Element Analysis of Fabrication- and Operation-Induced Mechanical Stress in AlGaN/GaN Transistors. *IEEE Trans. Semiconduct. Manufact.* 2016;29(4):349–354. <https://doi.org/10.1109/TSM.2016.2600593>
31. Klimov A.O. Thermomechanical response study of the FET crystal changing its vertical orientation in Solder. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye pribory = Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*. 2019;2(253):64–71 (in Russ.).
32. Joh J., del Alamo J.A., Langworthy K., Xie S., Zheleva T. Role of stress voltage on structural degradation of GaN high-electron-mobility transistors. *Microelectron. Reliability*. 2011;51(2):201–206. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2010.08.021>
33. Morkoc H. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. V. 3. Materials Properties, Physics and Growth*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co; 2008. 850 p. ISBN 978-3-527-40838-2
34. Ancona M.G., Binari S.C., Meyer D.J. Fully coupled thermoelectromechanical analysis of GaN high electron mobility transistor degradation. *J. Appl. Phys.* 2012;111(7):074504. <https://doi.org/10.1063/1.3698492>
35. Tsao Y.-F., Wang Y., Chiu P.-H., Hsu H.-T. Reliability Assessment of 60-GHz GaN Power Amplifier Under High-Level Input RF Stress. *IEEE Trans. Elect. Devices*. 2024;71(7):4087–4092. <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3397634>
36. Han Y., Tang G., Lau B.L. Thermal Characterization and Management of GaN-on-SiC High Power Amplifier MMIC. In: *IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. IEEE; 2023. P. 1989–1993. <http://doi.org/10.1109/ectc51909.2023.00342>
37. Demirtas S., del Alamo J.A. Effect of Trapping on the Critical Voltage for Degradation in GaN High Electron Mobility Transistors. In: *IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*. IEEE; 2010. P. 134–138. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2010.5488838>

Об авторе

Миннебаев Вадим Минхатович, к.т.н., доцент, заместитель генерального директора по развитию ЭКБ, АО «Микроволновые системы» (105122, Россия, Москва, Щёлковское шоссе, д. 5, стр. 1). E-mail: vm@mwsystems.ru. Scopus Author ID 6602931676, SPIN-код РИНЦ 8336-0490, <https://orcid.org/0000-0002-3992-5196>

About the author

Vadim M. Minnebaev, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Deputy General Director on the Development of Electronic Components, Microwave Systems JSC (5-1, Shchelkovskoye sh., Moscow, 105122 Russia). E-mail: vm@mwsystems.ru. Scopus Author ID 6602931676, RSCI SPIN-code 8336-0490, <https://orcid.org/0000-0002-3992-5196>