

07
Диоды Шоттки на основе монокристаллических гетероструктур Al/AlGaIn/GaN для микроволнового детектирования с нулевым смещением

© Н.В. Востоков, М.Н. Дроздов, М.А. Калинин, С.А. Краев, Д.Н. Лобанов, П.А. Юнин

Институт физики микроструктур РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: vostokov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 27 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 30 декабря 2024 г.
Принято к публикации 11 февраля 2025 г.

Исследованы микроволновые свойства новых полностью монокристаллических низкобарьерных диодов Шоттки Al/AlGaIn/GaN с приповерхностным поляризационно-индуцированным δ -легированием. Использована оригинальная методика микроволновых измерений тестовых структур на ростовой пластине. Продемонстрирована возможность создания высокочувствительного, работающего без постоянного смещения микроволнового детектора на основе планарной низкобарьерной гетероструктуры металл-полупроводник-металл, не требующего формирования омического контакта полупроводника с металлом. Оценки показали, что критическая частота такого детектора может достигать величины около 100 GHz для актуальных значений площади детектирующего контакта $\sim 10 \mu\text{m}^2$.

Ключевые слова: низкобарьерный GaN-диод Шоттки, микроволновые измерения на пластине, структурные дефекты и ловушки в полупроводнике, микроволновый детектор, работающий без постоянного смещения.

DOI: 10.61011/JTF.2025.06.60464.151-24

Введение

Освоение микроволнового терагерцового диапазона частот электромагнитного спектра требует создания удобных и компактных твердотельных устройств для детектирования, смещения и выпрямления сигналов. Наиболее распространенными нелинейными элементами в неохлаждаемых приемниках и RF/DC конвертерах микроволнового терагерцового излучения являются диоды с барьером Шоттки (Мотта) [1,2]. Диоды широко используются в смесительных и выпрямительных схемах. Несколько реже диоды Шоттки применяют как квадратичные и видеодетекторы [3]. Для обеспечения высокой чувствительности при детектировании необходимы диоды с пониженной эффективной высотой барьера Шоттки, что позволяет не использовать постоянное смещение. Это упрощает конструкцию приемника и приводит к снижению уровня шумов из-за отсутствия постоянного тока смещения. В качестве примера можно привести низкобарьерные диоды Мотта на основе GaAs с приповерхностным изотипным δ -легированием [4,5]. В смесительном режиме работы снижение эффективной высоты барьера диода позволяет уменьшить необходимый уровень мощности гетеродина [6,7], в выпрямительном режиме — увеличивает эффективность RF/DC преобразования при низкой мощности микроволнового сигнала [8,9]. Разрабатываются также и другие виды нелинейных элементов, работающих без постоянного смещения. Например, диоды с объемным барьером [10], диоды на основе гетероструктур InAs/AlSb/AlGaSb с межзонным

туннелированием [11], резонансно-туннельные диоды на основе AlAs/InGaAs/InAs [12], ASPAT диоды [13], диоды полуметалл/полупроводник [14], диоды с гетеробарьером InP/InGaAs [15], гетероструктурные диоды с варизонным барьером AlGaInAs [16], гетеробарьерные диоды на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs [17], самопереключаемые диоды [18], латеральные диоды [19], полевые транзисторы [20] и др.

Специфика широкозонных нитридов заключается в возможности создания приборов, работающих при высоких плотностях мощности и температурах, воздействии радиации и в агрессивных средах [21]. Уникальные характеристики этих материалов связаны с большой энергией связи атомов в кристаллической решетке и широкой запрещенной зоной. В то же время это затрудняет создание низких эмиссионных барьеров. Существует мало исследований, посвященных диодам, работающим без постоянного смещения, на основе GaN. Из немногочисленных примеров можно привести самопереключаемые [18] и латеральные [19] диоды. Отметим, что оба типа устройств хоть и называются диодами, но в них используется принцип транзисторного детектирования. Другой отличительной особенностью широкозонных нитридных полупроводников являются рекордные величины спонтанной поляризации и компонент пьезоэлектрического тензора. Сильные поляризационные эффекты могут быть использованы в качестве дополнительной степени свободы при разработке приборных гетероструктур на основе этих материалов [22]. В наших недавних работах [23,24] была продемонстрирована возможность

снижения эффективной высоты барьера Шоттки (Мотта) в гетероструктуре металл/AlGaN/GaN с Ga-поляризованностью за счет поляризационно-индуцированного δ -легирования гетероперехода AlGaN/GaN. Положительный поляризационный заряд, расположенный в плоскости гетерограницы AlGaN/GaN, формирует потенциальный рельеф с туннельно-прозрачным трапециевидным барьером у границы с металлом, что уменьшает эффективную высоту барьера диода. В [24] методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) были изготовлены полностью монокристаллические низкобарьерные диоды Шоттки с высокими значениями низкочастотной ампер-ваттной чувствительности $\alpha = -(dR/dU)/(2R)$ при малой удельной величине дифференциального сопротивления R при нулевом смещении U . В настоящей работе изучаются импеданс и характеристики детектирования таких диодов в микроволновом диапазоне. Исследуется влияние структурных дефектов, высокая плотность которых характерна для нитридных гетероструктур, выращиваемых на подложках с несогласованной решеткой.

1. Описание диодных структур и методы измерений

Диодные гетероструктуры выращивались методом МПЭ с плазменной активацией азота в установке STE 3N3 (SemiTEq) с источником активного азота HD25 (Oxford Applied Research). В качестве подложек использовались двухдюймовые пластины сапфира с ориентацией плоскости c (0001) параллельно поверхности пластины. После формирования буферных слоев выращивался сильно легированный донорами (Si) контактный слой n^+ -GaN толщиной $1 \mu\text{m}$. Далее выращивался номинально нелегированный барьерный слой GaN толщиной 120 nm , затем нелегированный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ толщиной 1 nm . В завершение ростового процесса для создания барьера Шоттки формировался эпитаксиальный монокристаллический металлический слой Al толщиной 70 nm из той же эффузионной ячейки, которая использовалась при росте полупроводниковой части гетероструктуры. Анализ химического состава гетероструктур проводился методом вторично-ионной масс-спектрометрии на установке TOF.SIMS-5 (IONTOF). Рентгенодифракционные измерения выполнялись на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Discover. Более подробно процесс изготовления и методы диагностики гетероструктур описаны в [24]. На рис. 1 схематично показана координатная зависимость положения дна зоны проводимости и положение уровня Ферми в низкобарьерной диодной гетероструктуре [23,24]. Исследовались две низкобарьерные диодные гетероструктуры D1 и D2 с близким составом твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \approx 0.6$) и для сравнения диодная гетероструктура D3 без слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ — обычный диод Шоттки Al/GaN со стандартной высотой барьера. Уровень легирования контактного слоя n^+ -GaN в диодных гетероструктурах D1–D3

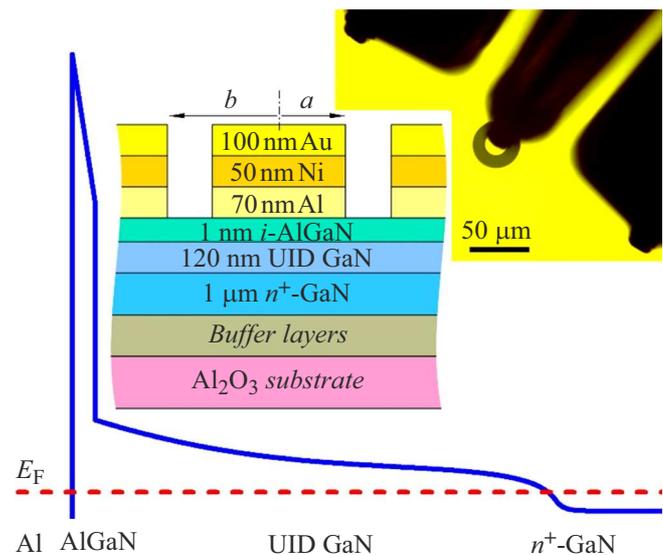


Рис. 1. Зонная диаграмма низкобарьерной диодной гетероструктуры. На вставке — схема слоев в тестовой диодной структуре и фотография тестовой структуры в контакте с микроволновым зондом.

составлял $1.2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ и $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ соответственно.

Для исследования микроволновых свойств диодов использовался подход, который применялся нами ранее для изучения различных электрофизических характеристик диодных и транзисторных гетероструктур на ростовой пластине [17,25]. Были изготовлены тестовые планарные диодные структуры, представляющие собой два встречновключенных контакта Шоттки, отделенных друг от друга кольцевым зазором, свободным от металлизации, с внутренним и внешним радиусами a и b соответственно. Для измерений использовались структуры с радиусами $a = 10 \mu\text{m}$, $b = 20 \mu\text{m}$. При формировании тестовых структур на образцы поверх слоя Al наносились дополнительные металлические слои Au/Ni (100 nm/50 nm) с использованием метода электронно-лучевого испарения. На вставке рис. 1 приведена схема слоев тестовой диодной структуры. Для проведения микроволновых измерений тестовые структуры подключались к векторному анализатору цепей E8361A (Agilent Technologies) с помощью микроволнового зонда (Cascade Microtech), как показано на фотографии на вставке рис. 1. Источник постоянного напряжения для измерения зависимостей параметров диодов от смещения и вольтметр для измерения продетектированного напряжения подключались к структурам через развязанную с микроволновым трактом низкочастотную цепь, встроенную в векторный анализатор цепей. Спектры импеданса структур $Z_m = Z_0 \cdot (1 + S_{11}) / (1 - S_{11})$ ($Z_0 = 50 \Omega$) определялись по измеренным частотным зависимостям коэффициента отражения зондирующего сигнала S_{11} . Измерения коэффициента отражения проводились в диапазоне

частот $f = 0.01–67$ GHz (1600 частот, распределенных по диапазону с логарифмическим шагом) при уровне мощности микроволнового сигнала, генерируемого векторным анализатором цепей, -20 dBm. Перед измерениями выполнялась однопортовая калибровка анализатора и микроволнового тракта с помощью стандартного набора калибровочных мер. Для определения неизвестных параметров диодной гетероструктуры вводилась функция невязки

$$\Phi = \sum_f \left\{ \left[\frac{\operatorname{Re}(Z_m - Z)}{\operatorname{Re}(Z_m)} \right]^2 + \left[\frac{\operatorname{Im}(Z_m - Z)}{\operatorname{Im}(Z_m)} \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

где суммирование ведется по всем частотам, на которых проводились измерения импеданса. Функция Φ характеризует относительное отклонение модельного значения импеданса тестовой диодной структуры Z от экспериментального значения Z_m . За искомые значения неизвестных параметров гетероструктуры принимались те значения, которые минимизировали функцию невязки. Процедура минимизации Φ проводилась в диапазоне частот $f = 0.05–50$ GHz. Импеданс тестовой структуры может быть представлен в виде суммы $Z = Z_i + Z_e + R_r$. Здесь Z_i импеданс внутреннего распределенного контакта Шоттки, Z_e импеданс внешнего распределенного контакта, $R_r = (\rho_r/2\pi) \cdot \ln(b/a)$ сопротивление кольцевой полупроводниковой области со слоевым сопротивлением ρ_r , расположенной между внутренним и внешним контактами. Задача об импедансе распределенных контактов металл–полупроводник различной формы многократно рассматривалась в литературе [26,27]. Решение основано на представлении контакта линией передачи с постоянной распространения малого сигнала $\gamma = (\rho \cdot g)^{1/2}$, где g — адмиттанс единицы площади перехода между металлом и полупроводником, ρ — слоевое сопротивление полупроводника под металлом. Для исследуемых структур с высокой степенью точности $\rho = \rho_r$ и определяется слоевым сопротивлением сильно легированного контактного слоя. Предполагается, что падением постоянного напряжения на необедненной области полупроводника можно пренебречь, поэтому γ не зависит от координат. С учетом этого импедансы внутреннего и внешнего распределенных контактов тестовой структуры определяются выражениями [25,27]:

$$Z_i = \frac{\rho}{2\pi\gamma a} \frac{I_0(\gamma a)}{I_1(\gamma a)}, \quad (2)$$

$$Z_e = \frac{\rho}{2\pi\gamma b} \frac{K_0(\gamma b)}{K_1(\gamma b)}, \quad (3)$$

где I_n и K_n — модифицированные функции Бесселя n -го порядка. При измерениях зависимостей параметров диодных гетероструктур от постоянного напряжения смещения внутренний контакт тестовой структуры являлся измерительным. При обратных и небольших прямых смещениях внутреннего контакта, падением постоянного напряжения на внешнем контакте можно

пренебречь из-за его значительно большей площади. Это позволяет также использовать тестовые структуры для измерений статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов. ВАХ низкобарьерных диодов D1 и D2 измерялись на тех же тестовых структурах, на которых проводились микроволновые измерения. ВАХ диодной гетероструктуры D3 измерялась на отдельном образце с использованием контакта Шоттки диаметром $10 \mu\text{m}$ и омического контакта, сформированного вплавлением нанесенной на поверхность полупроводника капли индия. Измерения статических ВАХ проводились с помощью параметрического анализатора 4200-SCS (Keithley Instruments). При исследовании характеристик детектирования внутренний контакт тестовой структуры являлся детектирующим, а внешний играл роль омического контакта. Как следует из расчетов, сделанных по результатам проведенных измерений, в используемом диапазоне частот радиус внутреннего контакта меньше характерной длины затекания в него тока $|\gamma|^{-1}$, поэтому контакт ведет себя как нелинейный с сосредоточенными параметрами. Поскольку $\operatorname{Re}Z_i \gg \operatorname{Re}Z_e$, во внутреннем контакте поглощается много бóльшая мощность, чем во внешнем. Кроме того, нелинейные свойства внешнего контакта сильно подавлены так как его размеры много больше $|\gamma|^{-1}$ [27]. По этим причинам детектирующими свойствами внешнего контакта можно пренебречь. Измерения вольт-ваттной чувствительности тестовых диодных структур проводились без подачи внешнего смещения на нескольких фиксированных частотах при уровне мощности микроволнового сигнала, генерируемого векторным анализатором цепей, -20 dBm. Продетектированное напряжение измерялось с помощью мультиметра 34401A (Agilent Technologies). Измерение коэффициента отражения микроволнового сигнала от диодной структуры совместно с калибровочными измерениями позволяли определить поглощенную в структуре мощность.

2. Результаты и обсуждение

Статические ВАХ и зависимости удельного дифференциального сопротивления и низкочастотной амперваттной чувствительности от напряжения для исследуемых диодных структур приведены на рис. 2. Зависимости $R(U)$ и $\alpha(U)$ получены численным дифференцированием измеренных ВАХ. Значения этих параметров при нулевом смещении приведены в таблице. Отличие ВАХ диодов D1 и D2, по-видимому, в основном связано с небольшим различием состава твердого раствора слоя AlGaIn.

На рис. 3 символами показаны частотные зависимости действительных и мнимых частей импеданса тестовых диодных структур, измеренные при нулевом напряжении постоянного смещения. Полученные спектры не описываются простейшей моделью адмиттанса барьера Шоттки, соответствующей эквивалентной схеме с

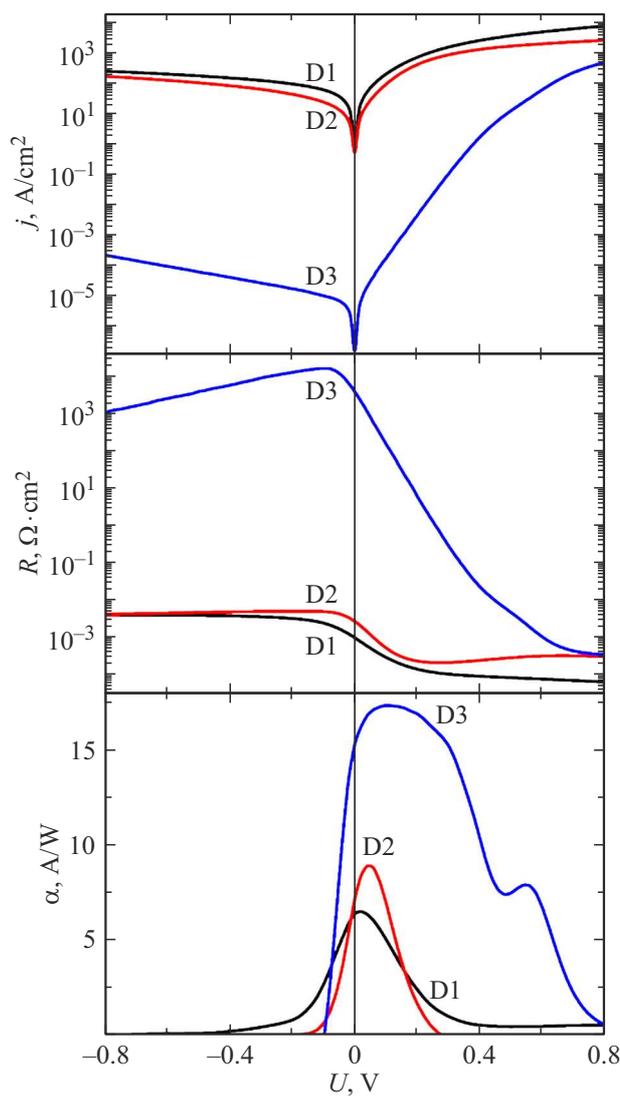


Рис. 2. Статические ВАХ и зависимости удельного дифференциального сопротивления и низкочастотной ампер-ваттной чувствительности от напряжения для исследуемых диодных структур.

параллельным соединением независимых от частоты барьерных сопротивления R_b и емкости C_b . Можно предположить, что причиной этого является влияние структурных дефектов с ловушечными состояниями в запрещенной зоне номинально нелегированного барьерного слоя GaN. Для учета влияния ловушек будем использовать простейший подход, согласно которому контакт Шоттки может быть описан с помощью эквивалентной схемы, показанной на вставке рис. 3 [28,29]. Соответствующий адмиттанс единицы площади контакта определяется выражением

$$g = \left[\left(\frac{1}{R_b} + i2\pi f C_b + \frac{i2\pi f C_t}{1 + i2\pi f R_t C_t} \right)^{-1} + r \right]^{-1}. \quad (4)$$

Параметры диодов

Название диода	D1	D2	D3
$R(U=0), \Omega \cdot \text{cm}^2$	$9.7 \cdot 10^{-4}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	3800
$\alpha(U=0), \text{A/W}$	6.4	7.2	15.4
$R_b(U=0), \Omega \cdot \text{cm}^2$	$9.2 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	
$C_b(U=0), \text{F/cm}^2$	$9.9 \cdot 10^{-8}$	$1.08 \cdot 10^{-7}$	$7.8 \cdot 10^{-8}$
$l_d(U=0), \text{nm}$	93	85	118
$r(U=0), \Omega \cdot \text{cm}^2$	$4.3 \cdot 10^{-6}$	$4.8 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$
$R_t(U=0), \Omega \cdot \text{cm}^2$	$8.4 \cdot 10^{-3}$	$5.9 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$
$C_t(U=0), \text{F/cm}^2$	$6.9 \cdot 10^{-8}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$	$8.1 \cdot 10^{-8}$
$\tau(U=0), \text{s}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$9 \cdot 10^{-10}$	$1.1 \cdot 10^{-9}$
$R_{hf}(U=0), \Omega \cdot \text{cm}^2$	$8.3 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$
$C_{lf}(U=0), \text{F/cm}^2$	$1.68 \cdot 10^{-7}$	$2.58 \cdot 10^{-7}$	$1.59 \cdot 10^{-7}$
ρ, Ω	21	14	60
$\mu, \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	250	220	350

Здесь i — мнимая единица, последовательная цепь $R_t C_t$ описывает ловушечные состояния, r — сопротивление необедненной части барьерного слоя в расчете на единицу площади (если имеет место непреднамеренное легирование слоя). Значения параметров диодных гетероструктур при нулевом смещении, полученные с помощью процедуры минимизации Φ , приведены в таблице. Соответствующие модельные частотные зависимости Z , показанные сплошными линиями на рис. 3, демонстрируют хорошее соответствие с экспериментальными зависимостями. Для сравнения штриховыми линиями показаны модельные спектры импеданса в отсутствие ловушек. Наиболее сильно влияние ловушек проявляется у высокобарьерного диода D3. Большое сопротивление барьера Шоттки этого диода не вносит вклада в импеданс в исследуемом диапазоне частот, поэтому действительная часть импеданса на частотах меньших единиц GHz определяется сопротивлением ловушек. Как следует из таблицы, значения дифференциального сопротивления барьера Шоттки низкобарьерных диодов D1 и D2, полученные из спектров импеданса (R_b), близки к соответствующим статическим значениям, определенными по ВАХ (R). Величины подвижности электронов μ в контактном слое вычислены из полученных значений ρ . Толщины обедненных областей l_d , определенные по значениям барьерной емкости C_b , меньше толщины барьерного слоя. Это указывает на то, что в номинально нелегированных барьерных слоях присутствует непреднамеренное донорное легирование и слои обеднены не полностью. Это подтверждается полученными ненулевыми значениями сопротивлений r . В высокобарьерном диоде D3 барьерный слой близок к полному обеднению, и величина r на порядок меньше, чем у низкобарьерных диодов. При формировании гетероструктур, для получения атомарно плоской ростовой поверхности использовался металл-обогащенный режим эпитаксиального роста барьерных слоев, благоприятствующий образованию в полупроводнике вакансий азота [30,31]. Поэтому наиболее вероятно, что наблюдаемое

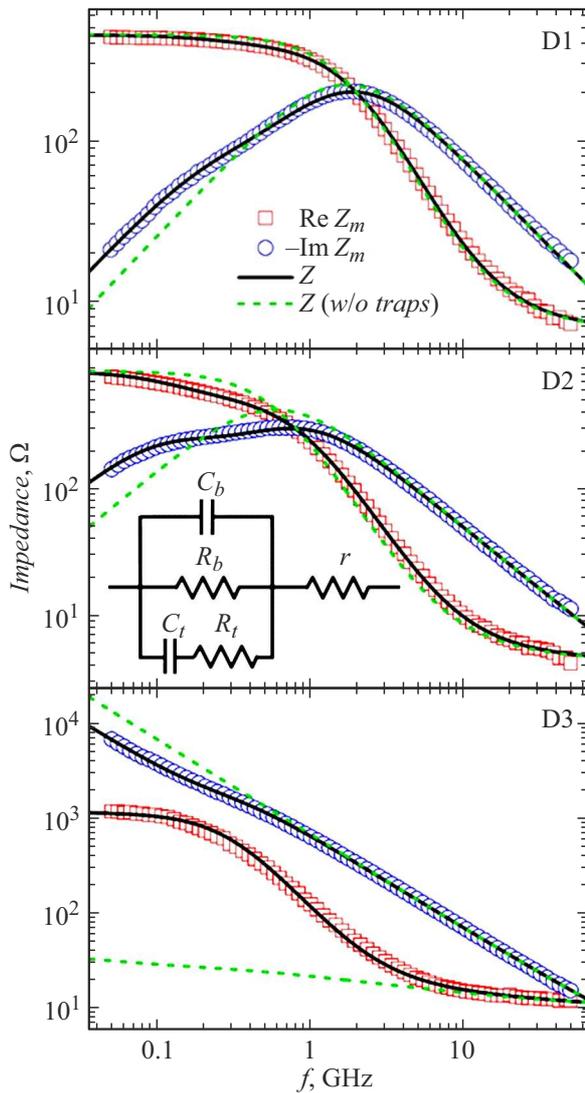


Рис. 3. Экспериментальные (символы) и модельные (линии) спектры импеданса тестовых диодных структур при нулевом напряжении постоянного смещения. На вставке показана используемая эквивалентная схема контакта Шоттки.

непреднамеренное донорное легирование GaN связано с вакансиями азота [32]. Как видно из таблицы, $C_t \sim C_b$. Из этого следует, что концентрация ловушек больше или порядка концентрации ионизированных некомпенсированных доноров [28]. Это также указывает на то, что ловушками могут быть сами вакансии азота. Как следует из таблицы, время релаксации заполнения ловушек в диодах $\tau = R_t C_t \sim 10^{-9}$ s. Для характерных сечений захвата электронов ловушками в GaN $10^{-16} - 10^{-13}$ cm² такое время релаксации при комнатной температуре соответствует положению ловушечных уровней на 0.07–0.25 eV ниже зоны проводимости [28,33]. Структурными дефектами с ловушечными состояниями в этом диапазоне энергий могут быть как вакансии азота, так и некоторые типы дислокаций [34]. На частотах, много меньших $(2\pi\tau)^{-1}$, емкость диода определяется суммой барьерной

емкости и емкости ловушек $C_{lf} = C_b + C_t$. На частотах, много больших $(2\pi\tau)^{-1}$, ловушки практически не вносят вклада в емкость диода и уменьшают его сопротивление $R_{hf} = R_b R_t / (R_b + R_t)$, что улучшает возможности согласования диода с микроволновым трактом.

На рис. 4 приведены зависимости параметров диодных гетероструктур от постоянного напряжения смещения. Полученные зависимости барьерного дифференциального сопротивления низкобарьерных диодов D1 и D2 находятся в хорошем соответствии с аналогичными зависимостями, определенными по статическим ВАХ. Барьерная емкость низкобарьерных диодов при увеличении обратного смещения сначала уменьшается, а потом почти не меняется из-за наступления полного обеднения барьерного слоя. По той же причине, с ростом обратного смещения сопротивление необеденной части барьерного слоя уменьшается и обращается в нуль. У диода D3 барьерный слой при нулевом смещении близок к полному обеднению, поэтому зависимость барьерной емкости от обратного смещения слабая. Как следует из рис. 4, с ростом обратного смещения ловушечная емкость всех трех диодов и время релаксации заполнения ловушек

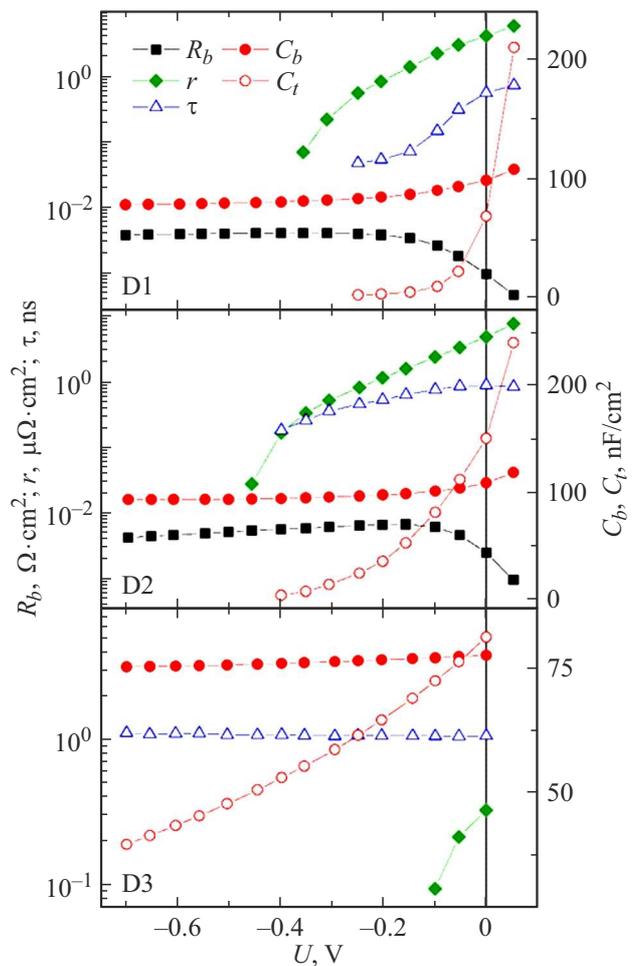


Рис. 4. Зависимости параметров диодных гетероструктур от постоянного напряжения смещения.

в низкобарьерных диодах уменьшается, что соответствует простейшей модели ловушек в контакте Шоттки к однородно легированному полупроводнику [28]. Другое поведение времени релаксации заполнения ловушек при обратных смещениях в диоде D3 ($\tau(U) \approx \text{const}$), вероятно, связано с полным обеднением барьерного слоя и влиянием сильно легированного контактного слоя. Методом вольт-фарадного профилирования [33] с использованием найденных зависимостей $C_b(U)$ построены профили распределения концентрации электронов по глубине в барьерных слоях низкобарьерных диодов. Из полученных профилей, показанных на рис. 5 (квадратные и круглые символы), следует, что концентрация ионизированных некомпенсированных доноров в барьерных слоях $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Резкий рост концентрации на профилях связан с приближением границы обедненной области к сильнолегированному контактному слою. Интересно отметить, что при измерениях емкости на низких частотах можно получить завышенную концентрацию электронов/доноров из-за вклада емкости ловушек. Для демонстрации этого на рис. 5 незакрашенными треугольными символами показан профиль концентрации, построенный по вольт-фарадной зависимости высокобарьерной диодной гетероструктуры D3, которая была получена с помощью стандартного LCR-метра на частоте 1 МГц с использованием контакта Шоттки диаметром $200 \mu\text{m}$, изготовленного на отдельном образце. Наблюдаемая величина концентрации завышена на порядок. Почти идентичный профиль (закрашенные треугольные символы на рис. 5) получается при использовании для его построения суммы найденных зависимостей барьерной и ловушечной емкости от напряжения $C_{lf}(U) = C_b(U) + C_l(U)$ диода D3.

На рис. 6 символами показаны экспериментальные зависимости вольт-ваттной чувствительности тестовых диодных структур от частоты. Полученные характеристики не описываются стандартной частотной зависимостью вольт-ваттной чувствительности диода Шоттки [35]. Разумно предположить, что это связано с присутствием ловушек. Ловушки обладают токовой нелинейностью ($R_t(U) \neq \text{const}$), но не могут создавать постоянного тока. Поэтому их влияние на вольт-ваттную чувствительность исчерпывается дополнительным поглощением микроволновой мощности. С учетом этого, используя подход [35], несложно получить выражение для вольт-ваттной чувствительности тестовой диодной структуры с ловушками

$$\mathfrak{R} = \alpha \frac{\hat{R}_b R_1}{[r_s(0) + \hat{R}_b + R_1] \left[1 + \frac{r_s(f)}{\hat{R}_b} \right]} \times \left[1 + \frac{(2\pi f)^2 \hat{R}_b r_s(f) \hat{C}_b^2}{1 + \frac{r_s(f)}{\hat{R}_b}} \xi(f) \right]^{-1}. \quad (5)$$

Здесь $\hat{R}_b = R_b/(\pi a^2)$, $\hat{C}_b = C_b \cdot (\pi a^2)$, R_1 — входное сопротивление мультиметра, измеряющего протекти-

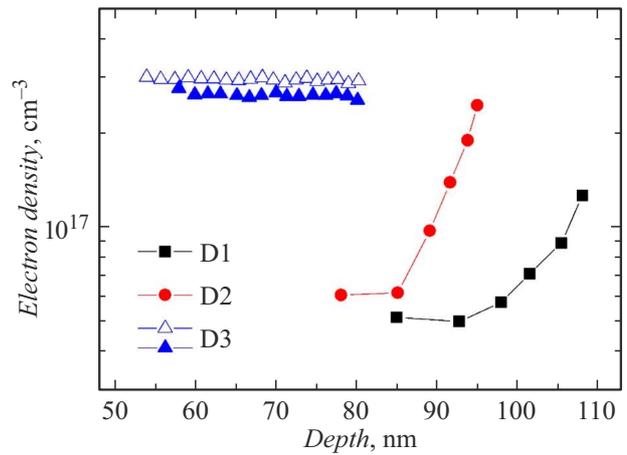


Рис. 5. Профили распределения концентрации электронов по глубине в барьерных слоях низкобарьерных диодных гетероструктур D1 и D2, построенные с использованием зависимостей $C_b(U)$ — квадратные и круглые символы. Профиль концентрации, построенный по вольт-фарадной зависимости диодной гетероструктуры D3, полученной на частоте 1 МГц, — незакрашенные треугольные символы. Профиль концентрации, построенный с использованием зависимости $C_{lf}(U)$ диодной гетероструктуры D3, — закрашенные треугольные символы.

рованное напряжение (при измерении низкобарьерных диодов D1 и D2 это сопротивление выбиралось равным $10 \text{ M}\Omega$, для измерения диода D3 — $10 \text{ G}\Omega$). Отличия от обычного диода состоят в том, что в выражении для вольт-ваттной чувствительности (5) присутствует дополнительный множитель

$$\xi(f) = 1 + \left(\frac{C_l}{C_b} \right)^2 \frac{1 + \frac{2R_t}{R_b} + \frac{2C_b}{C_l} + \frac{\hat{R}_b}{r_s(f)}}{1 + (2\pi f R_l C_l)^2}, \quad (6)$$

связанный с ловушками, и последовательное сопротивление зависит от частоты

$$r_s(f) = \frac{r}{\pi a^2} + \frac{\rho}{8\pi} + \frac{\rho}{2\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right) + \text{Re}[Z_e(f)]. \quad (7)$$

Как видно из выражения (7), последовательное сопротивление складывается из четырех слагаемых: сопротивление необедненной части барьерного слоя под внутренним контактом; сопротивление растекания в контактном слое под внутренним контактом [26]; сопротивление кольцевой полупроводниковой области между внутренним и внешним контактами; действительная часть импеданса внешнего контакта. Расчетные частотные зависимости \mathfrak{R} , показанные сплошными линиями на рис. 6, демонстрируют хорошее соответствие с экспериментом. При построении расчетных зависимостей подгоночным параметром служила низкочастотная ампер-ваттная чувствительность α . Для диодов D1–D3 получены значения $\alpha(A/W)$ 5.9, 7.5 и 13 соответственно, близкие к значениям, определенным по статическим ВАХ. Штриховыми линиями показаны зависимости $\mathfrak{R}(f)$, которые имели бы

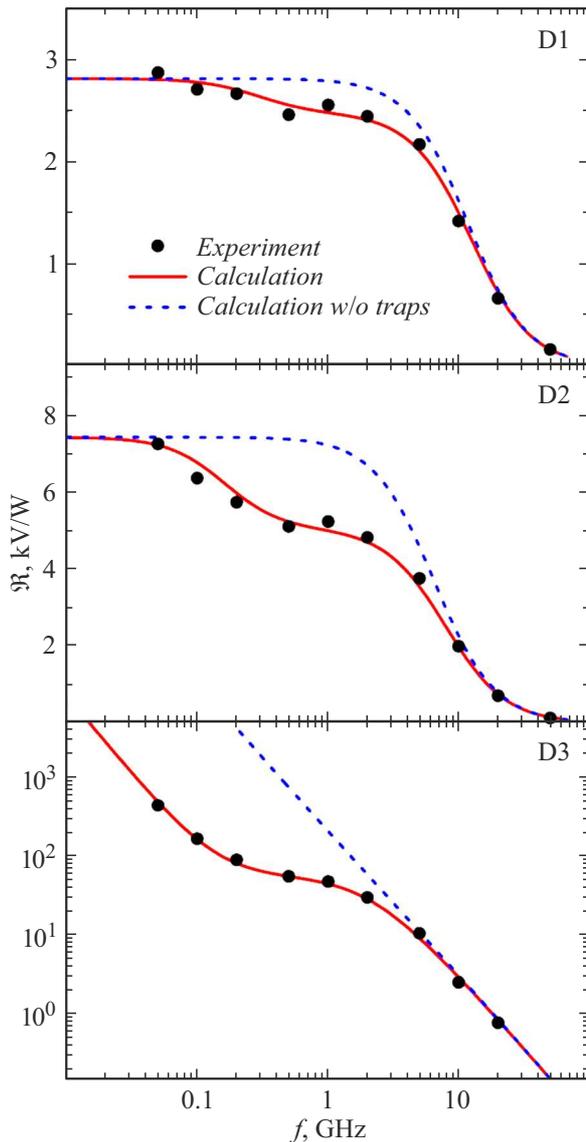


Рис. 6. Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) зависимости вольт-ваттной чувствительности тестовых диодных структур от частоты.

место без ловушек. Видно, что ловушки снижают вольт-ваттную чувствительность, но в случае низкобарьерных структур не очень существенно — в пределах десятков процентов. Отметим, что частотную зависимость вольт-ваттной чувствительности высокобарьерной диодной структуры D3 удалось измерить, как раз, благодаря ловушкам, которые увеличивают микроволновую проводимость диода на несколько порядков величины, что улучшает его согласование с микроволновым трактом. Проведенные измерения демонстрируют возможность использования планарной низкобарьерной структуры металл–полупроводник–металл в качестве чувствительного элемента детектора. Это особенно актуально для исследуемых низкобарьерных гетероструктур, в которых барьер Шоттки формируется *in situ*, что не позволяет

использовать высокотемпературный термический отжиг в последующих технологических операциях для изготовления омического контакта диода.

С ростом частоты детектируемого сигнала вольт-ваттная чувствительность диода уменьшается из-за увеличения шунтирующего действия барьерной емкости и роста доли микроволновой мощности, рассеиваемой на последовательном сопротивлении. При частоте сигнала f_c , называемой критической частотой детектирования [35], на последовательном сопротивлении рассеивается половина всей поглощаемой микроволновой мощности и $\Re(f_c) = \Re(0)/2$. Одним из путей увеличения критической частоты является уменьшение барьерной емкости детектирующего контакта за счет уменьшения его площади. Рассмотрим на примере гетероструктуры D1, как последовательное сопротивление и критическая частота зависят от радиуса внутреннего контакта a . На рис. 7 штриховыми линиями показаны расчетные зависимости $r_s(a)$ при $f = 0, 100$ GHz и зависимость $f_c(a)$ для этой гетероструктуры. При $a = 10 \mu\text{m}$ все четыре слагаемых в выражении для последовательного сопротивления (7) одного порядка величины и, например, на частоте 100 GHz равны (Ω) 1.4, 0.8, 2.3 и 1.1. Как следует из графиков, с уменьшением a последовательное сопротивление быстро растет, а критическая частота вследствие этого растет относительно медленно. Быстрый рост последовательного сопротивления связан с первым слагаемым — сопротивлением необедненной части барьерного слоя под внутренним контактом, которое квадратично зависит от a . Второе и четвертое слагаемые не зависят от a , третье слагаемое имеет слабую логарифмическую зависимость. Из этого следует, что для оптимизации диодной гетероструктуры необходимо

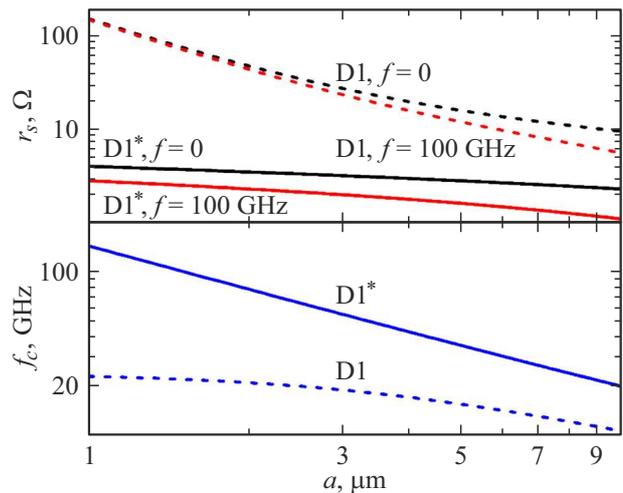


Рис. 7. Расчетные зависимости последовательного сопротивления (при $f = 0$ и 100 GHz) и критической частоты от радиуса внутреннего контакта тестовой структуры для диодной гетероструктуры D1 — штриховые линии, и для гипотетической диодной гетероструктуры D1* с оптимизированными параметрами барьерного и контактного слоев — сплошные линии.

в первую очередь избавиться от необедненной области в барьерном слое, т.е. перейти от контакта Шоттки к контакту Мотта. Простейший путь — уменьшение толщины барьерного слоя до величины немного меньшей толщины обедненной области l_d . Дополнительное уменьшение последовательного сопротивления возможно за счет увеличения толщины и удельной проводимости контактного слоя. На рис. 7 сплошными линиями показаны расчетные зависимости $r_s(a)$ и $f_c(a)$ для гипотетической оптимизированной диодной гетероструктуры D1*, которая имеет толщину барьерного слоя 75 nm, слои сопротивление контактного слоя 4.7Ω (толщина слоя $2 \mu\text{m}$, концентрация электронов $6 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$, их подвижность $110 \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), а в остальном идентична гетероструктуре D1. Используемые для расчета значения концентрации и подвижности электронов в контактном слое наблюдались в реальных структурах со слоями n^+ -GaN, выращенных в нашей установке МПЭ. Как следует из рисунка, для гетероструктуры D1* при $a = 1 \mu\text{m}$ достигается критическая частота 145 GHz.

Заключение

В работе исследованы микроволновые свойства полнотью монокристаллических низкобарьерных диодов Шоттки Al/AlGaN/GaN, изготовленных методом МПЭ. Исследуемые низкобарьерные диоды имели удельное дифференциальное сопротивление $\sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ и низкочастотную ампер-ваттную чувствительность около 7 A/W при нулевом смещении. Использовалась оригинальная методика микроволновых измерений тестовых структур на ростовой пластине. Определены все основные параметры диодных гетероструктур и характеристики детектирования диодов. Показано, что в барьерном слое GaN присутствует непреднамеренное донорное легирование, вероятно, вакансиями азота, приводящее к неполному обеднению слоя. Толщина обеднения барьерного слоя определяет барьерную емкость, которая для исследуемых низкобарьерных диодов имела удельную величину $\approx 10^{-7} \text{F/cm}^2$ при нулевом смещении. Необедненная часть барьерного слоя вносит основной вклад в последовательное сопротивление диодов малой площади. Измерения показали, что диодные гетероструктуры содержат ловушечные состояния в запрещенной зоне полупроводника с временем релаксации заполнения $\sim 10^{-9} \text{s}$. Наблюдаемые в барьерном слое ловушки, предположительно связанные с вакансиями азота или дислокациями, оказывают заметное влияние на импеданс и детектирующие свойства диодов. На частотах много больших обратной величины времени релаксации заполнения ловушки увеличивают проводимость диода, что улучшает возможности его согласования с микроволновой линией передачи или антенной, но приводят к снижению вольт-ваттной чувствительности. Продемонстрирована возможность создания работающего без постоянного смещения микроволнового детектора на осно-

ве планарной гетероструктуры металл–полупроводник–металл с двумя встречновключенными низкобарьерными контактами разной площади, не требующего формирования омического контакта полупроводника с металлом. Оценки показывают, что при оптимизации параметров гетероструктуры (уменьшении толщины барьерного слоя до его полного обеднения, увеличении толщины и уровня легирования контактного слоя) критическая частота такого детектора может достигать величины около 100 GHz для актуальных значений площади детектирующего контакта $\sim 10 \mu\text{m}^2$, что сопоставимо с лучшими достижениями.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10029, <https://rscf.ru/project/22-79-10029/>. Использовалось оборудование центра коллективного пользования „Физика и технология микро- и наноструктур“ Института физики микроструктур РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Sizov. *Semicond. Sci. Technol.*, **33** (12), 123001 (2018). DOI: 10.1088/1361-6641/aae473
- [2] L.-G. Tran, H.-K. Cha, W.-T. Park. *Micro Nano Syst. Lett.*, **5**, 14 (2017). DOI: 10.1186/s40486-017-0051-0
- [3] E.R. Brown. *Solid-State Electron.*, **48** (10-11), 2051 (2004). DOI: 10.1016/j.sse.2004.05.074
- [4] V.I. Shashkin, Y.A. Drjagin, V.R. Zakamov, S.V. Krivov, L.M. Kukin, A.V. Murel, Y.I. Chechenin. *Int. J. Infrared Millim. Waves*, **28** (11), 945 (2007). DOI: 10.1007/s10762-007-9272-2
- [5] П.В. Волков, Н.В. Востоков, А.В. Горюнов, Л.М. Кукин, В.В. Паршин, Е.А. Серов, В.И. Шашкин. *Письма в ЖТФ*, **45** (5), 56 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.05.47401.17613 [P.V. Volkov, N.V. Vostokov, A.V. Goryunov, L.M. Kukin, V.V. Parshin, E.A. Serov, V.I. Shashkin. *Tech. Phys. Lett.*, **45** (3), 239 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019030179]
- [6] В.Р. Закамов, В.И. Шашкин. *Радиотехника и электроника*, **56** (8), 1009 (2011). [V.R. Zakamov, V.I. Shashkin. *J. Commun. Technol. Electron.*, **56** (8), 1013 (2011). DOI: 10.1134/S1064226911060234]
- [7] S.A. Korolyov, A.P. Shikov, A.V. Goryunov, V.I. Shashkin. *IEEE Sensors Lett.*, **4** (5), 3500404 (2020). DOI: 10.1109/LENS.2020.2986370
- [8] B. Kapilevich, V. Shashkin, B. Litvak, G. Yemini, A. Etinger, D. Hardon, Y. Pinhasi. *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, **26** (8), 637 (2016). DOI: 10.1109/LMWC.2016.2585557
- [9] C.H.P. Lorenz, S. Hemour, K. Wu. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **64** (7), 2146 (2016). DOI: 10.1109/TMTT.2016.2574848
- [10] V.T. Vo, Z. Hu. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **54** (11), 3836 (2006). DOI: 10.1109/TMTT.2006.884628

- [11] Z. Zhang, R. Rajavel, P. Deelman, P. Fay. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, **21** (5), 267 (2011). DOI: 10.1109/LMWC.2011.2123878
- [12] P. Chahal, F. Morris, G. Frazier. *IEEE Electron Device Lett.*, **26** (12), 894 (2005). DOI: 10.1109/LED.2005.859622
- [13] K.N. Zainul Ariffin, Y. Wang, M.R.R. Abdullah, S.G. Muttalak, O.S. Abdulwahid, J. Sexton, K.W. Ian, M.J. Kelly, M. Missous. *IEEE Trans. Electron Devices*, **65** (1), 64 (2018). DOI: 10.1109/TED.2017.2777803
- [14] A.C. Young, J.D. Zimmerman, E.R. Brown, A.C. Gossard. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (16), 163506 (2005). DOI: 10.1063/1.2112201
- [15] H. Ito, T. Ishibashi. *Jpn J. Appl. Phys.*, **56** (1), 014101 (2017). DOI: 10.7567/JJAP.56.014101
- [16] S. Nadar, M. Zaknoute, X. Wallart, C. Coinon, E. Peytavit, G. Ducournau, F. Gamand, M. Thirault, M. Werquin, S. Jonniau, N. Thouvenin, C. Gaquiere, N. Vellas, J.-F. Lampin. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **7** (6), 780 (2017). DOI: 10.1109/TTHZ.2017.2755503
- [17] N.V. Vostokov, M.V. Revin, V.I. Shashkin. *J. Appl. Phys.*, **127** (4), 044503 (2020). DOI: 10.1063/1.5131737
- [18] P. Sangare, G. Ducournau, B. Grimbert, M. Faucher, C. Gaquiere. *Proc. of the 44th European Microwave Conference* (Rome, Italy, 6-9 Oct., 2014), p. 806. DOI: 10.1109/EuMC.2014.6986557
- [19] Q. Zhou, L. Liu, X. Zhou, A. Zhang, Y. Shi, Z. Wang, Y.G. Wang, Y. Fang, Y. Lv, Z. Feng, B. Zhang. *Electron. Lett.*, **51** (23), 1889 (2015). DOI: 10.1049/el.2015.2885
- [20] S. Regensburger, A.K. Mukherjee, H. Lu, A.C. Gossard, S. Preu. *Proc. of the 43rd International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves* (Nagoya, Jpn, 9-14 Sept., 2018). DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510198
- [21] R. Quay. *Gallium Nitride Electronics* (Springer, 2008)
- [22] *Polarization Effects in Semiconductors: From Ab Initio Theory to Device Applications*, ed. by C. Wood, D. Jena (Springer, 2008)
- [23] N.V. Vostokov, M.N. Drozdov, O.I. Khrykin, P.A. Yunin, V.I. Shashkin. *Appl. Phys. Lett.*, **116** (1), 013505 (2020). DOI: 10.1063/1.5132307
- [24] N.V. Vostokov, M.N. Drozdov, S.A. Kraev, D.N. Lobanov, A.V. Novikov, P.A. Yunin. *Appl. Phys. Lett.*, **121** (23), 233507 (2022). DOI: 10.1063/5.0131031
- [25] N.V. Vostokov, E.A. Koblov, S.A. Korolyov, M.V. Revin, V.I. Shashkin. *IEEE Trans. Electron Devices*, **65** (4), 1327 (2018). DOI: 10.1109/TED.2018.2803448
- [26] J.D. Wiley. *IEEE Trans. Electron Devices*, **25** (11), 1317 (1978). DOI: 10.1109/T-ED.1978.19272
- [27] Н.В. Востоков, С.А. Королев, В.И. Шашкин. *ЖТФ*, **84** (7), 91 (2014). [N.V. Vostokov, S.A. Korolev, V.I. Shashkin. *Tech. Phys.*, **59** (7), 1036 (2014). DOI: 10.1134/S1063784214070287]
- [28] J.L. Pautrat, B. Katircioglu, N. Magnea, D. Bensahel, J.C. Pfister, L. Revoil. *Solid-State Electron.*, **23** (11), 1159 (1980). DOI: 10.1016/0038-1101(80)90028-3
- [29] W.G. Oldham, S.S. Naik. *Solid-State Electron.*, **15** (10), 1085 (1972). DOI: 10.1016/0038-1101(72)90167-0
- [30] T. Mitsunaga, Y. Yagishita, M. Kurouchi, S. Kishimoto, J. Osaka, T. Mizutani. *Phys. Stat. Sol. C*, **5** (9), 3032 (2008). DOI: 10.1002/pssc.200779296
- [31] W. Kim, A.E. Botchkarev, A. Salvador, G. Popovici, H. Tang, H. Morkoc. *J. Appl. Phys.*, **82** (1), 219 (1997). DOI: 10.1063/1.365801
- [32] J.K. Sheu, G.C. Chi. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **14** (22), R657 (2002). DOI: 10.1088/0953-8984/14/22/201
- [33] D.K. Schroder. *Semiconductor Material and Device Characterization*, 3rd ed. (John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 2006)
- [34] A.Y. Polyakov, I.-H. Lee. *Mater. Sci. Eng. R*, **94**, 1 (2015). DOI: 10.1016/j.mser.2015.05.001
- [35] A.M. Cowley, H.O. Sorensen. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **14** (12), 588 (1966). DOI: 10.1109/TMTT.1966.1126337