

УДК 621.315.592

Г. Е. Яковлев, В. И. Зубков, А. В. Соломонов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Диагностика электрофизических параметров активных и буферных слоев нитридгаллиевых НЕМТ-гетероструктур

Методом электрохимического вольт-фарадного (ECV) профилирования исследованы нитридгаллиевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ). Измерены вольт-фарадные характеристики и спектры проводимости на различных частотах, получены профили распределения концентрации основных носителей заряда по глубине гетероструктур, определено пространственное расположение, а также уровни заполнения квантовых ям носителями заряда. Подробно изложены причины возникновения двумерного электронного газа (ДЭГ) в канале GaN НЕМТ, связанные со спонтанной и пьезоэлектрической поляризацией, а также факторы, влияющие на плотность носителей заряда в канале, и рабочие характеристики GaN НЕМТ-гетероструктур. Показана эффективность метода ECV для контроля качества как активных, так и буферных слоев GaN НЕМТ-гетероструктур. С учетом пьезоэлектрических полей проведен расчет плотности ДЭГ для различных технологических параметров интерфейса – таких, как взаимная ориентация слоев AlGaIn/GaN и состав $Al_xGa_{1-x}N$.

Электрохимическое вольт-фарадное профилирование, ECV, НЕМТ, GaN, КЯ, пьезоэлектрическая поляризация

Нитрид галлия обладает совокупностью свойств, позволяющих получать на его основе приборы, превосходящие по параметрам приборы на классических полупроводниках [1]. GaN и твердые растворы на его основе, как материалы для высокотемпературных, высоковольтных и сильноточных применений, позволяют существенно расширить операционные возможности полупроводниковой техники. Уникальное сочетание физических свойств GaN позволяет рассматривать нитридные полупроводники как наиболее перспективные материалы для создания приборов нового поколения. Именно с массовым внедрением нитрида галлия в настоящее время связывается прорыв в СВЧ- и силовой электронике. Однако следует отметить, что разработка и совершенствование таких приборов неуклонно приводит к ужесточению требований к точности воспроизводства последовательности слоев, состава и степени легирования лежащих в их основе полупроводниковых гетероструктур. Так, например, применительно к гетероструктурам нитридных транзисторов с высокой подвижностью электронов

(НЕМТ), занимающих передовые позиции в мощных СВЧ-приборах, особенно важно проводить исследования и контроль не только активных, но и буферных слоев гетероструктур, поскольку исходное наличие достаточно большого количества различного рода дефектов приводит к появлению ловушек захвата [2] и так называемому эффекту коллапса тока, ухудшающим частотные и мощностные свойства прибора. Поэтому отработка механизмов борьбы с данными негативными явлениями, а также проведение мер по оптимизации параметров гетероструктур для увеличения крутизны вольт-амперной характеристики, рабочих частот и мощности конечного прибора наиболее продуктивны в случае наличия и эффективного использования соответствующей диагностической базы для качественной и достоверной верификации параметров получаемых структур.

Таким образом, целью данной работы было прецизионное измерение профилей распределения концентрации основных носителей заряда (ОНЗ) по глубине, а также расчет плотности двумерного электронного газа (ДЭГ) на границе раз-

SiN _x , выглаживающий слой	20 Å
AlGaN, барьерный слой	240 Å
AlN, выглаживающий слой	10 Å
GaN, каналный слой	3 мкм
AlGaN/AlN, буферный слой	
SiC, подложка	

Тип I

GaN, выглаживающий слой	20 Å
Al _{0.33} Ga _{0.67} N, барьерный слой	120 Å
Al _{0.33} Ga _{0.67} N, донорный слой	100 Å
Al _{0.33} Ga _{0.67} N, спейсерный слой	20 Å
AlN, выглаживающий слой	10 Å
GaN, каналный/буферный слой	3 мкм
SiC, подложка	

Тип II

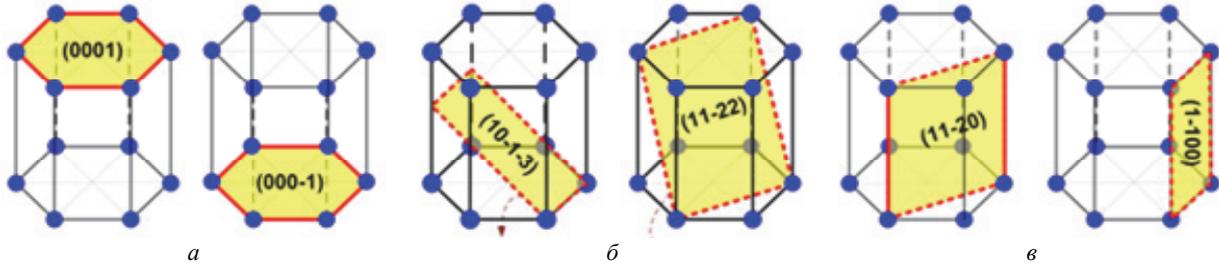


Рис. 1

Рис. 2

дела Al_xGa_{1-x}N/GaN при различных технологических параметрах и выработка рекомендаций по оптимизации параметров исследуемых образцов.

Исследуемые образцы. В данной работе исследовался набор GaN НЕМТ-гетероструктур двух типов (тип I – без дополнительного легирования, тип II – с дополнительным легированием донорного слоя). Дополнительное легирование донорного слоя применяется для увеличения проводимости канала и рабочего тока конечного НЕМТ-прибора. Послойная структура исследованных образцов представлена на рис. 1. Квантовая яма в таких структурах образуется за счет разрыва зон на границе раздела AlGaN/GaN, при этом канал с ДЭГ располагается со стороны слоя GaN. Поверхность гетероструктур I типа пассивировалась пленкой SiN_x в камере роста установки молекулярно-лучевой эпитаксии [3]. Тонкие (1...2 нм) выглаживающие слои GaN и AlN необходимы для улучшения структурных свойств и шероховатости, в частности наличие слоя AlN приводит к улучшению качества интерфейса GaN/AlGaN и заметному увеличению подвижности электронов в ДЭГ. К тому же, гетероструктуры со сверхтонким слоем AlN признаны наиболее подходящими для изготовления СВЧ-транзисторов из-за уменьшения эффектов короткого канала и низкого порогового напряжения [4].

Методика расчета встроенных пьезополей на интерфейсе AlGaN/GaN. В данном разделе представлены основы используемой в работе модели расчета встроенного электрического поля на границе раздела Al_xGa_{1-x}N/GaN с учетом поляризационных эффектов. Поляризационное поле

GaN НЕМТ складывается из двух составляющих – пьезоэлектрической и спонтанной. Спонтанная поляризация возникает вследствие особенностей решетки вюрцита и обусловлена природой химической связи, а именно тем, что в твердом теле геометрические центры отрицательных зарядов (электронов) не совпадают с центрами положительных зарядов (ядер). Это означает, что атомные связи между соседними атомами не эквивалентны, и объясняет, почему в большинстве полупроводников отсутствует спонтанная поляризация [5]. Пьезоэлектрическая поляризация вызвана деформацией кристаллической решетки из-за возникающего растягивающего напряжения при росте напряженного слоя Al_xGa_{1-x}N на GaN (Ga-граница) [6]. Из этого следует образование большой слоевой плотности заряда на обеих сторонах слоя AlGaN.

Спонтанная поляризация нитридных структур направлена вдоль полярной *c*-оси, которая совпадает с ориентацией (0001) сапфировой или SiC-подложки в процессе роста НЕМТ-структур (рис. 2, *a*). Полярные и неполярные ориентации плоскостей также показаны на рис. 2, *б* и *в*.

Ориентация системы координат, используемая в расчете, показана на рис. 3, *a*. Для расчета параметров кристаллической решетки вюрцита использовался закон Вегарда:

$$a_L = xa_{\text{AlN}} + (1-x)a_{\text{GaN}},$$

$$c_L = xc_{\text{AlN}} + (1-x)c_{\text{GaN}},$$

где индекс *L* обозначает слой Al_xGa_{1-x}N. Для дальнейшего удобства обозначений примем также $a_T = a_{\text{GaN}}$ и $c_T = c_{\text{GaN}}$.

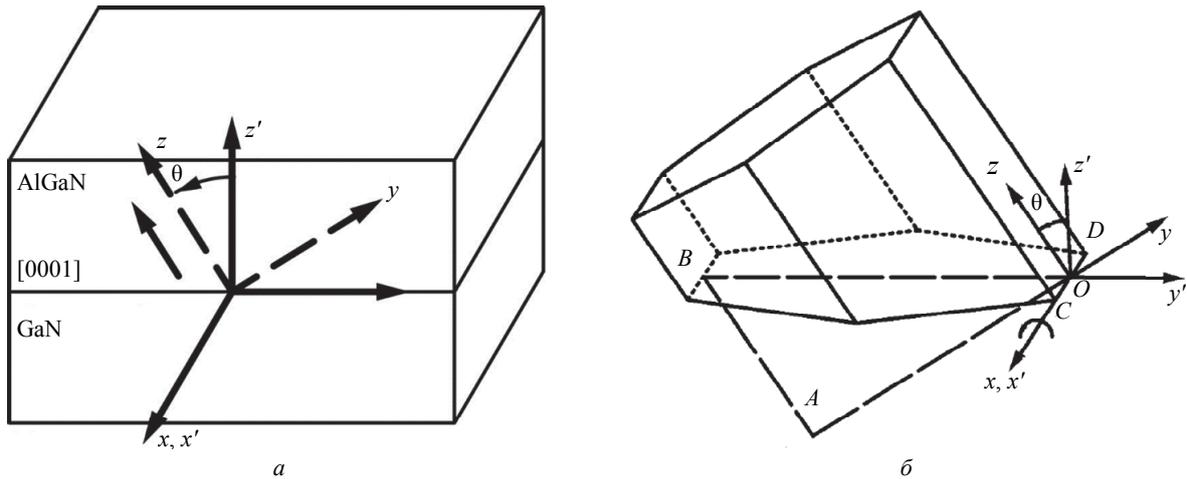


Рис. 3

Используемая модель предполагает, что c -ось в слое GaN наклонена на угол θ относительно вектора нормали к поверхности подложки. Для описания состояния упругости и поляризации в слое используются две координатные системы – xuz и $x'y'z'$ (рис. 3, б), для N - и P -систем координат (т. е. «natural» и «primed») соответственно. Ось z N -системы координат лежит в направлении $[0001]$ кристаллической решетки, две другие N -координаты x и y лежат в плоскости (0001) . В P -системе координат ось z' сонаправлена с нормалью к подложке, две другие оси (x' и y') лежат в плоскости подложки, причем x' совпадает с осью x – эти оси также служат осями вращения для c -оси наклона.

Псевдоморфно выращенный тонкий слой $Al_xGa_{1-x}N$ повторяет ориентацию кристаллографического направления слоя GaN и сохраняет его параметры решетки, что позволяет определить параметры несоответствия ϵ_{m1} и ϵ_{m2} вдоль двух взаимно-перпендикулярных направлений (т. е. вдоль x' и y' осей). Используя схему на рис. 3, б, где плоскость BCD обозначает границу раздела $AlGaIn/GaN$, мы получили следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \epsilon_{m1} &= \frac{CD_T - CD_L}{CD_L} = \frac{a_T - a_L}{a_L}, \\ \epsilon_{m2} &= \frac{OB_T - OB_L}{OB_L} = \\ &= \frac{a_T c_T - \sqrt{(a_T c_T)^2 \cos^2 \theta + (a_T c_T)^2 \sin^2 \theta}}{\sqrt{(a_T c_T)^2 \cos^2 \theta + (a_T c_T)^2 \sin^2 \theta}}. \end{aligned}$$

В случае, когда толщина слоя $Al_xGa_{1-x}N$ меньше критической толщины образования дислокаций несоответствия, а также много меньше толщины слоя GaN, рассогласования в периодах кристаллической решетки смягчаются за счет упругого растяжения слоя $Al_xGa_{1-x}N$. Так, в P -си-

стеме координат компоненты тензора упругих напряжений могут быть найдены из граничных условий интерфейса $Al_xGa_{1-x}N/GaN$: $\epsilon_{x'x'} = \epsilon_{m1}$, $\epsilon_{y'y'} = \epsilon_{m2}$, $\epsilon_{x'y'} = 0$. Последнее соотношение указывает на отсутствие сдвига внутри плоскости на границе раздела интерфейса $Al_xGa_{1-x}N/GaN$. Остальные компоненты тензора упругости рассчитываются из компонент механической жесткости [7].

В общем случае для полуполярного роста элементарная ячейка рассматриваемого материала может быть подвергнута произвольному упругому напряжению ϵ_{ij} . Принимая во внимание симметрию пространственной группы $R\bar{3}m$ Ш-нитридов, пьезоэлектрическая поляризация может быть связана с упругими напряжениями следующим образом [8]:

$$P^{Pz} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{15}\epsilon_{xz} \\ e_{15}\epsilon_{yz} \\ e_{31}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + e_{33}\epsilon_{zz} \end{pmatrix}.$$

Любые пространственные изменения в полной поляризации P ведут к образованию объемного заряда:

$$\rho = -\Delta P.$$

В нашем случае ввиду резкого изменения поляризации на границе раздела $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ данное уравнение претерпевает изменение и определяет фиксированную поверхностную плотность заряда

$$q = -\mathbf{n} \cdot \Delta \mathbf{P},$$

где \mathbf{n} – нормальный к интерфейсу вектор, а $\Delta \mathbf{P}$ – изменение полной поляризации. Фиксированный заряд q на на границе раздела $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ вызывает появление ДЭГ.

Скачок поляризации $\Delta P_{z'}$, отвечающий за накопление поверхностного заряда на гетерогранице, рассчитан из следующего соотношения:

$$\Delta P_{z'} = P_{Lz'}^{pz} + (P_L^{sp} - P_T^{sp}) \cos \theta,$$

где $P_{Lz'}^{pz}$ – пьезоэлектрическая компонента поляризации для P -системы координат:

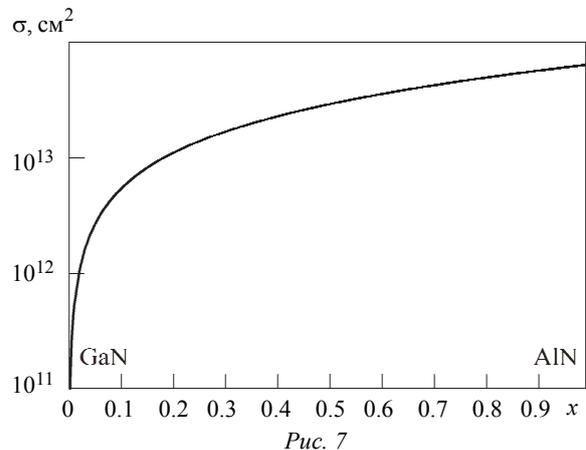
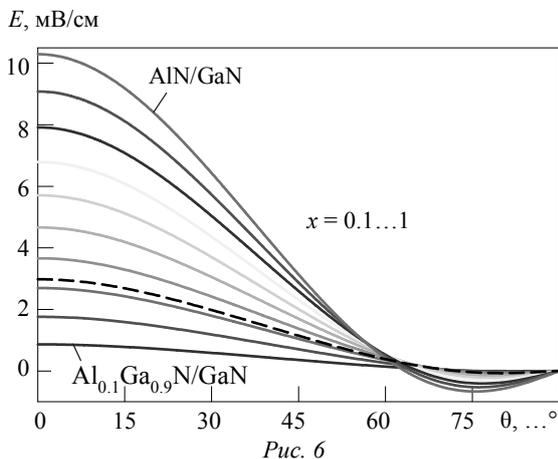
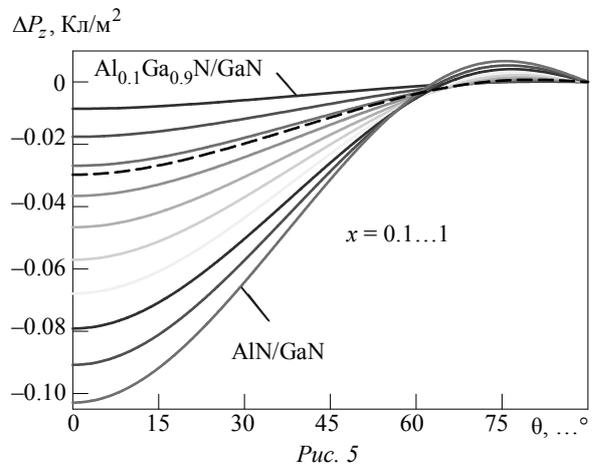
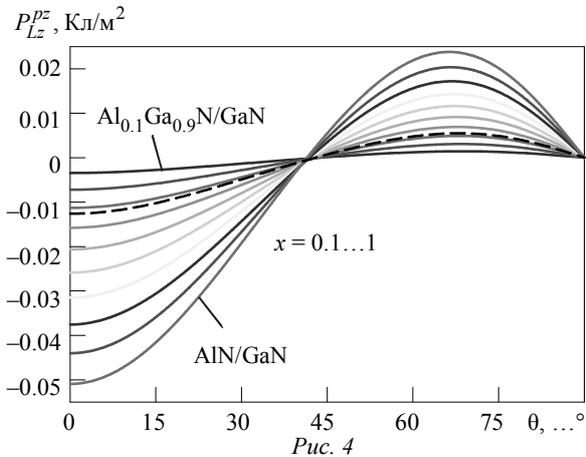
$$\begin{aligned} P_{Lz'}^{pz} = & (e_{31} \cos \theta) e_{x'x'} + \\ & + \left(e_{31} \cos^3 \theta + \frac{e_{33} - e_{15}}{2} \sin \theta \sin 2\theta \right) \varepsilon_{y'y'} + \\ & + \left(e_{33} \cos^3 \theta + \frac{e_{31} - e_{15}}{2} \sin \theta \sin 2\theta \right) \varepsilon_{z'z'} + \\ & + \left[(e_{31} - e_{33}) \cos \theta \sin 2\theta + e_{15} \sin \theta \cos 2\theta \right] \varepsilon_{y'z'}. \end{aligned}$$

Результаты исследований и их обсуждение.
Результаты расчета GaN HEMT-гетероструктур. При различных составах слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ рас-

считаны нормальная к слою GaN компонента вектора пьезоэлектрической поляризации $P_{Lz'}^{pz}$ (рис. 4) и значение скачка поляризации $\Delta P_{z'}$ на границе раздела AlGaN/GaN (рис. 5) в зависимости от состава и угла ориентации слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ относительно плоскости (0001). Здесь и далее на рисунках штрихами обозначена кривая, соответствующая исследуемому в нашей работе твердому раствору $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ (образцы I и II типа). Видно, что поляризация имеет нулевое значение не только при неполярной ориентации, что соответствует углу 90° , но и при угле 43° , когда вектор поляризации меняет свое направление.

Расчитанная величина индуцированного поляризацией электрического поля на границе раздела AlGaN/GaN в зависимости от состава и угла ориентации слоя $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ относительно плоскости (0001) приведена на рис. 6.

Как и ожидалось, максимальное значение напряженности электрического поля на гетерогранице AlGaN/GaN достигается при нулевом угле ориентации слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ относительно плоскости (0001). Расчет заряда на границе раз-



дела $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ в зависимости от состава твердого раствора при нулевом угле ориентации слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ относительно плоскости (0001) показывает, что плотность ДЭГ в канале GaN НЕМТ транзистора растет с увеличением доли алюминия в твердом растворе (рис. 7), причем наиболее значительный рост наблюдается при составах x до ~ 0.35 . Можно поэтому считать, что образец I типа представляет собой удачный компромисс между большим значением встроенного заряда и еще не очень высоким рассогласованием параметров решеток гетерослоев. Отметим, что для образца I типа без дополнительного легирования слоя $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ расчетное значение заряда ДЭГ составило $1.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что хорошо соотносится с экспериментально определенным далее значением ($2.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$).

Как уже отмечалось, природа высокой плотности заряда в GaN НЕМТ проистекает скорее от присущей этому материалу встроенной поляризации, чем от внешнего легирования. Поэтому известные передовые разработки таких НЕМТ, выращенных на других, нежели (0001), плоскостях (к примеру, на m -плоскости) даже с использованием дельта-легирующего слоя, позволяют достичь концентрации в канале транзистора всего $\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [9]. С этой точки зрения для GaN НЕМТ-приборов не актуальна тенденция перехода роста гетероструктур на полярных и неполярных гранях, активно осваиваемая исследователями, работающими со светодиодными GaN-гетероструктурами.

Результаты ECV-профилирования GaN НЕМТ-гетероструктур. Для верификации рассчитанных значений плотности ДЭГ в GaN НЕМТ-образцах I и II типа был применен метод электрохимического вольт-фарадного профилирования. Методика проведения измерений ECV-методом подробно рассмотрена нами в [10]. Измерения концентрации ОНЗ по глубине структур проводились при комнатной температуре с использованием установки электрохимического профилирования ECVPro (Nanometrics). В качестве электролита был выбран раствор $0.2\text{M H}_2\text{SO}_4$ [11]. Площадь электролитического выпрямляющего контакта составляла 0.1 см^2 . Травление материала осуществлялось в импульсном режиме [12], шаг травления составлял 1 нм. Напряжение смещения V в ECV-измерениях выбиралось на линейном участке ВФХ в координатах Мотта–Шотки ($1/C^2$ от V).

Для контроля глубины и качества травления использовался атомно-силовой микроскоп (АСМ) Solver NEXT (NT-MDT).

На рис. 8 изображена измеренная на двух частотах (1 МГц и 100 кГц) ВФХ образца I типа. При нулевом напряжении на затворе (точка А) энергетические уровни треугольной квантовой ямы (КЯ) на гетерогранице AlGaN/GaN находятся ниже уровня Ферми. Фоновая донорная примесь практически не ионизована, а из-за огромной концентрации электронов на гетерогранице изменение ее степени ионизации при обратном смещении будет мало. Подача на затвор отрицательного напряжения соответствует участку А–В, изменением концентрации электронов на гетерогранице уже нельзя пренебрегать. Уменьшение емкости связано с выдавливанием носителей заряда из КЯ и распространением ООЗ внутрь слоя GaN. В точке В на ВФХ край ООЗ подходит к границе квантовой ямы, при этом измеряемая концентрация электронов падает до $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что почти совпадает с фоновым уровнем легирования. Область ДЭГ (квантовой ямы) начинает истощаться. Дальнейшее увеличение обратного напряжения (до точки С) приводит к полному опустошению КЯ носителями заряда. Край ООЗ простирается до слоя с высоким сопротивлением, поэтому крутая часть кривой (участок В–С) отражает низкую концентрацию электронов и низкую утечку из слоя высокой подвижности в слой с высоким сопротивлением. Соответствующее изменение емкости сопровождается резким увеличением активной составляющей адмиттанса (рис. 9). Когда напряжение доходит до точки С, концентрация электронов уменьшается до $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Ток канала почти полностью прекращается, а точка С соответствует напряжению отсечки (запирания) канала, т. е. напряжению, при котором ток стока падает до нуля. После точки С край ООЗ профилирует буферный слой GaN, емкость имеет очень малое значение, не обращающееся в ноль из-за влияния фоновой концентрации, поэтому по мере увеличения обратного напряжения кривая практически не меняется. При этом, поскольку концентрация свободных носителей заряда в этой области очень мала, ООЗ будет расширяться горизонтально [13].

Как видно из ВФХ, с понижением частоты соотношение сигнал/шум резко уменьшается. То же наблюдается и на зависимостях проводимости от напряжения, однако поскольку точность измерения активной составляющей адмиттанса выше

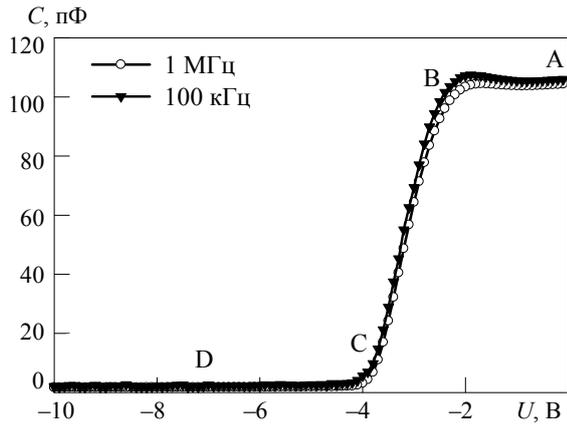


Рис. 8

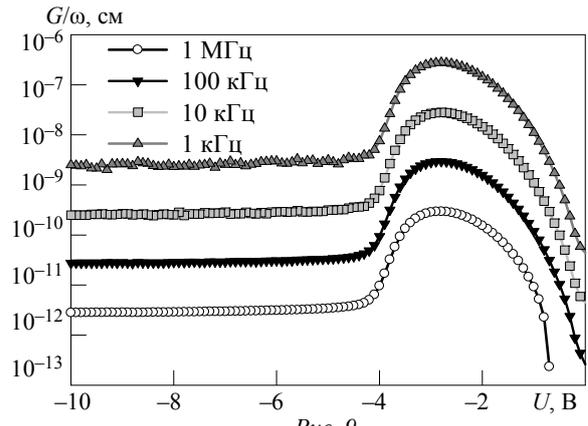


Рис. 9

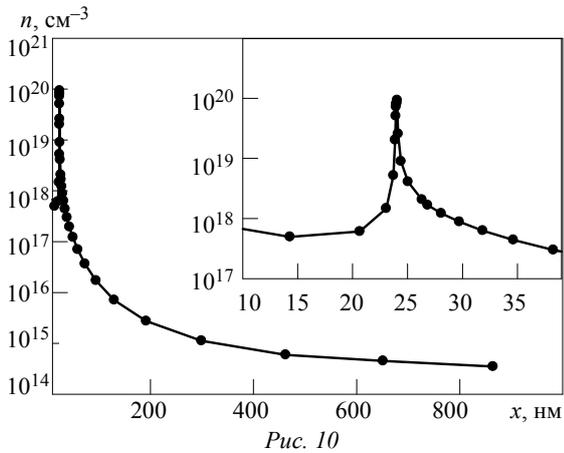


Рис. 10

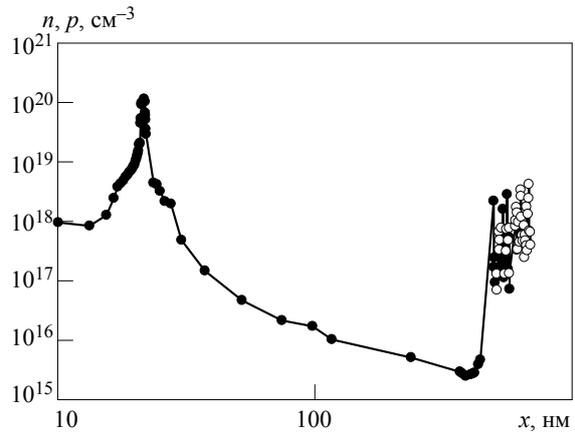


Рис. 11

по сравнению с реактивной [14], шум становится ощутимо заметен лишь на частотах порядка 1 кГц и ниже. Гистерезис ВФХ не наблюдался, что говорит об отсутствии потерь, связанных с перезарядкой электрически активных глубоких центров. Это важно, поскольку наличие глубоких центров лимитирует частотные свойства прибора, а также может приводить к туннелированию через глубокие центры барьерного слоя при высоких обратных напряжениях [15]. Полученный из ВФХ профиль распределения концентрации ОНЗ образца I типа представлен на рис. 10. Пик концентрационного профиля расположен на глубине 24 нм, что хорошо совпадает с расположением треугольной КЯ, образованной гетеропереходом AlGaIn/GaN. При этом из-за поляризационных эффектов, а также большего разрыва зоны проводимости пик на концентрационном профиле имеет достаточно большую амплитуду ($2.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$). Таким образом, даже без использования дополнительного легирования, GaN НЕМТ позволяют достигнуть плотностей ДЭГ в канале более 10^{13} см^{-2} .

Общепринятым механизмом увеличения крутизны вольт-амперной характеристики в НЕМТ-приборах является уменьшение толщин верхних

(донорных) слоев [16], в нашем случае (образец II типа) – слоя AlGaIn. При этом с уменьшением толщины слоя уменьшается и индуцированное поле, а следовательно, количество носителей заряда в канале, поэтому для сохранения рабочих характеристик прибора необходимо скомпенсировать потерянный из-за уменьшения толщины слоя заряд. Эта задача решается посредством искусственного ввода дополнительного заряда, т. е. за счет дополнительного легирования слоя AlGaIn.

На рис. 11 представлен наблюдаемый концентрационный профиль образца II типа, построенный в широком диапазоне по глубине. Максимум распределения концентрации ОНЗ, равный $1.2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ($2.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$), располагается на глубине 22 нм, что хорошо согласуется со спецификацией структуры. Следует отметить, что за счет дополнительного легирования удастся увеличить плотность ДЭГ в канале не более чем на 20 %, так как в основном все определяется большим встроенным поляризационным полем [17]. Это подтверждается нашими измерениями: пиковая концентрация в нелегированном GaN НЕМТ (I тип) равна $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ против $1.2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ в

структуре с дополнительным легированием (II тип). К преимуществам модуляционно-легированных GaN НЕМТ-гетероструктур можно отнести улучшенные характеристики по постоянному току, что, однако, сопровождается ухудшением высокочастотных характеристик за счет снижения скорости насыщения электронов по сравнению с приборами на нелегированных структурах [18].

На профиле распределения концентрации образца II типа также видно, что начиная с глубины ~450 нм происходит резкий рост концентрации. Мы связываем это с глубокими акцепторами, вводимыми для компенсации фоновой концентрации электронов в буферном материале. При чрезмерной компенсации глубокие акцепторы ведут себя как электронные ловушки, поэтому ключевым технологическим решением для этого типа ловушек становится оптимизация процесса компенсации [17]. В ECV-измерениях таких структур мы наблюдали спонтанную смену типа проводимости с *n*- на *p*-тип, что служит свидетельством высокой степени компенсации основной примеси глубокими акцепторами.

Выполнен расчет величины встроенного поля в GaN НЕМТ-структурах, учитывающий спонтанную и пьезоэлектрическую поляризацию для различных составов слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Расчет показал возможность изменения встроенного элект-

рического поля в диапазоне от 0 до 10 МВ/см при нулевом угле ориентации слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ относительно плоскости (0001). Экспериментально определенное значение заряда ДЭГ составило $1.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что в пределах погрешности приращенного континуального приближения теории упругости почти соответствует эксперименту ($2.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$).

Рассмотрена природа образования двумерного электронного газа в канале GaN НЕМТ, связанная со спонтанной и пьезоэлектрической поляризацией, а также факторы, влияющие на плотность носителей заряда в канале, и рабочие характеристики GaN НЕМТ-гетероструктур. Измерены вольт-фарадные характеристики и спектры проводимости на различных частотах, получены профили распределения концентрации основных носителей заряда по глубине гетероструктур, определено пространственное расположение, а также уровни заполнения квантовых ям носителями заряда. Показано, что метод ECV-профилирования может быть эффективно использован для контроля качества как активных, так и буферных слоев GaN НЕМТ-гетероструктур, а именно: положения гетерограницы AlGaN/GaN, плотности ДЭГ в КЯ, изолирующих свойств буферного слоя, наличия или отсутствия паразитного канала проводимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pejovic Mom. M., Pejovic Mil. M. Different types of field-effect transistors – Theory and Appl. Rijeka: InTech, 2017. 190 p.
2. Nondestructive diagnostics of nanoheterostructures with InGaN/GaN multiple quantum wells by thermal admittance spectroscopy / O. V. Kucherova, V. I. Zubkov, E. O. Tselev, I. N. Yakovlev, A. V. Solomonov // Inorganic Materials. 2011. Vol. 47, № 14. P. 1574–1578.
3. AlN/GaN-гетероструктуры для нормально закрытых транзисторов / К. С. Журавлев, Т. В. Малин, В. Г. Мансуров и др. // ФТП. 2017. Т. 51, № 3. С. 395–402.
4. Impact of barrier thickness on transistor performance in AlN/GaN high electron mobility transistors grown on free-standing GaN substrates / D. A. Deen, D. F. Storm, D. J. Meyer et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105, № 18. P. 093503.
5. King-Smith R. D., Van-derbilt D., King-Smith R. D. Theory of polarization of crystalline solids // Phys. Rev. 1993. Vol. B 47, № 3. P. 1651–1654.
6. Яковлев И. Н. Исследования светоизлучающих гетероструктур с квантовыми ямами, ориентированными в полярных и неполярных направлениях: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10. СПб., 2014. 20 с.
7. Strain-induced polarization in wurtzite III-nitride semipolar layers / A. E. Romanov, T. J. Baker, S. Nakamura, J. S. Speck // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100 (2). P. 023522-023522-10.
8. Nye J. F. Physical Properties of Crystals. New York: Oxford University Press, 1985. 329 p.
9. Si delta-doped m-Plane AlGaIn/GaN heterojunction field-effect transistors / Fujiwara T., Keller S., Higashiwaki M. et al. // J. Appl. Phys. Exp. 2009. Vol. 2, № 6. P. 061003.
10. Яковлев Г. Е., Зубков В. И. Электрохимическое вольт-фарадное профилирование арсенид- и нитридгаллиевых НЕМТ гетероструктур // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 10. С. 5–12.
11. Clawson A. R. Guide to references on III-V semiconductor chemical etching // Mater. Sci. Eng. R Rep. 2001. Vol. 31, № 1. P. 1–438.
12. Wolff T., Rapp M., Rotter T. // Phys. status solidi. 2004. Vol. 1, № 10. P. 2491.
13. Influence of carrier supply doping on the RF properties of AlGaIn/GaN/SiC high-electron-mobility transistors / M. Marso, J. Bernát, P. Javorka et al. // Phys. Status Solidi C. 2005. Vol. 2, № 7. P. 2611–2614.

14. Kokorev M. F., Maleev N. A. A new approach to the determination of gate length and other parameters of GaAs MESFETs and MODFETs // Solid-State Electron. 1996. Vol. 39, № 2. P. 297–302.

15. Зубков В. И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. СПб.: Элмор, 2007. 220 с.

16. Deep traps analysis in AlGaIn/GaN heterostructure transistors / W. Chikhaoui, J. M. Bluet, C. Bru-Chevallier et. al. // Phys. Status Solidi C. 2010. Vol. 7, № 1. P. 92–95.

17. Yakovlev G., Zubkov V. ECV profiling of GaAs and GaN HEMT heterostructures // J. Phys. Conf. Ser. 2018. Vol. 993, № 1. P. 012038.

18. Trapping effect and microwave power performance in AlGaIn/GaN HEMTs / S. C. Binari, K. Ikossi, J. A. Roussos et. al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2001. Vol. 48, № 3. P. 465–471.

G. E. Yakovlev, V. I. Zubkov, A. V. Solomonov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC PARAMETERS FOR ACTIVE AND BUFFER LAYERS OF GAN HEMT HETEROSTRUCTURES

The gallium nitride transistors with high electron mobility (HEMT) have been studied by means of electrochemical capacitance-voltage (ECV) technique. The capacitance-voltage characteristics and conductivity spectra at various frequencies were measured, the free charge carrier depth distributions were obtained, the spatial arrangement and quantum wells filling degree were determined. The features of 2D electron gas (2DEG) appearance in GaN HEMT, related to spontaneous and piezoelectric polarization, as well as the factors affecting on the density of free charge carriers in the channel and the performance of GaN HEMTs were described in detail. The efficiency of the ECV technique for quality control of both active and buffer layers of GaN HEMT heterostructures is shown. The calculation of the 2DEG density for various technological parameters of the interface, such as the mutual orientation of the AlGaIn/GaN layers and the composition of $Al_xGa_{1-x}N$, is carried out taking into account piezoelectric effects.

Electrochemical capacitance-voltage profiling, ECV, HEMT, GaN, QW, piezoelectric polarization
