

Смирнов Владимир Александрович

E-mail: sva@fep.tti.sfedu.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; к.т.н.; доцент.

Солодовник Максим Сергеевич

E-mail: solodovnikms@mail.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Авилов Вадим Игоревич

E-mail: Avir89@yandex.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; магистрант.

Ageev Oleg Alexeevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Head the Department; Dr. of Eng. Sc., Professor.

Smirnov Vladimir Alexandrovich

E-mail: sva@fep.tti.sfedu.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

Solodovnik Maksim Sergeevich

E-mail: solodovnikms@mail.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Avilov Vadim Igorevich

E-mail: Avir89@yandex.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Undergraduate.

УДК 621.373.8.002

О.А. Агеев, Ю.Н. Варзарёв, А.В. Рукомойкин, М.С. Солодовник

**ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМТ-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaAs
ДЛЯ СВЧ-ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ
КОМПЛЕКСЕ НАНОФАБ НТК-9**

Различные типы гетероструктур с селективным легированием на основе GaAs для создания приборов СВЧ-электроники были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии, реализованным в составе сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9. НЕМТ-структуры оптимизированной конструкции имеют концентрацию $1,28 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и подвижность $5465 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. В структурах типа pHEMT подвижность носителей достигает $7400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при концентрации $1,83 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. НЕМТ-структуры всех типов имеют высокую однородность и воспроизводимость параметров.

Молекулярно-лучевая эпитаксия; GaAs; гетероструктуры; НЕМТ; pHEMT.

O.A. Ageev, Yu.N. Varzarev, A.V. Rukomoykin, M.S. Solodovnik

**OBTAINING AND INVESTIGATION OF HEMT-STRUCTURE BASED
ON GaAs FOR ULTRA HIGH FREQUENCY FIELD EFFECT TRANSISTORS
AT NANOTECHNOLOGICAL SYSTEM NANOFAB NTF-9**

Different types of heterostructures with selective doping based on GaAs for making microwave electronics was obtain by method molecular-beam epitaxy, integrated in consist ultrahigh-vacuum nanotechnological system NANOFAB NTF-9. HEMT structure of optimized construction

have concentration carrier $1,28 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ and mobility $5465 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. In structures of type pHEMT carrier mobility achieve $7400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ at concentration $1,83 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. All types HEMT structure have high homogeneity and reproducibility parameter.

Molecular-beam epitaxy; GaAs; heterostructures; HEMT; pHEMT.

Развитие средств телекоммуникаций и связи во многом стало возможным благодаря успехам в области проектирования и технологии приборов полупроводниковой электроники сверхвысоких частот. В результате научно-технического прогресса в этой сфере в течение последних двух десятилетий развились отрасли новых знаний и технологий, которые привели к появлению систем спутниковой и сотовой связи и телевидения, беспроводных сетей обмена данными, систем глобальной навигации и позиционирования, новых поколений средств радиолокации т.д. Основой этого прогресса является развитие физики и технологии полупроводников, превратившихся на сегодняшний день в одну из самых динамичных и наукоемких отраслей производства. Синтез и применение новых материалов, широкое использование и совершенствование прецизионных технологий формирования микро- и наноструктур, компьютеризация и автоматизация процессов управления, контроля, проектирования и моделирования – всё это в совокупности привело к реализации приборов на основе гетеропереходов и сверхрешёток, теоретическая проработка которых была начата ещё в 60-х годах XX века. Концепция использования селективно-легированных гетероструктур в качестве базового материала СВЧ-транзисторов, предложенная в 1969 г., была реализована на практике в 1980 г. созданием первого транзистора с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, HEMT) на основе AlGaAs/GaAs. Структура типа HEMT легла в основу элементной базы современной СВЧ-электроники, существенно потеснив традиционные приборные структуры [1, 2].

Характеристики HEMT-транзистора во многом определяются топологией и технологией производства прибора. Однако важнейшие электрофизические параметры транзистора – подвижность и концентрация носителей – задаются непосредственно конструкцией самой гетероструктуры, а также технологическим процессом её изготовления. Появление технологии псевдоморфных HEMT (pHEMT), где материалом канала служит раствор InGaAs, обеспечило дальнейшее улучшение параметров транзистора.

В настоящее время разработка и внедрение технологий получения HEMT-структур является актуальной задачей. Целью данной работы является получение методом молекулярно-лучевой эпитаксии и исследование структур типа HEMT и pHEMT на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9.

Экспериментальные образцы согласованных и напряженных гетероструктур с селективным легированием выращивались в модульной системе молекулярно-лучевой эпитаксии STE-35, входящей в состав ростового кластера многофункционального сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 [3].

Для роста структур использовались пластины полуизолирующего GaAs (100), предварительно подготовленные для эпитаксии. Пластины диаметром 50 мм и толщиной 350 мкм имели поверхностную плотность дислокаций не более 5000 cm^{-2} , удельное сопротивление $2,7 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и подвижность носителей $4520 \text{ cm}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Контроль температуры и управление источниками осуществлялись автоматически с точностью до $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Потоки ростовых компонент третьей группы (Ga, In, Al) калибровались перед началом осаждения каждой экспериментальной структуры по данным системы наблюдения дифракции отраженных быстрых электронов (ДОБЭ). Скорость роста эпитаксиального слоя для всех образцов определялась по

картинам ДОБЭ и составляла 1 монослой в секунду (или 1 мкм/ч). Соотношение эффективных потоков ростовых компонент третьей и пятой групп выдерживалось на уровне 1:4.

Предростовая подготовка пластин заключалась в удалении пассивирующего слоя окисла путем отжига непосредственно в ростовой камере при температуре 580 °С. Управление температурой подложки осуществлялось с помощью пирометрической системы контроля. После сгона окисла на всех образцах проводился эпитаксиальный рост буферного слоя, препятствующего прорастанию дислокаций исходной подложки в активные слои гетероструктуры, путем осаждения 800 нм нелегированного GaAs. Затем проводился рост экспериментальных структур.

С целью оптимизации условий роста и контроля качества осаждаемого материала первоначально был выращен образец № 1, представляющий собой гомоэпитаксиальный слой нелегированного GaAs толщиной 12 мкм.

Для калибровки легирующей компоненты были выращены образцы № 2–7, состоящие из осажденного поверх буфера слоя эпитаксиального легированного кремнием GaAs, концентрация примеси в котором изменялась от образца к образцу. Толщина легированного слоя изменялась от 0,5 до 2 мкм. Ростовый процесс проводился при температуре 580 °С. Наблюдение на поверхности картины сверхструктуры (2×4) свидетельствовало о послойном характере роста и атомарной гладкости формируемых плёнок.

На следующем этапе ростовых экспериментов были получены согласованные гетероструктуры AlGaAs/GaAs, являющиеся основой для формирования НЕМТ-транзисторов. Для этого поверх буферного слоя сначала осаждался спейсер-слой нелегированного тройного соединения AlGaAs толщиной 2 нм. Толщина слоя выбиралась исходя из того, чтобы, с одной стороны, снизить рассеяние формирующегося у гетерограницы AlGaAs/GaAs слоя двумерного электронного газа на ионизированных атомах примеси вышележащего донорного слоя, с другой стороны, минимизировать препятствование переходу носителей в ДЭГ сквозь потенциальный барьер слоя нелегированного широкозонного материала. Мольная доля алюминия в тройном соединении слоя и всей структуры в целом составила 0,22. Данное значение является оптимальным, позволяя выдержать в допустимых пределах величину потенциального барьера на гетерогранице и концентрацию DX-центров, формирующих в AlGaAs глубокие ловушки. Затем выращивался донорный слой AlGaAs толщиной 35 нм, легированный кремнием. Сверху осаждалось 10 нм нелегированного AlGaAs. Завершалось формирование структуры нанесением слоя высоколегированного GaAs толщиной 10 нм с концентрацией кремния $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Прикрывающий слой GaAs служит для улучшения омичности формируемых впоследствии контактов и защиты Al-содержащих слоёв от окисления в атмосфере воздуха. Кроме того, наличие на поверхности легированного слоя GaAs улучшает электрофизические свойства всей гетероструктуры, дополнительно экранируя флуктуации потенциала путём заполнения поверхностных состояний свободными носителями [4].

Температура подложки в процессе эпитаксии не менялась и составляла 580 °С. С целью оптимизации конструкции гетероструктуры была выращена серия образцов с различной степенью легирования донорного слоя. Базовая схема НЕМТ-структуры приведена на рис. 1,а.

В завершении ростовой серии были выращены образцы напряженных псевдоморфных структур AlGaAs/InGaAs/GaAs, предназначенных для изготовления рНЕМТ-транзисторов. Для этого после осаждения буферного слоя GaAs при температуре 580 °С температура подложки понижалась до 420 °С и выращивался слой InGaAs толщиной 12 нм с содержанием индия 0,22 для избежания термической десорбции атомов индия, приводящей к нарушению состава тройного соединения. Со-

держание индия должно удовлетворять требованиям к величине разрыва зон на гетерогранице, с одной стороны, и бездислокационной кристаллической структуре канала – с другой. Существенное различие параметров решетки InAs и GaAs (порядка 7 %) приводит к возникновению деформаций сжатия, ограничивающих толщину бездефектного упруго-напряженного слоя согласно аппроксимации Мэттьюса–Блексли [5].

N+ GaAs cap layer (100 Å, $N=4E+18$)	N+ GaAs cap (83 Å, $n=4E+18$)
undoped $Al_xGa_{1-x}As$ spacer (100 Å, $x=0,22$)	undoped $Al_xGa_{1-x}As$ barrier (150 Å, $x=0,22$)
N- $Al_xGa_{1-x}As$ donor layer (350 Å, $x=0,22$, $N=1E+19$)	N- $Al_xGa_{1-x}As$ donor layer (208 Å, $x=0,22$, $n=3E+18$)
undoped $Al_xGa_{1-x}As$ spacer (20 Å, $x=0,22$)	undoped $Al_xGa_{1-x}As$ spacer (36 Å, $x=0,22$)
undoped GaAs buffer (8000 Å)	undoped $In_xGa_{1-x}As$ channel (120 Å, $x=0,22$)
SI GaAs substrate (350 mkm)	undoped GaAs buffer (8000 Å)
	SI GaAs substrate (350 mkm)

а

б

Рис. 1. Схема экспериментально полученных структур НЕМТ (а), рНЕМТ (б)

Затем температура подложки повышалась до 580 °С и формировалась остальная часть структуры. После осаждения спейсерного слоя нелегированного AlGaAs толщиной 3,6 нм выращивался донорный слой AlGaAs толщиной 20 нм, легированный кремнием до концентрации $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Затем осаждалось 15 нм барьерного слоя нелегированного AlGaAs. Зарастивалась структура слоем GaAs, легированного кремнием до $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщиной 8 нм. Мольная доля алюминия во всех слоях составила 0,22. Базовая схема структуры приведена на рис. 1, б.

Контроль поверхности всех полученных образцов осуществлялся методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе Nova NanoLab 600. Отсутствие видимых дефектов и неровностей на картине РЭМ свидетельствует о высоком совершенстве эпитаксиальных слоёв. Кроме того, был выполнен разрез структуры фокусированными ионными пучками, РЭМ-изображение которого приведено на рис. 2, а.

В дополнение к РЭМ анализ поверхности проводился методом контактной атомно-силовой микроскопией (АСМ) на сверхвысоковакуумном модуле сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) кластера локальных технологий комплекса НАНОФАБ НТК-9. Характерная АСМ-картина поверхности полученной структуры приведена на рис. 2, б. Перепад высот на поверхности образца № 1 составил 5,9 нм, средняя шероховатость – 3,48 нм, а среднеквадратичное отклонение – 0,7 нм. Для гомоэпитаксиальных (образцы № 2–7) и гетероэпитаксиальных (образцы № 8–14) структур разброс высот по поверхности скана размером 50×50 мкм не превысил 1,7 нм.

Средняя шероховатость данных образцов составила 0,76 нм, а значение среднеквадратичного отклонения – 0,16 нм. Резкое различие степени развитости рельефов образца №1 и остальных структур обусловлено значительной толщиной эпитаксиального слоя в первом случае. Существенное увеличение толщины плёнки при непрерывном осаждении материала приводит не только к нарушениям процессов послойного роста, но и к генерации различных типов дефектов кристаллической решётки, о чём также свидетельствует резкое возрастание плотности поверхностных дефектов в сравнении с более тонкими плёнками: 1270 см^{-2} для образца № 1 и $300\text{--}340 \text{ см}^{-2}$ для образцов № 2–7.

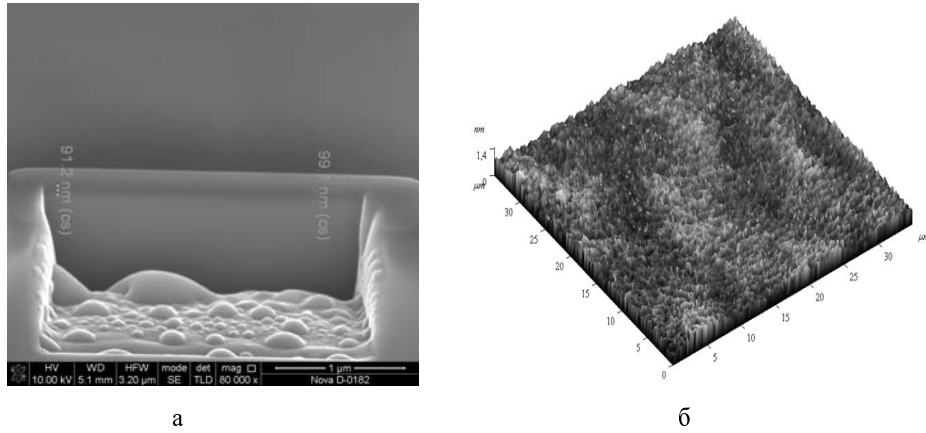


Рис. 2. РЭМ-изображение разреза (а) и АСМ-изображение поверхности (б) *HEMT-структуры*

Анализ электрофизических характеристик выращенных структур проводился на приборе Есоріа HMS-3000. На первом этапе измерялось удельное сопротивление образца по методу ван дер Пау. Затем по методу Холла определялась концентрация носителей в исследуемой структуре. На основании полученных данных определялась подвижность носителей заряда. Измерения проводились при токе 1 мА в магнитном поле с индукцией 0,59 Тл на образцах размером 1×1 см. Омические контакты формировались вжиганием сплава In (95 %)–Sn (5 %).

В образце № 1 подвижность носителей составила 473,7 см²/В·с при концентрации фоновой примеси 1,23·10¹⁴ см⁻³. Удельное сопротивление структуры составило 2,5 кОм·см. Полученные результаты позволяют говорить о высокой степени чистоты осаждаемого материала, достаточной для изготовления приборных структур. По результатам измерений образцов № 2–7 были получены зависимости подвижности основных носителей и удельного сопротивления слоёв GaAs от концентрации легирующей примеси, приведённые на рис. 3,а,б соответственно. Полученные данные позволяют дать хорошую оценку структурного совершенства полученных эпитаксиальных слоёв.

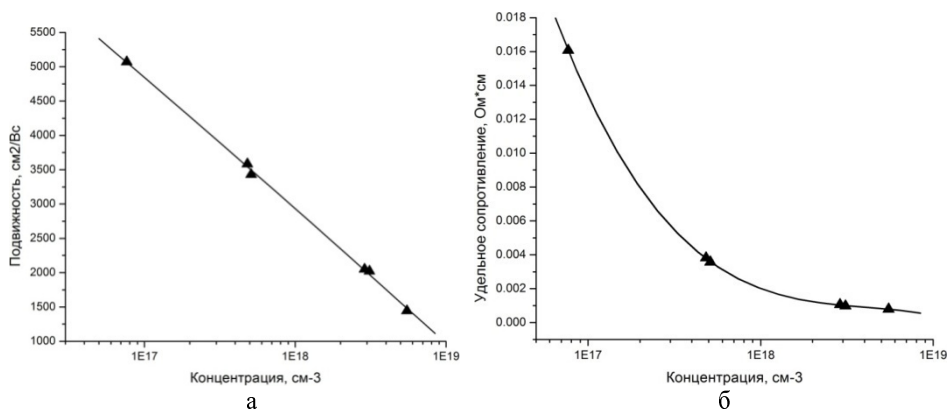


Рис. 3. Влияние концентрации примеси на подвижность носителей (а) и сопротивление структур (б)

Результаты холловских измерений параметров НЕМТ-структур представлены в табл. 1. На основании полученных численных данных были построены зависимости концентрации ДЭГ от степени легирования донорного слоя (рис. 4,а) и подвижности носителей ДЭГ от их концентрации в канале (рис. 4,б).

Таблица 1

Результаты измерений параметров НЕМТ-структур

№ образца	Концентрация примеси, см ⁻³	Концентрация ДЭГ, см ⁻³	Подвижность ДЭГ, см ² /В·с
8	$5 \cdot 10^{17}$	$2,52 \cdot 10^{10}$	3259
9	$7 \cdot 10^{17}$	$2,23 \cdot 10^{11}$	5477
10	$1 \cdot 10^{18}$	$6,75 \cdot 10^{11}$	5626
11	$1,3 \cdot 10^{18}$	$9,11 \cdot 10^{11}$	5676
12	$1,4 \cdot 10^{18}$	$1,28 \cdot 10^{12}$	5465

Как следует из представленных на рис. 4,а данных, с возрастанием концентрации легирующей примеси концентрация носителей в слое ДЭГ сначала растёт практически линейно, а затем насыщается. Насыщение характеристики обусловлено заполнением электронами свободных состояний в потенциальной яме на гетерогранице AlGaAs/GaAs. Дальнейшее увеличение степени легирования структуры может привести к появлению параллельной проводимости по вышележащему донорному слою, что отрицательно скажется на ключевых характеристиках транзистора.

Рост подвижности на начальном участке характеристики на рис. 4,б одновременно с увеличением концентрации носителей в потенциальной яме связан с возрастанием степени локализации волновой функции электронов слоя двумерного газа по мере заполнения ими первой энергетической подзоны, что снижает рассеяние на ионизованных примесях донорного слоя. Однако рост характеристики наблюдается до некоторого значения концентрации ДЭГ, после которого начинается спад, обусловленный началом заселения электронами второй энергетической подзоны [1].

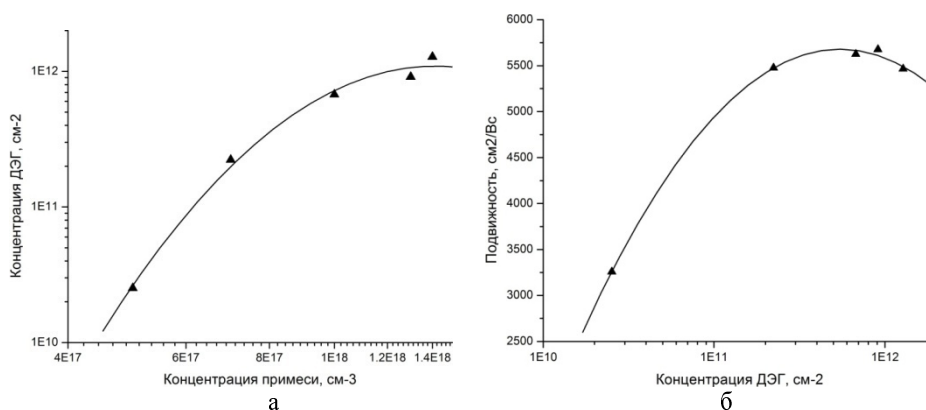


Рис. 4. Результаты измерений электрофизических параметров НЕМТ-структур методом Холла

В табл. 2 представлены результаты измерений методом Холла параметров оптимизированных рНЕМТ-структур при комнатной температуре (300 К) и температуре жидкого азота (77 К). Близость значений подвижности и концентрации к максимально возможным для данного сочетания выбора материалов и конструк-

ции гетероструктуры свидетельствуют о высоком кристаллическом совершенстве транзисторных структур и оптимальных режимах их формирования.

Таблица 2

Результаты измерений параметров рНЕМТ-структур

№ образца	300 К		77 К	
	Концентрация ДЭГ, см^{-3}	Подвижность ДЭГ, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	Концентрация ДЭГ, см^{-3}	Подвижность ДЭГ, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
26 (рНЕМТ)	$1.80\cdot 10^{12}$	7 198	$1.75\cdot 10^{12}$	20670
27 (рНЕМТ)	$1.83\cdot 10^{12}$	7 395	$1.88\cdot 10^{12}$	21 040

Контроль распределения параметров выращенных НЕМТ- и рНЕМТ-структур по поверхности пластин проводился методом бесконтактного измерения слоевого сопротивления на установке LEI 1510 (Leighton Electronics). Используемая в приборе методика является неразрушающим методом контроля, что позволяет получать картину распределения сопротивления гетероструктуры по всей площади пластины без нарушения её целостности. Гистограмма распределения сопротивления приведена на рис. 5.

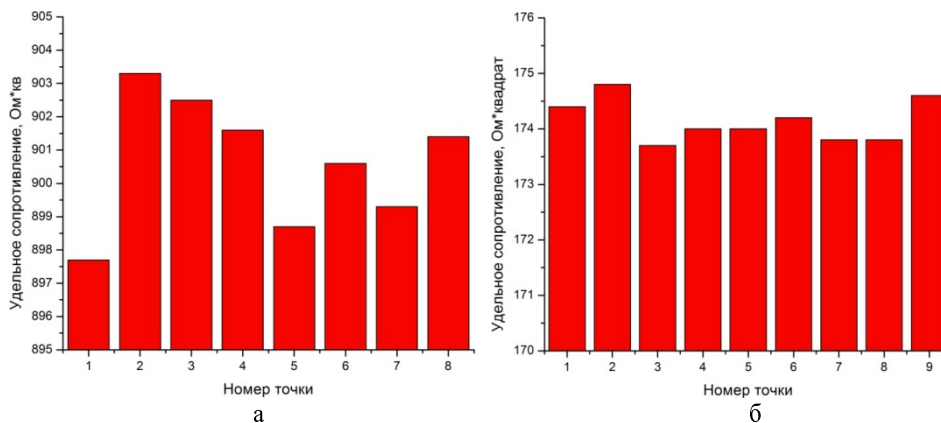


Рис. 5. Гистограмма распределения слоевого сопротивления по пластине для структур НЕМТ (а), рНЕМТ (б)

Среднее значение слоевого сопротивления для оптимизированных НЕМТ-структур составило 901,2 Ом/кв, для рНЕМТ – 174,3 Ом/кв. Максимальный разброс сопротивления по пластине для структур обоих типов составил 0,5 %.

Таким образом, методом МЛЭ на основе использования комплекса НАНОФАБ НТК-9 были получены селективно-легированные гетероструктуры типа НЕМТ и рНЕМТ на пластинах GaAs (100) диаметром 50 мм. Оптимизация процессов изготовления и конструкции гетероструктур позволила получить НЕМТ-структуры с подвижностью носителей $5465 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при концентрации ДЭГ $1,28\cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ по данным измерений Холла. Также получены рНЕМТ-структуры с подвижностью $7400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при концентрации носителей $1,83\cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Разброс сопротивления структур по пластине не превысил 0,5 %, что говорит о высокой степени однородности и качества эпитаксиального материала. Результаты данной работы могут быть использованы при разработке конструкции и технологии изготовления НЕМТ-транзисторов для приборов СВЧ-электроники сантиметрового и миллиметрового диапазонов дли волн.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шур М.* Современные приборы на основе арсенида галлия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 632 с.
2. *Егоров А.Ю., Гладышев А.Г., Никитина Е.В. и др.* Двухканальные псевдоморфные НЕМТ-гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs с импульсным легированием // Физика и техника полупроводников. – 2010. – № 7 (44). – С. 950-954.
3. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А.* Эпионные и зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 165-175.
4. *Василевский И.С., Галиев Г.Б., Климов Е.А. и др.* Электрофизические и структурные свойства двусторонне δ -легированных РНЕМТ-гетероструктур на основе Al-GaAs/InGaAs/AlGaAs // Физика и техника полупроводников. – 2008. – № 9 (42). – С. 1102-1109.
5. *Ayers John E.* Heteroepitaxy of semiconductors: theory, growth and characterization – Taylor & Francis Group, 2007. – 447 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.С. Кужаров.

Агеев Олег Алексеевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; заведующий кафедрой; д.т.н; профессор.

Варзарёв Юрий Николаевич

E-mail: yu_varzarev@fep.tti.sfedu.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; доцент.

Рукомойкин Андрей Васильевич

E-mail: Andru.Rukomoykin@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Солодовник Максим Сергеевич

E-mail: solodovnikms@mail.ru

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Ageev Oleg Alexeevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Head the Department; Dr. of Eng. Sc., Professor.

Varzarev Yuri Nikolaevich

E-mail: yu_varzarev@fep.tti.sfedu.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Associate Professor.

Rukomoykin Andrey Vasil'evich

E-mail: Andru.Rukomoykin@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Solodovnik Maxim Sergeevich

E-mail: solodovnikms@mail.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.