

На правах рукописи



ЯЧМЕНЕВ Александр Эдуардович

**ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ
СИСТЕМ ПРОВОДЯЩИХ НАНОНИТЕЙ ИЗ АТОМОВ ОЛОВА**

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-
и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

| | |
|---------------------------|--|
| Научный руководитель: | Член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник ИСВЧПЭ РАН, доктор физико-математических наук Рыжий Виктор Иванович |
| Научный консультант: | Заместитель директора по научной работе ИСВЧПЭ РАН, кандидат физико-математических наук Пономарев Дмитрий Сергеевич |
| Официальные оппоненты: | Профессор МГУ им. М.В. Ломоносова, доктор физико-математических наук Кульбачинский Владимир Анатольевич Доцент НИЯУ МИФИ, кандидат физико-математических наук Васильевский Иван Сергеевич |
| Ведущая организация: | Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет информационных технологий, радиозлектроники и электроники (МИРЭА) |

Защита диссертации состоится 17 мая 2016 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д002.204.01 при Физико-технологическом институте Российской академии наук по адресу: г. Москва, Нахимовский проспект 36 к 1, 6 этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института РАН.

Автореферат разослан ___ апреля 2016 года. Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв, заверенный печатью организации, по адресу 117218 г. Москва, Нахимовский проспект 36 к 1.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.204.01,
кандидат физико-математических наук



Вьюрков В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из главных направлений современной науки является создание и изучение свойств наноматериалов. Основными объектами исследования все в большей степени становятся не массивные кристаллы, а тонкие пленки, многослойные тонкопленочные системы, проводящие нанонити (НН) и кристаллиты, имеющие наноразмеры (квантовые точки). В таких системах существенно меняется большинство электронных свойств – возникают новые квантово-размерные эффекты.

Настоящая работа посвящена созданию и изучению электрических свойств нового нанобъекта – системы проводящих НН, расположенных в одной плоскости и состоящих из атомов олова (Sn), встроенных в матричный кристалл GaAs. Такая система НН может быть получена в результате декорирования краев атомных террас вицинальной поверхности GaAs атомами Sn при δ -легировании и последующего эпитаксиального зарастивания образовавшихся при декорировании атомных цепочек Sn.

Образующаяся структура будет представлять собой δ -легированный слой, в котором атомы Sn распределены в плоскости δ -слоя не однородно, а преимущественно цепочками вдоль краев террас. Притяжение, возникающее между ионизированными атомами цепочки атомов мелкой донорной примеси (которой является Sn в GaAs) и электронами способствует локализации электронов вблизи цепочки. Если расстояние между атомами олова в цепочке будет существенно меньше, а расстояние между цепочками атомов существенно больше Боровского радиуса (10 нм для мелкой донорной примеси в GaAs), то волновые функции основных состояний электронов вдоль цепочки будут сильно перекрываться, а между цепочками – нет. Более протяженные в пространстве волновые функции возбужденных состояний могут при этом перекрываться и вдоль, и поперек цепочек. В таком случае возникнет совокупность одномерных электронных квантовых состояний вдоль цепочек и расположенных выше по энергии двумерных состояний, то есть произойдет отщепление уровня одномерного размерного квантования от основного уровня двумерных электронов δ -легированного слоя.

Степень и характер перекрытия волновых функций будут зависеть от концентрации атомов Sn на единицу длины НН, которое определяется

концентрацией δ -легирования, и расстояния между НН, которое определяется углом разориентации вицинальной грани относительно сингулярной грани GaAs.

Цель и задачи работы

Целью работы являлось создание на основе вицинальных подложек GaAs с разориентациями $0,3^\circ$ гомоэпитаксиальных наноструктур, содержащих НН из атомов Sn, встроенные в кристалл GaAs, а также гетероэпитаксиальных PHEMT (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) структур AlGaAs/InGaAs с профилем δ -легирования в виде НН из атомов Sn.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Определены ключевые этапы и разработана технология роста методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) гомо- и гетероэпитаксиальных наноструктур, содержащих НН из атомов олова;
2. Исследованы электрофизические свойства (концентрация и подвижность двумерных электронов) гомо- и гетероэпитаксиальных образцов наноструктур с НН из атомов олова с помощью измерения эффекта Холла;
3. Измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) гомо и гетероэпитаксиальных образцов наноструктур с НН из атомов олова и исследованы особенности токовой нестабильности в гомоэпитаксиальных образцах;
4. Исследованы оптические свойства гетероэпитаксиальных InGaAs/AlGaAs PHEMT образцов наноструктур с НН из атомов олова с помощью измерений спектроскопии фотолюминесценции;
5. Разработан и исследован полевой транзистор на основе изготовленной InGaAs/AlGaAs PHEMT наноструктуры с профилем δ -легирования в виде НН из атомов олова.
6. Проведено численное моделирование зонной структуры гомоэпитаксиального образца с НН из атомов олова для оценки возможности использования его для изготовления болометра на горячих электронах;
7. Проведен анализ и обобщение полученных теоретических и экспериментальных данных.

Научная новизна работы

1. Впервые определена совокупность оптимальных параметров МЛЭ роста, позволяющая расположить атомы Sn преимущественно вдоль краев террас с

сохранением расположения во время зарастивания как для гомо-, так и гетероструктур;

2. Впервые изготовлена PHEMT наноструктура AlGaAs/InGaAs с профилем δ -легирования в виде НН из атомов Sn на вицинальной подложке GaAs с углом разориентации $0,3^\circ$ и исследованы ее электрофизические и оптические свойства;
3. Впервые обнаружена анизотропия тока насыщения при протекании тока вдоль и поперек НН из атомов олова для PHEMT наноструктуры AlGaAs/InGaAs с профилем δ -легирования в виде НН из атомов Sn;
4. Впервые изготовлен полевой транзистор на основе PHEMT наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs с профилем δ -легирования в виде НН из атомов Sn и измерены его СВЧ характеристики;
5. Впервые проведены исследования колебаний тока в реальном масштабе времени в зависимости от тянущего напряжения и светового воздействия при протекании тока перпендикулярно НН из атомов олова в гомоэпитаксиальных структурах.
6. Впервые проведен расчет зонной структуры гомоэпитаксиальных образцов с НН из атомов олова и сделана оценка применимости таких структур для изготовления болометра на горячих электронах;

Научная и практическая значимость работы

Полученные результаты диссертационной работы расширяют известные ранее представления об электронном транспорте и структурных особенностях эпитаксиальных структур, содержащих НН, а также описывают свойства новой предложенной конструкции структур на основе PHEMT AlGaAs/InGaAs с профилем легирования в виде НН из атомов олова.

Практическая ценность работы связана с тем, что полученные и исследованные PHEMT наногетероструктуры с профилем легирования в виде НН из атомов олова могут применяться в качестве базового материала компонентной базы СВЧ электроники для создания полевых транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ диапазона благодаря превосходящим параметрам электронного транспорта по сравнению с приборами, изготовленными на базе традиционных PHEMT AlGaAs/InGaAs структур. Таким образом, результаты данной диссертационной работы позволяют увеличить быстродействие СВЧ приборов на основе такого типа структур. В данной работе определены оптимальные условия для декорирования краев террас вицинальной поверхности GaAs атомами Sn, разработана технология изготовления и экспериментально созданы эпитаксиальные

структуры с профилем δ -легирования в виде НН из атомов Sn, которые могут успешно использоваться в качестве основы для создания полевых СВЧ транзисторов и МИС на их основе для миллиметрового диапазона длин волн. Были продемонстрированы результаты измерений полевого транзистора, показавшего параметры на уровне лучших PHEMT AlGaAs/InGaAs на подложке GaAs: значения MSG (Maximum Stable Gain) на 10 ГГц составили 17,7 дБ при протекании тока вдоль краев вицинальных террас и 15,5 дБ поперек; $F_{\max} = 150$ ГГц для продольного направления и 117 ГГц перпендикулярно краям террас.

Изменение угла разориентации подложки позволяет задавать размер террас, а, следовательно, расстояние между НН и вместе с вариацией уровня легирования дает возможность управлять степенью локализации носителей в потенциальной яме и перекрытия волновых функций в отдельных НН. Эта дополнительная степень свободы может быть полезна для инженерии эпитаксиальных наноструктур с требуемым коэффициентом анизотропии проводимости, что открывает возможность для использования таких структур в оптоэлектронных приложениях, например, таких, как болометр на горячих электронах. Проведенный расчет зонной гомоэпитаксиальной структуры со встроенными в кристалл GaAs НН также подтверждает возможность изготовления приборов данного типа на основе такой структуры.

Результаты диссертации были использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Поисковые исследования по разработке методов формирования упорядоченных массивов кристаллографических наноструктур на основе олова для наноэлектроники» в ИСВЧПЭ РАН (2011-2013 гг.). Также зарегистрирован патент на изобретение № 2520538 «Наноразмерная структура с квазиодномерными проводящими нитями олова в решетке GaAs».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Определенная совокупность параметров процесса МЛЭ, при которых происходит декорирование краев террас вицинальной поверхности подложки GaAs с разориентацией $0,3^\circ$ и размером террасы 500 \AA , приводящее к формированию НН;
2. Обнаруженная анизотропия тока насыщения при протекании тока в ортогональных направлениях вдоль и поперек НН с коэффициентом анизотропии $k_a = I_{\parallel}/I_{\perp}$, составляющим $\sim 1,2$ для гомоэпитаксиальных образцов

на подложке GaAs с разориентацией $0,3^\circ$ и $\sim 2,5$ для образцов РНЕМТ AlGaAs/InGaAs на подложке GaAs с разориентацией $0,3^\circ$;

3. Обнаруженные осцилляции тока при его протекании перпендикулярно НН из атомов олова в гомоэпитаксиальных структурах на подложке GaAs с разориентацией $0,3^\circ$, возникающие при напряженности тянущего поля > 10 кВ/см, частота и амплитуда которых зависит от величины тянущего напряжения и светового воздействия.

Достоверность научных положений, результатов и выводов

Достоверность научных результатов обусловлена применением современных и общепризнанных экспериментальных методов: МЛЭ, дифракции быстрых электронов в геометрии «на отражение» (ДБЭО), спектроскопии фотолюминесценции, а также измерениями эффекта Холла, ВАХ и высокочастотных характеристик и т.д. Полученные в работе результаты и выводы не противоречат ранее известным данным, неоднократно апробированы на международных и российских конференциях и научных семинарах.

Личный вклад соискателя

Соискатель принимал активное участие на всех стадиях работы. Им был выполнен анализ имеющихся литературных (отечественных и зарубежных) данных по теме диссертационной работы, а также основная часть расчетных и экспериментальных работ: расчет параметров эпитаксиального роста; комплекс работ по определению оптимальных параметров роста и экспериментальному получению наноструктур методом МЛЭ; интерпретация картин ДБЭО во время роста; измерение эффекта Холла и ВАХ, а также обработка их результатов; анализ спектров фотолюминесценции, а также обработка измерений параметров тестовых полевых транзисторов. Расчет зонных структур, проведение измерений спектроскопии фотолюминесценции, изготовление полевых транзисторов и измерение высокочастотных характеристик РНЕМТ проводились также при его непосредственном участии.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех основных глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы 132 страницы машинописного текста, 43 рисунка, 6 таблиц. Список литературы содержит 113 наименований.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на 1-ой и 2-ой Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 2011 и 2012 гг.); 2-ой международной научно-технической конференции «Технологии микро- и наноэлектроники в микро- и наносистемной технике» (Москва, 2011 г.); XIV Национальной конференции по росту кристаллов (Москва, 2010 г.); 60-й и 63-й Научно-технической конференции в МИРЭА (Москва, 2011 и 2014 г.).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликованы 14 работ в научных журналах и сборниках трудов международных и российских конференций, в том числе 8 работ в реферируемых журналах из перечня ВАК, 6 в трудах конференций, получен 1 патент на изобретение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертации, отражены новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приведен обзор литературы по основным методам изготовления НН, описаны преимущества и недостатки. Обоснован вывод о перспективности использования выбранного метода изготовления НН. Обобщенно можно выделить три основных метода получения НН: с помощью субмикронной литографии на структурах с двумерным электронным газом (ДЭГ); эпитаксиальное выращивание на фасетированных и вицинальных поверхностях и эпитаксиальное создание вертикальных НН. Используемый в диссертационной работе метод относится к эпитаксиальному выращиванию на вицинальных поверхностях. К достоинствам данного метода можно отнести: использование доступных вицинальных подложек GaAs с заданным углом разориентации; возможность встроить НН в классическую PHEMT структуру AlGaAs/InGaAs с модулированным легированием, создавая таким образом потенциальный рельеф в квантовой яме в виде квазиодномерных проводящих каналов из атомов Sn; крайне высокая технологичность благодаря отсутствию дополнительных технических процессов, связанных с подготовкой подложки и

возможности использовать стандартную планарную PHEMT AlGaAs/InGaAs технологию для изготовления приборов.

Во **второй главе** представлено описание экспериментального оборудования и методов исследования образцов, использованных в диссертационной работе. Дана схема установки МЛЭ RIBER 32P, использовавшейся для изготовления гомоэпитаксиальных и PHEMT AlGaAs/InGaAs наноструктур со встроенными НН из атомов олова и описание физики процессов при эпитаксии. Описываются методики получения дифракционных картин ДБЭО, эффекта Холла и спектров фотолюминесценции.

Третья глава занимает центральное место в диссертации. В ней описываются теоретические и экспериментальные исследования по возможности декорирования краев террас вицинальной поверхности атомами олова, обозначены ключевые проблемы при изготовлении структур с НН из атомов олова и представлены способы их решения, разработаны конструкция структур и технология их изготовления.

Если при δ -легировании расположить атомы донорной примеси в одной плоскости, но в виде параллельных линейных цепочек со средним расстоянием между нитями намного больше двух боровских радиусов и со средним расстоянием между атомами примеси в цепочке намного меньше боровского радиуса, то получим для каждой такой нити квантование не только в направлении перпендикулярном поверхности, как для слоевого δ -легирования, но и во втором, ортогональном направлении, перпендикулярном линиям цепочек донорных атомов. В таком случае в окрестности каждой цепочки может быть сформирован квазиодномерный газ электронов проводимости. При уменьшении расстояния между линейными цепочками атомов донорной примеси волновые функции квазиодномерных электронов проводимости вблизи каждой такой цепочки начнут частично перекрываться, то есть будет расти доля двумерной компоненты электронного газа

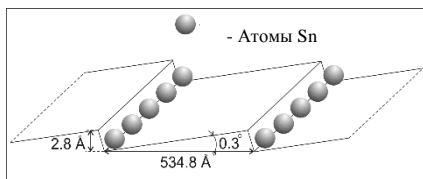


Рис. 1. Расположение атомов олова вдоль краев террас вицинальной поверхности

и при чрезмерном сближении линейных цепочек атомов электрически активной донорной примеси одномерная компонента электронного газа практически исчезает, газ становится двумерным. В случае достаточно большого расстояния между цепочками атомов

примеси, если среднее расстояние между атомами примеси в самой цепочке будет соизмеримо с расстоянием между цепочками также можно получить двумерный электронный газ. Таким образом, важно добиться максимальной линейной плотности атомов примеси при формировании квазиодномерных цепочек из атомов примеси.

Для практического осуществления поставленной задачи предлагается использовать особенности формирования поверхности вицинальных подложек монокристаллического GaAs с кристаллографической ориентацией поверхности, отклоненной на небольшой угол от исходной плоскости типа (100) в направлении плоскости типа (111). Для таких подложек поверхность представляет собой ступени высотой в один монослой (для ориентации типа (100) один монослой равен половине постоянной решетки GaAs, то есть $\sim 2,83 \text{ \AA}$) разделенные террасами с точной кристаллографической ориентацией типа (100). Ширина террас, или расстояние между ступенями $L=2,83 \text{ \AA}/\text{tg}(\alpha)$, где α – угол разориентации (рис. 1). Так, для $\alpha = 3^\circ$ имеем $L \approx 50 \text{ \AA}$, а для $\alpha = 0,4^\circ$ – $L \sim 500 \text{ \AA}$. Такая ступенчатая поверхность характеризуется всплеском потенциальной энергии на краях ступеней для адсорбированных адатомов эпитаксиально наращиваемого вещества, например, атомов Ga. Это же свойство вицинальных подложек используется для послойного роста методом МЛЭ атомарно гладких пленок в режиме Франка-ван-дер-Мерве за счет организации так называемого “step flow growth” режима. Если средняя диффузионная длина адатома на поверхности превышает размер террас вицинальной грани, то эпитаксиальный рост пленки осуществляется за счет присоединения адатомов к краям ступеней без образования зародышевых островков на террасах. Таким образом, задавая нужный размер террас вицинальной подложки (т.е. угол разориентации), подбирая условия роста и точно дозируя количество адатомов вещества, попадающих на поверхность, можно сформировать на поверхности в том числе и нити, представляющие собой цепочки атомов, занявших вакантные связи на краях ступеней. Оптимальным выбором в данном случае будут подложки с углом разориентации $0,3^\circ$, имеющие террасы шириной $\sim 500 \text{ \AA}$ как наиболее компромиссный вариант с учетом допуска неточности разориентации $\pm 0,1^\circ$.

Обобщенно для решения задачи можно выделить следующие принципиально важные этапы:

- 1) подготовка поверхности GaAs после эпитаксиального выращивания буферного слоя к высаживанию легирующей примеси Sn;
- 2) непосредственно легирование поверхности;
- 3) заращивание высаженных цепочек атомов Sn в режимах, обеспечивающих активацию атомов легирующей примеси с одной стороны, и предотвращающих диффузию и сегрегацию атомов Sn во время заращивания с другой.

Подготовка к легированию заключается в создании максимально идеальной ступенчатой поверхности с атомарно гладкими террасами. Единственно возможным способом контроля гладкости поверхности *in situ* является дифракция быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Интенсивность рефлексов электронной поверхностной дифракции чрезвычайно чувствительна к состоянию поверхности. Чем больше размер островков из которых состоит поверхность сингулярной грани, тем больше интенсивность зеркального рефлекса (ЗР). Поверхность, состоящая из предельно больших островков эквивалентна атомарно гладкой поверхности без островков. Таким образом, полное отсутствие островков на поверхности соответствует максимальной интенсивности зеркального рефлекса. При ориентации первичного пучка электронов в азимутальном направлении перпендикулярно краям атомных террас вицинальной грани максимум интенсивности ЗР будет соответствовать максимальному размеру островков, равному ширине террас. Но это состояние поверхности вицинальной грани как раз и соответствует полному отсутствию островков на террасах. Таким образом, состояние поверхности, представляющее эшелоны атомарно гладких террас, наиболее подходящее для проведения декорирования, можно определить по максимальному значению интенсивности зеркального рефлекса отраженных электронов.

Для формирования атомарно гладких террас на поверхности вицинальной подложки GaAs были проведены следующие технологические процессы:

- термическое удаление естественного окисла с поверхности подложки перед эпитаксиальным ростом;
- выращивание первой части буферного слоя GaAs в условиях, обеспечивающих полное отсутствие трехмерной дифракции ДБЭО и фасетирования поверхности подложки на дефектах и остаточных примесях, которое приводит к появлению дополнительных угловых рефлексов ДБЭО;

- выращивание второй части буферного слоя GaAs в условиях повышенной поверхностной подвижности адатомов Ga для минимизации количества достраивающихся монослоев на террасах во время роста;
- выдержка подложки в потоке As₄ в отсутствие атомов Ga при температуре, обеспечивающей формирование атомарно гладких террас за разумное время.

Экспериментально были определены условия роста первой части буферного слоя: скорость роста GaAs ~ 0,6 мкм/ч; температура подложки T_s ~ 580° C; ВЕР_{As} ~ 1×10⁻⁵ торр; время роста до достижения чисто двумерного характера дифракционной картины ДБЭО ~ 15 минут. Вторая часть буферного слоя GaAs

Таблица 1. Ростовые режимы, обеспечивающие максимальную гладкость поверхности GaAs

| процесс | параметр | Технологические режимы | |
|------------------|-------------|------------------------|---------------------------|
| | | T _s , °C | V _{GaAs} , мкм/ч |
| CP AlAs/GaAs, ×5 | 20Å + 20Å | 580 | 0,6 |
| Буфер GaAs-1 | 0,4-0,6 мкм | 580 | 0,6 |
| Буфер GaAs-2 | 0,2 мкм | 620 | 0,6 |
| Прерывание роста | 2 мин | 620 | - |

выращивалась при таких режимах, которые обеспечивали максимальную подвижность адатомов Ga при сохранении сверхструктуры на поверхности β(2×4). Контроль поверхности осуществлялся измерением интенсивности зеркального рефлекса ДБЭО и системы регистрации интенсивности свечения люминесцентного экрана. При температурах подложки T_s ниже 620° C амплитуда осцилляций была больше, но интенсивность ЗР перед началом роста была меньше. Амплитуда осцилляций для сингулярной поверхности с точной ориентацией растет вместе с ростом подвижности адатомов. Подвижность адатомов увеличивается вместе с увеличением температуры подложки в условиях неизменной сверхструктуры. Наблюдающееся уменьшение амплитуды осцилляций с ростом температуры для вицинальной грани говорит о том, что поверхностная диффузионная длина адатомов близка к половине ширины террас. Когда диффузионная длина адатомов становится заметно больше половины ширины террас вицинальной грани, то осцилляции интенсивности ЗР на начальных стадиях роста исчезают, так как меняется механизм

эпитаксиального роста с двумерного на так называемый “step flow growth” режим. При этом режиме гладкость поверхности на атомарном уровне не меняется во время начальных стадий роста, а сам рост происходит достраиванием ступеней на краях террас. Была тем не менее выбрана температура роста 620°C, так как при более высокой температуре происходила перестройка сверхструктуры поверхности во время начала роста. После завершения роста буферного слоя GaAs выдерживали подложку в потоке As₄ при различных T_s с контролем интенсивности ЗР. Найденные таким образом оптимальные режимы формирования террас на поверхности вицинальной подложки GaAs, которые обеспечили максимальное значение интенсивности зеркального рефлекса можно сформулировать в табл. 1.

В качестве метода исследования, позволяющего судить о расположении атомов олова на поверхности кристалла, также применялась ДБЭО, которая при углах скольжения первичного электронного пучка ~1° получает информацию от нескольких приповерхностных слоёв объекта и допускает интерпретацию результатов в рамках кинематической теории дифракции. Поскольку атомы Sn имеют существенное (~40%) различие амплитуд рассеяния в сравнении с атомами

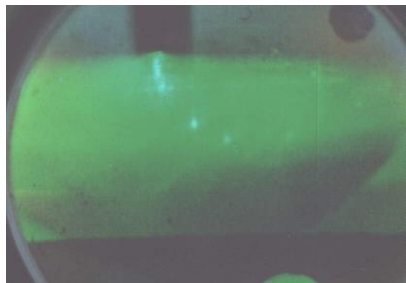


Рис. 2. Фотография дифракционной картины от поверхности GaAs после осаждения олова

Ga, это позволяет регистрировать изменения интенсивностей рефлексов дифракционной картины от 1 до 10% при дозах δ – легирования на уровне $10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-2}$, т.е. на уровне 0,1 – 1,0% монослоя. Качественно картину дифракции в кинематическом приближении можно представить следующим образом. Вицинальная поверхность кристалла составлена из кусочков сингулярной плоскости кристалла (террас). Они располагаются

таким образом, что края террас образуют плоскость макроскопической ориентации образца. Обратное пространство, соответствующее вицинальной поверхности кристалла подложки – это периодическая система стержней поверхностной сверхструктуры, перпендикулярных сингулярной плоскости террас (т.е. плоскости (001)). Эти стержни наклонены к плоскости макроскопической ориентации образца на угол, соответствующий углу разориентации кристалла. Если атомы осаждаемой

примеси располагаются хаотично на плоскостях террас и не декорируют их края, то обратное пространство такого объекта – нулевой стержень обратной решётки, нормальный к плоскости террасы. Он совпадает с нулевым узлом обратной решётки подложки. Таким образом, при равномерном распределении олова по поверхности террас следует ожидать изменения интенсивности дифракции в точках нулевого стержня обратной решётки, но качественного изменения вида дифракционной картины не произойдёт. Если же примесь преимущественно располагается на краях террас – то возникает рассеивающая плоскость атомов примеси, совпадающая с плоскостью макроскопической ориентации образца. Другими словами, появляется новый двумерный объект, составленный из атомов примеси – плоскость, наклонённая к сингулярной плоскости террас. И при ДБЭО нулевой стержень обратной решетки пересечет нулевой узел обратной решётки подложки в точке, соответствующей зеркальному рефлексу, при этом должно произойти качественное изменение дифракционной картины, связанное с расщеплением зеркального рефлекса в виде буквы V. Для наблюдения этого эффекта азимутальная ориентация первичного пучка электронов должна совпадать с направлением [1-10], параллельным краям атомных террас. На рис. 2 видно расщепление нулевого

| | | |
|----|---|---------|
| 7. | n ⁺ GaAs | 100 А |
| 6. | i-GaAs | 200 А |
| 5. | Прерывание роста | |
| 4. | δ -Sn $7,5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ | |
| | ● ● ● ● ● | |
| 3. | Прерывание роста | |
| 2. | i-GaAs | 0,6 мкм |
| 1. | Подложка GaAs off 0,3-3° | |

Рис. 3. Конструкция гомоэпитаксиальных структур

рефлекса дифракционной картины после нанесения олова, свидетельствующее об образовании сегрегации атомов олова на краях террас вицинальной грани кристалла GaAs.

Последний этап – зарощивание высаженных на края ступеней атомов Sn следует проводить с максимальной скоростью и минимальной T_s . Эти меры необходимы для предотвращения диффузии и сегрегации олова во время зарощивания, при этом атомы Sn должны находиться в кристаллической решетке, замещая атомы галлия, чтобы оставаться электрически

активной мелкой донорной примесью. Однако при чрезмерно низкой температуре эпитаксиального роста возможно образование слишком большого количества дефектов роста типа галлиевых вакансий. Что, в свою очередь, может привести к

большой концентрации глубоких уровней и ухудшить электрические свойства выращенных структур. Конкретное значение T_s для зарощивания выбирается экспериментально.

Выбранная конструкция для образцов гомоэпитаксиальных структур, содержащих нанонити из атомов олова, показана на рис.3. Для исследования были изготовлены гомоэпитаксиальные образцы двух типов. Образец первого типа №217 на вицинальной подложке GaAs с разориентацией $0,3^\circ$ с размером террас $\sim 500 \text{ \AA}$ и второго типа №218 – на вицинальной подложке GaAs с разориентацией 3° с размером террас $\sim 50 \text{ \AA}$. Время прерывания роста перед дельта-легированием (слой №3 на рис.3) составляло 180 с при $T_s = 630 \text{ }^\circ\text{C}$. Время прерывания роста после дельта-легирования (слой №5 на рис. 3) составляло 120 с при $T_s=620 \text{ }^\circ\text{C}$.

Важной особенностью структур типа РНЕМТ является наличие барьерного слоя AlGaAs, эффективность легирования оловом которого практически не изучалась. Для оптимизации процесса декорирования краев террас атомами олова использовался технологический прием, заключающийся во введении дополнительной прослойки GaAs в область δ -легирования, что позволило воспроизвести уже изученные в гомоэпитаксиальных системах условия для легирования оловом, а также повысить гладкость поверхности и эффективность легирования слоя. Конструкция структуры представлена на рис. 4. Температура T_s для слоев № 8, 9, 11 – $620 \text{ }^\circ\text{C}$, время прерывания роста № 9 – 30 с, № 11 – 45 с.

Были изготовлены рабочие образцы, отличающиеся концентрацией легирования и температурой подложки T_s при зарощивании (табл. 2). Использовалась стандартная для РНЕМТ $T_s=580 \text{ }^\circ\text{C}$ и пониженная, оптимальная для сохранения положения атомов олова на краях террас после легирования $T_s=500 \text{ }^\circ\text{C}$.

В четвертой главе продемонстрированы электрофизические и оптические свойства изготовленных образцов как гомоэпитаксиальных, так и РНЕМТ

| | | |
|-----|--|---------|
| 14. | GaAs : Si | 15 нм |
| 13. | Al _{0,24} Ga _{0,76} As | 33 нм |
| 12. | i-GaAs | 1 нм |
| 11. | Прерывание роста | |
| 10. | δ -Sn | |
| | ● ● ● ● ● | |
| 9. | Прерывание роста | |
| 8. | i-GaAs | 3 нм |
| 7. | Al _{0,24} Ga _{0,76} As | 4 нм |
| 6. | Прерывание роста | |
| 5. | i-GaAs | 2 нм |
| 4. | In _{0,2} Ga _{0,8} As | 12 нм |
| 3. | Прерывание роста | |
| 2. | i-GaAs | 0,6 мкм |
| 1. | Подложка GaAs off $0,3^\circ$ | |

Рис. 4. Конструкция РНЕМТ AlGaAs/InGaAs структур

AlGaAs/InGaAs структур, содержащих НН из атомов олова, а также теоретически рассмотрена возможность использования гомоэпитаксиальных структур в качестве основы для создания болометра на горячих электронах (Hot Electron Bolometer, НЕВ).

Результаты измерений эффекта Холла структур типа PHEMT AlGaAs/InGaAs показаны в табл. 2. Несмотря на высокое качество кристалла, показанное ДБЭО непосредственно во время эпитаксиального роста образца №256, электрофизические параметры оказались недостаточными для дальнейшей работы. Температура подложки T_s во время легирования, обеспечивающая требуемую поверхностную миграцию, приводит к высокой скорости реиспарения атомов Sn с поверхности подложки. Таким образом, для получения рабочих значений концентрации носителей необходимо повышать степень легирования. Образец № 261 изготовлен по стандартной технологии PHEMT с легированием кремнием и является контрольным. Образец № 275 с профилем легирования в виде НН из атомов олова, изготовленный при стандартной для PHEMT температуре показал понижение концентрации на два порядка, что, очевидно, связано с повышенной диффузией и сегрегацией атомов олова из δ -слоя. Дальнейшее увеличение концентрации атомов олова при легировании до значений $\sim 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ в сочетании с оптимизированными режимами эпитаксиального роста привело к получению образца №278 с рабочей концентрацией электронов.

Таблица 2. Условия изготовления и результаты измерений эффекта Холла AlGaAs/InGaAs PHEMT структур

* – Концентрация δ -Si

| Образец | Температура заравнивания | Концентр. легирования δ -Sn, см^{-2} | Измеренные параметры эффекта Холла при 300 К | |
|---------|--------------------------|--|--|------------------------|
| | | | μ , $\text{см}^2/\text{В} \times \text{с}$ | n , см^{-2} |
| 256 | Пониж. | $3,7 \times 10^{12}$ | 4800 | $1,5 \times 10^{11}$ |
| 258 | Пониж. | $7,4 \times 10^{12}$ | 4950 | $3,4 \times 10^{11}$ |
| 260 | Пониж. | $1,48 \times 10^{13}$ | 5600 | $7,8 \times 10^{11}$ |
| 261 | Стандарт | $3,4 \times 10^{12}$ * | 5880 | $2,1 \times 10^{12}$ |
| 275 | Стандарт | $1,48 \times 10^{13}$ | 4900 | $6,5 \times 10^{10}$ |
| 278 | Пониж. | $2,96 \times 10^{13}$ | 5530 | 2×10^{12} |

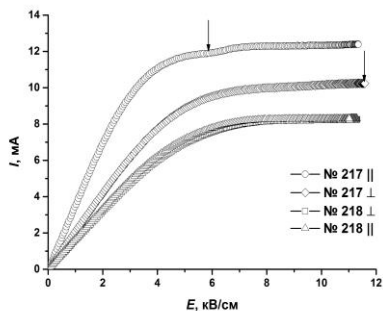


Рис. 5. ВАХ гомоэпитаксиальных образцов

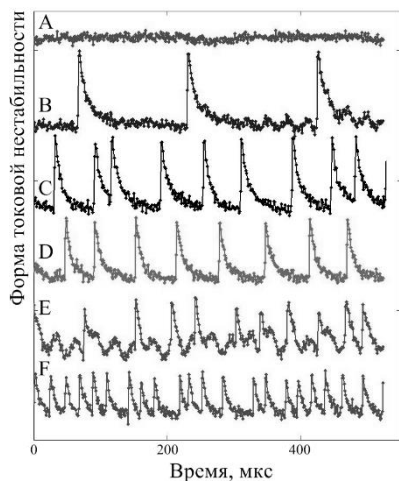


Рис. 6. Колебания тока, проходящего через образец при различном постоянном напряжении: А – 4 В; В – 5.8 В; С – 5.9 В; D – 6 В; E – 6.1 В; F – 6.2 В

Форма, амплитуда и период импульсов зависят от величины тянущего поля и освещения, на рис. 6 показаны развертки импульсов в реальном времени при различных условиях. Подобное поведение характерно для формирования и

Для измерения ВАХ в ортогональных направлениях на поверхность пластин GaAs со структурами были нанесены омические контакты шириной 20 мкм и расстоянием между ними 6 мкм. Измеренные кривые ВАХ гомоэпитаксиальных образцов показаны на рис. 5. Структура №217 проявляет хорошо различимую анизотропию тока насыщения, свидетельствующую об образовании НН из атомов олова и ее полное отсутствие для контрольного образца № 218 с разориентацией 3° . Стрелкой на верхней кривой отмечен перегиб перед выходом на область насыщения при протекании тока вдоль НН в образце № 217, который, по всей видимости, связан с вовлечением в механизм проводимости носителей из локализованных состояний, возникающих при случайном распределении и внедрении атомов олова в кристаллическую решетку GaAs. В сильных полях при напряженности поля > 10 кВ/см (область отмечена стрелкой на кривой рис. 5 №217 \perp) обнаружены осцилляции тока при его протекании в направлении перпендикулярно НН, при этом в параллельном направлении эффект отсутствует вплоть до теплового пробоя. Форма, амплитуда и период импульсов зависят от величины тянущего поля и освещения, на рис. 6 показаны развертки импульсов в реальном времени при различных условиях. Подобное поведение характерно для формирования и

движения электрического домена сильного поля. На фурье-спектре колебаний основная частота находится в диапазоне ~ 25 кГц, что позволяет отнести механизм возникновения доменов к перегревно-рекомбинационной неустойчивости, связанной со спецификой нагрева электронов и его влияния на их захват в потенциальные ямы, образованные НН из атомов олова. В случае пролетной неустойчивости частота колебаний $f \sim \frac{v_{др}}{L}$ должна была бы быть существенно выше.

Кривые ВАХ для PHEMT структуры InGaAs/AlGaAs показаны на рис. 7. Как и в гомоэпитаксиальных образцах, хорошо различима анизотропия проводимости при комнатной температуре, причем отношение $I_{\parallel}/I_{\perp} \sim 2.5$ существенно превышает

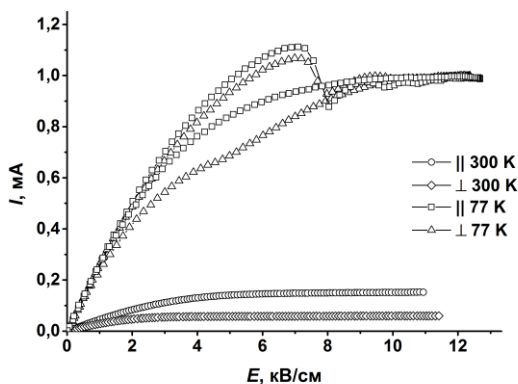


Рис. 7. ВАХ PHEMT AlGaAs/InGaAs образца № 260

полученное при легировании гомокристалла GaAs. Это может быть обусловлено повышенной локализацией электронного газа в виде НН благодаря ионному остову в δ -слое, эффективно модулирующему электронный газ в квантовой яме в виде квазиодномерных каналов. Понижение температуры измерения до 77 К существенно меняет характер поведения проходящего тока. При тянущем поле более 6 кВ/см появляется область отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), вероятнее всего связанная с уменьшением рассеяния носителей на фононах и междолинным рассеянием в область с большей эффективной массой. При этом практически полностью пропадает анизотропия тока насыщения в ортогональных

направлениях, что может быть обусловлено приобретением носителями в высоких полях > 6 кВ/см энергии, превышающей потенциальный барьер, в котором локализованы электроны.

Оптические свойства образцов РНЕМТ AlGaAs/InGaAs структур с НН из атомов олова исследовались методом спектроскопии фотолуминесценции. Кривые спектров показаны на рис. 8. Недостаточность легирования в образце № 260

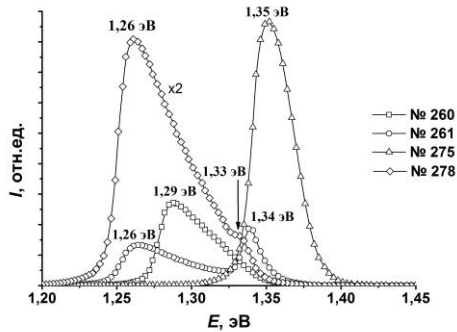


Рис. 8. Спектры ФЛ РНЕМТ AlGaAs/InGaAs образцов

проявляется в отсутствии видимого пика рекомбинации со второго уровня размерного квантования $2e-1h$, в отличие от № 278 с увеличенной в два раза n_{sh} . Отдельно стоит отметить спектр образца № 275. Он смещен в более высокоэнергетическую область по сравнению с $In_{0,2}Ga_{0,8}As$, его максимум расположен на уровне 1,35 эВ. Поскольку конструкция и состав этой структуры не отличаются от № 260, их энергетические диаграммы должны совпадать, чего не наблюдается. Можно заключить, что повышенная температура зарачивания оловосодержащих структур, которая применялась в образце № 275 является сильно неоптимальной для сохранения положения атомов олова на краях вицинальных террас и приводит к диффузии также склонного к сегрегации In из канала $In_{0,2}Ga_{0,8}As$ в растущие слои, несколько уменьшая тем самым содержание In в канале и как следствие некоторому увеличению E_g .

На основе структуры №278 были изготовлены тестовые полевые транзисторы в специальной геометрии для проведения измерений в двух ортогональных направлениях с ориентацией затвора для протекания тока вдоль и поперек НН (или краям вицинальных террас). Ширина затвора составляет 2×120

мкм, длина 150 нм. Полученные частотные характеристики показывают явную анизотропию значений для ортогональных направлений, рис. 9-10. Максимальная частота усиления по мощности F_{\max} изготовленных транзисторов составила 150 ГГц

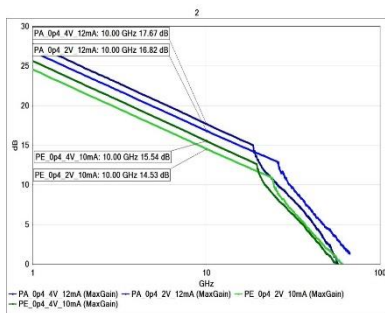


Рис. 9. MSG/MAG транзистора для двух ортогональных направлений

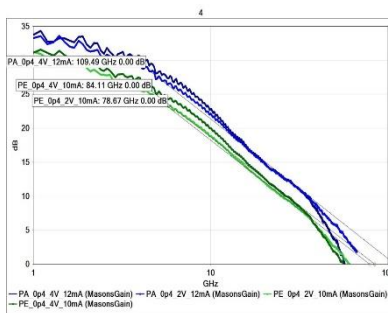


Рис. 10. Masons Gain транзистора для двух ортогональных направлений

для продольного направления и 117 ГГц для поперечного, значение MSG на частоте 10 ГГц равнялось 17,7 дБ и 15,5 дБ для направлений вдоль и поперек нанонитей соответственно. Величина MSG на 10 ГГц для транзисторов, ориентированных для протекания тока в продольном направлении, находится на уровне лучших образцов РНЕМТ структур, в которых достигнуто ~ 17 дБ и превышает типичные значения для РНЕМТ транзисторов порядка 15 дБ, уступая лишь приборам на метаморфных эпитаксиальных структурах (МНЕМТ) с повышенным содержанием индия в канале, где MSG на 10 ГГц может превышать 20 дБ. Такой результат подтверждает перспективность применения РНЕМТ AlGaAs/InGaAs структур с профилем легирования в виде НН из атомов олова в качестве элементной базы для изготовления приборов.

Одним из возможных применений гомоэпитаксиальной структуры с НН из атомов олова является болометр на горячих электронах (Hot Electron Bolometer, НЕВ). Для оценки применимости был проведен теоретический расчет зонной структуры. Расчет выполнялся с помощью решения системы уравнений, состоящей из: 1) двумерного уравнения Пуассона для самосогласованного электрического потенциала; 2) выражения для плотности электронов в квазиклассическом приближении; 3) уравнения электронейтральности системы. Рассчитан пространственный профиль потенциальной энергии $U(x)$ для рабочих параметров:

расстояния между НН $L=50$ нм при $T = 300$ К, который показан на рис. 11. При заданных параметрах уровень Ферми располагается выше потенциального барьера, следовательно, управление степенью анизотропии возможно только приложением

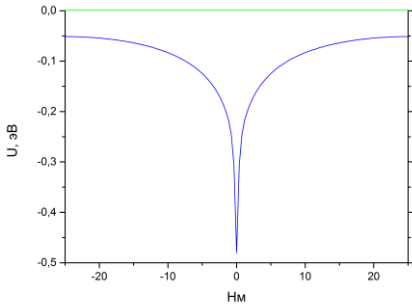


Рис. 11. Профиль потенциальной энергии для ширины террасы 500 \AA

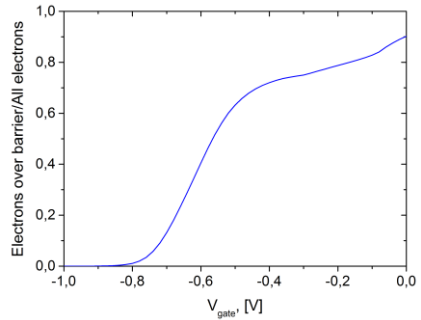


Рис. 12. Отношение плотности электронов над барьером к суммарной плотности от напряжения на затворе

затворного потенциала. Моделирование показывает, что при $V_g=0$ В и концентрации атомов олова $n_{Sn}=8 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ количество локализованных носителей в яме составляет $\sim 10\%$ от общего числа (рис. 12). Это дает коэффициент анизотропии $\sim 1,1$, что в целом соответствует полученным экспериментальным данным (рис. 5). Для реализации НЕВ требуется исключить проводимость в перпендикулярном направлении для уменьшения темнового тока, что можно достичь приложением закрывающего затворного потенциала V_g . При $V_g = -0,5$ В высота барьера составляет ~ 50 мэВ при числе локализованных в квантовой яме носителей $\sim 1,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При дальнейшем увеличении V_g высота барьера увеличивается с одновременным уменьшением плотности электронов в системе. Качественно такое поведение позволяет рассматривать возможность формирования НЕВ на основе гомоэпитаксиальной структуры с НН из атомов олова.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определена совокупность оптимальных условий для декорирования краев террас вицинальной поверхности GaAs с разориентацией $0,3^\circ$ атомами олова.
2. При выполнении условий для декорирования факт преимущественного расположения атомов олова вдоль краев террас подтверждается расщеплением зеркального рефлекса ДБЭО.
3. Обнаружено, что неоптимальные условия зарощивания в InGaAs/AlGaAs РНЕМТ приводят не только к диффузии атомов олова в растущие слои и деградации электрофизических свойств структуры, но и к сегрегации In из квантовой ямы: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $x < 0,15$.
4. Результаты исследований образцов методами ДБЭО и спектроскопии фотолюминесценции показывают высокое структурное совершенство полученных наноструктур.
5. Расчетное моделирование зонной структуры гомоэпитаксиальных образцов подтвердило возможность их использования для изготовления болометра на горячих электронах при условии уменьшения темнового тока и получения требуемой анизотропии тока насыщения.
6. Измерены ВАХ гомоэпитаксиальных наноструктур. Обнаружено, что коэффициент анизотропии тока насыщения при $T = 300$ К составляет $\sim 1,2$, что в целом согласуется с данными расчетного моделирования.
7. На ВАХ гомоэпитаксиальных структур обнаружены осцилляции тока при его протекании перпендикулярно НН из атомов олова в гомоэпитаксиальных структурах на подложке GaAs с разориентацией $0,3^\circ$, возникающие при напряженности тянущего поля > 10 кВ/см, частота и амплитуда которых зависит от величины тянущего напряжения и светового воздействия. Такое поведение обусловлено возникновением электрических доменов сильного поля из-за сильной неоднородности распределения легирующей примеси в перпендикулярном направлении.
8. Измерены ВАХ РНЕМТ структур. Установлено, что коэффициент анизотропии тока насыщения для таких структур при $T = 300$ К составляет $\sim 2,5$, что является следствием модуляции электронного газа ионным остовом в δ -слое. При понижении температуры до 77 К на кривой ВАХ обнаружена область отрицательного дифференциального сопротивления, связанная с междолинным рассеянием в

области с большей эффективной массой. В полях, превышающих 8 кВ/см анизотропия тока насыщения пропадает.

9. На основе AlGaAs/InGaAs PHEMT структуры с профилем δ -легирования в виде НН из атомов олова изготовлен полевой транзистор с $L_g=150$ нм и $W_g=2 \times 120$ мкм и измерены СВЧ параметры. Для затворов с ориентацией протекания тока \parallel НН – $f_{\max \parallel} = 150$ ГГц (и $MSG = 17.7$ дБ); для PHEMT с ориентацией протекания тока \perp НН – $f_{\max \perp} = 117$ ГГц (и $MSG = 15.5$ дБ).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. R A Khabibullin, A E Yachmenev, D V Lavrukhin, D S Ponomarev, A S Bugayev and P P Maltsev. Pseudomorphic HEMT with Sn nanowires on a vicinal GaAs substrate // Semiconductor Science and Technology, 2015, 30, 085009;
2. Р.А. Хабибуллин, А.Э. Ячменев, Д. В. Лаврухин, Д.С. Пономарев, А.С. Бугаев, П.П. Мальцев, А.П. Сеничкин Электронный транспорт и оптические свойства структур с нанонитями из атомов олова на вицинальных подложках GaAs // Физика и техника полупроводников, 2016, том 50, вып.2, стр. 185-190;
3. Р. Р. Галиев, А. Э. Ячменев, А. С. Бугаев, Г. Б. Галиев, Ю. В. Федоров, Е. А. Климов, Р. А. Хабибуллин, Д. С. Пономарев, П. П. Мальцев Перспективные материалы электронно-компонентной базы для создания детекторов и генераторов ТГц диапазона частот (0.5–10 ТГц) // Известия РАН. Серия физическая, 2016, том 80, № 4, с. 523–525;
4. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев, Ключков А.Н. Патент на изобретение № 2520538 “Наноразмерная структура с квазидомерными проводящими нитями олова в решетке GaAs” зарегистрирован 27.06.2014;
5. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Оптические и электрофизические свойства PHEMT наногетероструктур с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова // Нано- и микросистемная техника, 2015, № 1, Стр.27-32;
6. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Оптимизация технологии получения рHEMT структур на подложках GaAs с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова // Нано- и микросистемная техника, 2014, № 5, Стр.15-17;
7. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Исследование токовой нестабильности в образцах, содержащих нанонити из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия // Нано- и микросистемная техника, 2014, № 3, Стр.32-34;

8. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Особенности вольт-амперных характеристик системы нанонитей из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия // Нано- и микросистемная техника, 2012, № 11, Стр.52-54;
9. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Вольт-амперные характеристики системы нанонитей из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия // Нано- и микросистемная техника, 2011, № 12, Стр.11-12;
10. А.П.Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Вольт-амперные характеристики системы нанонитей из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида // Сборник тезисов 2-й международной научно-технической конференции «Технологии микро- и нанoeлектроники в микро- и наносистемной технике», НИУ МИЭТ, 2011;
11. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Разработка технологии получения рНЕМТ структур на вицинальных подложках GaAs, содержащих нанонити из атомов олова // Сборник тезисов 63-й Научно-технической конференции МИРЭА, 2014;
12. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Изучение декорирования оловом краев террас вицинальной поверхности арсенида галлия методом дифракции быстрых электронов «на отражение» // Тезисы докладов XIV Национальной конференции по росту кристаллов, 2010;
13. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Получение методом молекулярно-лучевой эпитаксии квазиодномерных цепочек атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия // Сборник тезисов 1-ой Научно- практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», 2011;
14. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Особенности электронного транспорта в кристаллах GaAs, содержащих нанонити из атомов олова // Сборник тезисов 2-ой Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», 2012;
15. А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, А.Э. Ячменев Особенности электронного транспорта в кристаллах GaAs, содержащих нанонити из атомов олова // Сборник тезисов 60-й Научно-технической конференции МИРЭА, 2011.