

**Выписка из протокола № 11 заседания Ученого совета
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии
наук (ИСВЧПЭ РАН) от 10 ноября 2015 г.**

Присутствовали:

доктора наук: А.Н. Алешин, В.И. Рыжий, П.П. Мальцев, С.А. Гамкредидзе.

кандидаты наук: Д.С. Пономарев, Д.Л. Гнатюк, О.С. Матвеев, А.Ю. Павлов,
Р.А. Хабибуллин.

Всего: 9 человек из 11 членов Совета.

Председатель:

Врио директора ИСВЧПЭ РАН, д.т.н. П.П. Мальцев

Учёный секретарь:

к.ф.-м.н. Р.А. Хабибуллин

СЛУШАЛИ: Доклад по диссертационной работе Ячменева Александра Эдуардовича «Физико-технологические основы формирования систем проводящих нанонитей из атомов олова», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

В ходе обсуждения д.ф.-м.н., член-корреспондент Российской академии наук, профессор В.И. Рыжий, являющийся научным руководителем А.Э. Ячменева, сообщил, что во время работы над диссертацией соискатель проявил себя как специалист, владеющий глубокими теоретическими знаниями и необходимым практическим опытом. А.Э. Ячменев выполнил поставленные перед ним задачи самостоятельно. Опубликованные соискателем работы достаточно полно отражают содержание диссертации. По мнению В.И. Рыжия работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и ее следует рекомендовать к защите в Физико-технологическом институте РАН.

Заместитель директора ИСВЧПЭ РАН по научной работе, научный консультант диссертанта, к.ф.-м.н. Д.С. Пономарев в своем выступлении указал на актуальность выполненной работы и практическую значимость предложенного метода формирования систем проводящих нанонитей из атомов олова на вицинальных подложках GaAs.

С положительной оценкой работы также выступили:

- зав. лабораторией исследования процессов формирования низко-размерных электронных систем в наногетероструктурах соединений АЗВ5, д.ф.-м.н. Г.Б. Галиев;
- зав. лабораторией фундаментальных исследований низко-размерных электронных систем в наногетероструктурах полупроводниковых соединений АЗВ5, д.ф.-м.н. А.Н. Алешин.

ПОСТАНОВИЛИ: рекомендовать диссертацию Ячменева Александра Эдуардовича «Физико-технологические основы формирования систем проводящих нанонитей из атомов олова» к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» и утвердить заключение, содержащее общую характеристику диссертационной 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.

Настоящая работа посвящена разработке метода формирования эпитаксиальных наноструктур, содержащих нанонити из атомов олова и изучению их электрофизических и оптических свойств.

Научная новизна и достоверность полученных результатов

Научная новизна работы состоит в следующих результатах, которые были получены 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.
- 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.
- 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.
- Изготовлен полевой транзистор на основе PHEMT наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs с профилем δ -легирования в виде НН из атомов Sn и измерены его СВЧ характеристики.

- 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.
- Проведен расчет зонной структуры гомоэпитаксиальных образцов с НН из атомов олова и сделана оценка применимости таких структур для изготовления болометра на горячих электронах.

Достоверность научных результатов обусловлена применением современных и общепризнанных экспериментальных методов: МЛЭ, дифракции быстрых электронов в геометрии «на отражение» (ДБЭО), спектроскопии фотолуминесценции, 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.

Положения, выносимые на защиту

- 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.
- 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 PHEMT AlGaAs/InGaAs на подложке GaAs с разориентацией $0,3^\circ$.
- 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 $> 10 \text{ кВ/см}$, частота и амплитуда которых зависит от величины тянущего напряжения и светового воздействия.

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; $F_{\text{max}} = 150 \text{ ГГц}$ 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.

Личный вклад автора

Постановка задач диссертационной работы осуществлялась научным руководителем работы Рыжием В.И. Все эксперименты, представленные в диссертационной работе, обработка и интерпретация результатов были выполнены лично автором. Непосредственное участие коллег автора диссертации в проведенных исследованиях отражено в виде их соавторства в опубликованных работах. Результаты, выносимые на защиту и составляющие научную новизну работы, получены автором лично.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите

Содержание диссертационной работы соответствует специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Полнота изложения материалов в печати

Основное содержание диссертации достаточно полно отражено в 14 публикациях, включая публикации в научных журналах, из которых – 8 в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ в качестве ведущих рецензируемых журналов, так же был зарегистрирован 1 патент на полезную модель. Результаты исследований, составляющих диссертацию, докладывались на 6 международных и всероссийских конференциях и симпозиумах.

Заключение

Ученый совет ИСВЧПЭ РАН после обсуждения диссертационной работы А.Э. Ячменева оценивает ее как научную квалификационную работу, которая по актуальности, объему, новизне и значимости результатов полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

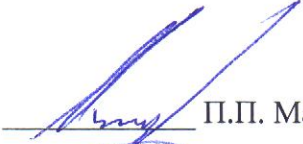

Исходя из вышесказанного следует рекомендовать диссертацию А.Э. Ячменева «Физико-технологические основы формирования систем проводящих нанонитей из атомов олова» к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в диссертационном совете Д.002.204.01 в Физико-технологическом институте РАН по специальности 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Председатель Ученого совета,
Заслуженный деятель науки РФ,
д.т.н., профессор

Ученый секретарь, к.ф.-м.н.

«10» ноября 2015 г.




П.П. Мальцев

П.А. Хабибуллин