

Утверждаю

Проректор по инновационному развитию



А.В. Рагуткин

“10” 04 2016 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Московского технологического университета” (МИРЭА) на диссертацию Ячменева Александра Эдуардовича на тему «Физико-технологические основы формирования систем проводящих нанонитей из атомов олова» по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертационная работа Ячменева А.Э. посвящена изучению физико-технологических основ формирования нанонитей из атомов олова на вицинальных подложках GaAs, применяемых при создании приборов современной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники, а также оптоэлектронных приборов типа болометра на горячих электронах. Системы, использующие СВЧ диапазон сейчас наиболее важны для приложений радиолокации, спутникового телевидения, многоканальных систем беспроводной связи, в том числе - космической и специальной. Для увеличения частотного диапазона вплоть до ТГц области спектра необходимо улучшение параметров и конструкции наноструктур, обеспечивающих повышение дрейфовой скорости электронов и увеличение быстродействия приборов на их основе, что обусловлено перегруженностью на сегодняшний день существующих диапазонов, а также нарастанием плотности информации. Низкоразмерные системы с нанонитями из атомов олова являются достаточно сложными объектами, в которых возникает специфика формирования зонного профиля и рассеяния электронов. Поставленная задача подчеркивает важность создания и исследования параметров структур, содержащих нанонити из атомов олова, а также изучения частотных характеристик приборов на основе таких структур.

Таким образом, выбранная Ячменевым А.Э. тема диссертации и выполненная по ней работа по физико-технологическим основам формирования нанонитей из атомов олова, является актуальной как с научной, так и практической точек зрения.

Результаты работы Ячменева А.Э. вносят вклад в физические и технологические основы разработки приборных наноструктур для применений в области СВЧ электроники.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного содержания и выводов, содержит 132 страницы, включая 43 рисунка, 6 таблиц и список цитируемой литературы из 113 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследования физико-технологических основ формирования системы проводящих нанонитей из атомов олова; сформулированы цель работы и решаемые задачи, указана новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту. Также представлен список публикаций по теме работы. Основные работы опубликованы в 8 статьях в реферируемых журналах из перечня ВАК и одном патенте.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приведен обзор литературы по основным методам изготовления нанонитей, описаны преимущества и недостатки. Обоснован вывод о перспективности использования выбранного метода изготовления нанонитей. 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 нанонити в классическую PHEMT структуру AlGaAs/InGaAs с модулированным легированием, а также высокая технологичность благодаря отсутствию дополнительных технических процессов, связанных с подготовкой подложки.

В разделе 1.4 сформулированы основные выводы, исходя из современного состояния методов формирования одномерных систем.

Во второй главе представлено описание экспериментального оборудования и методов исследования образцов, использованных в работе. Представлена схема установки МЛЭ RIBER 32P, использовавшейся для изготовления гомоэпитаксиальных и PHEMT AlGaAs/InGaAs наноструктур со встроенными нанонитями из атомов олова и описание физики процессов при эпитаксии. Далее в

разделе описываются методики получения дифракционных картин ДБЭО, измерения эффекта Холла и спектров фотолюминесценции.

Третья глава посвящена исследованию возможности создания потенциального рельефа при дельта-легировании атомами олова слоев GaAs/AlGaAs. В разделе 1 главы 3 проанализированы физические процессы, протекающие при декорировании краев вицинальных террас атомами олова, и сформулированы ключевые этапы, необходимые для создания потенциального рельефа, подробное исследование которых проводится в разделах 3-5 главы 3. Рассмотрены подготовка и выглаживание кристалла GaAs перед высаживанием олова, сам процесс декорирования, а также заращивание с сохранением расположения атомов олова. Определенная совокупность параметров для реализации декорирования краев вицинальных террас отражена в таблице 3.2. В разделах 3.6-3.7 обобщаются результаты предыдущих разделов и приводятся результаты по получению образцов гомоэпитаксиальных и AlGaAs/InGaAs PHEMT структур соответственно.

Особо следует подчеркнуть новый результат, полученный Ячменевым А.Э. в разделе 3.7, где на основе предлагаемых в 3.3-3.5 условий для декорирования краев вицинальных террас и выбранной конструкции впервые изготовлены образцы PHEMT структур с профилем дельта-легирования в виде нанонитей из атомов олова.

Четвертая глава посвящена исследованию электрофизических и оптических параметров образцов как гомо-, так и гетероструктур, содержащих нанонити из атомов олова. Автором приведены экспериментальные результаты электрофизических измерений, СВЧ измерений полевого транзистора на основе PHEMT структуры и результаты теоретического расчета зонной структуры гомоэпитаксиальных образцов. Установлено, что коэффициент анизотропии тока насыщения вследствие декорирования краев вицинальных террас атомами олова составляет $\sim 1,2$ для гомоэпитаксиальных и $\sim 2,5$ для PHEMT структур. Обнаружено, что по мере увеличения тянущего поля до значений > 10 кВ/см при протекании тока перпендикулярно нанонитям в гомоэпитаксиальных структурах возникают осцилляции тока вследствие перегревно-рекомбинационной неустойчивости, приводящей к формированию домена сильного поля.

Отметим, что для увеличения коэффициента анизотропии, необходимого для создания болометра на горячих электронах на основе гомоэпитаксиальных структур

автором проведен расчет зонной структуры с приложением затворного потенциала, который показал принципиальную возможность увеличения высоты потенциального барьера, которая, к примеру, составляет 50 мэВ при $U_g = -0,5$ В. Кроме того, для сравнительного анализа им были рассчитаны зонные профили для различной концентрации атомов олова (рис. 4.11), показавшие оптимальную глубину квантовой ямы при концентрации атомов олова $n_{Sn} = 8 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, используемой в работе.

Научная новизна

В работе получен ряд научных результатов, к которым следует отнести:

1. Впервые определенную совокупность оптимальных параметров МЛЭ роста, позволяющую расположить атомы олова преимущественно вдоль краев террас с сохранением расположения во время эпитаксии как для гомо-, так и гетероструктур.
2. Впервые изготовленную PHEMT наноструктуру AlGaAs/InGaAs на вицинальной подложке GaAs с профилем дельта-легирования в виде нанонитей из атомов олова и исследованные электрофизические и оптические свойства.
3. Впервые обнаруженную анизотропию тока насыщения при протекании тока вдоль и поперек нанонити из атомов олова для PHEMT наноструктуры AlGaAs/InGaAs.
4. Впервые изготовленный полевой транзистор на основе PHEMT наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs с профилем дельта-легирования в виде нанонитей из атомов олова и его СВЧ характеристики.
5. Впервые проведенные исследования колебаний тока в реальном масштабе времени в зависимости от тянущего напряжения и светового воздействия при протекании тока перпендикулярно нанонити из атомов олова в гомоэпитаксиальных структурах.
6. Впервые проведенный расчет зонной структуры гомоэпитаксиальных образцов с нанонити из атомов олова и сделанную оценку применимости таких структур для изготовления болометра на горячих электронах.

Результаты моделирования, электрофизических и оптических исследований, представленные в обсуждаемой работе Ячменева А.Э., представляют законченную работу в области изготовления и исследования электронного транспорта в эпитаксиальных структурах, содержащих нанонити из атомов олова. Надежность и

достоверность результатов обусловлена комплексностью проведенных исследований с использованием современного оборудования и методик. Результаты многократно обсуждались на отечественных и международных конференциях, полно отражены публикациями автора в ведущих научных изданиях. Результаты работы внедрены в ИСВЧПЭ РАН в лабораторные технологии изготовления экспериментальных образцов эпитаксиальных наноструктур двух типов, содержащих нанонити из атомов олова.

Выводы и рекомендации, представленные в диссертации Ячmeneва А.Э. использованы при выполнении НИР по заказу Минобрнауки России в рамках государственного контракта № 16.513.11.3045 от «12» апреля 2011 г. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в ОАО «НИИМЭ и Микрон», группе компаний «Ангстрем», ООО «НПП «Пульсар»», а также в высших учебных заведениях в качестве информационных и демонстрационных материалов для учебных курсов по направлению подготовки «Электроника и нанoeлектроника » и смежным с ним.

Диссертационной работе свойственны и недостатки

1. Из текста работы не совсем ясно утверждение, что протекание тока в структурах осуществляется именно по нанонитям из атомов олова, а не по объему полупроводника;
2. Было бы полезно определить реальную геометрию нанонитей в структуре, например, с помощью измерений СТЭМ;
3. В Главе 3 в конструкции AlGaAs/InGaAs PHEMT структур (рис. 3.10) не поясняется назначение слоя GaAs после InGaAs, хотя такая конструкция не является типичной;
4. В Главе 2 диссертационной работы приведены рисунки 2.1, 2.3, однако не указаны ссылки на цитируемую литературу, из которой они были заимствованы.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа Ячmeneва А.Э. является законченной научной работой, расширяет подходы к конструированию новых эпитаксиальных структур и изучению электронного транспорта в структурах, содержащих нанонити из атомов олова. Результаты работы имеют научно-практическое значение. Считаем, что работа выполнена на высоком научно-

техническом уровне, отвечает современным требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям. Автореферат достаточно полно и ясно отражает содержание диссертации. Выводы и положения, вынесенные на защиту, полностью соответствуют поставленной задаче диссертационной работы, обоснованно следуют из результатов проведенной автором работы.

Диссертация Ячменева А.Э. «Физико-технологические основы формирования систем проводящих нанонитей из атомов олова» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой и полностью соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения степеней», постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., а ее автор Ячменев Александр Эдуардович заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Диссертационная работа и отзыв обсуждались на семинаре кафедры физики конденсированного состояния (ФКС) института электроники Московского технологического университета (МИРЭА) 09 февраля 2016 г., протокол №2. Отзыв подготовлен зав. лабораторией «Фемтосекундная оптика для нанотехнологий», д.ф.-м.н., профессором Мишиной Еленой Дмитриевной



Почтовый адрес: 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Телефон: (495) 434 7665.

Адрес электронной почты: mishina_elena57@mail.ru.

Зав. кафедрой ФКС,
академик РАН, д.ф.-м.н.

Ученый секретарь




Сигов А.А.

Юрасов А.Н.