

О Т З Ы В

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры физики низких температур физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова **Кульбачинского Владимира Анатольевича** на диссертационную работу Ячменева Александра Эдуардовича "ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПРОВОДЯЩИХ НАНОНИТЕЙ ИЗ АТОМОВ ОЛОВА", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертационная работа Ячменева А.Э. посвящена созданию на вицинальной подложке GaAs гомоэпитаксиальных структур путем дельта-легирования Sn, а также гетероэпитаксиальных псевдоморфных (PHEMT) структур AlGaAs/InGaAs, также дельта-легируемых Sn. Автор отработал технологию роста таких структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). В диссертационной работе автором проведено исследование возможности декорирования краев террас вицинальной поверхности арсенида галлия оловом. Для этой цели выполнено много технологических задач - калибровка молекулярного источника олова, подготовка вицинальной поверхности кристалла GaAs перед декорированием краев террас атомами олова, осаждение олова. Крайне важно заращивание высаженных атомов олова ввиду возможного всплывания осажденного слоя. В работе исследовались два типа структур: гомоэпитаксиальные структуры с дельта-слоем атомов олова, встроенного в кристалл GaAs и гетероэпитаксиальные структуры. Использование вицинальной поверхности и осаждение кремния, олова или другого элемента может привести к сегрегации элемента вдоль краев ступеней вицинальной поверхности и создания массива квазиодномерных каналов вдоль ступеней. Это один из возможных способов создания квазиодномерных проводников. Исходя из вышесказанного, тема диссертационной работы представляется весьма актуальной.

Идея использования осаждения олова на вицинальной поверхности арсенида галлия для получения квазиодномерных каналов была предложена в 1994 г. А.П. Сеничкиным, В.А. Кульбачинским и др. (Квазиодномерные электронные каналы и двумерный электронный газ в структурах с дельта-легированием оловом вицинальных граней GaAs // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т.59, вып.5, с.339-343). В то время в таких структурах были обнаружены: анизотропия проводимости и магнетосопротивления по ортогональным направлениям [110] и [-110], изучена долговременная фотопроводимость, связанная с возникновением DX-центров олова при декорировании вицинальных граней GaAs и ее гашение при воздействии импульсов сильного электрического поля, исследованы вольт-амперные характеристики в сильных электрических полях.

В диссертационной работе Ячменева А.Э. приводятся результаты получения, стабилизации и экспериментального исследования гетероэпитаксиальных структур, содержащих атомы олова на вицинальных поверхностях. Исследованы концентрация и подвижность двумерных электронов в гомо и гетероэпитаксиальных образцах структур с оловом, полученных путем измерения эффекта Холла при комнатной температуре. Измерены вольт-амперные характеристики гомо и гетероэпитаксиальных образцов структур при 300 и 77 К до напряженностей электрического поля порядка 11 кВ/см. В диссертационной работе представлен полевой транзистор на основе PHEMT наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs с профилем дельта-легирования оловом 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 ступенькам вицинальной поверхности в гомоэпитаксиальных

структурах. Сделана оценка применимости таких структур для изготовления болометра на горячих электронах.

Диссертация состоит из введения и четырех глав. Автор построил свою работу так, что каждая глава заканчивается соответствующими выводами. Кроме того, есть общие выводы по диссертации.

Во *Введении* обоснована актуальность тематики, сформулированы постановка задачи и основные цели работы, научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту. Остановимся последовательно на основных и наиболее значимых с точки зрения оппонента результатах диссертационной работы.

В *Главе 1* приводится обзор литографических методов формирования квазиодномерных структур. Рассмотрены методы формирования одномерных проводящих каналов на фасетированных и вицинальных поверхностях. Рассматривается эпитаксиальное выращивание вертикальных стержней.

В *Главе 2* представлено описание экспериментального оборудования и методов исследования образцов, использованных в диссертационной работе. Дана схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии, использовавшейся для изготовления гомоэпитаксиальных и РНЕМТ AlGaAs/InGaAs структур, дельта-легированных атомами олова. Дано описание физики процессов при эпитаксии. Описываются методики дифракции быстрых электронов, измерения эффекта Холла и получение спектров спектров фотолюминесценции. К сожалению, в этой главе я не нашел описания импульсной методики измерения вольт-амперных характеристик, хотя в четвертой главе приводятся соответствующие результаты. И в четвертой главе тоже нет ничего о методике, даже длительности импульсов, оценки возможного перегрева электронной системы и т.д.

В *Главе 3* и далее содержатся оригинальные результаты работы. Использование олова в качестве донорной легирующей примеси имеет особенности. Во-первых, отсутствие амфотерности и увеличенный предел растворимости позволяют получить существенно большие концентрации электронов. Во-вторых, повышенная сегрегационная активность в случае объемного легирования при определенных условиях приводит к градиенту концентрации по толщине пленки (обеднение оловом нижних слоев и обогащение верхних слоев). Таким образом, задавая нужный размер террас вицинальной подложки, что определяется углом разориентации, подбирая условия роста, дозируя количество осаждаемого вещества, можно сформировать на поверхности, в том числе и квазиодномерные структуры, представляющие собой цепочки атомов, занявших вакантные связи на краях ступеней. Например, как было опубликовано в ряде статей, на вицинальной поверхности GaAs можно вырастить нитевидные цепочки AlAs на краях ступеней и зарастить их слоем GaAs. Как было показано А.П. Сеничкиным, В.А. Кульбачинским и др. еще в 1994 г. атомы олова проявляют заметную сегрегационную активность во время легирования вицинальной поверхности и скапливаются на краях ступеней без образования зародышей на террасах. Далее автор рассказывает, как подложка готовится к высаживанию олова.

Следующий раздел посвящен обычной калибровке молекулярного источника олова. После этого параграф посвящен дифракции быстрых электронов и контролю поверхности этим методом. Были подобраны оптимальные режимы формирования террас. К сожалению автор не провел измерений поверхности подложек сканирующим или атомно-силовым микроскопом, чтобы убедиться в протяженности и регулярности ступенек вицинальной поверхности.

Следующий раздел посвящен высаживанию олова. К сожалению, здесь единственным методом контроля является дифракция быстрых электронов. Никаких прямых измерений и доказательств существования одномерных нитей олова не приводится. Есть много различных методов, которые можно было бы использовать: например, синхротронное излучение, рентген, электронный микроскоп, сканирующий

туннельный или атомно-силовой микроскоп. Так что существование нитей олова в принципе остается не доказанным.

Далее рассказывается о выращивании гомоэпитаксиальных структур и PHEMT AlGaAs/InGaAs структур. В работе определены технологические условия формирования гомоэпитаксиальных образцов, и AlGaAs/InGaAs PHEMT образцов с профилем дельта-легирования атомов Sn. Изготовлены экспериментальные образцы эпитаксиальных наноструктур обоих типов.

Глава 4 посвящена собственно измерениям электрофизических свойств и некоторым расчетам. Проведены измерения эффекта Холла, вольт-амперных характеристик при 300 К и 77 К. Исследована токовая нестабильность ВАХ. Все результаты обсуждаются на качественном уровне. В этой же главе измерена фотолюминесценция структур. Фотолюминесценция показала наличие двух уровней двумерного квантования. Никакого проявления наличия одномерных каналов не выявлено в структурах. Следующий раздел 4.5 назван "Расчет зонной структуры гомоэпитаксиальных образцов". В этом разделе, однако, автор лишь решил уравнение Пуассона в самых простых предположениях. Можно с сожалением констатировать, что зонная структура не рассчитывалась, уровни энергии и волновые функции электронов не определялись.

В следующем разделе описано изготовление полевых транзисторов на основе структур на вицинальных подложках, дельта легированных оловом и приведены характеристики полевых транзисторов. Это действительно достижение автора. На основе AlGaAs/InGaAs PHEMT структуры с дельта-легированием оловом изготовлен полевой транзистор с длиной затвора 150 нм и измерены его СВЧ параметры. Для затворов с ориентацией протекания тока параллельно краям вицинальных террас максимальная частота усиления по мощности составила 150 ГГц.

Диссертация заканчивается выводами.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Есть довольно странные фразы, например, на стр. 56 – "Измерения эффекта Холла проводятся разрушающим методом." Что это значит, я не понял.
2. Зачем при наличии литографии и возможности сделать холловские мостики измерения проводились в геометрии Ван дер Пау с поправочными коэффициентами? Метод недостаточно точный.
3. К сожалению, ни в главе 2 (методический) ни в главе 4, где приведены вольт-амперные характеристики в сильных электрических полях ничего не говорится о методике измерений. Какова была длина импульсов, какова скважность, был ли перегрев? Что за методика измерений применялась?
4. Автор не провел никаких структурных измерений и о наличии одномерных проводящих каналов судит только по косвенным данным. Не проведены измерения морфологии поверхности исходных вицинальных подложек, чтобы получить данные о длине ступенек, их однородности, распределении по размерам. Тоже самое надо было сделать после осаждения олова.

Несмотря на замечания диссертация Ячменева А.Э. представляет собой законченную научную работу. В диссертационной работе получены интересные результаты. Их достоверность обусловлена использованием апробированных экспериментальных методик, воспроизводимостью экспериментальных результатов и подтверждается перекрестным характером проведенных опытов.

Полученные результаты, помимо несомненного фундаментального интереса, полезны и для практических целей. Результаты работы важны для СВЧ техники. Кроме того полученные результаты рекомендуется использовать в академических институтах: ИФП им. П. Л. Капицы РАН, ИФТТ РАН, ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Новосибирский Государственный Университет, ИРЭ РАН, ИФП РАН, в лабораториях МГУ имени М.В. Ломоносова, СПбГУ, ННГУ, НИЦ

"Курчатовский институт". Результаты работы опубликованы в научных журналах из списка ВАК и докладывались Ячменевым А.Э. на конференциях. Положения, вынесенные на защиту полностью доказаны результатами работы. Выводы обоснованы. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа «"Физико-технологические основы формирования систем проводящих нанонитей из атомов олова"» удовлетворяет требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, А.Э. Ячменев, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро– и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Профессор кафедры физики низких температур физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния, профессор

Владимир Анатольевич Кульбачинский

Адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Криогенный корпус, а.1-04А, Раб. Тел. +7 (495) 939-1147; E-mail: kulb@mig.phys.msu.ru

Подпись профессора В.А. Кульбачинского удостоверяю
Декан физического факультета МГУ,
д.ф.-м.н., профессор



Николай Николаевич Сысоев