

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ФТИАН РАН

Директор ФТИАН РАН

В.Ф. Лукичев

11 ноября 2017 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБУН Физико-технологический институт Российской академии наук (ФТИАН РАН) на диссертационную работу Трунькина Игоря Николаевича «Определение атомной структуры гетеросистем на основе A^3B^5 комплексом методов электронной микроскопии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Актуальность избранной темы

Диссертационная работа Трунькина И.Н. посвящена решению задачи комплексного применения методов электронной микроскопии для исследования микроструктуры наногетеросистем на основе A^3B^5 , таких как InGaAs/InAlAs и низкотемпературный GaAs. В частности, в диссертации приведены результаты исследования влияния разориентации подложки GaAs и наличия нановставок InAs и GaAs на тип и концентрацию дислокаций, шероховатость границ между слоями, размеры областей перемешивания, а также на концентрацию двумерного электронного газа и подвижность электронов. Кроме того, приведены результаты исследования влияния ориентации подложки и параметров процессов осаждения, легирования и отжига слоя низкотемпературного GaAs на формирование дефектов и образование преципитатов As в этом слое.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью создания высококачественных многослойных метаморфных наногетеросистем на основе InGaAs/InAlAs, так как они являются весьма перспективными для создания СВЧ-транзисторов с рабочей частотой, превышающей 600 ГГц. Что касается низкотемпературного GaAs, то этот материал обладает уникальными свойствами, которые, в частности, обеспечивают его использование для создания антенн, работающих в терагерцовом диапазоне. Предложенный в диссертации подход, состоящий в комплексном применении методов электронной микроскопии для исследования микроструктуры наногетеросистем, позволяет с высокой точностью контролировать их качество.

Новизна исследования и полученных результатов

Новизна исследования определяется тем, что предложенный в диссертации комплексный метод электронной микроскопии применен для исследования актуальных наноструктур на основе материалов A^3B^5 . Большое внимание при этом было уделено исследованию влияния разориентации подложки на структурные и электрофизические параметры наноструктур, что не в полной мере исследовано в современной научной литературе. Можно также отметить установление автором диссертации кристаллической структуры дефектов упаковки внедрения с двумя частичными дислокациями Шокли типа Ic и Ib.

Значимость для науки и производства полученных результатов

Применение предложенного в диссертации подхода в научных и научно-практических исследованиях позволит обеспечить более высокую точность определения структурных параметров наногетеросистем на основе материалов A^3B^5 . Полученные в диссертации результаты могут помочь в поиске оптимальных условий выращивания перспективных наногетеросистем, обладающих более высоким качеством, в частности, большей подвижностью электронов.

Рекомендации по использованию полученных результатов

Результаты диссертации могут быть использованы как в организациях академической (например, Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН) и вузовской (например, Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ") науки, так и в организациях, выпускающих серийную СВЧ полупроводниковую продукцию (например, научно-производственное предприятие "Пульсар").

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений обусловлены проведенным автором диссертации теоретическим анализом процессов формирования изображения для используемых методов электронной микроскопии, использованием аттестованного оборудования известных производителей, воспроизведением ранее опубликованных в мировой научной литературе результатов. Кроме того, результаты, полученные автором диссертации, докладывались и обсуждались на нескольких международных и российских научных мероприятиях в 2013-2017 гг.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом, замечания по оформлению

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения и содержит 157 страниц. Список цитируемой литературы содержит 126 наименований. **Во введении** представлено общее описание перспективности исследуемых наногетеросистем и материалов, сформулированы цели работы, сделаны утверждения относительно новизны работы и практической ценности ее результатов, приведены положения, выносимые на защиту, указан личный вклад соискателя и, наконец, перечислены публикации в научных журналах и материалах научных мероприятий, в которых участвовал диссертант.

В первой главе представлен небольшой обзор научных работ в области применения наногетеросистем на основе InGaAs/InAlAs и низкотемпературного GaAs для изготовления приборов микро- и нанoeлектроники. Кратко описаны тетрагональные искажения эпитаксиальных слоев материалов A^3B^5 , а также основные особенности метода молекулярно-лучевой эпитаксии, который используется для формирования наногетеросистем. Далее описаны методы исследования кристаллической структуры наногетеросистем на основе материалов A^3B^5 , причем основное внимание уделено различным методам электронной микроскопии (растровая, просвечивающая, высокоугловая темнопольная и др.) в части описания принципов формирования электронного сигнала изображения. Описан принцип темнопольной высокоугловой электронной микроскопии, а также метод коррекции сферической аберрации с помощью гексапольных магнитных линз. Автор диссертации подробно останавливается на математической модели, используемой для построения карт распределения деформаций кристаллической решетки. Для темнопольного слаболучевого метода подробно описана процедура формирования контраста. Далее автор останавливается на особенностях исследования структурных дефектов кристаллической структуры методами электронной микроскопии. Подробно рассмотрены современные методики подготовки образцов к исследованию, в частности, процесс утонения. Заключительный раздел первой главы посвящен обзору методов измерения электрофизических характеристик полупроводниковых структур и зависимости электрофизических характеристик наногетеросистем от их структурных особенностей.

Во второй главе представлено описание технологии создания многослойных гетероструктур на основе материалов A^3B^5 и подробно представлены схемы исследованных многослойных гетероструктур и приведены особенности процесса их осаждения. Основой четырех групп образцов являлась гетероструктура InGaAs/InAlAs, тогда как пятая группа образцов содержала низкотемпературный GaAs, осажденный на

тонкий слой высокотемпературного GaAs, нанесенного, в свою очередь, на подложку из полуизолирующего GaAs. Ряд образцов в первых четырех группах содержал нановставки GaAs и InAs. В качестве подложек использовались материалы GaAs и InP. Некоторые из образцов пятой группы содержали δ -слои кремния. Далее в третьей главе описана методика, применявшаяся для приготовления образцов, представлены характеристики электронного микроскопа TITAN 80-300 (FEI, USA) и программы обработки изображений Digital Micrograph (Gatan, USA) и TEM Image Analysis (FEI, USA). В конце главы описана использовавшаяся в работе методика измерения концентрации и подвижности электронов и приведены результаты измерений для образцов из первых четырех групп.

В третьей главе представлены результаты исследования гетеросистем, созданных на базе InGaAs/InAlAs. Разнообразие и сложность исследованных структур не позволяет изложить здесь все полученные результаты, поэтому отметим лишь некоторые из них. Гетеросистемы $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.64}\text{Al}_{0.36}\text{As}$ с метаморфным буфером, выращенные на разориентированной на 2° подложке GaAs (100), имеют несколько худшее качество гетерограниц, хотя и заметно более высокое значение плотности электронов в двумерном электронном газе. Автор предлагает объяснение этому эффекту, основанное на эффекте увеличения степени активации атомов кремния при выращивании структуры на слегка разориентированной подложке. Кроме того, автор подробно исследовал влияние качества структуры нановставок GaAs и InAs и смежных с ними гетерограниц на подвижность и концентрацию электронов в гетеросистеме. Было показано, что в исследуемом диапазоне технологических параметров осаждения критически важным является качество гетерограниц (в частности, размер области перемешивания и латеральная однородность состава). Для нановставок InAs автором было показано, что существенного улучшения структурного качества и увеличения подвижности электронов можно достичь, подбирая оптимальное значение соотношения потоков $\gamma = P_{\text{As}}/P_{\text{In}}$ во время осаждения. Наконец, отметим факт обнаружения автором дефекта упаковки типа внедрения с двумя частичными дислокациями Шокли в гетеросистеме InAlAs/InGaAs/InAs и определение его кристаллической структуры.

В четвертой главе представлены результаты исследования слоев низкотемпературного GaAs, выращенных на подложках GaAs (100) и GaAs (111)A, покрытых тонким (0.2 мкм) слоем высокотемпературного GaAs. Основным объектом исследования были преципитаты мышьяка, которые образуются после отжига указанной структуры при температуре порядка 600 °C, а также состояние кристалличности слоя и наличия дефектов. При этом исследовалось влияние ориентации подложки, наличия трех эквидистантных δ -слоев кремния и соотношения потоков $\gamma = P_{\text{As}}/P_{\text{Ga}}$ во время осаждения

низкотемпературного GaAs. Было обнаружено, что с точки зрения качества структуры предпочтительнее использовать подложки GaAs (100). Наличие δ -слоев кремния приводит к концентрации преципитатов в плоскостях, в которых эти слои расположены. Что касается влияния величины γ , то ее оптимальное значение с точки зрения качества структуры лежит в диапазоне 16-20. Экспериментальный факт отсутствия преципитатов мышьяка в области поликристалличности слоя низкотемпературного GaAs автор объясняет тем, что границы зерен и экспериментально наблюдаемый поры служат стоками для атомов мышьяка при их диффузии во время отжига.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Диссертация не лишена некоторых недостатков, которые вызваны, скорее, большим количеством исследованных структур и необходимостью изложить результаты исследований в компактном виде. Численные результаты представлены в виде таблиц, что при большом количестве геометрических и технологических параметров не позволяет получить представление о поведении той или иной целевой величины (например, степени размытости или шероховатости гетероперехода) при изменении в некотором диапазоне, например, величины γ . Отметим также, что в тексте диссертации практически не описана процедура получения параметров латеральной шероховатости гетерограниц. При этом приведены только периоды шероховатости, но не указаны такие важные параметры шероховатости как R_a , R_z и R_{max} . Наконец, результаты исследования образования преципитатов мышьяка в различных условиях смотрелись бы более полно, если бы автор привел не только средний размер преципитатов и их концентрацию в тех или иных областях исследуемых структур, но еще и функции распределения по размерам в этих областях. Текст диссертации также содержит некоторое количество опечаток и неточностей. Указанные недостатки не снижают ценности полученных результатов и общего уровня диссертации.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации, а также цель работы, ее новизну и практическую ценность, положения, выносимые на защиту.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

По результатам работы автор диссертации (в соавторстве с коллегами) опубликовал вполне достаточное количество статей (а именно, семь) в

высокорейтинговых научных журналах, как отечественных ("Кристаллография", "Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования"), так и зарубежных ("Journal of Crystal Growth", "Journal of Materials Research").

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней»

Таким образом, диссертация Трунькина Игоря Николаевича «Определение атомной структуры гетеросистем на основе A^3B^5 комплексом методов электронной микроскопии», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является научно-квалификационной работой и соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Трунькин Игорь Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Доклад диссертанта был заслушан и одобрен на научном семинаре «Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники» в ФТИАН РАН 31 октября 2017 года. Отзыв на диссертацию был рассмотрен и одобрен на заседании Лаборатории физики поверхности микроэлектронных структур ФТИАН РАН 16 ноября 2017 года.

Адрес ФТИАН РАН: 117218, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, корп. 1,
тел. (499) 129-00-46; E-mail: lukichev@ftian.ru

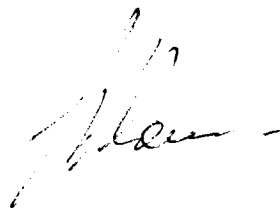
Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник
лаб. Ионно-лучевых технологий ФТИАН РАН,
к.ф.-м.н.



В.П. Кудря

Ученый секретарь ФТИАН РАН,
к.т.н.



В.А. Кальнов