

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Иванова Сергея Викторовича

на диссертацию Соболева Максима Сергеевича

«Гетероэпитаксия упругонапряженных, упругокомпенсированных и метаморфных слоев твердых растворов A^3B^5 и A^3B^5-N на поверхности GaAs, GaP и Si», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 - «Приборы и методы экспериментальной физики»

В настоящее время основным полупроводниковым материалом A^3B^5 для производства приборов СВЧ-электроники является арсенид галлия. На фоне этой доминирующей сегодня технологии развиваются направления, которые, возможно, будут играть важнейшую роль в СВЧ-электронике будущего. Прежде всего, речь идет об электронике на фосфиде индия и твердых растворах AlGaInAs, изорешеточных к нему, обладающей улучшенным быстродействием и меньшей потребляемой мощностью. Однако подложки InP, по сравнению с GaAs, обладают существенными недостатками: меньший размер коммерчески доступных пластин, высокая хрупкость и более высокая стоимость. В связи с этим актуальной задачей является разработка альтернативного гетероструктур на фосфиде индия подхода - создание так называемых метаморфных гетероструктур AlGaInAs на подложках GaAs, приборные характеристики которых не уступали бы характеристикам гетероструктур на InP.

Решеточно-согласованные трехпереходные солнечные элементы (СЭ) GaInP/GaInAs/Ge с высоким кристаллическим качеством являются в настоящее время основой для промышленного производства СЭ высокоэффективной концентраторной солнечной энергетики. Эффективность GaInP/GaAs/Ge трехпереходных солнечных батарей превышает 40 %, что близко к теоретическому пределу. Теоретические оценки показали, что повысить КПД многопереходных солнечных элементов, согласованных по периоду решетки на подложках Ge до 52%, можно при добавлении еще одного перехода с шириной запрещенной зоны около 1 эВ. Наиболее привлекательным решеточно-согласованным с GaAs и имеющим необходимую ширину запрещенной зоны, является четверной раствор так называемых разбавленных нитридов - GaInNAs.

Интерес к твердым растворам GaPN(As) обусловлен тем, что они могут быть псевдоморфно или решеточно-согласованно выращены с высоким структурным качеством на подложке кремния. Кроме того, замещение даже небольшого количества фосфора в GaP азотом (~0.5%) и добавление мышьяка для управления постоянной решетки, приводит к формированию прямой структуры зон и открывает возможность создания на основе твердых раство-

ров GaPN(As) новых приборов оптоэлектроники, способных к интеграции с кремниевой электроникой, а именно, создание монолитных оптоэлектронных интегральных схем и эффективных солнечных элементов.

В связи с вышесказанным, тема диссертационной работы Соболева М.С., посвященная исследованию физических аспектов гетероэпитаксии твердых растворов A^3B^5 и A^3B^5-N на поверхности GaAs, GaP и Si методом молекулярно-пучковой эпитаксии и разработке приборов микро- и оптоэлектроники с улучшенными характеристиками (транзисторы с высокой подвижностью электронов, высокоэффективные преобразователи солнечного излучения, светоизлучающие гибридные гетероструктуры на основе кремния и твердых растворов A^3B^5), представляется весьма своевременной и **актуальной**.

Научная новизна представленной работы заключается в том, что

- автором впервые предложена, обоснована и применена новая конструкция наногетероструктуры оригинального метаморфного буферного слоя AlGaInAs, позволяющая получить кристаллически совершенную область гетероструктуры транзистора с высокой подвижностью электронов и подавить процесс развития микрорельефа поверхности во время эпитаксии;

- разработаны и созданы методом «цифровой» эпитаксии прототипы гетероструктур транзисторов AlGaInAs с высокой подвижностью электронов для миллиметрового диапазона на подложках GaAs, демонстрирующих высокие значения концентрации (более $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и подвижности (более $8800 \text{ см}^2/\text{Вс}$) носителей заряда в проводящем канале;

- обоснован спектральный отклик гетероструктур твердых растворов InGaAsN и GaPAsN с p-n переходом, зафиксированный при комнатной температуре, свидетельствующий о реализации механизма многозонного поглощения оптического излучения в таких материалах;

- показана принципиальная возможность создания фотоэлектрического преобразователя с внешней квантовой эффективностью более 75% на основе периодических гетероструктур InAs/GaAsN, с пространственным разделением слоев, содержащих In и N, с шириной запрещенной зоны 1эВ и постоянной кристаллической решетки 5.653 \AA ;

- созданы и продемонстрированы светоизлучающие диоды на основе упруго-напряженной гетероструктуры GaPN(As) с длиной волны излучения 647-654 нм и трехпереходные солнечные элементы на основе упруго-напряженной гетероструктуры GaPNAs со спектральной чувствительностью в диапазоне 350-1200 нм и повышенным напряжением холостого хода 2.2 В, синтезированные на подложке кремния.

Представленные к защите материалы в полной мере апробированы, доложены на семинарах и конференциях, опубликованы в периодических науч-

но-технических изданиях из перечня ВАК. Диссертационная работа содержит введение, 4 главы, заключение и список цитируемой литературы из 72 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, указаны ее научная новизна и практическая значимость, приведены положения, вынесенные на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы по фундаментальным физическим свойствам метаморфных, упруго-напряженных и упругокомпенсированных полупроводниковых соединений A^3B^5 и A^3B^5-N с малой молярной долей азота. Обсуждаются основные проблемы эпитаксиального роста гетероструктур A^3B^5 и A^3B^5-N на основе GaP на кремнии. Рассматривается метод, так называемого, цифрового (“digital alloying”) формирования квантово-размерных гетероструктур.

Во второй главе приведено описание экспериментальных методов, использованных в диссертационной работе. Представлена принципиальная схема реактора и внешний вид установок молекулярно-пучковой эпитаксии компании VEECO GenIII (США) и RIBER MBE 49 (Франция), а также рассмотрено влияние основных параметров процесса МПЭ роста соединений A^3B^5-N с участием плазменного активатора азота на их элементный состав.

В третьей главе рассматриваются структурные и оптические свойства механически напряженных слоев A^3B^5 и A^3B^5N на поверхности GaAs, GaP. Продемонстрированы запатентованная диссертантом наногетероструктура метаморфного буферного слоя специальной оригинальной конструкции и транзисторы на ее основе с высокой подвижностью электронов для миллиметрового диапазона на подложке GaAs; исследованы упруго-компенсированные наногетероструктуры InAs/GaAsN, изорешеточные к GaAs и обладающие высокой внешней квантовой эффективностью фотопреобразования; представлены исследования свойств твердых растворов GaPN, GaPAsN на поверхности GaP.

В четвертой главе обсуждаются структурные и оптические свойства упругонапряженных слоев A^3B^5 и A^3B^5-N на поверхности Si. Представлены результаты исследований светоизлучающих диодов и многопереходных солнечных элементов на основе твердых растворов GaPN(As), выращенные на подложках кремния.

Диссертация соответствует тематике указанной специальности. Автореферат полностью передает ее содержание, которое также адекватно раскрывается приведенными диссертантом публикациями, полностью отражающими его личный вклад. Достоверность полученных автором результатов не вызывает сомнений, методы разработки технологий, теоретических расчетов и экс-

периментальных исследований, примененные им, достаточно хорошо обоснованы и оправданы.

В качестве недостатков работы следует отметить следующее:

- 1) В работе рассмотрена и используется только одна модель описания формирования электронной зонной структуры в полупроводниковых твердых растворах A^3B^5N - модель межзонного взаимодействия (Band Anticrossing Model). В обзоре не указываются другие модели, например, модель линейной комбинации азотных состояний с состояниями основной полупроводниковой решетки (LCINS) и не приводится их сравнение для описания данного класса твердых растворов.
- 2) В разделе 3.2 анализируется возможность использования субмонослойных гетероструктур InGaAsN/GaAs в качестве инфракрасного каскада СЭ и продемонстрированы многообещающие результаты по внешней квантовой эффективности. Но поскольку процесс выращивания таких цифровых твердых растворов большой толщины представляет определенные технологические трудности (что отражается, например, в снижении квантовой эффективности при увеличении толщины), интересно, проводилось ли сравнение характеристик СЭ на основе цифровых твердых растворов и твердых растворов InGaAsN, полученных методом обычного объемного МПЭ роста.
- 3) Из диссертации непонятно как соотносятся интегральные интенсивности электролюминесценции СД с КЯ GaPN/GaPAsN, выращенные на подложках GaP и Si при комнатной температуре?
- 4) В автореферате рис. 76 не отражает полностью спектральную характеристику внешней квантовой эффективности трехпереходного СЭ GaPAsN/Si, представленную в диссертации на рис. 4.11а, а вместо «внешней квантовой эффективности» в обоих случаях ошибочно написано «внутреннего квантового выхода».
- 5) Текст диссертации и автореферата содержит большое количество жаргонных выражений, неточностей и смысловых опечаток «по параметру постоянной решетки», «композиционный состав», «увеличение спектра квантовой эффективности», «многoperеходные солнечные элементы с шириной запрещенной зоны 1эВ» и др., а также огромное количество орфографических опечаток.

Отмеченные недостатки, не умаляют общей высокой оценки диссертационной работы М.С. Соболева, которая представляет собой обширное и многоплановое исследование эпитаксиальных гетероструктур новых материалов A^3B^5 и оптоэлектронных приборов на их основе, безусловно имеющее существенный потенциал для развития. По объему, научному уровню и ценности

полученных результатов диссертационная работа соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№842, от 24 сентября 2013 г.), а ее автор М.С. Соболев несомненно достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 - «Приборы и методы экспериментальной физики».

Заведующий лабораторией
квантоворазмерных гетероструктур,
доктор физ.-мат. наук, профессор
ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26
тел. +7 (812) 292-7124, ivan@beam.ioffe.ru

 С. В. Иванов

Подпись С.В. Иванова заверяю
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе
доктор физ.-мат. наук.



 А. П. Шергин

04.12.2015 г.