

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Самарцева Ильи Владимировича «Излучающие и фоточувствительные гетероструктуры на длины волн более 1 мкм, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs и Si», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников

Актуальность темы

Разнообразие многокомпонентных полупроводниковых твердых растворов, на основе которых с помощью методов эпитаксии можно формировать излучающие или фотоприемные квантоворазмерные гетероструктуры позволяет перекрывать ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный (ИК) диапазон длин волн. Однако сдерживающим фактором использования значительного количества комбинаций молярной доли компонентов в твердых растворах является значительно меньшее количество доступных монокристаллических подложек. Актуальным для развития телекоммуникаций является разработка новой элементной базы – излучателей и фотоприемников ИК диапазона. Тема диссертации связана с поиском новых и совершенствованием существующих способов создания на широко распространенных подложках GaAs и Si полупроводниковых лазерных излучателей и фотодиодов, способных работать в области длин волн более 1 мкм, поэтому является актуальной.

Цель и задачи диссертационной работы

Диссертационная работа Самарцева Ильи Владимировича ставит своей целью изучение взаимосвязи механизмов роста методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs и Si слоев A^3B^5 с сильным рассогласованием параметров кристаллической решетки (метаморфного роста) и функциональных характеристик фоточувствительных и лазерных структур на основе таких слоев. В работе автор определяет следующие задачи: исследование закономерностей эпитаксиального выращивания материалов рассогласованных по параметру решетки с подложкой для излучающих и фоточувствительных структур с применением метаморфных буферных слоев на подложках GaAs и Si, создание

экспериментальных образцов свето- и фотодиодов на основе структур с метаморфными слоями, исследование и анализ их характеристик.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность результатов в экспериментальной части работы обеспечена использованием взаимодополняющих методов анализа, воспроизводимостью характеристик исследуемых объектов, многократной экспериментальной проверкой результатов измерений, использованием метрологически аттестованного измерительного оборудования, непротиворечивостью полученных результатов общепринятым положениям теории эпитаксиального роста полупроводниковых структур и физики полупроводников, использованием известных методов исследования. Комплексный подход к изучению полученных структур и приборов на их основе обеспечивает надежность проведенных исследований.

Положения, выносимые на защиту, результаты и выводы по работе сформулированы достаточно ясно и вполне обоснованны. Полученные автором научные результаты обладают оригинальностью и новизной.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения и свидетельствуют о личном вкладе автора диссертации в науку.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

1. Впервые методом МОС-гидридной эпитаксии сформированы фоточувствительные $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ гетероструктуры с дискретным метаморфным буферным слоем на подложке GaAs приборного качества, т.е. с плотностью прорастающих дислокаций ниже 10^6 см^{-2} .

2. Впервые методом МОС-гидридной эпитаксии сформированы фотодиоды с фоточувствительной областью $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ на подложке GaAs с диаметром мезаструктуры 560 мкм и темновым током при комнатной температуре и обратном смещении -5 В равным $2 \times 10^{-7} \text{ А}$.

3. Впервые методом МОС-гидридной эпитаксии на неотклоненной подложке Si (001) с релаксированным Ge буферным слоем получена фоточувствительная структура с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$.

4. Впервые методом МОС-гидридной эпитаксии была создана лазерная структура с метаморфным буферным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и КЯ $\text{In}_{0,58}\text{Ga}_{0,42}\text{As}$ на неотклоненной подложке Si (001) и продемонстрированы фотолюминесценция и стимулированное излучение на длинах волн 1,45 мкм и 1,3 мкм соответственно.

Значимость результатов для науки, производства и практики

Диссертация Самарцева И.В. посвящена получению и комплексному изучению новых перспективных полупроводниковых материалов для создания элементной базы оптоэлектроники и радиофотоники. В работе развиты представления о реализации приборных структур с метаморфными буферными слоями и найдены пути получения слоев с относительно невысокой плотностью прорастающих дислокаций. Изучены механизмы влияния параметров роста метаморфных буферных слоев на структурные и функциональные свойства выращиваемых структур.

Практическая значимость результатов состоит в следующем.

1. Разработана лабораторная технология формирования методом МОС-гидридной эпитаксии слоев $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ приборного качества на подложке GaAs с долей Sb около 10% и 20 % с использованием метаморфных буферных слоев.

2. Разработана лабораторная технология выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии буферных слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ со ступенчатым изменением состава. Изготовлены фотодиоды с диаметром фоточувствительной площадки 560 мкм. Темновой ток фотодиодов при комнатной температуре составил 6 нА (-5 В). Данное значение темнового тока близко к значению темнового тока фотодиодов, выращенных на согласованных подложках, но получено на структурах, сформированных с использованием более дешевого технологического процесса.

3. Методом МОС-гидридной эпитаксии получена лазерная структура с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и квантовыми ямами $\text{In}_{0,58}\text{Ga}_{0,42}\text{As}$ на

неотклоненной подложке Si (001) с релаксированным Ge буферным слоем, излучающая при оптической накачке на длине волны 1,3 мкм.

4. Методом МОС-гидридной эпитаксии получена фоточувствительная структура на длины волн до 1,8 мкм с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ на неотклоненной подложке Si (001) с релаксированным буферным слоем Ge.

5. Разработана лабораторная технология эпитаксиального выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ фотодиодных структур на основе дискретного метаморфного буферного слоя $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$ на подложке GaAs, отличающаяся низкой плотностью темнового тока ($8 \times 10^{-5} \text{ А/см}^2$ при комнатной температуре и обратном смещении -5 В).

6. Разработана лабораторная технология формирования «виртуальных» подложек InP/GaAs. С использованием полученных подложек изготовлены СВЧ-диоды, диодные микросборки и тройной балансный смеситель с диапазоном частот входного сигнала и гетеродина 2-40 ГГц, диапазон промежуточных частот 0,5-20 ГГц. Применение InP/GaAs-диодов позволило в 20 раз снизить мощность сигнала гетеродина без увеличения потерь преобразования во всем диапазоне частот смесителя.

Оценка содержания

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, списка публикаций автора по теме диссертации и двух приложений.

Во введении обоснованы актуальность и новизна представленных исследований, поставлена цель работы и определены задачи для ее достижения.

В первой главе проведен литературный обзор методов эпитаксиального выращивания монокристаллических тонких пленок на полупроводниковых пластинах GaAs и Si. Рассмотрены основные физические механизмы, лежащие в основе эпитаксиального роста. Описаны условия осуществления метаморфного эпитаксиального выращивания слоев полупроводниковых структур. Рассмотрены основные виды дефектов, возникающих при метаморфном росте слоев и их

влияние на функциональные характеристики выращиваемых приборных гетероструктур.

Во второй главе приведено описание основного метода, применяемого для получения полупроводниковых гетероструктур – МОС-гидридной эпитаксии. Рассмотрено два варианта метода: при атмосферном давлении водорода и пониженном давлении водорода соответственно. Также в рамках второй главы представлено описание всех исследованных в работе структур, которые можно разделить на две группы: структуры на подложке Si и структуры на подложке GaAs. Приведены условия роста, полученных структур, и выполнен анализ эффективности применения различных конструкций метаморфных слоев.

В третьей главе представлены результаты исследований излучающих и фоточувствительных структур на основе метаморфных буферных слоев, выращенных на подложке GaAs. Проведены исследования влияния скорости и температуры роста на структурные и функциональные свойства буферных слоев со ступенчатым изменением состава $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. Установлено, что выращивание метаморфных слоев $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ со ступенчатым изменением состава со скоростью роста 2 Å/s при температуре роста 540 °C позволяет повысить кристаллическое качество буферного слоя. На основе гетероструктур с такими буферными слоями изготовлены излучающие структуры с квантовой ямой и зафиксирована стабильная электролюминесценция на длине волны $1,31 \text{ мкм}$ при комнатной температуре.

Проведены исследования влияния конструкции метаморфного буферного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ со ступенчатым изменением состава на функциональные характеристики фоточувствительных структур. В качестве практического результата можно отметить получение фотодиодов с низким значением плотности прорастающих дислокаций и низким значением темнового тока сопоставимым по величине с темновым током фотодиодов, изготовленных на согласованных подложках InP. Проведены исследования по выращиванию методом МОС-гидридной эпитаксии фоточувствительных структур с сильным рассогласованием с помощью метаморфных буферных слоев $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$ с дискретным

изменением состава. Выбранные режимы синтеза обеспечивают работу фоточувствительного элемента, отличающуюся низкой плотностью темнового тока (8×10^{-5} А/см² при комнатной температуре и обратном смещении -5 В).

В четвертой главе проведены исследования и выявлены закономерности влияния состава зародышевого слоя «дислокационного фильтра» на оптическое и структурное качество слоев GaAs, выращенных на неотклоненной подложке Si. Продемонстрирована возможность получения фоточувствительных структур с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, сформированной методом МОС-гидридной эпитаксии на неотклоненной подложке Si. Впервые методом МОС-гидридной эпитаксии создана лазерная структура с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и квантовой ямой $\text{In}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}/\text{In}_{0,58}\text{Ga}_{0,42}\text{As}$ на неотклоненной подложке Si, продемонстрированы фотолуминесценция и стимулированное излучение на длинах волн 1,45 мкм и 1,3 мкм соответственно при температуре жидкого азота.

В заключении сформированы основные результаты работы.

В списке литературы представлены 149 источников заимствования материалов или отдельных результатов, на которые соискатель ученой степени ссылается в диссертации.

Также в диссертации есть два приложения, содержащих описание технологии изготовления и результатов исследования функциональных характеристик InP/GaAs метаморфных диодов (**Приложение А**) и краткое описание метода картирования фотолуминесценции (**Приложение Б**).

Соответствие автореферата основным идеям и выводам диссертации

Автореферат правильно отражает содержание диссертации и представляет краткое изложение всех основных результатов диссертационной работы. Расхождений между выводами в автореферате и диссертации нет.

Замечания по работе

1. Для структур серии Б, описание которых приводится на стр.61-62, с целью определения наличия механических напряжений в метаморфном слое и фоточувствительной области автором приводятся результаты исследования спектров комбинационного рассеяния света. Данные представлены только для

структур Б1, а для модифицированной серии структур Б2 такие измерения в работе не приводятся. Для сравнения характеристик полученных структур было бы хорошо сравнить спектры для структур Б1 и Б2.

2. В спектрах комбинационного рассеяния для структуры В2 изображенных на рисунке 3.32 на кривых 3 и 4 наблюдается «минимум» вблизи поверхности структуры. Автор не обсуждает чем обусловлена данная спектральная особенность.

3. В разделе 4.1 демонстрируется, что при составе зародышевого слоя $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ происходит подавление роста одного из антифазных доменов, что позволяет получить близкий к монокристаллическому буферный слой. При этом не предложен механизм роста, приводящий к данному результату.

4. На рисунке 4.2 для лучшего отображения информации автору следовало увеличить контрастность.

5. Механизмы токопереноса при обратных смещениях изучаемых барьерных структур можно было бы идентифицировать, зная параметры зонной диаграммы – величины разрывов разрешенных зон, особенности потенциального рельефа вблизи гетерограниц, на который влияют особенности технологии эпитаксиального роста, а также концентрацию, энергию активации дефектов с глубокими энергетическими уровнями.

Личный вклад автора не вызывает сомнений, заключается в постановке задач, разработке режимов выращивания исследуемых структур и проведении экспериментов. Автором внесен основной вклад в получение, анализ и обобщение полученных результатов.

Основные результаты диссертационной работы достаточно полно отражены в 9 статьях в рецензируемых изданиях, включенных в список ведущих научных журналов и изданий, утвержденный ВАК РФ, или входящих в международные базы данных. Результаты работы были широко представлены на престижных научных конференциях.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты, полученные в диссертации, способствуют развитию физических основ методов получения полупроводниковых материалов и структур пониженной размерности, пониманию физической природы оптических и фотоэлектрических явлений в полупроводниках и в композиционных полупроводниковых структурах.

Заключение

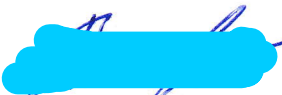
Замечания, указанные в отзыве, не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация представляет собой актуальное законченное научное исследование. Диссертация удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК Российской Федерации к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, в том числе критериям Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842), а автор диссертационной работы Самарцев Илья Владимирович заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Официальной оппонент:

доктор физико-математических наук (специальность
01.04.10 – Физика полупроводников),

доцент, заведующий кафедрой «Микро- и нанoeлектроника»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

 Литвинов Владимир Георгиевич
«22» мая 2025 г.

Адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

Раб. тел.: 

E-mail: 

Подпись Литвинова Владимира Георгиевича удостоверяю

Ученый секретарь ученого совета РГРТУ
кандидат физико-математических наук

Бухенский Кирилл Валентинович

