

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Сушкова Артема Александровича «Создание платформы на основе подложки класса «кремний-на-изоляторе» для эпитаксии слоев $A^{III}B^V$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. – «Физика полупроводников»

Актуальность темы. Диссертация Сушкова А. А. посвящена исследованию гетероэпитаксии полупроводниковых материалов на подложках класса «кремний-на-изоляторе» (КНИ) для создания светоизлучающих гетероструктур на базе соединений семейства $A^{III}B^V$. Светоизлучающие гетероструктуры $A^{III}B^V$, эпитаксиально выращенные на КНИ, востребованы для развития интегральных микросхем (ИМС). Создание источника излучения из таких гетероструктур непосредственно на подложке КНИ в интегральной микросхеме позволит приблизиться к решению вопроса формирования оптических межсоединений в ИМС. Организация оптических межсоединений в интегральной микросхеме, в свою очередь, позволит увеличить ее быстродействие и улучшить ее энергоэффективность. Однако, проблема осаждения эпитаксиальных слоев соединений семейства $A^{III}B^V$ на подложках КНИ сопряжена со значительными трудностями и на сегодняшний день в полной мере не решена. Так, дефекты мезоскопического масштаба, возникающие при осаждении $A^{III}B^V$ слоев, такие как антифазные границы, дислокации и трещины, существенно ограничивают эффективность светоизлучающих структур на их основе. То есть, развитие технологий формирования эпитаксиальных слоев $A^{III}B^V$ на подложках класса «кремний-на-изоляторе» с минимально допустимым уровнем дефектности в перспективе приведет к реализации важного функционала интегральных микросхем, росту их быстродействия и энергоэффективности. В связи с этим тема диссертации Сушкова А. А. безусловно является актуальной.

Краткая характеристика основного содержания диссертации.

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

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации и степень разработанности предмета исследования, формулируются цель и задачи работы, выделяются такие ее характеристики, как научная новизна, теоретическая и практическая значимость, кратко описываются методология подхода и методы исследований, представлены апробация работы, число и характер публикаций,

структура и объем диссертации, выделен личный вклад соискателя и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** Сушковым А. А. проведен детальный литературный обзор, направленный на изучение фундаментальных проблем, препятствующих гетероэпитаксии полупроводников $A^{III}B^V$ на поверхности кремния, дополнительных трудностей при гетероэпитаксии на подложках класса КНИ, путей решения данных вопросов. К фундаментальным проблемам относятся дефекты, которые образуются в слоях $A^{III}B^V$ в процессе и после роста: антифазные границы, дислокации и термические трещины. В диссертации также изучался вопрос взаимной диффузии атомов на гетерогранице полупроводников $A^{III}B^V$ и A^{IV} , который критичен для некоторых приложений. Дополнительные трудности при гетероэпитаксии на подложках класса КНИ связаны с наличием в них диэлектрической основы. Она затрудняет контроль температуры роста и может привести к изменению оптимальных температурных режимов роста относительно режимов роста на подложках Si. В ходе литературного обзора Сушковым А. А. установлено, что использование буферного слоя Ge между GaAs и Si является эффективным способом уменьшения плотности прорастающих дислокаций, а также минимизации общей толщины буферных слоев. Поэтому в диссертации решалась задача создания платформы Ge/Si/КНИ для дальнейшей гетероэпитаксии полупроводников $A^{III}B^V$. При этом исходя из проведенного литературного обзора Сушковым А. А. прописаны критерии к создаваемой в диссертации платформе Ge/Si/КНИ. На основе обзора литературы Сушковым А. А. сформулированы направления исследований для развития перспективных методов подавления дефектов в эпитаксиальных слоях $A^{III}B^V$, выращиваемых на платформе Ge/Si/КНИ.

Для реализации поставленных задач Сушковым А. А. подобраны подложки класса «кремний-на-изоляторе», методы роста полупроводников, методы измерений гетероструктур и технология изготовления светоизлучающих p-i-n диодов, которые описаны во **второй главе**.

В **третьей главе** Сушковым А. А. решалась задача создания платформы Ge/Si/КНИ, удовлетворяющей критериям, перечисленным в обзоре литературы. Среди подобранных подложек класса «кремний-на-изоляторе» по структурным свойствам с помощью электронно-микроскопических исследований Сушковым А. А. отобраны одноименные подложки «кремний-на-изоляторе», представляющие собой гетероструктуру Si/SiO₂/Si (001). Далее используя метод сканирующей просвечивающей электронной микроскопии им проведено сравнение образцов Ge/Si (001), созданных разными методами. В результате

Сушковым А. А. установлено, что метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с применением режима двухстадийного роста и термоциклического отжига в вакууме позволяет получить слой Ge с лучшими структурными свойствами. В завершении главы Сушковым А. А. продемонстрировано, что оптимизированные в ИФМ РАН температурные режимы роста слоя Ge методом МПЭ на подложке КНИ позволяют выращивать на платформе Ge/Si/КНИ гетероструктуру $A^{III}B^V$ с качеством соответствующему качеству гетероструктуры $A^{III}B^V$, выращенной на оптимизированной платформе Ge/Si. В выводах к третьей главе детально описаны структурные свойства и морфология поверхности созданной в диссертации платформы Ge/Si/КНИ.

В четвертой главе Сушковым А. А. проводились исследования методов подавления дефектов в эпитаксиальных слоях $A^{III}B^V$ по актуальным направлениям, которые установлены в обзоре литературы. В результате Сушковым А. А. с помощью комплекса методов измерений (просвечивающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, in-situ измерения отражательной способности, энергодисперсионная спектроскопия) установлены параметры роста слоев $A^{III}B^V$ методом МОС-гидридной эпитаксии на созданной платформе Ge/Si/КНИ (001), позволяющие подавить основную плотность антифазных дефектов, параметры in-situ отжига буферных слоев $A^{III}B^V$ для уменьшения плотности антифазных границ и для изменения последующего преобладающего режима роста $A^{III}B^V$ с 2D-островкового на наиболее благоприятный для зарастивания антифазных доменов ступенчатый режим роста; обоснован выбор дислокационных фильтров; и исследована эффективность системы зародышевых слоев $Al_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ в подавлении взаимной диффузии, прорастающих дислокаций и антифазных границ в системе слоев $A^{III}B^V/Ge$ на точно ориентированной подложке (001). На основе полученных результатов, Сушковым А. А. даются рекомендации для формирования буферных слоев $A^{III}B^V$ методом МОС-гидридной эпитаксии на созданной платформе Ge/Si/КНИ (001). В завершении четвертой главы благодаря использованию данных рекомендаций Сушковым А. А. удалось продемонстрировать фотолюминесценцию при комнатной температуре от светоизлучающей гетероструктуры $A^{III}B^V$, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии на созданной платформе Ge/Si/КНИ (001). Кроме этого созданный на основе данной гетероструктуры светоизлучающий p-i-n диод и контрольный светоизлучающий p-i-n диод на подложке GaAs демонстрируют электролюминесценцию при температуре 77 К одного порядка интенсивности.

В **Заключении** формулируются основные результаты работы.

В **приложениях** представлены описания некоторых методик измерений, методики препарирования поперечного среза сапфира, параметров и свойств образцов, более детальные описания результатов измерений отражательной способности во время роста $A^{III}B^V$, гетероструктур на подложке «кремний-на-сапфире», а также исследование возможностей метода атомно-силовой микроскопии.

Наиболее важными результатами работы является то, что:

1. Продемонстрирована возможность МОС-гидридной эпитаксии слоев $A^{III}B^V$ на созданной платформе Ge/Si/КНИ (001) со структурными и с оптическими свойствами, не уступающими слоям $A^{III}B^V$, сформированным на платформе Ge/Si (001).

2. Продемонстрирована фотолюминесценция при комнатной температуре гетероструктуры $A^{III}B^V$ на основе квантовых ям $In_{0,14}Ga_{0,86}As/GaAs$, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии на платформе Ge/Si/КНИ (001).

3. Установлены параметры роста эпитаксиальных слоев $A^{III}B^V$ методом МОС-гидридной эпитаксии на созданной платформе Ge/Si/КНИ (001) и их отжига, способствующие аннигиляции основной плотности антифазных границ и выравниванию поверхности.

4. Показана возможность использования системы буферных слоев $Al_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ в гетероструктуре $A^{III}B^V/Ge/Si/КНИ (001)$ для уменьшения плотности дефектов и подавления взаимной диффузии атомов на гетерогранице с Ge.

Представленные в работе результаты обладают несомненной **научной новизной, теоретической и практической значимостью**, что подтверждается публикациями соискателя в научных журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена применением прямого метода просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и ряда других современных методов измерений, которые подтверждали, дополняли результаты ПЭМ и не противоречили им. Кроме этого результаты диссертации докладывались и обсуждались на многочисленных всероссийских и международных конференциях и научных семинарах.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Результаты диссертации могут служить научным заделом для дальнейшего развития технологии интеграции полупроводников $A^{III}B^V$ с подложками КНИ (001)

методами эпитаксиального осаждения в направлении минимизации толщины буферных слоев и приближения к характеристикам гетероструктур, получаемых на подложках GaAs (001).

По диссертации имеются **замечания**.

1. В пределах всей диссертации аббревиатура КНИ используется параллельно как для обозначения целого класса подложек, так и частного случая подложек Si/SiO₂/Si. Хотя автор на стр.11 в сноске и предлагает исходить из контекста, чтобы уяснить, для обозначения чего из двух вариантов используется аббревиатура КНИ в том или ином случае, такое неоднозначное ее использование создает для читателя вполне ощутимый дискомфорт.

2. В разделе 1.1.2.4 автор указывает значение плотности прорастающих дислокаций, приемлемое для эффективной работы лазерных гетероструктур A^{III}B^V на основе квантовых точек, однако при дальнейшем изложении своих результатов, на мой взгляд, не пытается подтвердить или опровергнуть данную важную информацию.

3. В четвертой главе на изображениях поверхности исследуемых образцов, полученных методом атомно-силовой микроскопии, недостает четкого обозначения особенностей – антифазных границ и атомных ступеней. Это усложняет восприятие материала.

4. В заключении к диссертации приводятся рекомендации для дальнейшего развития темы исследования. В частности, предлагается исследование модификации поверхности созданной платформы Ge/Si/КНИ (001) с помощью отжига при высокой температуре в атмосфере водорода с целью создания благоприятных начальных условий для полного зарастивания антифазных доменов полупроводников A^{III}B^V. Однако в диссертации не объясняется, как отжиг платформы при высокой температуре в атмосфере водорода способен модифицировать поверхность и не приводятся аргументы целесообразности данных исследований.

5. В приложении Е на рисунке Е.1 (а) пронумерованы различные временные интервалы процесса роста, соответствующие определенным операциям. При этом каждому интервалу присвоены границы, за исключением области 5, у которой завершение не отмечено. Это усложняет восприятие материала.

Высказанные замечания не снижают научной ценности диссертации и не затрагивают основных положений, защищаемых соискателем.

Заключение


Диссертация Сушкова А. А. «Создание платформы на основе подложки класса «кремний-на-изоляторе» для эпитаксии слоев $A^{III}B^V$ », представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. Диссертация соответствует специальности и отвечает критериям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК при Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Результаты исследований в достаточной мере опубликованы в научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Сушков Артем Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

12.09.2023

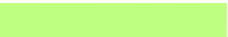
С обработкой персональных данных согласен.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Научно-исследовательская лаборатория «Гетероструктуры для посткремниевой электроники» Института физики, ведущий научный сотрудник, руководитель

 Юсупов Роман Валерьевич

Адрес: 420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Тел.: +7 

E-mail: 