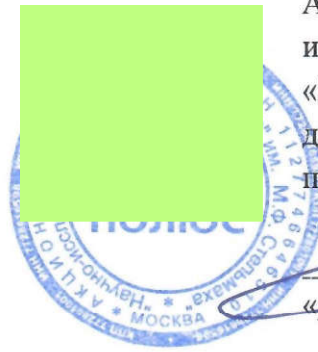


## УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
Акционерного общества «Научно-исследовательский институт  
«Полус» имени М.Ф. Стельмаха»,  
доктор технических наук,  
профессор



Е.В. Кузнецов

«21» 007 2023 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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 диссертации

Диссертация Сушкова Артема Александровича посвящена актуальной научной тематике в области физики полупроводников, заключающейся в создании кремниевых оптических межсоединений в интегральной микросхеме (ИМС) с целью увеличения быстродействия, уменьшения энергопотребления, усиления помехоустойчивости, минимизации потерь сигнала и количества выделяемого тепла. Одной из задач для формирования оптических межсоединений в интегральной микросхеме является создание эффективного источника излучения на единой подложке. Полупроводники  $A^{III}B^V$  благодаря своим превосходным оптическим свойствам являются перспективными кандидатами для решения данной задачи и создания из них надежных источников излучения – полупроводниковых лазеров. Наиболее промышленно-ориентированной интеграцией полупроводников  $A^{III}B^V$  с электронной ИМС является использование методов эпитаксиального осаждения. В качестве подложек для интегральных микросхем используются объемный кремний и подложки класса «кремний-на-изоляторе» (КНИ). Во время роста  $A^{III}B^V$  на поверхности кремния неизбежно образуется большая плотность дефектов, которые ухудшают качество полупроводникового лазера.

К настоящему времени достигнут серьезный прогресс в уменьшении плотности дефектов в слоях  $A^{III}B^V$ , выращенных на объемных подложках Si, благодаря которому созданы полупроводниковые лазеры с выдающимися характеристиками. Тем не менее интегральные микросхемы на подложках класса «кремний-на-изоляторе» имеют ряд преимуществ перед ИМС на объемном кремнии, которые обусловлены наличием диэлектрической основы. Вместе с тем наличие диэлектрической основы в КНИ усложняет эпитаксиальный рост на таких подложках. В этом случае затруднен контроль температуры на поверхности подложки, что может привести к изменению оптимальных температурных режимов роста относительно режимов роста на объемных подложках Si. Известно относительно мало работ по

гетероэпитаксии светоизлучающих гетероструктур  $A^{III}B^V$  на значимых для технологии кремниевой наноэлектроники подложках класса «кремний-на-изоляторе». При этом в них описывается достаточно сложная технология интеграции. Поэтому **актуальными** являются поиск и исследование альтернативных подходов улучшения кристаллического совершенства слоев  $A^{III}B^V$  при гетероэпитаксии на подложках класса «кремний-на-изоляторе».

### **Общая оценка диссертации**

Диссертация содержит все необходимые разделы, отражающие проведенные исследования, и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, благодарностей, списка публикаций по теме диссертации, списка цитируемой литературы и приложений.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цель и задачи работы.

**Первая глава** является обзорной. В ней более подробно раскрывается актуальность темы исследования и степень ее разработанности, описываются проблемы, препятствующие гетероэпитаксии полупроводников  $A^{III}B^V$  на подложках кремния и класса КНИ, возможные пути их преодоления, а также критерии, предъявляемые к создаваемой в диссертации платформе для эпитаксии гетероструктур  $A^{III}B^V$ . При проведении литературного обзора Сушковым А.А. показано, что в настоящее время одной из ключевых проблем, препятствующих развитию передовых технологий интеграции  $A^{III}B^V$  с кремнием эпитаксиальными методами, является прорастающие через активную область дислокации. Кроме этого, необходимость использования толстых буферных слоев также затрудняет приборное применение данных технологий. Недавние исследования, представленные в обзоре литературы, демонстрируют, что технология формирования платформы с буферным слоем Ge представляется актуальной как для уменьшения плотности прорастающих дислокаций, так и для уменьшения толщины буферных слоев.

Во **второй главе** перечислены используемые в работе подложки класса «кремний-на-изоляторе», методы роста на них гетероструктур  $A^{III}B^V/Ge/Si$ , технология изготовления светоизлучающих диодов и методы измерений.

В **третьей главе** описан процесс создания платформы Ge/Si/КНИ для эпитаксии гетероструктур  $A^{III}B^V$ . Проведено сравнение подложек класса КНИ: «кремний-на-сапфире», изготовленных по технологии газофазной эпитаксии, и «кремний-на-изоляторе», изготовленных по технологии Smart Cut. Для дальнейшей работы отобраны вторые, так как их структурные свойства значительно превосходят структурные свойства первых подложек. Также проведено сравнение методов роста слоя Ge: газофазное осаждение с разложением моногермана на «горячей проволоке» (HWCVD), молекулярно-пучковая эпитаксия с использованием двухстадийного режима роста и термоциклического отжига в вакууме (МПЭ). Показаны преимущества второго метода, так как метод МПЭ позволяет сформировать слой Ge с меньшей плотностью прорастающих дислокаций, чем метод HWCVD. В дополнении к основным результатам с помощью детальных электронно-микроскопических исследований было установлено, что формирование на гетерогранице Ge/Si (001) политипа 9R-Ge и двумерных дефектов, прорастающих на несколько десятков нанометров, может быть использовано в качестве способа уменьшения плотности прорастающих до поверхности слоя Ge дислокаций без воздействия высоких температур. Такой вывод сделан на основании того, что на гетерогранице Ge/Si, в которой плотность прорастающих дислокаций была меньше,

наблюдаются включения политипа 9R-Ge и двумерных дефектов, в отличие от другой гетерограницы с большей плотностью прорастающих дислокаций. В завершении главы продемонстрирована возможность роста слоев на основе GaAs на сформированной платформе с качеством, не уступающим качеству аналогичных слоев, выращенных на платформе Ge/Si путем проведения сравнительного анализа морфологии поверхности, структурных и оптических свойств.

**Четвертая глава** посвящена исследованию и внедрению методов для уменьшения плотности дефектов и шероховатости поверхности в выращиваемых гетероструктурах  $A^{III}B^V$  на созданной платформе Ge/Si/КНИ (001) и установлению возможности формирования на такой платформе светоизлучающих гетероструктур  $A^{III}B^V$ . По результатам исследования поперечного среза образцов прямым методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что дислокационные фильтры InAlAs/GaAs эффективнее, чем дислокационные фильтры InGaAs/GaAs в уменьшении плотности прорастающих дислокаций. Кроме этого, показано, что эффективность дислокационных фильтров зависит от начальной плотности прорастающих дислокаций: чем выше начальная плотность, тем эффективнее дислокационная фильтрация. Благодаря комплексному применению таких методов измерения, как просвечивающая электронная микроскопия, *in-situ* измерение отражательной способности образцов, атомно-силовая микроскопия, удалось установить параметры роста буферных слоев, которые способствуют аннигиляции основной плотности антифазных границ (АФГ), параметры отжига буферных слоев, которые способствуют уменьшению плотности АФГ, а также модификации поверхности, благоприятной для аннигиляции АФГ. Методом энергодисперсионной спектроскопии продемонстрировано, что зародышевый слой  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  является эффективным в борьбе с взаимной диффузией атомов. Методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что использование вставки  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  даже с применением во время роста термоциклического отжига не играет существенной роли в уменьшении плотности прорастающих дислокаций, однако оказывает положительное влияние на уменьшение плотности антифазных границ. В завершении описаны результаты исследования сформированного светоизлучающего диода на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs с квантовыми ямами InGaAs, выращенной с использованием внедренных методов уменьшения плотности дефектов и шероховатости поверхности на созданной платформе Ge/Si/КНИ.

На наш взгляд, **наиболее важными результатами** представленной диссертации являются следующие. Продemonстрировано, что платформа Ge/Si/КНИ является перспективной для роста светоизлучающих гетероструктур на основе GaAs при использовании подложки типа «кремний-на-изоляторе» (Si/SiO<sub>2</sub>/Si (001)), изготовленной по технологии Smart Cut, а в качестве методов роста слоев Ge/Si – метода молекулярно-пучковой эпитаксии с применением двухстадийного режима роста Ge, термоциклического отжига в вакууме и оптимизированных температурных режимов. Установлено, что созданная платформа Ge/Si/КНИ (001) может быть использована для МОС-гидридной эпитаксии слоев AlGaAs/GaAs со структурными и с оптическими свойствами, существенно не уступающими свойствам аналогичных слоев, сформированных на платформе Ge/Si (001). Исследованы и внедрены методы снижения плотности дефектов и шероховатости поверхности в выращиваемых гетероструктурах AlGaAs/GaAs на созданных платформах Ge/Si/КНИ (001). Данные результаты, которые имеют **теоретическую и практическую значимость**, позволили впервые продемонстрировать фотолуминесценцию при комнатной температуре

гетероструктуры AlGaAs/GaAs с квантовыми ямами InGaAs, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии на платформе Ge/Si/КНИ (001). Созданные светоизлучающие диоды на основе данной гетероструктуры и на основе контрольного образца на подложке GaAs (001) демонстрировали электролюминесценцию при температуре 77 К одного порядка интенсивности, что определяет **научную новизну** диссертации. Результаты диссертации указывают на возможность создания светоизлучающих гетероструктур AlGaAs/GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии на сформированной платформе Ge/Si/КНИ (001) и служат научным заделом для развития данного направления.

Работа выполнена на высоком научном уровне, что подтверждается наличием у соискателя публикаций в журналах, рекомендованных ВАК РФ, индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Исследования, представленные в диссертации, выполнены с использованием серийного оборудования и современных методик. В числе прочего, применялись прямые измерения методом просвечивающей электронной микроскопии. Это обуславливает **достоверность** полученных результатов.

Результаты работы могут быть рекомендованы для использования в организациях, работающих в областях физики полупроводниковых материалов и приборов на их основе: Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе РАН, Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, НИИ молекулярной электроники, Институте физики микроструктур РАН (филиале Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН), АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха».

#### **Замечания по диссертации**

Изложенный в диссертации материал, однако, не лишен и некоторых недостатков.

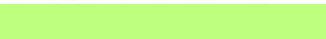
1. В названии диссертации указано, что работа посвящена созданию платформы для эпитаксии слоев полупроводников  $A^{III}B^V$ , однако в тексте говорится только о слоях на основе GaAs. Остается непонятным, будут ли предложенные подходы эффективны и для других соединений  $A^{III}B^V$ , например, структур на основе InP, которые востребованы для создания полупроводниковых лазеров телекоммуникационного диапазона.
2. В работе отмечена практическая значимость создания кремниевых оптических межсоединений в интегральных микросхемах, в частности, излучателей на основе полупроводников  $A^{III}B^V$  в окне прозрачности объемного Si. Однако, автором изучались излучающие структуры, не соответствующие данному требованию.
3. В работе получена платформа на КНИ с плотностью дислокаций, предположительно достаточной для создания излучающих структур на основе квантовых точек, но недостаточной для излучающих структур с квантовыми ямами. Тем не менее автором исследовались образцы только с квантовыми ямами, что не позволяет в полной мере судить об эффективности созданной платформы для образцов с квантовыми точками.
4. Проведенные исследования продемонстрировали, что дислокационные фильтры InAlAs/GaAs эффективнее, чем дислокационные фильтры InGaAs/GaAs в уменьшении плотности прорастающих дислокаций, но не поясняется по какой причине.

Высказанные замечания не преуменьшают общего положительного впечатления от диссертации и не затрагивают основных положений, защищаемых соискателем.

## Заключение

Диссертация представляется законченным непротиворечивым исследованием, которое может быть полезно специалистам, заинтересованным темой интеграции полупроводников  $A^{III}B^V$  с подложками класса «кремний-на-изоляторе» и объемного кремния методами эпитаксиального осаждения. Защищаемые положения, основные результаты и выводы диссертации являются оригинальными и в достаточной степени обоснованы. Содержание автореферата соответствует диссертационной работе и хорошо отражает положения, выносимые на защиту, и основные результаты. Диссертация Сушкова Артема Александровича на тему «Создание платформы на основе подложки класса «кремний-на-изоляторе» для эпитаксии слоев  $A^{III}B^V$ » соответствует заявленной специальности и отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК при Минобрнауки России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель, Сушков Артем Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Диссертация и отзыв заслушаны и обсуждены на заседании секции НТС «Полупроводниковые приборы» АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», протокол № 7 от 21 июля 2023 года.

Ладугин Максим Анатольевич  
доктор физ.-мат. наук  
начальник научно-производственного комплекса  
АО «НИИ «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха»  
117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1  
тел.: +7 (495) 333-91-44  
e-mail: 

М.А. Ладугин

 «21» 07 2023 г.

Сведения о ведущей организации:

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха» (АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»)

Адрес: 117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1

Тел.: +7 495 333-91-44;

e-mail: [bereg@niipolyus.ru](mailto:bereg@niipolyus.ru);

Сайт: <https://niipolyus.ru>