

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по научной
работе и стратегическому развитию
МГТУ им. Н.Э. Баумана



Б.Н. Коробец

2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Диссертационная работа Филиппова Ивана Андреевича «Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов» выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Проектирования и технологии производства электронной аппаратуры».

В период подготовки диссертации Филиппов Иван Андреевич являлся аспирантом очной формы обучения МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Проектирование и технологии производства электронной аппаратуры».

В 2014 году Филиппов И.А. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по специальности «Конструирование и технология электронных средств».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2020 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель в период обучения в аспирантуре МГТУ им. Н.Э. Баумана — член-корр. РАН, доктор технических наук, профессор Шахнов Вадим

je
2020

Анатольевич работает в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Проектирование и технологии производства электронной аппаратуры» в должности заведующего кафедрой.

Тема диссертационной работы утверждена на заседании Ученого Совета Научно-учебного комплекса «Информатика и системы управления» протоколом № 34 от 25 сентября 2017 г.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация И.А. Филиппова является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи разработки плазменных технологий для создания наноразмерных элементов для плазмоники (спазеров) и гетероструктурных СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на базе полупроводниковых соединений AlN, GaN, InN.

Актуальность темы и направленность исследования

Значительная часть задач по разработке новых поколений электронных и оптоэлектронных приборов и устройств сводится к разработке новых технологических процессов, адаптированных к значительно уменьшившимся критическим размерам элементов и позволяющих решить проблемы, возникающие при применении неадаптированных к новым приборам технологических процессов. Так, для увеличения рабочей частоты СВЧ транзисторов с близко расположенным к поверхности двумерным электронным газом (2 DEG) необходим ряд процессов плазменных обработок наноразмерных элементов топологии, обладающих уменьшенной энергией взаимодействующих с поверхностью ионов. Для улучшения параметров наноразмерных источников света на основе спазера необходимо решать комплекс конструктивных и технологических задач, часть из которых сводится к необходимости разработки плазменных технологий, позволяющих формировать на чувствительных к высокоэнергетичным воздействиям поверхностях наноразмерные элементы с

заданными геометрическими параметрами. Для решения обеих задач необходимо изучение различных типов и режимов травления, отличающихся как составом газов, так и задействованием различных механизмов травления.

Актуальность диссертационной работы заключается в применении новых процессов плазменного травления к решению задач по созданию нового поколения электронных и оптоэлектронных приборов - спазеров и СВЧ транзисторов мм-диапазона, конструкция которых требует формирования наноразмерных конструктивных элементов.

Разработка спазеров и транзисторов мм-диапазона с использованием процессов плазменного травления будет способствовать совместимости технологии новых приборов плазмоники и наногетероструктурной электроники с технологическим оборудованием современных микроэлектронных производств.

Научная новизна результатов проведённых исследований

Выявлены особенности плазмохимических процессов травления наноразмерных элементов, формируемых в тонких пленках Ag.

Обнаружено влияние размеров кристаллитов в тонких пленках Ag на форму nanoотверстий, получаемых при плазменном травлении.

Показана возможность использования процессов реактивного ионного травления (РИТ) и индуктивно-связанного реактивного ионного травления (ИСП РИТ) в плазме SF₆ для формирования затворных щелей в Si₃N₄ с углами наклона стенок 80÷90° (РИТ) и 75÷85° (ИСП РИТ).

Выявлено влияние напряжения смещения и состава газовой смеси при плазмохимическом травлении на слоиое сопротивление двумерного газа в транзисторных гетероструктурах In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN с тонким барьерным слоем.

Практическая значимость работы.

Разработана технология формирования топологических элементов в тонких

пленках серебра для устройств плазмоники, обеспечивающая формирование матрицы наноразмерных отверстий.

Изготовлен спазер с резонатором на основе пленки серебра, обладающий узким спектром люминесценции (1,7 нм) и диаграммой направленности излучения (1,3°).

Предложена конструкция СВЧ транзистора миллиметрового диапазона на основе GaN с тонким барьерным слоем и щелью затвора с наклонными стенками, сформированной с помощью процесса травления Si₃N₄.

Оптимизированы режимы плазменной обработки затворной щели на основе Si₃N₄, обеспечивающие минимальную деградацию слоевого сопротивления двумерного газа эпитаксиальных гетероструктур In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN.

Внедрение

Разработанные методики и режимы работы технологического оборудования внедрены в НИР и ОКР, проводимые ФГУП ВНИИА и АО «НПФ» МИКРАН.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Основные результаты экспериментальных исследований, вошедшие в диссертацию, получены преимущественно автором в индивидуальных и коллективных исследованиях. Соискателем проведен анализ результатов экспериментальных исследований, выявлены особенности и основные подходы к применению плазменных методов формирования наноразмерных элементов в технологии плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Результаты исследований получены с применением апробированных современных методов технологии и метрологии. Полученные результаты находятся в согласии с данными других авторов в тех областях, где таковые данные имеются. Сформулированные выводы являются взаимно

согласованными и не содержат противоречий.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на:

Международном форуме по стратегическим технологиям «IFOST 2019», Томск, 2019;

Международной конференции Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, Мюнхен, 2019;

Международной конференции «Days of Diffraction», Санкт-Петербург, 2017;

Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства, Владимир-Суздаль, 2017;

18-ой международной молодежной конференции «Научные технологии и интеллектуальные системы - 2016», Москва, 2016.

Основные результаты диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 работах, в том числе 2 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК, 3 в журналах, индексируемых в SCOPUS. В опубликованных работах автором определены режимы травления пленок серебра для создания наноразмерных элементов:

1. Филиппов И.А., Великовский Л.Э., Шахнов В.А. Плазмохимическое травление тонких пленок серебра для приложений плазмоники индуктивно - связанной аргоновой плазмой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Вып. 4. 2020. С. 165-180. (0,81 п.л./0,6 п.л.).

Автором определены режимы травления подзатворного диэлектрика.

2. Филиппов И.А. et al. Плазменное травление в технологии InAlN/GaN НЕМТ // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. С. 84-87. (0,42 п.л./0,30 п.л.)

Автором определены режимы травления резонаторов в серебряной пленке.

3. Filippov I. et al. Plasmonic nanolaser for intracavity spectroscopy and sensorics // Appl. Phys. Lett. 2017. Vol. 111, № 21. P. 213104. DOI: 10.1063/1.5003655 p. 213104-1- 213104-5. (0,56 п.л. / 0,1 п.л.).

Автором разработан двухэтапный процесс травления.

4. Philippov I.A. et al. Mass production compatible fabrication techniques of single-crystalline silver metamaterials and plasmonics devices // Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2017 / ed. Engheta N., Noginov M.A., Zheludev N.I. San Diego, United States: SPIE, 2017. P. 115. 1034337- 1- 1034337-7. (0,79 п.л. / 0,15 п.л.).

Автором изготовлены образцы для создания нанолазеров.

5. Philippov I.A. et al. Plasmonic nanolaser based on a hybrid mode of plasmonic crystal // Day on diffraction 2017 Abstracts. St. Petersburg, 2017. P. 96–97. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.).

Автором изготовлены образцы и проведены исследования режимов травления для нитрида кремния.

6. Filippov I.A. et al. InAlN/GaN and AlGaIn/GaN HEMT Technologies Comparison for Microwave Applications // Тезисы докладов международной конференции IFOST 2019. Tomsk, Russia, 2019. P.61-65. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.).

Автором исследованы процессы травления кремния с использованием индуктивно-связанной плазмы.

7. Филиппов И.А. Плазмохимическое травление в индуктивной связной плазме // 18-ая международная конференция “Научно-технологические и интеллектуальные системы.” Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. P. 208–213. (0,7 п.л. / 0,7 п.л.).

Автором смоделированы чувствительные элементы и исследованы их основные свойства.

8. Филиппов И.А. Проектирование чувствительного элемента микроакселерометра для систем контроля доступа // 18-ая международная

конференция “Научные технологии и интеллектуальные системы.” Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. Р. 167–174. (0,82 п.л. / 0,82 п.л.).

Автором изучены процессы травления пленок серебра с помощью хлорной газовой фазы.

9. Филиппов И.А., Смирнов Ю.Н., Зверев А.В. Технология формирования наноразмерных структур методами плазмохимического травления для изделий наноплазмоники. Всероссийская научно-техническая конференция с элементами научной школы «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 1-7. (0,47 п.л. / 0.25 п.л.).

Перечисленные выше публикации достаточно полно отражают основное содержание работы.

Заключение:

Диссертационная работа Филиппова Ивана Андреевича «Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов» является самостоятельной, завершенной, научно-квалификационной работой, в которой на основе проведенных исследований решена актуальная научная задача формирования наноразмерных резонаторов в тонких пленках серебра для изготовления спазеров и формирования щелей затворов СВЧ транзисторов. Рассмотренная работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ, п. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертации на соискании ученой степени кандидата технических наук. Тема и содержание диссертации полностью соответствуют выбранной специальности 01.04.04 - «Физическая электроника».

Диссертационная работа Филиппова Ивана Андреевича «Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных

элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 - «Физическая электроника».

Заключение принято на заседании кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Присутствовало на заседании: 18 чел.

Результаты голосования: «за» - 18; «против» - 0; «воздержались» - 0.

Протокол № 8 от 08 сентября 2020 г.

Заместитель заведующего кафедрой,
к.т.н., доцент



А.И. Власов



УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной
и инновационной
деятельности ТГУ
Краснова Т.С.

«21» октября 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Диссертация Филиппова Ивана Андреевича «Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 - «Физическая электроника» выполнялась в НОЦ «Наноэлектроника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» в рамках ПНИЭР «Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктуры InAlN/GaN для изделий космического применения» ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Соглашение №14.578.21.0240 от 26.09.2017 г. Научный руководитель ПНИЭР доктор физ.-мат. наук, профессор Брудный В.Н.

По итогам обсуждения результатов работы принято следующее заключение.

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация И.А. Филиппова является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по разработке плазменных технологий для создания наноразмерных элементов для плазмоники (спазеров) и гетероструктурных СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на базе полупроводниковых соединений группы III-N (AlN, GaN, InN) и твердых растворов/.

Актуальность темы и направленность исследования

Основным направлением диссертационной работы является разработка плазменных методов формирования ключевых элементов конструкции спазеров и гетероструктурных СВЧ транзисторов. Значительное уменьшение критических размеров современных приборов наноэлектроники делает актуальным разработку технологических приемов, позволяющих адаптировать процессы плазменной обработки к требованиям приборной технологии. Особый интерес представляют перспективные приборы наноплазмоники (наноразмерные источники света - спазеры) и новое поколение СВЧ НЕМТ на базе соединений III-N. Уникальные свойства элементов наноплазмоники должны позволить создавать накопители данных высокой плотности, усовершенствованные оптико-электронные компоненты и многие другие

оптические технологии будущего. Гетероструктурные СВЧ транзисторы в настоящее время широко используются в высокоскоростной телекоммуникации, в системах спутниковой связи и радиолокации, при этом повышение рабочих частот и выходной удельной мощности таких транзисторов является одним из основных тенденций развития СВЧ микроэлектроники.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Основные результаты экспериментальных исследований, вошедшие в диссертацию, получены преимущественно автором в индивидуальных и коллективных исследованиях. Соискателем проведен анализ результатов экспериментальных исследований, выявлены особенности и основные подходы к применению плазменных методов формирования наноразмерных элементов в технологии плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов.

Степень достоверности результатов проведённых исследований

Результаты исследований получены с применением апробированных современных методов технологии и метрологии. Полученные результаты находятся в согласии с данными других авторов в тех областях, где таковые данные имеются. Сформулированные выводы являются взаимно согласованными и не содержат противоречий.

Новизна результатов проведённых исследований

Новизна результатов проведённых исследований обусловлена использованием новых материалов в конструкции элементов спазеров и СВЧ транзисторов (резонатора на основе пленки серебра и гетероструктур InAlN/AlN/GaN соответственно).

Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов

Практическая значимость результатов обусловлена тем, что разработанные технологические подходы для формирования наноразмерных элементов для спазеров и НЕМТ транзисторов позволяют значительно улучшить параметры приборов, а возможности их применения выходят за рамки исследованных приборов и могут применяться в других устройствах наноплазмоники и гетероструктурной СВЧ электроники.

Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.

По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 2 статьи в журналах входящих в перечень ВАК, 3 в журналах, индексируемых в SCOPUS. В опубликованных работах достаточно полно отражены основные результаты диссертационного исследования.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности.

Предмет исследования и материалы диссертационной работы соответствуют специальности 01.04.04 - физическая электроника, технические науки по следующим пунктам, перечисленным в структуре области исследования в паспорте специальности:

изучение физических основ плазменных и лучевых (пучковых) технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких пленок и пленочных структур;

твердотельная электроника, в том числе СВЧ - электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника,


оптоэлектроника, криоэлектроника;

Заключение принято на заседании кафедры физики полупроводников физического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Присутствовали на заседании: дфмн. Эрвье Ю.Ю., кфмн. Бобровникова И.А., дфмн, проф. Брудный В.Н., дфмн. Гриняев С.Н., дфмн. Ивонин И.В., кфмн. Новиков В.А., инж. Серикова А.К., всего 7 чел.

Результаты голосования: «за» - 8,

«против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 10 от 16. 10. 2020 г.

16.10.2020. Эрвье Юрий Юрьевич, 

доктор физико-математических наук, заведующий
кафедрой физики полупроводников Федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**
(ТУСУР)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям

А. Г. Лощилов

« 4 » 10 2020 г.

ВЫПИСКА

из протокола расширенного заседания кафедры «Физическая электроника»
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
№ 36 от 14 октября 2020 года

Присутствовали:

Председатель заседания – заведующий кафедрой «Физическая электроника», д.т.н.,
профессор Троян П.Е.

Секретарь заседания – старший преподаватель кафедры «Физическая электроника»
Жидик Ю.С.

Смирнов С.В., д.т.н., профессор кафедры «Физическая электроника»

Чистоедова И.А., к.т.н., доцент кафедры «Физическая электроника»

Битнер Л.Р., к.ф-м.н., доцент кафедры «Физическая электроника»

Сальников А.С., к.т.н., доцент кафедры «Физическая электроника»

Поздеева А.Ф., старший преподаватель кафедры «Физическая электроника»

Давыдов В.Н., д.т.н., профессор кафедры «Электронные приборы»

Буримов Н.И., д.ф-м.н., заведующий кафедрой «Электронные приборы»

Каранский В.В., старший преподаватель кафедры «Физическая электроника»

Сахаров Ю.В., д.т.н., профессор кафедры «Физическая электроника»

Мостовщиков А.В., к.т.н., доцент кафедры «Физическая электроника»

Всего присутствовало – 12 человек, из них по специальности рассматриваемой диссертации докторов наук – 4

Повестка заседания:

Обсуждение диссертационной работы Филиппова Ивана Андреевича на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: «Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов» по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Филиппов Иван Андреевич закончил радиотехнический факультет ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э.Баумана (Национальный исследовательский университет) в 2014 году. С 2014 года обучался в очной аспирантуре МГТУ им. Баумана по специальности 05.11.14 «Технология приборостроения». В процессе обучения работал инженером-технологом участка плазмохимического травления в НОЦ «Функциональные микро и нано-системы» и Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»). С 2014 года участвовал в проекте «Плазмоника» по созданию новой фотонной элементной базы. В 2018 году окончил аспирантуру с защитой выпускной квалификационной работы на тему «Процессы плазмохимического травления для приложений плазмоники» и присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь». Научная работа, представленная в диссертации, была выполнена на кафедре «Физическая электроника». Работа выполнена, представленная в диссертации выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», а также Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физическая электроника Сахаров Юрий Владимирович.

Слушали:

С изложением основных итогов диссертационного исследования выступил соискатель Филиппов И.А. В ходе своего 20 минутного доклада он обозначил актуальность темы исследования, цели и задачи диссертационного исследования,

теоретическую и практическую значимость работы. Основная часть доклада была посвящена доказательству 4 положений, выносимых на защиту. В завершении доклада были сформулированы основные выводы по диссертационному исследованию.

После заслушанного доклада были заданы следующие вопросы:

- д.т.н., профессор Смирнов С.В.: «Уточните режимы плазмохимического травления»
- д.т.н., профессор Смирнов С.В.: «Какой газ использовался при плазменном травлении серебра?»
- д.т.н., профессор Троян П.Е.: «Вопрос по терминологии: спазер или спайзер»
- д.т.н., профессор Троян П.Е.: «Толщина пленок серебра?»
- д.т.н., профессор Сахаров Ю.В.: «Каким пунктам паспорта специальности 01.04.04 соответствует диссертация?».
- д.т.н., профессор Сахаров Ю.В.: «Доверительные интервалы?»
- д.т.н., профессор Смирнов С.В.: «Влияние размера кристаллитов на размеры и форму отверстий в пленках серебра?»
- д.т.н., профессор Смирнов С.В.: «Какое распыление происходит физическое или химическое?»
- д.т.н., профессор Сахаров Ю.В.: «Практическое применение, наличие актов внедрения результатов диссертационной работы?»
- д.т.н., профессор Смирнов С.В.: «Достаточна ли энергия для физического распыления серебра. Коэффициент распыления серебра при таких энергиях?»

На все поставленные вопросы Филиппов И.А. дал развернутые ответы.

Выступили:

Выступил научный руководитель, д.т.н., профессор Сахаров Ю.В.:

Актуальность работы связана с активным развитием интегральной фотоники и СВЧ электроники. Одной из проблем, ограничивающих развитие технологии для интегральной фотоники является сложность получения оптических функциональных слоев с минимальными оптическими потерями, а также сложность технологии формирования приборов фотоники и наличие нано размерных элементов топологии. Для НЕМТ транзисторов, сложностью является слабая степень проработки технологии травления подзавторных диэлектриков. Задачи, решаемые Филипповы И.А., являются актуальными и значимыми с точки зрения расширения отечественной интегральной фотоники, а также микро- и нанoeлектроники. На этапе работы над диссертацией Филиппов И.А. провел

значительный объем экспериментальных исследований. Исследованы основные технологические подходы к решению комплекса проблем, исследован ряд оригинальных технических решений, получены результаты работы спазера и СВЧ измерений работы транзисторов. Представленные в диссертации результаты получены Филипповым И.А. самостоятельно, либо при его непосредственном участии.

В процессе работы над диссертацией Филиппов И.А. проявил умение самостоятельно ставить и решать сложные научно-технические задачи, продемонстрировал инженерный подход в постановке и проведении экспериментов, их анализе, моделировании физических процессов, построении гипотез и их научного обоснования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается апробацией на Всероссийских и Международных научных конференциях, публикациями в рецензируемых научно-технических журналах, входящих в Перечень ВАК. Результаты исследований Филиппова И.А. опубликованы в 9 работах, в том числе 2 статьях, входящих в список ВАК и 3 индексируемых *Web of Sciences* и *Scopus*.

д.т.н., профессор Троян П.Е.:

Профессор Троян П.Е. отметил ценность диссертационного исследования, особо выделив научную новизну и практическую значимость.

д.т.н., профессор Смирнов С.В.:

Профессор Смирнов С.В. высказался о необходимости корректировки текста диссертации и автореферата для соответствия паспорту специальности 01.04.04.

д.ф-м.н., профессор Буримов Н.И.:

Профессор Буримов Н.И. выступил с рядом замечаний по представлению экспериментальных данных, а также с предложениями по корректировке научных положений выносимых на защиту.

к.т.н., доцент Чистоедова И.А.:

Доцент Чистоедова И.А. выступила с поддержкой диссертационной работы, отметив большой объем представленных экспериментальных данных. В целом диссертационная работа оценена положительно. Основные замечания относятся к представленному докладу: «Необходимо скорректировать научные положения, выносимые на защиту, а также практическую значимость и научную новизну. Также следует сократить введение и более подробно изложить режимы плазмохимического травления».

Постановили:

1. Рекомендовать диссертацию Филиппова И.А. на тему «Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов» к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

2. Утвердить следующее заключение:

Научная новизна

1. Выявлены особенности плазмохимических процессов травления наноразмерных элементов, формируемых в тонких пленках Ag.
2. Обнаружено, влияние размеров кристаллитов в тонких пленках Ag на форму и шероховатость nanoотверстий, получаемых при плазменном травлении.
3. Показано, возможность совместного использования процессов реактивного ионного травления (РИТ) и индуктивно-связанного реактивного ионного травления (ИСП РИТ) в плазме SF₆, для формирования затворных щелей в Si₃N₄ с углами наклона стенок 80÷90° (РИТ) и 75÷85° (ИСП РИТ).
4. Выявлено, влияние напряжения смещения и состава газовой смеси при плазмохимическом травлении на слоевое сопротивление двумерного газа In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN наногетеротранзисторов с тонким барьерным слоем.

Практическая значимость работы.

1. Разработана конструкция и технология изготовления спазера с матрицей наноразмерных отверстий в пленке серебра, обеспечивающая когерентное узконаправленное излучение.
2. Изготовлена матрица спазера на основе пленок Ag в качестве резонатора, обладающий узкими спектром люминесценции (1,7 нм) и диаграммой направленности излучения (1,3°).
3. Предложена конструкция СВЧ транзистора миллиметрового диапазона на основе эпитаксиальных гетероструктур In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN с тонким барьерным слоем и сформированной с помощью процесса травления Si₃N₄ щелью затвора, найдены оптимальные параметры плазменных обработок для формирования затворной щели.
4. Оптимизированы режимы плазменной обработки затворной щели на основе Si₃N₄ обеспечивающие минимальную деградацию слоевого сопротивления двумерного газа эпитаксиальных гетероструктур In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN.

Личный вклад автора.

Личный вклад заключается в планировании экспериментов, приготовлении экспериментальных образцов, проведении экспериментов, выполнении большей части измерений, обработке результатов экспериментов. Автором проведен анализ, моделирование, интерпретация и обобщение полученных результатов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современных метрологических и технологических методов, воспроизводимостью полученных результатов и их соответствием данным, полученным другими авторами в тех областях, где таковые имеются.

Разработанные процессы формирования плазмонных структур и созданные с помощью новых технологических режимов устройства были применены в «Научно-образовательном центре функциональных микро и наносистем МГТУ им. Н.Э. Баумана» и «ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова» в рамках проекта: «Плазмоника».

Режимы травления нитрида кремния были внедрены в рамках проекта "Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического применения" Томского Государственного Университета. Исследование процессов травления нитрида кремния выполнено при финансовой поддержке ПНИЭР "Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического применения" (Соглашение № 14.578.21.0240 от 26.09.2017 г.) УИР REMEFI 57817X240.

Работа поддержана Министерством образования и науки в рамках базовой части проекта FEWM-2020-0038 «Физические аспекты исследований в актуальных направлениях развития плазменной эмиссионной электроники, фотоники, оптического и космического материаловедения».

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на следующих научно-практических конференциях и семинарах: Международной конференции IFOST 2019 (Томск, 2019), 18-й и 19-й Международных молодежных научных конференциях «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы» в МГТУ им. Н.Э. Баумана, на международной конференции «Дни Дифракции», 2017 год, Санкт-Петербург.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных автором

По материалам и основному содержанию диссертации опубликовано 9 научных работ в научно-технических журналах и трудах конференций, из них 2 опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 3 работы опубликованы в журналах, индексируемых в *Scopus* и *Web of Science*.

Содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

Основные публикации в изданиях, рекомендованные ВАК:

1. Филиппов И.А., Великовский Л.Э., Шахнов В.А. Плазмохимическое травление тонких пленок серебра для приложений плазмоники индуктивно -связанной аргоновой плазмой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2020.

2. Филиппов И.А. Плазменное травление в технологии InAlN/GaN HEMT/ И.А. Филиппов, В.А. Шахнов, Л.Э. Великовский, П.А. Брудный, О.И. Демченко// Изв. вузов. Физика. – 2020. – Т. 63. № 1 (745). – С. 84-87.

Основные публикации в изданиях, находящихся в базах данных *Scopus* и *Web of Science*:

3. Filippov I. et al. Plasmonic nanolaser for intracavity spectroscopy and sensorics // Appl. Phys. Lett. 2017. Vol. 111, № 21. P. 213104. DOI: 10.1063/1.5003655

4. Philippov I.A. et al. Mass production compatible fabrication techniques of single-crystalline silver metamaterials and plasmonics devices // Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2017 / ed. Engheta N., Noginov M.A., Zheludev N.I. San Diego, United States: SPIE, 2017. P. 115.

5. Philippov I.A. et al. Plasmonic nanolaser based on a hybrid mode of plasmonic crystal // Day on diffraction 2017 Abstracts. St. Petersburg, 2017. P. 96–97.

Публикации в других изданиях:

6. Filippov I.A. et al. InAlN/GaN and AlGaIn/GaN HEMT Technologies Comparison for Microwave Applications // Тезисы докладов международной конференции IFOST 2019. Tomsk, Russia, 2019.

7. Филиппов И.А. Плазмохимическое травление в индуктивной связанной плазме // 18-ая международная конференция “Научно-технологические и интеллектуальные системы.” Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. P. 208–213.

8. Филиппов И.А. Проектирование чувствительного элемента микроакселерометра для систем контроля доступа // 16-ая международная конференция “Научно-технологические и интеллектуальные системы.” Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. P. 167–174.

9. Филиппов И.А., Смирнов Ю.Н., Зверев А.В. Технология формирования наноразмерных структур методами плазмохимического травления для изделий наноплазмоники. Всероссийская научно-техническая конференция с элементами научной школы Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.

Соответствие диссертации специальности

Представленная Филипповым И.А. диссертационная работа на тему «Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов» является фундаментальным научным исследованием в области плазменных технологий.

Указанная область исследований соответствует паспорту специальности 01.04.04 «Физическая электроника», а именно пункту 6 – Изучение физических основ плазменных и лучевых (пучковых) технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких пленок и пленочных структур.

Вывод

1. Диссертационная работа Филиппова И.А. на тему «Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов» соответствует паспорту специальности 01.04.04 «Физическая электроника» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук

2. Диссертационная работа Филиппова И.А. на тему «Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов» может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника»

Результаты открытого голосования: За – 10, против – 1, воздержалось – 0.

Председатель заседания
д.т.н., профессор кафедры ФЭ



Троян П.Е.

Секретарь заседания
старший преподаватель кафедры ФЭ



Жидик Ю.С.