Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт нанотехнологий микроэлектроники
Российской академии наук (ИНМЭ РАН)

119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 32А,
тел. (499) 616 3812, факс (499) 616 3812
ИНН 7724595010 КПП 773601001 ОГРН 1067758649375

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИНМЭ РАН,
Академик РАН
Сауров А.Н.

«____» _____ 2020 г.

ОТЗЫВ
ведущей организации на диссертационную работу
Филиппова Ивана Андреевича
«Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 01.04.04 - физическая электроника

Современный уровень технологий микро- и наноэлектроники обеспечивает возможность активного развития технологий фотоники и СВЧ электроники, позволяет разрабатывать и изготавливать новые типы приборов, открывающих новые возможности по передаче и обработке информации, увеличению чувствительности сенсоров различного назначения и формирует фундамент дальнейшего развития электроники.

Актуальность темы. Диссертация Филиппова И.А. посвящена исследованию существующих проблем использования плазменных методов для формирования функциональных элементов нано- и микроэлектроники. Тема работы касается разработки технологических подходов создания

современной элементной базы СВЧ электроники и плазмоники, и безусловно является актуальной.

Целью работы является исследование процессов формирования наиболее важных элементов конструкции современных спазеров и наногетероструктурных СВЧ транзисторов с помощью методов плазмохимической обработки.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов работы и списка цитируемой литературы из 72 источников, включая публикации соискателя по теме диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, обоснована новизна исследований и их практическая значимость, сформулированы защищаемые положения, представлены сведения об апробации результатов работы.

В первой главе выполнен обзор и анализ научно-технической литературы по особенностям конструкций и изготовлению элементов плазмоники, а также технологии формирования СВЧ транзисторов. Представлен анализ применения методов плазмохимического травления при создании элементов этих устройств. Анализ научно-технической литературы показывает, что работы по изготовлению спазеров, а также работы по повышению выходной удельной мощности и частотного диапазона HEMT на базе гетероструктур InAlN/AlN/GaN проводятся во многих зарубежных фирмах и научных центрах.

Во второй главе приводятся описание физико-химических особенностей процессов травления и результаты расчетных зависимостей, полученных методом математического моделирования процессов травления различных материалов. Приведенные профили позволяют оценить диапазоны выходных параметров, характеризующих процессы травления. Рассмотрена физика этих процессов с точки зрения применения их в наноэлектронике.

Третья глава посвящена анализу экспериментальных данных по травлению образцов с тонкими пленками серебра. Рассмотрены процессы травления с применением различных газовых смесей. Рассмотрено влияние изменения параметров режимов плазменного травления на результаты изготовления наноразмерных элементов для создания спазера. Представлены результаты исследования параметров спазеров изготовленных на основе тонких пленок серебра, полученных с применением разработанных методов.

В четвертой главе рассмотрено влияние плазмохимического травления нитрида кремния для формирования ножки к подзатворному диэлектрику и

последующего удаления маски, на тонкой InAlN/AlN/GaN гетероструктуре транзистора. Проведен анализ влияния различных параметров плазменной обработки, в том числе с применением различных газовых смесей в процессе травления, на характеристики СВЧ транзисторов. Продемонстрировано, что предложенная методика и режимы плазмохимического травления, позволяют исключить деградацию выходных характеристик СВЧ транзистора в результате проведения технологических процессов формирования рассматриваемой структуры.

Основные результаты и выводы

Показано, что форма отверстий, получаемых в пленке серебра при травлении в плазме Ar, зависит от размеров кристаллитов, которые, в свою очередь, определяются режимами осаждения слоя серебра и температурными режимами, при формировании маски.

Использование процесса двухэтапного травления серебра, в режимах с низкой и высокой ВЧ мощностью плазмы Ar, позволяет сформировать элементы с наклоном стенок от 87 до 89 градусов и изготовить матрицу наноотверстий для спазера, излучающего на длине волны 628 нм.

Обнаружено, что использование газовой смеси CHF3 и Ar при травлении затворных щелей приводит к пропорциональному увеличению размеров топологических элементов, что ограничивает возможность их применения для формирования затворных щелей с размерами меньше 100 нм. Улучшение анизотропии для этого процесса затруднительно из-за ограничений, накладываемых чувствительностью гетероструктур InAlN/GaN к ионной бомбардировке и нестабильности индуктивно-связанной плазмы (ИСП) при малых мощностях.

Показано, что процесс ИСП реактивного ионного травления (РИТ) в плазме SF6 обладает селективностью при травлении через резистивную маску марки AR-P 6200, что дает возможность получать наклонный угол в щели травления близким к 90°.

Использование плазмы SF6 с низкими значениями напряжения смещения до 10-15 В при травлении затворной щели в Si3N4 в наногетероструктурах In0,14Al0,86N(6 нм)/AlN(1 нм)/GaN в режимах реактивного ионного травления и реактивного ионного травления с источником индуктивно-связанной плазмы исключает рост сопротивления двумерного электронного газа.

Научная новизна.

Продемонстрированы особенности плазменных процессов травления наноразмерных элементов, формируемых в тонких пленках Ag.

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

Показана возможность использования процессов РИТ и ИСП РИТ в SF6 для формирования затворных щелей в Si3N4 с углами наклона стенок 80÷90° (РИТ) и 75÷85° (ИСП РИТ).

Исследовано влияние напряжения смещения и состава газовой смеси при плазменном травлении на сопротивление двумерного газа In0,14Al0,86N/AlN/GaN наногетеротранзисторов с тонким барьерным слоем.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс в АО «НПФ «Микран» (г. Томск).

Обоснованность и достоверность результатов. Научные положения и выводы, сформулированные в работе, их достоверность и научная новизна аргументированы и обоснованы результатами экспериментальных исследований, выполненных на современном метрологическом и технологическом оборудовании.

Полнота изложения материалов диссертации

По результатам диссертации опубликовано 9 работ, из которых 2 статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, и 3 работы опубликованы в журналах, индексируемых в SCOPUS. Результаты диссертации были представлены на Российских и международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе.

По результатам рассмотрения можно сформулировать следующие замечания к диссертационной работе Филиппова И.А.:

- Не приведено обоснование выбора пленок серебра как базового материала для создания структуры спазеров.
- По тексту диссертации используются надписи и сокращения непереведенные с английского языка, а также неустоявшаяся терминология.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности.

Предмет и результаты исследования диссертационной работы Филиппова И.А. соответствует пункту «Изучение физических основ плазменных и лучевых (пучковых) технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких пленок и пленочных структур.» паспорта специальности 01.04.04 – физическая электроника, технические науки.

Заключение.

Диссертация Филиппова И.А. «Особенности применения плазменных технологий для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ транзисторов» является завершенной научно-квалификационной работой.

Это позволяет квалифицировать представленную работу как решение задачи, имеющей существенное значение для развития технологических подходов при создании элементов фотоники и СВЧ электроники. Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.04 - физическая электроника, технические науки. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация соответствует критериям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а её автор Филиппов И.А., заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника.

Доклад Филиппова И.А. заслушан на регулярном научном семинаре Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук под председательством академика РАН Саурова А.Н., отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и утвержден 27 ноября 2020 года.

Отзыв подготовил:	Старший научный сотрудник отдела разработок и исследований микро- и наносистем, кандидат технических наук Ануфриев Ю.В.