

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Актуальность темы. Повышение рабочих частот СВЧ приборов полупроводниковой электроники, развитие интегральной фотоники и уменьшение размеров рабочих структур требует разработки новых технологических процессов в этой области. Создание элементов полупроводниковых структур с размерами менее 1 микрометра предъявляют особые требования к режимам их формирования и, в особенности, к плазменным методам их обработки. Являясь ключевым этапом технологических маршрутов изготовления приборов, плазмохимического травления и осаждения тонких пленок при использовании вакуумно-плазменных методов, позволяет массово формировать сложные топологические элементы из широкого спектра различных материалов. Повышение рабочих частот и увеличение мощности полевого СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктуры InAlN/AlN/GaN требует применения новых подходов и методов плазменных обработок. Использование тонких металлических слоев в плазмонике также требует решения сложных технологических задач.

Диссертация Филиппова И.А. посвящена исследованию технологии формирования наноразмерных элементов в тонких пленках нитрида кремния и серебра. Исследования направлены на поиск технологических решений, позволяющих сформировать так называемые нанорезонаторы для создания спазера на основе пленок серебра и травлении нитрида кремния для изготовления ножки подзатворного диэлектрика, что делает **актуальной** тему, представленной к защите диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения со списком основных выводов и списка использованных источников. Общий объем диссертации 111 страниц машинописного текста, в том числе 16 таблиц, 49 рисунков, список литературы из 72 наименований.

Во введении отражены требуемые показатели квалификационной работы, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук: цель работы, ее научная новизна, практическая значимость, актуальность темы

диссертации, степень ее разработанности, задачи и методы исследования, степень достоверности и апробация работы, а также научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу литературы и имеет обзорный характер, здесь рассмотрены различные виды приборов плазмоники, их конструкции и способы изготовления. Рассмотрено применение плазменного травления для СВЧ электроники. Показано, что пропорциональное уменьшение основных параметров конструкции транзистора налагает более жесткие требования на технологический процесс формирования его структуры. Показано преимущество метода реактивного ионного травления в сравнении с другими технологиями формирования структур, указаны основные принципы работы современных систем травления.

Во второй главе приведены физико-химические аспекты процессов травления, показано как влияют параметры установок на процесс травления. Приведены результаты моделирования процессов травления для нитрида кремния и серебра, расчетные зависимости скоростей травления для двух типов режимов травления, предназначенных для создания СВЧ транзистора и спазера.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям процессов травления тонких пленок серебра. Приведены режимы травления для твердой маски из оксида кремния, выяснены и объяснены закономерности процесса, приведены данные по оптимизации режима травления. Исследовано влияния температуры сушки резиста на кристаллизацию тонких пленок серебра и даны рекомендации по выбору режимов сушки. Апробированы технологические характеристики режимов травления серебра в различных газовых смесях. Продемонстрирована возможность устранения негативных эффектов, связанных с особенностью «переосаждения» серебра во время травления. Разработан двухэтапный метод травления тонких пленок серебра, который можно применять и для других металлов при формировании наноразмерных отверстий.

В четвертой главе приведены основные этапы по исследованию процесса травления нитрида кремния для создания ножки затвора. Дано обоснование режимов травления и исследовано влияние состава газовых компонентов на характеристики СВЧ структур. Показано, что в процессе травления происходит деградация гетероструктуры. Изучено изменение слоевого сопротивления в процессе плазменной обработки. Установлены технологические режимы травления, которые позволяют сформировать наклонный профиль травления с помощью элегаза, что позволяет

исключить концентрацию электрических полей под затвором во время работы СВЧ транзистора.

Основные новые научные результаты, полученные автором, сформулированы в заключении и являются основой для четырех защищаемых положений.

Научная новизна и практическая значимость исследований.

В диссертации Филиппова И.А. представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость, среди которых можно выделить следующие:

- Показана возможность использования процессов реактивного ионного травления в элегазе (SF_6) для формирования затворных щелей в Si_3N_4 с различными углами наклона стенок.
- Выявлено влияние напряжения смещения и состава газовой смеси при плазменном травлении на величину слоевого сопротивления в канале в гетероструктуре $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ с тонким барьерным слоем.
- Изготовлен спазер с резонатором на основе пленки серебра, обладающий узким спектром люминесценции (1,7 нм) и сравнительно узкой диаграммой направленности излучения ($1,3^\circ$).
- Оптимизированы режимы плазменной обработки затворной щели в Si_3N_4 , обеспечивающие минимальную деградацию слоевого сопротивления в гетероструктурах $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность научных положений и выводов обеспечивается использованием современных экспериментальных технологических методик и методов измерений, согласием полученных результатов и их сопоставимостью с данными других авторов, а также непротиворечивостью существующим научным представлениям. Основные результаты исследований, представленные в работе, достаточно полно отражены в 9 научных публикациях, доложены и обсуждены на 5 российских и международных научных конференциях.

Замечания по работе.

- В работе не отражены данные по методике осаждения пленок серебра, сопутствующие процессы подготовки подложки.
- Не обоснован выбор диапазона основных параметров плазмы для плазмохимического травления нитрида кремния.

- Ряд рисунков в диссертации приведен масштабной шкалы, см. например рисунки 2,3,4 в автореферате диссертации.

- Есть ошибки по тексту, см., например, в диссертации и автореферате с.11: «Также в ходе экспериментов наблюдалось частичное или полное удаление пленки **Ar....**», не пленки Ar, а пленки серебра (Ag). Не для всех сокращений есть расшифровка по тексту (ПХТ, ПММА, РИС).

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования.

Общее заключение. В целом диссертация Филиппова И. А. представляет законченное исследование, выполненное на высоком техническом и технологическом уровне. По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне представленная диссертационная работа соответствует пункту 6 «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.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертационной работы и отражает ее основные результаты, научные положения и выводы.

Считаю, что диссертационное исследование Филиппова Ивана Андреевича «Особенности применения технологий на основе плазменных источников для формирования наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ - транзисторов», представленное на соискание ученой степени кандидата технических наук, по критериям актуальности, научной новизны, обоснованности и достоверности полученных результатов и выводов соответствует требованиям ВАК РФ, а диссертант заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 - Физическая электроника.

Официальный оппонент,
док-р техн. наук, профессор,
зав. НПЛ ИПЭПТ ТПУ
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, РФ
Тел. +7(3822) 60-64-05, e-mail: remnev@tpu.ru
«11» декабря 2020 г.

Ремнев Г.Е.

Подпись Г.Е. Ремнева заверяю
Ученый секретарь ТПУ



Ананьева О.А.