

УДК 66.088, 621.382

На правах рукописи



Филиппов Иван Андреевич

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ
ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАЗМОНИКИ
И ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ**

Специальность 01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2020

Работа 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», Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель:

Сахаров Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры физическая электроника ФГБОУ ВО ТУСУР

Официальные оппоненты:

Ремнев Геннадий Ефимович, доктор технических наук, заведующий лабораторией электроразрядных и пучково-плазменных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Мяконьких Андрей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН), Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (ИНМЭ РАН), г. Москва.

Защита состоится 28 декабря 2020 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.04, созданного на базе ФГБОУ ВО ТУСУР по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ТУСУР и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/сберс5pz>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Ю.П. Акулиничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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 устройств плазмоники, в частности наноразмерных источников света на основе спазера (от англ. *Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) – плазмонный наноисточник оптического излучения, необходимо решить 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 режимов 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.

Степень разработанности темы.

В конструкции спазера одними из важнейших и наиболее трудно реализуемых элементов являются наноразмерные отверстия, формируемые в пленке одного из металлов с наименьшими потерями в видимом и ближнем ИК диапазоне. Одним из таких металлов является серебро, что делает его наиболее привлекательным материалом для плазмоники. Однако при работе с тонкими пленками Ag возникает ряд сложных технологических проблем, делающих его использование в конструкции спазера сложной малоизученной технической задачей, в особенности с применением промышленного технологического оборудования.

Повышение частоты работы мощных СВЧ транзисторов в мм-диапазоне требует использования новых типов наногетероструктур, отличающихся высокими электрофизическими параметрами (низким слоевым сопротивлением, высокой подвижностью) при тонком (5÷10 нм) барьерном слое. Транзисторы на основе наногетероструктуры InAlN/GaN являются предметом значительного количества исследований, однако количество публикаций, где приводятся сведения о влиянии ионной бомбардировки на параметры гетероструктур типа InAlN/GaN и параметрах плазменного травления при изготовлении затвора, очень ограничено.

Ведущими учеными в области мощных наногетероструктурных СВЧ транзисторов мм-диапазона являются *Kozo Makiyama* и *Kazukiyo Joshin* из Лаборатории Фуджитсу (Япония) и *Farid Medjdoub* из Института Электроники, Микроэлектроники и Нанотехнологии (Франция), Шалаев В.М. из Университета Пердью (США), *Stefan Maier* из Университета Людвиг-Максимилиана (Германия). Значительный вклад в развитие отечественной наноэлектроники внесли работы академиков Красникова Г.Я. и Саурова А.Н. Работы в отечественной плазмонике проводятся в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством И.А. Родионова. Несмотря на большое количество публикаций, посвященных разработанным приборам плазмоники и наногетероструктурной электроники, неизученными остаются аспекты формирования наиболее критических элементов данных приборов с помощью плазменных процессов травления. В данной работе особое внимание уделяется отечественным исследованием применения плазменного травления для формирования ключевых элементов конструкции современных приборов плазмоники и гетероструктур InAlN/GaN для СВЧ электроники.

Цель работы

Целью работы является исследование процессов формирования наиболее важных элементов конструкции современных наноэлектронных устройств – спазеров и наногетероструктурных СВЧ транзисторов с помощью методов плазменной обработки поверхности.

Для достижения данной цели решаются следующие задачи:

1. Выбор конструкции и технологии формирования элементов плазмоники и наногетероструктурной СВЧ электроники, изготавливаемых с помощью процессов плазменного травления.
2. Выбор направлений исследования технологии формирования наноструктур для спазера и наногетероструктурных СВЧ транзисторов;
3. Получение расчетных зависимостей параметров плазменных процессов с помощью моделирования и применение их в экспериментах.
4. Исследование процессов травления металлов в хлорсодержащей газовой фазе и аргоновой газовой фазе для формирования элементов плазмоники;
5. Исследование процессов травления оксида и нитрида кремния для формирования элементов плазмоники и наногетероструктурной СВЧ электроники;

6. Исследование приборных характеристик полученных элементов плазмоники и наногетероструктурной СВЧ электроники.

Научная новизна работы.

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

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

3. Показана возможность использования процессов реактивного ионного травления (РИТ) и реактивного ионного травления с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП РИТ) в 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 плазменном травлении на слоиное 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. Изготовлен спазер с резонатором на основе пленки серебра, обладающий узким спектром люминесценции (1,7 нм) и диаграммой направленности излучения (1,3°).

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

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

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Применение технологии двухэтапного плазменного травления пленки серебра в среде аргона в режимах с низкой и высокой ВЧ-мощностью позволяет формировать элементы конструкций устройств плазмоники, в том числе матрицы nanoотверстий для спазера, с размерами до 100 нм и наклоном стенок до 89 градусов.

2. Плазменное травление пленок серебра с размерами кристаллитов, сопоставимых с размерами топологических элементов устройств плазмоники, приводит к неконтролируемому искажению их формы.

3. Совместное использование источников ёмкостно-связанной и индуктивно-связанной плазмы позволяет уменьшить наклон стенок затворной щели Si₃N₄, формируемой в СВЧ транзисторах на основе GaN плазменным травлением в SF₆, с 90° до 75°.

4. Уменьшение напряжения смещения в плазме SF₆ до 10-15 В при травлении затворной щели в Si₃N₄ в наногетероструктурах In_{0,14}Al_{0,86}N(6 нм)/AlN(1 нм)/GaN в режимах реактивного ионного травления и реактивного ионного травления с источником индуктивно-связанной плазмы позволяет ограничить

десятью процентами рост слоевого сопротивления двумерного электронного газа.

Методология и методы исследования.

Результаты диссертации получены с применением комплекса экспериментальных метрологических (растровая электронная микроскопия, микроскопия с фокусированным ионным пучком, профилометрия, атомно-силовая микроскопия, измерения слоевого сопротивления, импульсные и СВЧ измерения) и технологических (различные методы и режимы плазменного травления) методик. Использовалось моделирование процесса травления в программном комплексе Silvaco TCAD. В работе использовалась теория физики плазмы, плазмоники, физики полупроводниковых приборов, статистические методы для анализа результатов экспериментов, численные методы Монте-Карло, физико-химические основы наноэлектроники.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном оборудовании в МГТУ им. Н.Э. Баумана, ТГУ и ТУСУР.

Степень достоверности и апробация работы.

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: Международном форуме по стратегическим технологиям «IFOST 2019», (Томск, 2019 г.), Международной конференции Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics

Conference (Мюнхен, 2019 г.), на международной конференции «Days of Diffraction» (Санкт-Петербург, 2017 г.), на международной конференции «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства» (Владимир-Суздаль, 2017 г.) и на 18-ой международной молодежной конференции «Наுகоемкие технологии и интеллектуальные системы - 2016» (Москва, 2016 г.).

Публикации. По материалам и основному содержанию диссертации опубликовано девять научных работ в научно-технических журналах и трудах конференций, из них две опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Три работы опубликованы в журналах, индексируемых в SCOPUS.

Личный вклад автора заключается в планировании и проведении экспериментальных исследований процессов плазменного травления [1-3], выполнении моделирования процессов [1], анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке материалов исследований к публикации [4-5]. Образцы со слоями серебра и наноотверстиями в резисте были изготовлены в «Научно-образовательном центре функциональных микро и наносистем МГТУ им. Н.Э. Баумана». Образцы гетероструктур изготавливались в ФТИ им. Иоффе РАН. Образцы СВЧ транзисторов и гетероструктур с тестовыми элементами изготавливались в Томском Государственном Университете и АО «НПФ «Микран».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы и решаемых в диссертации задач.

В первой главе проведен литературный анализ современного состояния исследований в области устройств плазмоники и наногетероструктурной электроники, рассмотрены возможности улучшения характеристик приборов за счет применения плазменных технологий в маршрутах формирования приборов плазмоники и наногетероструктурных СВЧ транзисторов.

Разработка спазеров является одним из ключевых направлений развития плазмоники. Однако полноценному развитию плазмоники препятствует отсутствие устройств, которые могут генерировать когерентные плазмонные поля. Спазер может генерировать вынужденное излучение поверхностных плазмонов (колебания свободных электронов в металлических наноструктурах) в резонирующих металлических наноструктурах, прилегающих к усиливающей среде. Но попытки реализовать спазер сталкиваются с проблемой потерь в металлах. Благодаря минимальным потерям в оптическом диапазоне в качестве материала для формирования резонатора спазера возможно использовать благородные металлы. Улучшить параметры спазера возможно за счет замены более простого в технологическом отношении золота на серебро, поскольку оно имеет наименьшие оптические потери в видимом и ближнем ИК диапазоне и наибольшую длину пробега плазмон-поляритона по поверхности. Однако применение Ag в технологии спазера требует решения ряда сложных технологических задач, связанных как с нанесением пленки, так и с формированием в ней матрицы наноразмерных (менее 200 нм) отверстий. Для формирования плазмонных элементов возможно использовать различные технологии литографии, плазмохимического осаждения и травления. Плазменное травление является технологией, позволяющей формировать различные элементы на целой пластине в едином процессе и широком спектре материалов. Оно имеет высокую повторяемость, скорость и равномерность при средней сложности и стоимости оборудования, что делает его использование в производстве экономически выгодным.

Для изготовления спазера процесс плазменного травления должен обеспечить следующие характеристики:

1. Селективность травления тонкой металлической пленки в спазере относительно маски выбранного резиста должна быть $\geq 1:1$ (скорость травления резиста должна быть меньше или равной скорости травления Ag или Au);
2. Угол наклона стенки должен быть как можно ближе к 90° ;
3. Край отверстий должен быть ровным, без переосажденного металла;
4. Форма отверстий должна быть одинаковой и соответствовать выбранной топологии (в данном случае - близкой к окружности).

Повышение рабочей частоты мощных СВЧ транзисторов предполагает прежде всего уменьшение длины затвора, расстояния исток-сток и затвор-канал. Использование гетероструктур на основе InAlN/GaN в сочетании с

использованием современных технологических процессов (плазменного травления, осаждения диэлектрических пленок, электронной литографии), позволяет увеличить максимальные частоты и мощности СВЧ транзисторов. Для успешного формирования затвора СВЧ транзистора процесс плазменного травления не должен вносить нарушения в полупроводниковую структуру, способные ухудшить электрофизические параметры двумерного электронного газа. Поскольку для транзисторов мм-диапазона использование дополнительного полевого электрода для снижения максимумов электрического поля в подзатворной области транзистора невозможно из-за роста входной емкости транзистора C_{gs} , приводящей к снижению усиления, основным способом снизить электрическое поле под затвором является формирование наклонных стенок в затворной щели.

Требования к процессу плазменного травления при изготовлении наногетероструктурных СВЧ транзисторов сводятся к необходимости обеспечить следующий набор свойств:

1. Селективность травления Si_3N_4 относительно маски электронного резиста должна быть $\geq 1:1$ (скорость травления резиста должна быть меньше или равной скорости травления Si_3N_4);

2. Угол наклона стенки должен быть меньше 90° ;

3. Процесс плазменного травления нитрида кремния должен обладать минимальным воздействием на электрофизические параметры двумерного электронного газа в гетероструктуре (подвижность и концентрацию электронов);

4. Перенос критического размера элемента топологии (CD) из маски резиста в нитрид кремния должен проходить с минимальным изменением размеров при максимальном аспектном соотношении глубины щели в диэлектрике к ширине щели.

Таким образом, для разработки современных приборов плазмоники и наногетероструктурной СВЧ одной из важнейших задач является разработка новых режимов технологии плазменной обработки поверхности, которые должны обеспечивать формирование наиболее критических элементов конструкции, находящихся в нанометровом диапазоне.

Среди методов плазменного травления процессы реактивного ионного травления (РИТ) (англ. *Reactive ion etching, RIE*) обладают возможностью гибкого выбора режимов травления в зависимости материала и целей процесса. Такие установки, помимо обеспечивающего режим РИТ источника емкостно-связанной плазмы (называемого также источником ВЧ плазмы) (англ. *Capacitively Coupled Plasma, CCP* и англ. *RF plasma source*), часто оснащаются источником индуктивно-связанной (ИСП) (англ. *Inductively Coupled Plasma, ICP*), в этом случае их называют ИСП РИТ (англ. *Inductively Coupled Plasma Reactive ion etching, ICP RIE*). В таких установках можно реализовать процессы распыления ионами инертных газов, процессы реактивного ионного травления в режиме РИТ (без подачи мощности на источник ИСП), процессы плазменного травления в ИСП режиме (без подачи ВЧ мощности на электрод емкостно-

связанной плазмы), а также режимы травления с одновременно включенными источниками ИСП и емкостно-связанной плазмы. Регулируя ВЧ мощность, подводимую к источнику емкостно-связанной плазмы (далее – ВЧ электроду), можно менять энергию бомбардирующей поверхность травящегося образца ионов, а регулируя ВЧ мощность, подводимую к ИСП источнику, можно менять концентрацию ионов в плазме.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы процессов плазменного травления, приведены результаты моделирования процессов травления пленок Ag и Si₃N₄ для формирования спазера и наногетероструктурного СВЧ транзистора.

Исследование зависимостей скоростей травления и получаемых профилей было проведено с помощью моделирования в программном комплексе *Silvaco*, модуль *Athena Elite*. Для моделирования процесса травления была выбрана модель Монте-Карло, поскольку она позволяет задать такие важные параметры процесса травления, как мощность, давление, концентрацию ионов и температуру. При этом есть возможность выбора режима травления за счет управления физической и химической компонентами реакции. Модель использует перенос ионов из нейтральной плазмы через темное пространство, окружающее электроды и стенки. Рассматривается процесс переноса большого количества ионов, включая их столкновения с различными газовыми составляющими. Рассчитанные распределения ионов используются для расчета потока ионов, падающего на поверхность подложки. Значение этого потока затем используется для расчета скорости травления путем интегрирования потока по «окну травления» в резисте в каждой точке на поверхности.

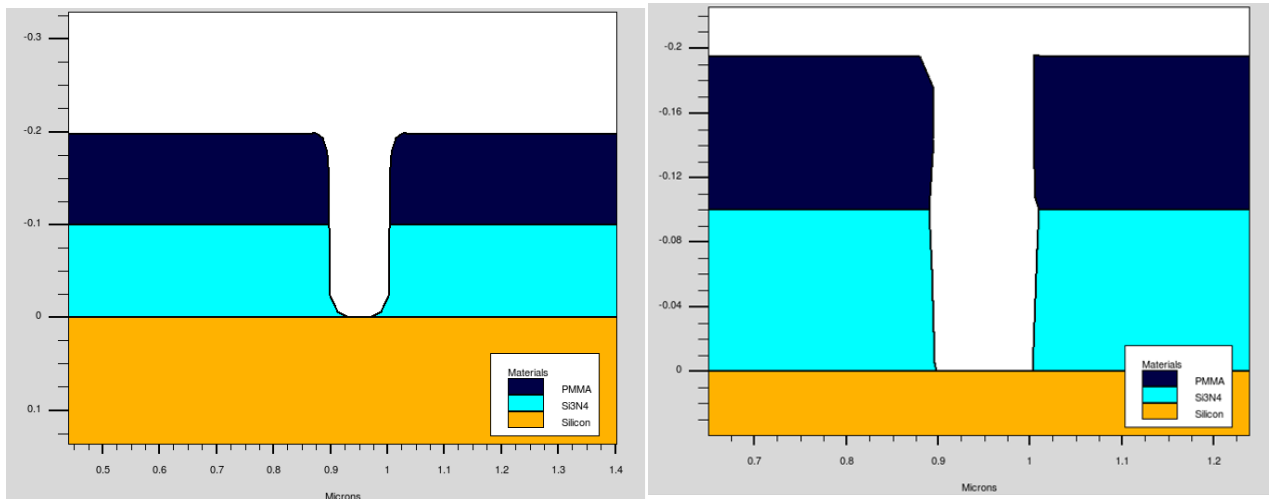
Для расчета скорости травления в модели применяется уравнение:

$$ER(m) = \sum_n EP(m, i) * v_{abs},$$

где n – количество типов ионов в плазме, заданное параметром *ION.TYPES*, $EP(m, i)$ – параметры материала m и ионов i , заданные параметрами *MC.ETCH1* и *MC.ETCH2*, v_{abs} – ионная скорость.

При моделировании процесса травления Ag в плазме Ag получены зависимости скорости травления и профиля от мощности ИСП источника.

Моделирование профиля травления Si₃N₄ показало, что требуемые для процессов изготовления СВЧ транзисторов профили травления можно получить для обоих исследованных режимов травления – ИСП РИТ и РИТ (рисунок 1). Для ИСП РИТ в нижней части щели можно получить наклонные стенки щели в Si₃N₄ с уменьшающимся критическим размером, что снижает максимальные значения электрического поля в стоковой стороне канала под затвором.



а)

б)

Рисунок 1 – расчетные профили травления Si_3N_4 , полученные для процессов ИСП РИТ (а) и РИТ (б)

В результате проведенного моделирования процессов РИТ и ИСП РИТ для травления тонких пленок Ag для спазеров и тонких пленок Si_3N_4 для наногетероструктурных СВЧ транзисторов было показано, что:

1. Процесс РИТ позволяет получить высокую анизотропию и близкий к 90 градусам угол наклона профиля травления как для процессов травления Ag , так и для травления Si_3N_4 ;

2. Использование ИСП РИТ приводит к значительному росту скорости травления, что необходимо учитывать при выборе режимов травления для предотвращения перетрава и обеспечения необходимого уровня контроля момента окончания травления;

3. При травления Si_3N_4 с использованием режима ИСП РИТ возникает наклон стенок вблизи дна затворной щели, что дает сужение размера щели по сравнению с размером в резисте;

4. Для травления пленок серебра и нитрида кремния через электронный резист возможно использовать как процессы РИТ, так и процессы ИСП РИТ.

В третьей главе приведены результаты разработки технологии формирования основного элемента спазера - матрицы наноотверстий в пленке Ag . Для этого выполнены исследования процессов плазмохимического травления (ПХТ) для оксида кремния, исследованы результаты влияния плазмы хлора или аргона на процесс формирования отверстий в пленке Ag и результаты оптимизации режимов травления. В качестве маски для травления использовался электронный резист ПММА либо двухслойная маска ПММА/ SiO_2 . Отработка процесса травления Ag велась на образцах из кремния, кварцевого стекла или слюды с осажденным слоем Ag толщиной 100 нм. В слое ПММА были сформированы отверстия с линейными размерами $150 \div 200$ нм, с расстоянием между центрами отверстий $545 \div 585$ нм.

Исследование процессов травления SiO_2 в смеси CHF_3/Ar позволило получить стенки SiO_2 с углом профиля в $89 \div 90^\circ$ градусов, использовавшиеся в

дальнейшем для травления Ag. Были проведены исследования процессов травления Ag в газовых смесях Ar/Cl, Ar/BCl₃ и Ar/HBr. Типичный результат, получаемый при травлении Ag через маску SiO₂, приведен на рисунке 2. В результате травления происходит перетрав в подложку Si и переосаждение частиц Ag на стенки маски SiO₂. Для устранения перетрава в подложку кремния необходимо уменьшать ВЧ мощность, подаваемую на емкостно-связанный источник плазмы (ВЧ электрод), по однако при этом наблюдается увеличение переосаждения Ag на стенки маски и деформация самих стенок маски.

Особенностью плазменного травления тонких пленок Ag является невозможность образования летучих химических соединений при комнатной температуре в камере травления. При использовании газовых смесей на основе Ar/HBr и Ar/BCl₃ наблюдалось агрессивное воздействие плазмы на Ag и резист, вызывающее оплавление резиста и разрушение пленки Ag. Также в ходе экспериментов наблюдалось частичное или полное удаление пленки Ag в ходе жидкостного травления маски SiO₂. Высокое аспектное соотношение при использовании маски SiO₂, и переосаждение частиц Ag в ходе травления на стенки маски является еще одной выявленной проблемой. Таким образом, для имеющихся режимов и условий получение управляемого процесса травления для двухслойной маски ПММА/SiO₂ реализовать крайне сложно.

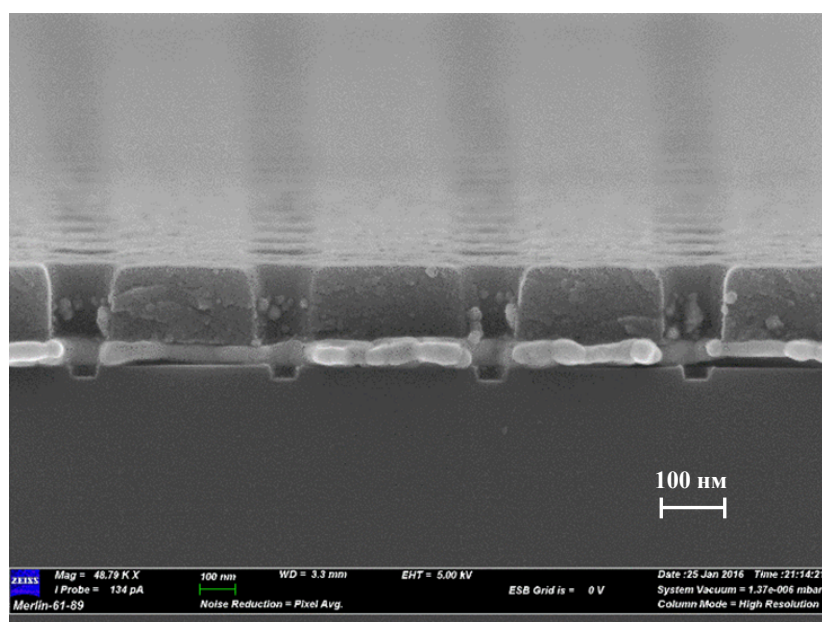


Рисунок 2 – Снимок в СЭМ скола образца после травления Ag толщиной 100 нм через маску SiO₂ в плазме Ar/Cl

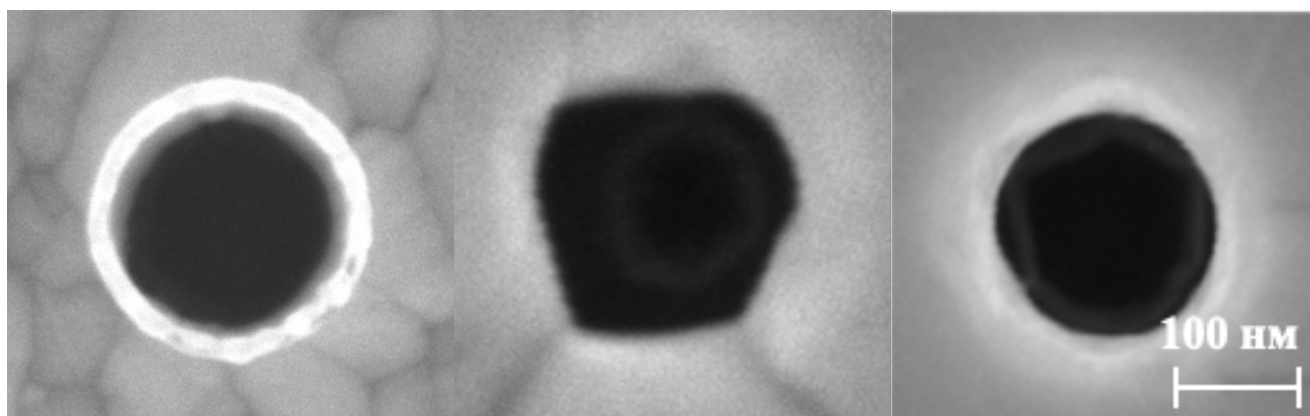
Исследование процесса травления с маской из электронного-лучевого резиста и уменьшенной мощностью ИСП, напротив, позволяет устранить проблемы, связанные с очисткой поверхности после травления. Для удаления с поверхности продуктов реакции и атомов металла необходимо повышать мощность ВЧ источника на подложкодержателе. Однако ПММА обладает низкой плазмостойкостью, из-за чего процессы травления Ag через маску ПММА имеют узкое процессное окно, которое удалось определить в результате

исследований. Для исключения деформации ПММА из-за перегрева были определены допустимые мощности генераторов источника ИСП и ВЧ мощности нижнего электрода. Поскольку ПММА обладает низкой стойкостью к хлорсодержащей плазме, процессы травления проводилось в плазме Ag. Были определены скорости травления Ag в плазме Ag для различных мощностей источников плазмы.

Эксперименты по травлению Ag через маску ПММА показали, что электронно-лучевой резист не выдерживает высокие мощности источника ИСП: в процессе травления происходит перегрев резистивного слоя и дальнейшее его оплавление. Было установлено, что резист ПММА не оплавляется в течение 3÷5 минут травления на любых из используемых типов подложек при обработке в плазме с мощностью источника ИСП меньше 300 Вт. В результате травления пленки Ag толщиной 100 нм через ПММА резист толщиной 300 нм на подложке из слюды при выбранных параметрах (мощность источника ИСП 100 Вт, мощность на ВЧ электроде 300 Вт, давление в камере 1 мторр, поток аргона 16 см³/мин) вокруг отверстий образовались ореолы из переосажденных на стенки маски частиц Ag. Измерения внутренних диаметров также показали, что наклон стенок после травления составляет 65÷75°. Для устранения переосаждения Ag на стенки маски, толщина ПММА была уменьшена с 300 нм до 130 нм.

В дальнейших исследованиях была выявлена зависимость формы отверстий от размеров кристаллитов пленки Ag (рисунок 3). Травление отверстий первого типа (рисунок 3,а) на образцах с тонкопленочным покрытием Ag, имеющих наименьший размер зерна Ag (5÷10 нм), происходит с переосаждением продуктов травления на маску ПММА. Второй тип отверстий (рисунок 3,б) имеет наилучший угол стенок, но наихудшую форму, так как отверстия расположены на границе зерен размером более 500 нм. Третий тип отверстий (рисунок 3,в), имеет наилучшую форму и угол, так как попадает на поверхность крупного зерна пленки Ag размером более 1 мкм.

Обнаруженный эффект меняет требования к режимам осаждения и последующей обработки образцов, содержащих слой Ag. Чтобы исключить рекристаллизацию пленок Ag при формировании маски травления, все стандартные обработки на стадии литографии были скорректированы в сторону температур, не меняющих кристаллическую структуру пленки. Чтобы предотвратить рекристаллизацию серебряных пленок, были определены допустимые режимы литографии электронным пучком и режимы (время и мощность) для процесса плазменного травления. Это позволило получить высокую повторяемость критических размеров, формы и глубины наноструктур на больших площадях (более 500 × 500 мкм) без повреждения пленок Ag.



а) б) в)
Рисунок 3 – Форма отверстий в пленках серебра при различных размерах кристаллитов: а - $5 \div 10$ нм, б – более 500 нм, в – более 1 мкм

Для сохранения формы отверстия и профиля отверстий был разработан двухстадийный процесс травления. На первом этапе травилось 70-80% всей толщины Ag, затем, с мощностью 300 Вт, подаваемой на ВЧ электрод, травилась оставшаяся 20-30% толщины пленки Ag. Увеличение энергии позволяет удалять частицы Ag на большей глубине вплоть до дна получаемых отверстий, а также позволяет улучшить равномерность травления и угол профиля. На рисунке 4 приведены полученные на подложке из слюды матрицы отверстий для спазера. Давление составляло 1 мторр, поток Ag $16 \text{ см}^3/\text{мин}$, температура подложки 30°C . Полученные отверстия имеют близкую к окружности форму, при этом переосаждение серебра на стенки практически отсутствует. Угол наклона стенок был определен равным 85° . Аналогичный результат был получен в том же режиме травления Ag на подложке из кварца.

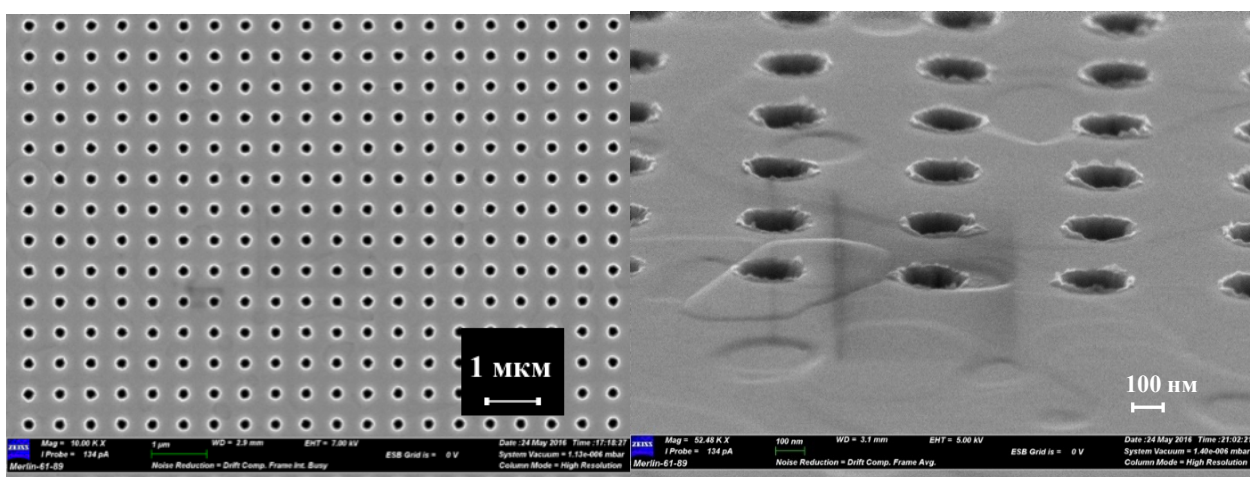


Рисунок 4 – Полученные двухэтапным травлением Ag матрицы отверстий для создания спазера

Применение разработанного двухэтапного режима травления Ag позволило создать спазер с использованием плазмонного кристалла и молекул красителя в качестве активной среды. Резонатор спазера был образован матрицей нанотверстий в пленке Ag. Были изготовлены кристаллы с

различными периодами и диаметром отверстий. Усиливающая среда, нанесенная поверх матрицы спазера для измерения эмиссии, была образована раствором красителя R101 в диметилсульфоксиде с концентрацией $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Результаты измерений спектров излучения спазера на основе наночастиц золота и матрицы отверстий в серебре приведены на рисунке 5. Интенсивность излучения спазера в зависимости от мощности накачки в обоих случаях носит пороговый характер. У спазера на основе Ag величина пороговых значений составила $0,5 \text{ МВт/см}^2$. Для предотвращения выгорания люминофора использовался импульсный режим накачки: длина импульса 10 нс с частотой 40 Гц.

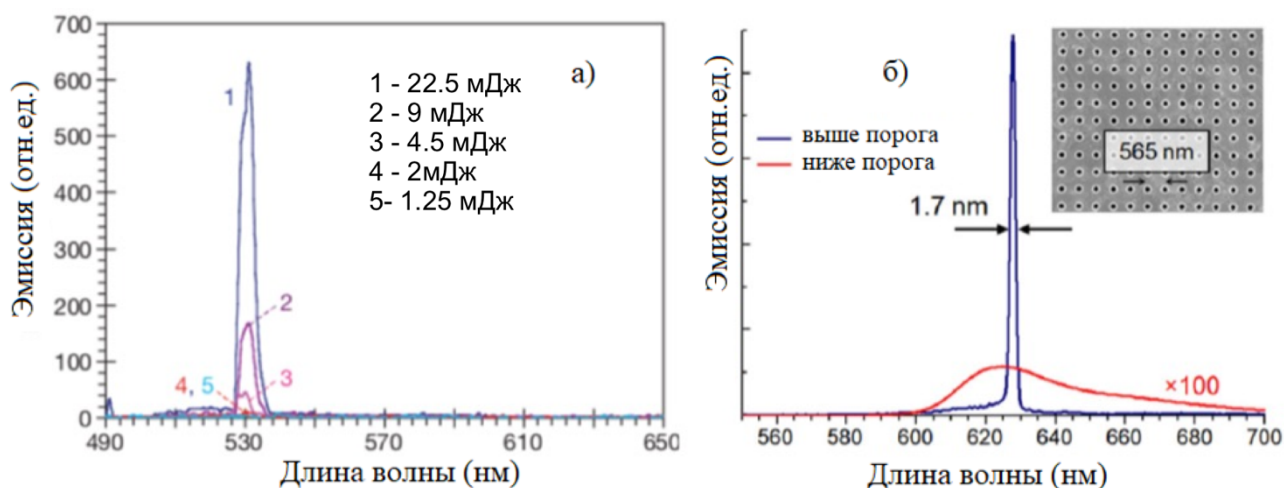


Рисунок 5 – Сравнение спектров эмиссии спазеров на основе наночастиц золота (а) (цифрами показаны разные мощности накачки), и на основе матрицы отверстий в пленке серебра (б)

По сравнению с известными из литературы параметрами спазера на основе наночастиц золота, спазер на основе матрицы отверстий в пленке Ag демонстрирует более узкий спектр излучения на длине волны 628 нм (1,7 нм) при более узкой диаграмме направленности ($1,3^\circ \times 4,1^\circ$). В результате измерений спектров излучения спазеров с резонатором на основе матрицы отверстий в серебре были получены зависимости потерь в спазере от радиуса и периода отверстий в матрице показанная на рисунке 6.

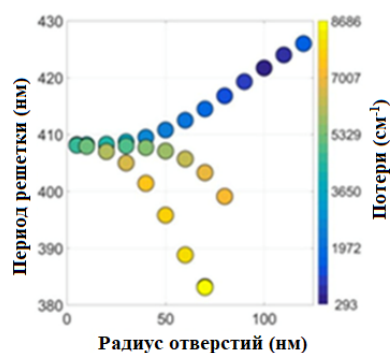


Рисунок 6 – Зависимости потерь в спазере от радиуса и периода отверстий в матрице

В четвертой главе приведены результаты разработки режимов формирования щели затворов наногетероструктурных СВЧ транзисторов с помощью процессов плазменного травления и сравнение результатов моделирования с экспериментами, для предварительной оценки скоростей травления. Влияние параметров плазменной обработки на электрофизические свойства двумерного электронного газа (2DEG) изучалось на гетероструктуре $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}$, выращенной методом MOVPE на подложках SiC и Al_2O_3 . Эпитаксиальные слои включали в себя зародышевый слой AlN, изолирующий буферный слой, промежуточный слой AlN толщиной $1\div 1,5$ нм, слой InAlN толщиной 5 нм и осажденный *in situ* Si_3N_4 толщиной 5 нм. Подвижность электронов, их слоевая концентрация в 2DEG и слоевое сопротивление гетероструктуры составляли около $1100 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $2,1\div 2,5\cdot 10 \text{ см}^{-3}$ и $220\div 270 \text{ Ом}/\square$ соответственно. Для формирования ножки Т-образного затвора на поверхность гетероструктуры был осажден Si_3N_4 толщиной 100 нм. В процессе электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) использовался резист на основе ПММА (PMMA950K) и плазмостойкий резист AR-P 6200 (CSAR62). Деградация электрофизических параметров 2DEG в образцах оценивалась в тестовых элементах по изменению слоевого сопротивления (R_s) и изменению тока насыщения в транзисторах.

Для определения допустимых режимов плазменной обработки проведено исследование влияния плазменной обработки на параметры InAlN/GaN гетероструктур для СВЧ НЕМТ. Была обнаружена высокая чувствительность 2DEG в InAlN/GaN гетероструктурах с тонким барьерным слоем к обработке поверхности в O_2 и Ar плазме. Параметрами процесса РИТ, в наибольшей степени влияющем на деградацию 2DEG, являются ВЧ мощность, подводимая к плазме, и газовый состав плазмы. Оба в значительной степени определяют напряжение смещения в плазме – параметр процесса, связанный с физической компонентой процесса травления.

Обнаружено, что, начиная с определенного порога подводимой мощности воздействие O_2 плазмы на поверхность транзисторов на гетероструктурах InAlN/GaN приводит к значительному росту слоевого сопротивления в наногетероструктуре. Поэтому для формирования затворов на гетероструктурах с тонким барьерным слоем режимы плазменной очистки поверхности должны быть скорректированы в сторону снижения подводимой мощности.

В отличие от гетероструктур InAlAs/GaAs и AlGaAs/GaAs, эффект деградации параметров InAlN/GaN гетероструктур в результате плазменной обработки (в зарубежной литературе обозначаемый термином *plasma induced damage*) мало изучен. Поскольку InN обладает самой слабой прочностью молекулярных связей (7,72 эВ) по сравнению с другими нитридами третьей группы (у GaN 9,12 эВ, у AlN 11,52 эВ), InAlN будет также обладать большей чувствительностью к плазменному воздействию, чем GaN. Энергии связи на поверхности могут быть значительно меньше, чем в объеме. Еще одним фактором, увеличивающим воздействие ионов плазмы на свойства двумерного электронного газа, является близость 2DEG к поверхности (типичная толщина

барьерного слоя транзисторной гетероструктуры для AlGaN составляет $20 \div 30$ нм, а для InAlN $5 \div 10$ нм).

Плазменное травление проводилось в режимах РИТ и ИСП РИТ. Влияние напряжения смещения в плазме при 1-минутной обработке в Ar в ИСП РИТ ИСП в режиме плазмы на слоевое сопротивление (R_s) 2DEG и плотность тока (I_{ds}) в InAlN/GaN НЕМТ показано на рисунке 7. Характер полученной зависимости показывает, что для плазменных процессов на InAlN/GaN-гетероструктурах с тонким барьерным слоем могут быть использованы только режимы со смещением < 50 В.

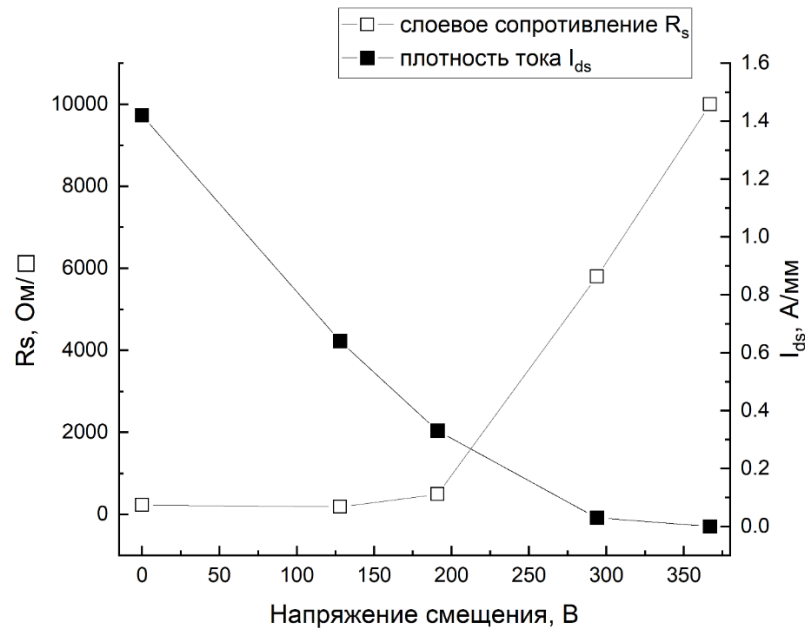


Рисунок 7 – Влияние напряжения смещения в ВЧ электроде при плазменной обработке поверхности в Ar на слоевое сопротивление R_s и плотность тока I_{ds} InAlN/GaN НЕМТ. Нулевой мощности и смещению соответствуют параметры до обработки.

Допустимые диапазоны ВЧ мощности и смещения плазмы различаются в зависимости от используемого состава газовой смеси и режима плазмы. Так, при напряжении смещения 10 В обработка в режиме РИТ плазме SF_6 в течение 1 мин увеличивает слоевое сопротивление гетероструктуры InAlN/GaN на 10% (рисунок 8). Селективность травления резистов РММА950К и AR-P 6200 для всех выбранных режимов составляет около 0,45 и 0,7 соответственно, что накладывает ограничение на толщину используемого при литографии электронно-лучевого резиста. Использование плазмостойких резистов, в частности AR-P 6200, позволяет снизить толщину резиста в $1,5 \div 2$ раза, что упрощает получение и перенос в пленку Si_3N_4 топологических размеров менее 200 нм. Данная проблема может быть решена за счет смены резиста, либо за счет выбора других газовых смесей. Проведенные эксперименты по добавлению в газовую смесь на основе SF_6 других газов (Ar, He, CHF_3) позволили выявить ряд закономерностей. Добавление CHF_3 позволяет значительно увеличить селективность травления: для газовой смеси на основе

$SF_6:CHF_3:He$ для режимов РИТ и ИСП РИТ селективность находится в диапазоне $1,5 \div 3$. Однако добавление CHF_3 приводит к образованию полимеров на поверхности щели, что приводит к появлению неровностей в щели и сужению размера в нижней части щели. Этот эффект усиливается при повышении давления и снижении ВЧ мощности, и для его устранения необходимо либо увеличивать время травления, либо увеличивать ВЧ мощность по мере заглубления щели, что в равной степени неприемлемо при травлении гетероструктур с тонким барьерным слоем.

На основании выявленных закономерностей сделан вывод о том, что добавление CHF_3 в газовую смесь, несмотря на увеличение селективности, усложняет получение ровных границ затворной щели без внесения значительных дефектов от ионной бомбардировки поверхности полупроводника. Эксперименты по добавлению Ar в газовую смесь $SF_6:CHF_3$ показали, что аргон увеличивает вызванный ионной бомбардировкой рост слоевого сопротивления полупроводника. Добавление He в SF_6 , не позволяет уменьшить мощность источника ИСП, которая необходима для поддержания стабильного газового разряда и несколько снижает скорость травления.

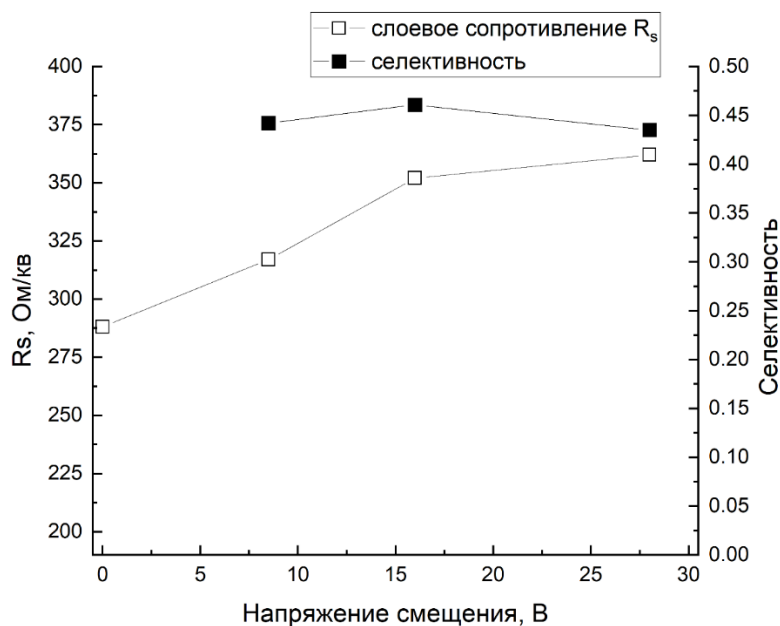


Рисунок 8 – Зависимость слоевого сопротивления R_s InAlN/GaN-гетероструктуры и селективности травления PMMA/Si₃N₄ от напряжения смещения для РИТ в SF_6 . Нулевому смещению соответствуют параметры структуры до травления

Благодаря большой атомной массе образуемых в плазме SF_6 ионов, как для режима РИТ, так и для ИСП РИТ можно реализовать режимы с низкими значениями напряжения смещения. Это позволяет ограничить энергию ионов, бомбардирующих поверхность образца. Низкая скорость и большой размер ионов, бомбардирующих поверхность материала при травлении, ограничивают глубину их проникновения в полупроводник, что обуславливает минимальное изменение электрофизических параметров 2DEG. Однако высокая скорость

распыления затрудняет использование маски ПММА в плазме SF₆ при травлении затворной щели InAlN/GaN НЕМТ. Решением является использование плазмостойкого электронного резиста AR-P 6200. Отличие в селективности AR-P 6200 по сравнению с резистом на основе ПММА для режима ИСП РИТ составляет более чем в 2,5 раза (Таблица 1).

Таблица 1 – Параметры процессов травления в плазме SF₆

№	ИСП/ВЧ мощность, Вт	Напряжение смещения, В	Время процесса, мин	V(Si ₃ N ₄), нм/мин	Селективность к ПММА950К	Селективность к AP-R 6200	ΔRs/Rs , %
1	0/30	5,5	1	90	0,63	1,0	5
2	1000/50	26	0,5	360	0,38	-	162
3	1200/50	38	0,5	660	0,35	-	339
4	1200/20	15	0,5	230	0,56	1,4	4

Для режима РИТ отличия в значениях селективности меньше, тем не менее, они позволяют уменьшить до 0,2 мкм толщину AR-P 6200 при формировании затворных щелей транзисторов. Толщина AR-P 6200 для процесса ИСП РИТ может быть уменьшена до 0,15 мкм, что должно позволить формировать затворные щели размером 50÷70 нм с сохранением аспектного соотношения для щели не более 3 и толщине слоя Si₃N₄ 105 нм.

Исследование процесса травления в режиме РИТ (рисунок 9) и ИСП РИТ, показало, что травление затворных щелей в Si₃N₄ на гетероструктурах InAlN/GaN с тонким барьерным слоем должно проводиться при ВЧ мощности, создающей напряжение смещения не более 10 В (для РИТ) и не более 15 В (для ИСП РИТ). Для РИТ и ИСП РИТ в SF₆ через маску из AR-P 6200 были изготовлены щели затворов НЕМТ и определены изменения в топологических размерах в результате травления. Полученные в сканирующем электронном микроскопе и с помощью фокусированного ионного пучка изображения затворных щелей демонстрирует угол наклона стенок 75÷85° для режима ИСП РИТ, в то время как наклон стенок для РИТ режима составляет 80÷90°.

Проведенные исследования показали, что найденные закономерности и режимы травления могут быть использованы для формирования щелей затвора наногетероструктурных СВЧ транзисторов как на основе AlGaIn/GaN и InAlN/GaN. Чувствительность AlGaIn/GaN гетероструктур к плазменному воздействию ниже, поэтому для травления Si₃N₄ той же толщины (105 нм) через маску AR-P 6200 найденные режимы РИТ и ИСП РИТ позволяют избежать заметной деградации слоевого сопротивления. Основные параметры СВЧ транзисторов на основе AlGaIn/GaN и InAlN/GaN гетероструктур приведены в Таблице 2.

Измеренные (для частоты 10 ГГц) и расчетные (с помощью нелинейной СВЧ модели для частоты 30 ГГц) СВЧ параметры транзисторов находятся на уровне либо превосходят параметры известных из литературы GaN транзисторов, что подтверждает применимость предложенного подхода к формированию затвора. Разработанные процессы РИТ и ИСП РИТ для щелей в

Si_3N_4 с размерами меньше 200 нм можно использовать для формирования затворов гетероструктурных транзисторов на основе GaN с тонким (менее 7 нм) барьерным слоем без внесения дефектов, приводящих к значительной (более 10%) деградации электрофизических параметров материала.

Таблица 2 – Параметры изготовленных транзисторов

	0.25 мкм AlGaIn/GaN HEMT	0.15 мкм AlGaIn/GaN HEMT	0.15 мкм InAlIn/GaN HEMT
Диапазон частот, ГГц	≤ 18	≤ 40	≤ 40
Максимальный ток, А/мм	1.0	1.0	1.6
Рабочее напряжение, В	≤ 40	≤ 30	≤ 30
Напряжение пробоя, В	≥ 150	≥ 120	≥ 120
Длина затвора, мкм	0.25	0.15	0.15
Удельная выходная мощность (Вт/мм)	4÷6 (10 ГГц)	3 Вт/мм (30 ГГц)*	4÷4.8 Вт/мм (30 ГГц)*
КПД по добавленной мощности (PAE), %	50% (10 ГГц)	45÷50% (30 ГГц)	45÷50% (30 ГГц)
Коэффициент усиления по мощности (MaxGain), дБ	>14 дБ (10 ГГц)	>12 дБ (30 ГГц)	>14 дБ (30 ГГц)

*расчет

Применение разработанных режимов травления Si_3N_4 для изготовления $\text{In}_{0.14}\text{Al}_{0.86}\text{N}$ (6нм)/AlN(1нм)/GaN позволяет, по сравнению с AlGaIn/GaN HEMT, увеличить усиление и выходную мощность транзистора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен комплекс исследований, направленных на изучение возможностей использования процессов плазменного травления при создании современных приборов нанoeлектроники – спазера и наногетероструктурного СВЧ транзистора.

Основные научные и практические выводы, полученные в работе:

1. Обнаружено, что форма отверстий, получаемых в пленке серебра при травлении в плазме Ag, зависит от размеров кристаллитов в данной области, которые, в свою очередь, определяются режимами осаждения слоя серебра и температурными режимами, выбранными для операций по формированию маски.

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

3. Обнаружено, что использование CHF_3 и Ag для травления 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 ИСП при малых мощностях.

4. Показано, что процесс ИСП РИТ в плазме SF₆ обладает селективностью при травлении через маску AR-P 6200, что дает возможность получать наклонный угол в щели травления, в то время как угол в щели при травлении в режиме РИТ близок к 90°.

5. Использование плазмы SF₆ с низкими значениями напряжения смещения до 10-15 В при травлении затворной щели в Si₃N₄ в наногетероструктурах In_{0,14}Al_{0,86}N(6 нм)/AlN(1 нм)/GaN в режимах реактивного ионного травления и реактивного ионного травления с источником индуктивно-связанной плазмы исключает рост слоевого сопротивления двумерного электронного газа.

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. Сер. Приборостроение, 2020, № 4, с. 165–180. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-4-165-180>.
2. Филиппов И.А., Шахнов В.А., Великовский Л.Э., Брудный П.А., Демченко О.И. Плазменное травление в технологии InAlN/GaN НЕМТ. Изв. вузов. Физика, 2020, № 1, с. 84-87. DOI: 10.17223/00213411/63/1/84.

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 “Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы.” Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. P. 208–213.
8. Филиппов И.А. Проектирование чувствительного элемента микрокселерометра для систем контроля доступа // 16-ая международная

конференция “Научно-технологические и интеллектуальные системы.”
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. Р. 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.