

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет)

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

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

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
доцент Сахаров Юрий Владимирович

Томск 2020

## Список сокращений

ИМС - интегральные микросхемы;  
ПХТ – плазмохимическое травление;  
ПММА – Полиметилметакрилат;  
ПО – программное обеспечение;  
МТП - маршрутный технологический процесс;  
МЛЭ, МВЕ - молекулярно-пучковая эпитаксия;  
МИС - микроволновая монолитная интегральная схема;  
ИСП – индуктивно-связная плазма;  
ВЧ плазма, RF plasma – плазма, создаваемая источником емкостно-связанной плазмы;  
RIE, РИТ – реактивное ионное травление;  
ICP RIE, ИСП РИТ – реактивное ионное травление с источником индуктивно-связной плазмы;  
LPCVD - химическое осаждение из газовой фазы при низком давлении;  
PECVD - стимулированное плазмой химическое вакуумное осаждение из газовой фазы;  
ICP CVD - стимулированное индуктивно-связанной плазмой химическое вакуумное осаждение из газовой фазы;  
ALD – атомно-слоевое осаждение;  
CD – критический размер элемента топологии;  
SEM, СЭМ – сканирующий электронный микроскоп;  
2DEG - двумерный электронный газ;  
HEMT, ТВПЭ - транзистор с высокой подвижностью электронов;  
MOCVD - осаждение металлоорганических соединений из газовой фазы;  
FIB – микроскопия с фокусируемым ионным пучком;  
PAE – КПД по добавленной мощности транзисторов;  
P<sub>out</sub> – выходная мощность транзисторов;  
Gain – коэффициент усиления транзисторов.

## СОДЕРЖАНИЕ

## ВВЕДЕНИЕ 5

ГЛАВА 1. Процессы плазменного травления в наногетроструктурной СВЧ электронике и плазмонике .....	13
1.1 Плазменное травление в технологии устройств и элементов плазмоники	13
1.1.1 Современные устройства плазмоники .....	13
1.1.2 Применение плазменного травления в технологии устройств плазмоники .....	15
1.2 Плазменное травление в технологии наногетроструктурной СВЧ электроники.....	21
1.2.1 Современные устройства наногетроструктурной СВЧ электроники	21
1.2.2 Применение плазменного травления в технологии наногетроструктурных СВЧ транзисторов .....	23
1.3 Современные методы плазменного травления.....	28
1.3.1 Классификация методов плазменного травления.....	28
1.3.2 Особенности реактивно-ионного травления.....	30
1.4 Основные результаты и выводы главы 1 .....	34
ГЛАВА 2. Процессы плазменного травления для формирования структур в нанoeлектронике и их моделирование .....	35
2.1 Физико-химические аспекты процессов травления .....	35
2.2 Моделирование процессов травления тонких пленок серебра .....	42
2.3 Моделирование процессов травления тонких пленок нитрида кремния...	51
2.4 Основные результаты и выводы главы 2.....	52
ГЛАВА 3. Процессы плазменного травления для создания наноразмерного источника света .....	54
3.1 Подготовка образцов и формирование маски для травления.....	54
3.2 Формирование твердой маски из SiO <sub>2</sub> для травления серебра.....	55
3.3 Процесс плазменного травления серебра.....	58
3.4 Основные результаты и выводы главы 3.....	80

ГЛАВА 4. Процессы плазменного травления для формирования элементов СВЧ транзисторов.....	82
4.1 Технология изготовления затвора транзисторов .....	82
4.2 Влияние плазменной обработки на параметры гетероструктуры НЕМТ..	84
4.3 Травление $\text{Si}_3\text{N}_4$ в газовых смесях на основе $\text{SF}_6$ через маску ПММА.....	89
4.4 Травление $\text{Si}_3\text{N}_4$ в $\text{SF}_6$ через маску резиста AR-P 6200 .....	92
4.5 Формирование затворных щелей в $\text{Si}_3\text{N}_4$ .....	94
4.6 Основные результаты и выводы главы 4.....	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	103
СПИСОК литературы .....	105

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы 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 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 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.

Технология плазменного травления является важной частью современных технологий микроэлектроники, наноэлектроники, оптоэлектроники и микромеханики [1–7]. Актуальность диссертационной работы заключается в применении 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.

**Степень разработанности темы.** Для создания устройств плазмоники и нового поколения устройств наногетероструктурной СВЧ электроники нужно решить ряд задач, включающих в себя создание бездефектных металлических и диэлектрических пленок, разработку методов формирования наноструктур заданного профиля с размерами от 50 до 200 нм при допусках  $\pm 5\%$ , а также разработку методов контроля качества их изготовления. Особую важность имеет разработка такого сочетания процессов, которое позволило бы осуществить перенос топологического рисунка, сформированного в маске резиста, в требуемой конструкцией прибора материал (диэлектрик в случае наногетероструктурной СВЧ микроэлектроники, металл в случае плазмоники). Методы «сухого» плазменного травления в низкотемпературной неравновесной газоразрядной плазме являются основными методами, применяемыми для переноса топологического рисунка с субмикронным размером. Они обеспечивают точный контроль процесса формирования топологии и позволяют формировать сложные по форме и параметрам структуры, в том числе щели с линейными размерами менее 100 нм и углами профиля  $< 90^\circ$ . Применение широкого спектра процессных газов позволяет гибко управлять параметрами процессов, адаптируя их к требованиям конструкции и технологии конкретного прибора. Использование процессов плазменного травления необходимо прежде всего при формировании самых важных элемента конструкции как транзистора мм-диапазона (затвор), так и наноразмерного источника света (матрицы наноразмерных отверстий в металлической пленке). В технологии изготовления данных элементов чаще всего используется электронная литография субмикронной щели в сочетании с переносом рисунка в резисте в слой диэлектрика методами плазменного травления. Формируемые элементы должны отвечать жестким требованиям конструкции приборов, а технология их формирования должна обеспечивать надежность и вос-

производимость параметров приборов, что предполагает разработку процессов, отличающихся минимальной дефектностью, необходимым уровнем контроля параметров. Данная работа является первым отечественным исследованием применения плазменного травления в данных областях технологии приборов плазмоники и наногетероструктурной СВЧ электроники. Ведущими учеными в области мощных наногетероструктурных 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.

Серебро имеет теоретически наименьшие потери в видимом и ближнем ИК диапазоне среди всех металлов, поэтому является наиболее привлекательным материалом для плазмоники. Однако при работе с тонкими пленками серебра возникает ряд проблем, делающих его использование сложной технической задачей, имеющей мало примеров успешного решения, в особенности с применением промышленного технологического оборудования [8–10].

Повышение частоты работы мощных СВЧ транзисторов требует использования новых типов наногетероструктур, отличающихся высокими электрофизическими параметрами (низким слоевым сопротивлением, высокой подвижностью) при тонком ( $5\div 10$  нм) барьерном слое, отделяющем двумерный электронный газ наногетероструктуры от поверхности. Транзисторы на основе наногетероструктуры InAlN/GaN являются предметом значительного количества исследований [11–14], однако имеется ограниченное количество публикаций, где приводятся сведения о влиянии ионной бомбардировки на параметры гетероструктур типа InAlN/GaN и параметрах плазменного травления при изготовлении затвора [15,16].

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных разработанным приборам наноплазмоники и наногетероструктурной СВЧ электроники, количество публикаций, посвященных технологическим аспектам формирования наиболее критических элементов данных приборов, достаточно невелико. При этом важнейшие параметры технологических процессов, в частности параметры процессов плазменного травления, в них, как правило, не приводятся. Данная работа является одним из первых отечественным исследованием применения плазменного травления для формирования элементов конструкции современных приборов плазмоники и наногетероструктурных InAlN/GaN транзисторов для СВЧ электроники.

**Цель и задачи исследований.** Целью работы является исследование процессов формирования наиболее важных элементов конструкции современных нанoeлектронных 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.
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  $SF_6$  для формирования затворных щелей в  $Si_3N_4$  с углами наклона стенок  $80\div 90^\circ$  (РИТ) и  $75\div 85^\circ$  (ИСП РИТ).

4. Выявлено влияние напряжения смещения и состава газовой смеси при плазменном травлении на слоиое 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 узкими спектром люминесценции (1,7 нм) и диаграммой направленности излучения ( $1,3^\circ$ ).

3. Предложена конструкция СВЧ транзистора миллиметрового диапазона на основе GaN с тонким барьерным слоем и щелью затвора с наклонными стенками, сформированной с помощью плазменного травления  $Si_3N_4$ .

4. Оптимизированы режимы плазменной обработки затворной щели в  $Si_3N_4$ , обеспечивающие минимальную деградацию слоиое сопротивления двумерного газа эпитаксиальных гетероструктур  $In_{0,14}Al_{0,86}N/AlN/GaN$ .

### **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 слоиое сопротивления, импульсные и СВЧ измерения) и технологических (различные методы и режимы плазменного травления) методик. Использовалось моделирование процесса травления в программном комплексе Silvaco TCAD. В ра-

боте использовалась теория физики плазмы, плазмоники, физики полупроводниковых приборов, статистические методы для анализа результатов экспериментов, численные методы Монте-Карло, физико-химические основы нанoeлектроники.

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

### **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 нанootверстий 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  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , формируемой в СВЧ транзисторах на основе GaN плазменным травлением в  $\text{SF}_6$ , с  $90^\circ$  до  $75^\circ$ .

4. Уменьшение напряжения смещения в плазме  $\text{SF}_6$  до 10-15 В при травлении затворной щели в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в наногетероструктурах  $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}(6 \text{ нм})/\text{AlN}(1 \text{ нм})/\text{GaN}$  в режимах реактивного ионного травления и реактивного ионного травления с источником индуктивно-связанной плазмы позволяет ограничить десятью процентами рост слоевого сопротивления двумерного электронного газа.

### **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: 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.

**Публикации.** По материалам и основному содержанию диссертации опубликовано десять 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, выполнении моделирования процессов, анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке

материалов исследований к публикации. 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».

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованных источников. Содержит 111 стр. машинописного текста, 49 рисунков и 16 таблиц. Библиография включает 72 наименования.

# ГЛАВА 1. ПРОЦЕССЫ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ В НАНОГЕТРОСТРУКТУРНОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКЕ И ПЛАЗМОНИКЕ

## 1.1 Плазменное травление в технологии устройств и элементов плазмоники

### 1.1.1 Современные устройства плазмоники

В 1965 году В.М. Аграновичем и В.Л. Гинзбургом была изложена теория взаимодействия лазерного излучения с веществом, в результате которого формируются поверхностные электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль границы разделов двух сред, у которых диэлектрическая проницаемость имеет противоположные знаки [17]. В таких металлах как Au и Ag, групповые плазменные колебания, квазичастицей которых и является плазмон, отвечают за их оптические свойства. В зависимости от плазменной частоты происходит отражение света, либо пропускание. В работах по изучению поверхностных плазмон-поляритонов, выполненных в 60-х и 70-х годах Э. Кречманном, А. Отто, Х. Рэтером и М. Флейшманом, были найдены основные технические и теоретические принципы, реализация которых на современном оборудовании позволила перейти к разработке и созданию устройств плазмоники.

Уникальные свойства плазмоники должны позволить создавать накопители данных высокой плотности, усовершенствованные оптико-электронные компоненты и многие другие оптические технологии будущего. Результаты опубликованных в 2013-2019 году работ [18–23] подтверждают экспериментальную реализацию следующих устройств:

- Активных нанофотонных схем с использованием диэлектрических волноводов;
- Метаматериалы на основе использования наноплазмонных структур;
- Массивы плазмонных нанооверстий для нелинейных световых взаимодействий.

Одним из важных применений плазмоники является молекулярная спектроскопия и детектирование биомолекул. Увеличение чувствительности методов флуоресцентной спектроскопии открывает новые возможности в исследовании ДНК [24], флуоресцентной наноскопии и др.

Интеграция современных полупроводниковых технологий с плазмонными элементами является ключевым вопросом в создании подобных типов устройств. В современных устройствах используются многоядерные процессоры, которые в активной фазе своей работы могут интенсивно обмениваться информацией, например между чипом памяти, из-за этого каналы связи испытывают большую нагрузку и могут не успевать быстро обрабатывать все запросы. Дальнейшее развитие устройств связано с увеличением производительности. Многоядерность является современным трендом, однако тактовая частота или рабочая частота полупроводниковой промышленности будет оставаться прежней и не будет способна отвечать этим современным реалиям. Элементы плазмоники работают на оптических рабочих частотах порядка ТГц. Решением проблемы потерь и высокой «плотности» информации, является создание оптических соединителей между двумя чипами. Оптические волноводы способны передавать данные в 1000 раз быстрее, чем электронные. Носителем информации в плазмонике является поверхностный плазмон-поляритон, что позволяет создать элементы меньше длины волны света (суб-волновые). Все это является огромными преимуществами при создании устройств нового поколения.

Анализ опубликованных работ в области плазмоники позволяет выделить ряд ключевых устройств и направлений исследований [18,19,24–28]:

- Теоретические и экспериментальные исследования волноводов и компонентов волновода на основе поверхностных плазмонов, предназначенных для уменьшения размеров фотонных схем и уменьшения потребления энергии активных электронных компонентов;
- Создание оптических соединений для интеграции в серверы для увлечения производительности, снижения энергии потребления и себестоимости;

- Спазеры и оптические элементы;
- Солнечные батареи;
- Биосенсоры.

### 1.1.2 Применение плазменного травления в технологии устройств плазмоники

Для того чтобы компенсировать оптические потери, которые также возникают в плазмонных волноводах, создают специальную среду усиления, которая состоит из красителей или квантовых точек. Концентрация квантовых точек в волноводе составляет  $9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  [29]. Схематическое изображение конструкции оптического волновода приведено на рисунке 1.1. На тонкой металлической пленке Au толщиной  $40 \pm 3 \text{ нм}$  сформирован полимерный волновод из полиметилметакрилата (ПММА) с квантовыми точками из сульфида свинца. В полимерном проводнике, легированном квантовыми точками, возникает стимулированное излучение.

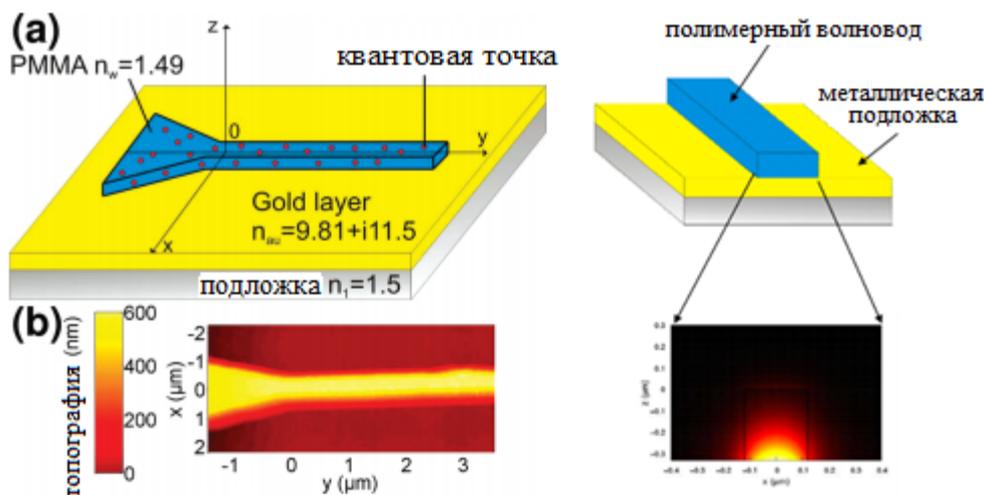


Рисунок 1.1 – Диэлектрический волновод поверхностных плазмон-поляритонов (Dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides, DLSPWs). Дизайн волновода (высота 600 нм, ширина 400 нм и длина 65 мкм) выбран для эффективного возбуждения направленных плазмонных мод. Конструкция (а) и изображение в атомном силовом микроскопе (б) [29]

В качестве усиливающей среды могут выступать различные по формам и конструкциям массивы наночастиц из металлов. Примеры таких наночастиц приведены на рисунке 1.2. Все они получены с помощью электронной литографии и предназначены для использования в качестве усиливающей плазмонные резонансы среды.

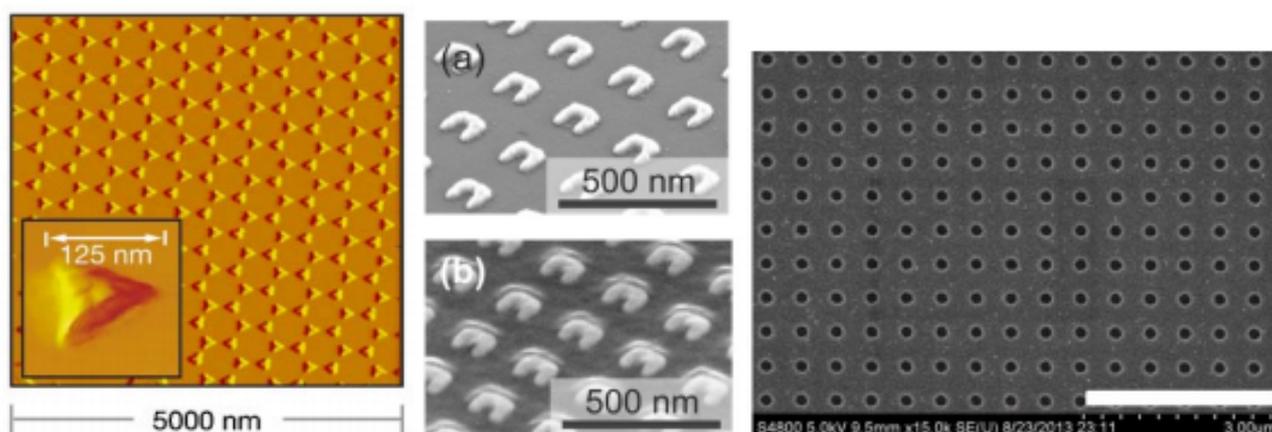


Рисунок 1.2 – Конструкции элементов, используемые в приложениях плазмоники: массив из треугольников [30] (слева), подковообразные кольца (в середине) [23], отверстия, для создания решетки нанолазеров (справа) [31]

Строгая зависимость между размерами, геометрической формой различных плазмонных устройств и их оптическими свойствами диктует высокие требования к технологии их формирования и воспроизведения. Поэтому технология изготовления этих устройств определяет их оптическую структуру. Современные технологии создания плазмонных устройств включают в себя: электронно-лучевую литографию, технологии плазменного травления и осаждения, электронно-лучевое осаждение тонких пленок, методы ионно-лучевого травления или магнетронного распыления.

Основными функциональными материалами в плазмонике являются благородные металлы серебро и золото, а также медь. В качестве материала волновода и в качестве масок для формирования плазмонных структур используются электронно-лучевые резисты: позитивный - полиметилметакрилат (ПММА, англ.

*polymethylmethacrylate, PMMA*), и негативный -водород силсесквиоксан (англ. *hydrogen silsesquioxane, HSQ*). В качестве подложки используют слюду, стекло, плавный кварц или кремний.

На рисунке 1.3 приведен пример диэлектрического плазмон-поляритонного волновода. Диэлектрический плазмонный волновод, легированный нанокристаллами PbS, изготовлен на золотой пленке с помощью УФ-литографии, с использованием резиста ПММА и квантовых точек.

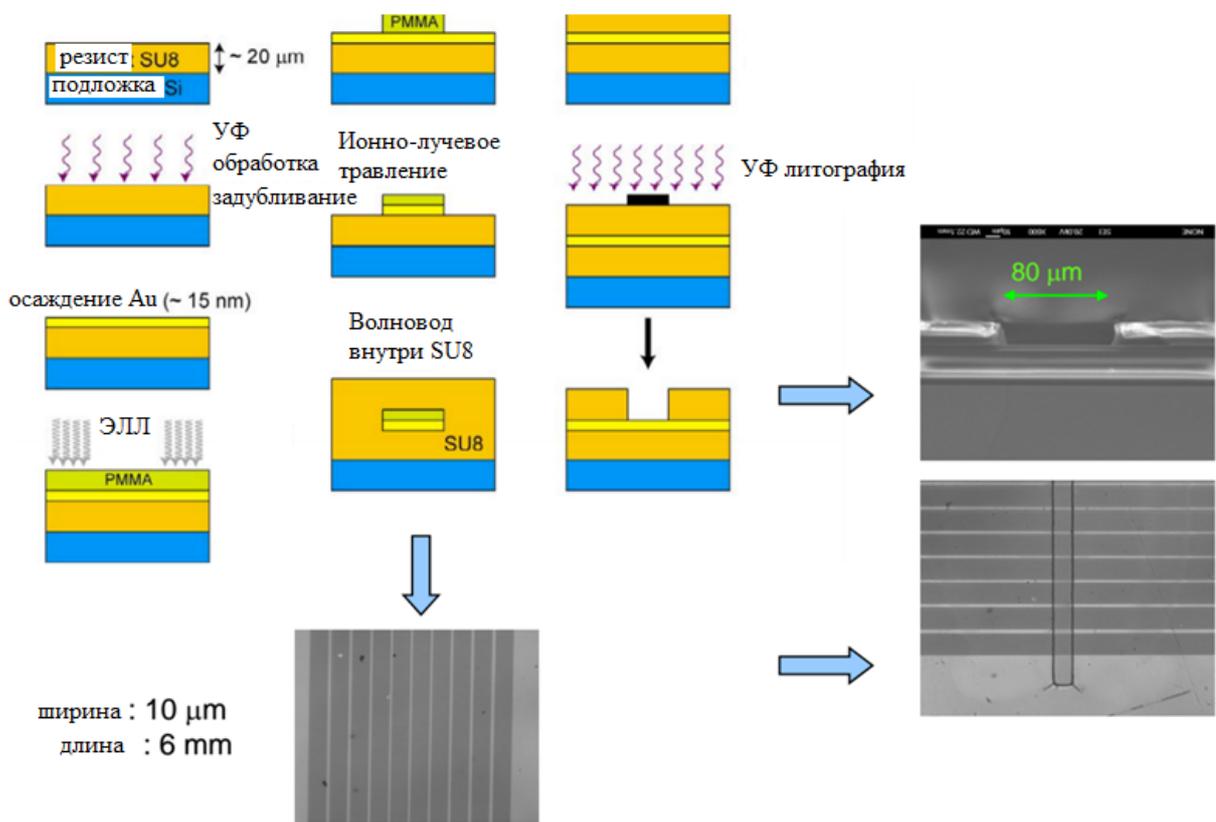


Рисунок 1.3 – Пример создания диэлектрического плазмон-поляритонного волновода [20]

С помощью толуола растворяют нанокристаллы PbS, получая однородную дисперсию квантовых точек (КТ) в растворе ПММА. Пленку Au толщиной 40-нм получают путем термического испарения. Волноводы шириной 400 нм были изготовлены УФ-излучением (длина волны 250 нм, 1900 мДж/см<sup>2</sup>) с использованием контактной литографии (Süss Microtech MJB4) и маски из хрома [20].

Для формирования наноразмерных элементов применяются различные технологии литографии.

Основными технологическими процессами, применяемыми для формирования топологии в металлических функциональных слоях плазмонных элементов, являются: травление фокусированным ионным пучком, взрывная литография, плазменное травление, плазмохимическое осаждение, наноимпринт литография, магнетронное распыление и электронно-лучевое осаждение. Технологические маршруты изготовления плазмонных структур являются комбинацией нескольких методов. Фокусированный ионный пучок (Focused ion beam - FIB) требует дорогостоящего оборудования, однако имеет очень низкую скорость и воспроизводимость по сравнению с другими методами. Установки ионно-лучевого травления (Ion beam etching) работают по схожему с фокусированным ионным пучком принципом, однако здесь формируется фокусированный направленный поток ионов большой плотности и для травления требуется литографическая маска. За счет того, что ионы генерируются в отдельной плазменной камере, скорость травления имеет крайне низкие значения, однако обеспечивается хорошая воспроизводимость, равномерность и контроль процесса. Процессы плазменного травления являются базовыми для технологий микроэлектроники, позволяя формировать различные элементы на целой пластине, в едином процессе, и широком спектре материалов. Они имеют высокую воспроизводимость, скорость и равномерность при средней сложности и стоимости оборудования. Однако плазменное травление не может использоваться без литографической маски и требует долгих подготовительных процессов. В зарубежных исследованиях для формирования плазмонных элементов в основном используется технология взрывной литографии и ионно-лучевого травления. Использование же плазменного травления чаще всего встречается как промежуточная технологическая операция.

В наноимпринт литографии используется специальная заготовочная форма, которая позволяет создавать структуры размерами от 10 нм с шагом в 70 нм, с идеальными углами профиля в  $90^\circ$  [32]. Достоинством этой технологии является от-

сутствие энергетических или электронных лучей, и, следовательно, отсутствие дифракционного предела, а также возможность быстрого прототипирования и массового изготовления элементов. Недостатками данной технологии является сложность изготовления заготовочной-формы, а также невозможность использования данного метода для формирования структур в металлах, которые являются основными плазмонными материалами. Помимо этого на этапе удаления заготовочной-формы из полимера, материал может остаться в форме.

Другим методом формирования элементов плазмоники, является ионно-лучевое травление (рисунок 1.4). Использование фокусированного ионного-лучевого травления является эффективным, но низко производительным и сложным методом [33]. Преимуществом его является высокая воспроизводимость. Однако в физическом распылении всегда присутствует эффект переосаждения материала на соседние структуры или объекты. Также высокоэнергичные ионы могут повредить материал подложки, если толщина функционального слоя будет слишком мала по сравнению с длиной пробега ионов. Выходом в данной ситуации может выступать поэтапное травление с различной энергией ионов [33]. Помимо переосаждения частиц металла, получаемый угол в металле после физического распыления не превышает  $65\div 75^\circ$ .

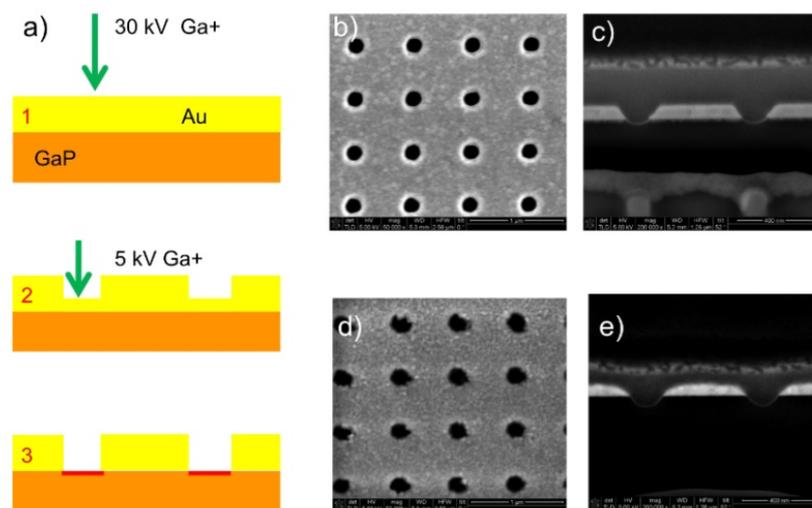


Рисунок 1.4 – Формирование плазмонного спазера с помощью ионно-лучевого травления [33]

Анализ литературы [21,22,34–36] показывает актуальность исследований процессов плазменного травления для формирования элементов плазмоники, так как они позволяют использовать большую номенклатуру газов и режимов травления материалов, использующихся в плазмонике. В данной работе рассмотрен процесс создания плазмонного наноисточника оптического излучения – спазера, представляющего собой массив отверстий в тонкой пленке металла.

Процесс формирования наноразмерных элементов является одним из наиболее важных процессов технологии формирования плазмонных спазеров, поскольку для снижения потерь и увеличения длины пробега плазмона необходимо иметь в структуре матрицу элементов, отличающихся высокой однородностью геометрических параметров: размера (он должен быть не более 200÷500 нм), формы (окружность, пирамида и т.д.), периода (с точностью  $\pm 10$  нм), шероховатости поверхности (не более 2÷5 нм). Для использования процесса плазменного травления при формировании таких элементов необходимо, чтобы процесс соответствовал ряду жестких требований, требующих для своего выполнения проведения детального исследования, в том числе с использованием моделирования.

Требования к процессу плазменного травления обусловлены результатами компьютерного моделирования плазмонных устройств и в случае спазера сводятся к необходимости обеспечить следующий набор свойств:

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);
2. Угол наклона стенки должен быть как можно ближе к  $90^\circ$ ;
3. Край отверстий должен быть ровным, без переосажденного металла;
4. Форма отверстий должна быть одинаковой, соответствовать выбранной топологии (в данном случае - близкой к окружности).
5. Перенос критического размера элемента топологии (CD) из маски резиста в серебро должен проходить с минимальным изменением размеров.

## **1.2 Плазменное травление в технологии наногетероструктурной СВЧ электроники**

### **1.2.1 Современные устройства наногетероструктурной СВЧ электроники**

Современные высокоскоростные средства телекоммуникаций, системы дистанционного зондирования земной поверхности, автоматизированные системы управления транспортными средствами, радары различного назначения имеют в своем составе приемно-передающие устройства с полупроводниковыми сверхвысокочастотными монокристаллическими интегральными схемами и СВЧ транзисторами в качестве усилительных элементов. Повышение мощности, чувствительности к слабым сигналам и рост рабочей частоты этих устройств открыли возможности для постоянного улучшения ключевых параметров этих систем. Наилучшими параметрами обладают полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT), в которых проводящий канал формируется в гетероструктуре – на границе раздела двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны. Возможности для улучшения свойств СВЧ транзисторов еще не исчерпаны, а дальнейшее развитие связано с повышением частоты работы и удельной мощности приборов (рисунок 1.5).

Наногетероструктурная СВЧ электроника развивается в направлении увеличения рабочей частоты и мощности активных элементов СВЧ схем. Как видно из рисунка 1.5, наиболее перспективным материалом, перекрывающим весь диапазон до 100 ГГц, является нитрид галлия (GaN). СВЧ МИС на этом материале стали применяться в СВЧ устройствах с рабочими частотами до 90 ГГц, разрабатываются технологии на частоты до 300 ГГц [11,12,37]. Таким образом, разработка высокочастотных транзисторов на основе нитрида галлия является наиболее перспективным направлением развития современной СВЧ электроники.

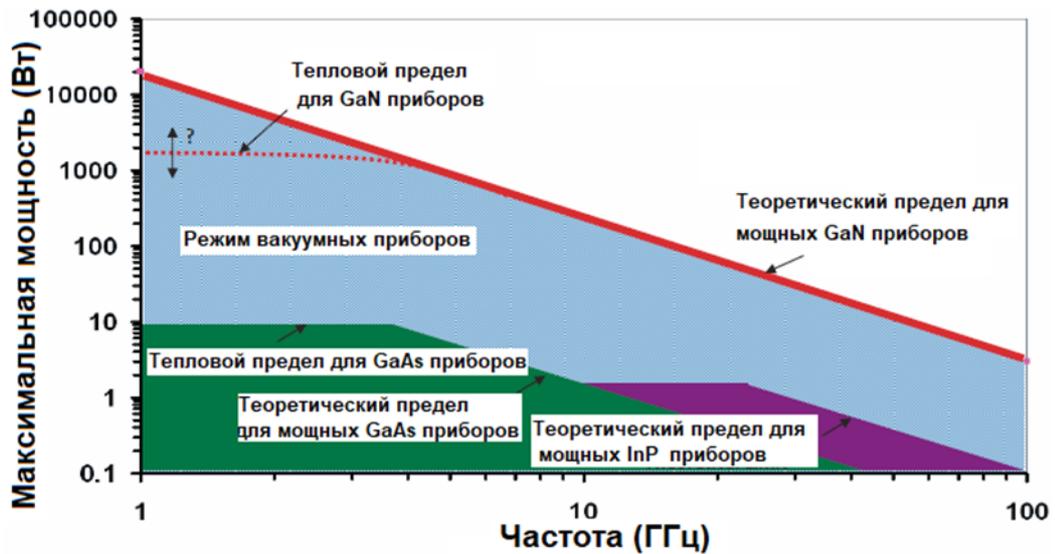


Рисунок 1.5 – Теоретические пределы диапазонов применения различных типов приборов в СВЧ усилителях [38]

Для новых технологий СВЧ МИС, позволяющих работать в миллиметровом диапазоне частот, требуется разработка новых технологических приемов изготовления транзисторов. Повышение рабочей частоты транзисторов предполагает прежде всего увеличение коэффициента усиления по току ( $h_{21}$ ) и максимально доступного/максимально стабильного коэффициента усиления по мощности (англ. *maximum available/stable gain* - *MAG/MSG*). Для характеристики транзисторов используют максимальную частоту усиления по току  $f_t$  и максимальную частоту усиления по мощности  $f_{max}$ . Основными параметрами мощного транзистора являются коэффициент усиления по мощности, КПД по добавленной мощности (англ. *Power Added Efficiency* – *PAE*) и удельная (на миллиметр ширины затвора) выходная мощность. В приближенное выражение для  $f_t$  входит длина затвора:

$$f_t \cong \frac{v_{sat}}{2\pi L_g} \quad (1.1)$$

где  $L_g$  – длина затвора, а  $v_{sat}$  – насыщенная дрейфовая скорость электронов в канале транзистора.

В выражение для  $f_{max}$  входит  $f_t$ :

$$f_{max} = \frac{f_t}{2 \cdot \sqrt{(R_{gs} + R_s + R_g) / R_{ds} + 2\pi f_t R_g C_{gd}}} \quad (1.2)$$

где  $R_{gs}$ ,  $R_s$ ,  $R_g$  и  $R_{ds}$  – паразитные сопротивления, а  $C_{gd}$  – емкость затвор канал.

Из (1.1) и (1.2) следует, что для повышения рабочей частоты транзистора необходимо уменьшение длины затвора, при сохранении высокой дрейфовой скорости носителей заряда в двумерном газе. Использование гетероструктур на основе нитридов индия-галлия-алюминия в сочетании с использованием современных технологических процессов (различных видов плазменного травления, осаждения диэлектрических пленок, электронной литографии), позволяет увеличить максимальные частоты и мощности СВЧ транзисторов.

### 1.2.2 Применение плазменного травления в технологии наногетероструктурных СВЧ транзисторов

Для повышения рабочей частоты наногетероструктурного СВЧ транзистора на основе GaN до миллиметрового диапазона основным требованием к затворному блоку технологических операций является получение затворов с длиной основания порядка 100 нм. Площадь сечения затвора должна быть достаточно большой, т.к. для получения максимального усиления необходимо свести к минимуму потери СВЧ сигнала при прохождении по затвору. Поэтому затворы транзисторов делают с минимальным основанием и достаточно большой и высокой верхней частью, в результате у затвора появляется грибообразный профиль (рисунок 1.6).

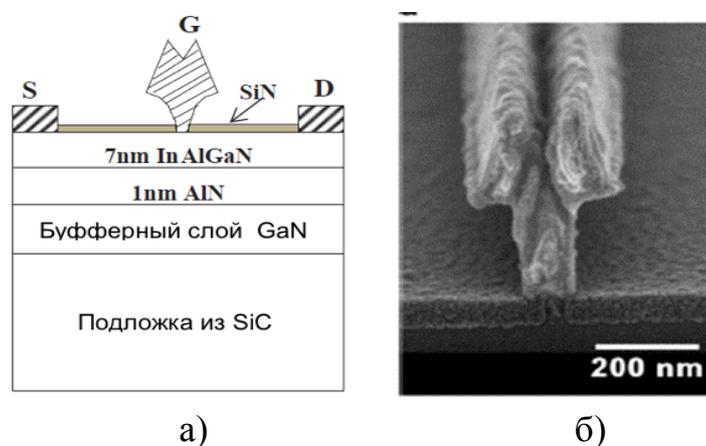


Рисунок 1.6 – Поперечное сечение СВЧ транзистора миллиметрового диапазона (а) и его затвора (б) [39]

Для повышения рабочей частоты затворы приходится делать с уменьшением основания до  $10\div 100$  нм. По мере уменьшения длины основания затвора такая конструкция становится все более неустойчивой. Показанный на рисунке 1.6,б затвор отличается двойным сужением основания. Для длин основания больше 100 нм, как правило, профиль затворов имеет одно сужение (рисунок 1.6, а). Для придания конструкции устойчивости нижнюю часть затвора часто формируют с помощью щели в диэлектрическом материале (нитриде кремния), который одновременно является пассивирующим слоем в изготавливаемом приборе (рисунок 1.6, б). В этом случае после осаждения диэлектрика электронно-лучевой литографией формируется щель в резисте с нанометровыми размерами, а затем плазменным травлением топологический рисунок в резисте переносится в нитрид кремния (рисунок 1.7). Металл затвора, сформированный таким образом, имеет зафиксированную в диэлектрическом слое «ножку», что обеспечивает его устойчивость при дальнейших технологических операциях. Альтернативой использованию травления щели является проведение пассивации после напыления затвора, при этом возникает сложная задача сформировать сплошную пленку  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в области у основания затвора.

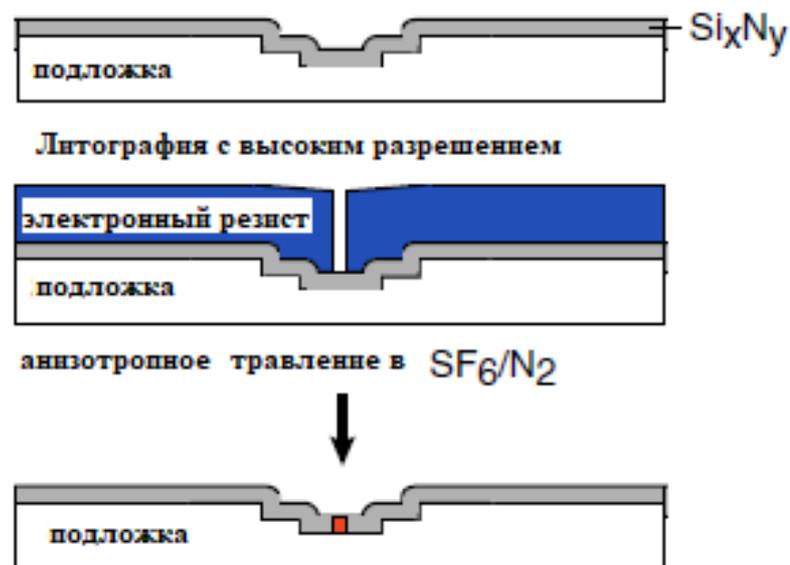


Рисунок 1.7 – Последовательность изготовления основания («ножки») затвора

Плазменное травление, таким образом, является одним из ключевых технологических процессов при разработке и изготовлении СВЧ приборов с длинами затворов, находящиеся в нанометровом диапазоне. Технологии с использованием щели в диэлектрической маске, формируемой методами плазменного травления, позволяют отдельно выполнять литографии для формирования узкого субмикронного основания затвора, и литографию верхней части затвора. Последовательность операций при этом следующая:

1. Осаждение диэлектрика  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;
2. Литография основания затвора;
3. Травление щели в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  через маску резиста;
4. Литография верхней части затвора;
5. Напыление затворной металлизации.

Основными параметрами процесса плазменного травления являются скорость травления нитрида кремния, селективность (соотношение скоростей травления резиста и нитрида кремния), анизотропия (соотношение скоростей травления по вертикали и горизонтали), наклон стенок в щели и зависимость скорости травления от аспектного соотношения ширины и глубины щели.

Скорость, селективность, анизотропия процесса травления должны обеспечивать перенос полученного в литографической маске размера в нижележащий слой диэлектрика, в качестве которого используют  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , причем  $\text{Si}_3\text{N}_4$  используют наиболее часто. Для процессов травления нитрида кремния используются содержащие фтор газы:  $\text{SF}_6$ ,  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{C}_4\text{F}_8$ ,  $\text{C}_2\text{F}_6$  и ряд других, при этом в состав газовой смеси часто добавляют кислород, аргон, гелий или азот [41–45]. Содержащие углерод газы легко образуют полимеры на боковой поверхности травящейся щели, что способствует повышению анизотропии процесса травления. Для предотвращения маскирования дна щели полимерами в газовую смесь часто добавляют кислород. За счет высокой концентрации ионов фтора в газовой камере,  $\text{SF}_6$  обеспечивает высокую скорость травления при низкой энергии бомбардировки ионами поверхности полупроводника. Однако низкая селективность травления

электронно-лучевых резистов ограничивает возможность получения щелей с высоким аспектным соотношением. Скорость травления наиболее распространенного электронно-лучевого резиста на основе РММА в таких процессах, как правило, больше скорости травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Для процессов в  $\text{SF}_6$  плазме селективность составляет примерно 0,5, в то время как в плазме углерод содержащих газов она доходит до 2÷3 [46]. Эта проблема способствовала разработке стойких к плазме электронно-лучевых резистов. Так, для плазмостойких резистов ZEP520 и AR-P 6200 скорость травления в плазме  $\text{CF}_4+\text{O}_2$  удалось снизить почти в два раза [47].

Положительный наклон стенок в полученной щели положительно сказывается на распределении электрических полей между затвором и стоком, поскольку именно в этой области на краю затвора находятся максимумы электрического поля и, как следствие, температуры в транзисторе. Транзистор с наклонными стенками затворной щели имеет сниженный пик электрического поля, при этом область сильного поля расширяется в сторону стока [6,48].

Для успешного формирования затвора процесс плазменного травления не должен вносить нарушения в полупроводниковую структуру транзистора, способные уменьшить дрейфовую скорость электронов, приводить к проявлению различных эффектов, негативно влияющих на параметры прибора и т.д. При уменьшении длины основания в грибообразном затворе транзистора меняется аспектное соотношение между длиной затвора и расстоянием затвор-канал. Если это соотношение GaN транзисторе меньше, чем 10÷15, то в вольт-амперной характеристике транзистора начинают проявляться короткоканальные эффекты – уменьшение выходного сопротивления, сдвиг напряжения отсечки с ростом напряжения на стоке [49,50] (рисунок 1.8). Они приводят к уменьшению коэффициента усиления по мощности в СВЧ транзисторах. Поэтому для подавления короткоканальных эффектов расстояние от поверхности до двумерного газа в канале транзисторов, предназначенных для миллиметрового диапазона длин волн, составляет всего 5÷10 нм.

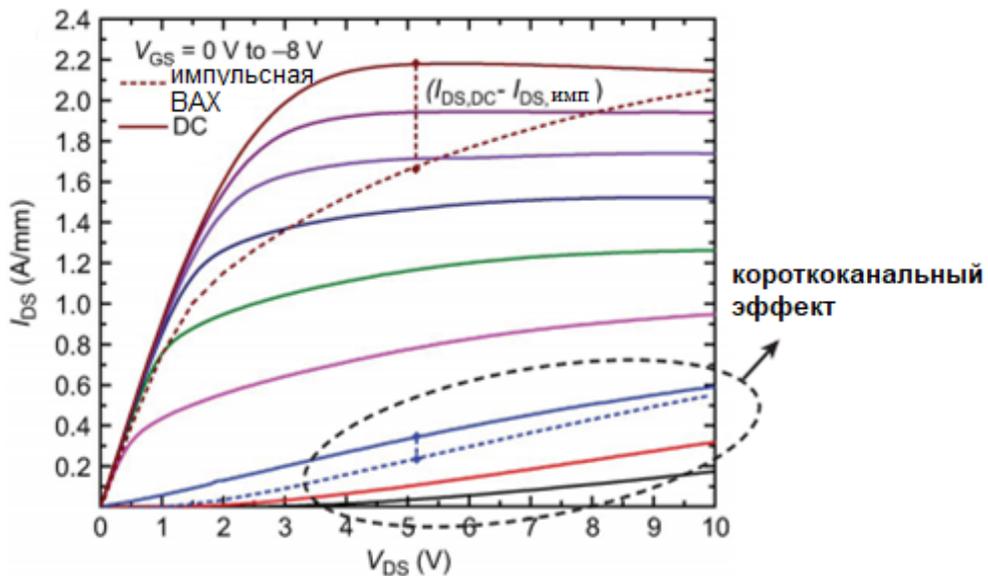


Рисунок 1.8 – Короткоканальный эффект на импульсной ВАХ и ВАХ на постоянном токе [51]

В результате уменьшения расстояния затвор-канал в ходе плазменного травления область канала СВЧ транзистора оказывается под воздействием бомбардировки ионами плазмы, что приводит к деградации электрофизических параметров двумерного электронного газа в канале транзистора [15].

Технологические требования к травлению щели затворов наногетероструктурных СВЧ транзисторов сводятся к требованиям, связанным собственно с параметрами процесса, и к требованиям, связанным с необходимостью свести к минимуму негативный эффект от ионной бомбардировки поверхности гетероструктуры к моменту окончания процесса травления.

Первую группу требований можно свести к следующим положениям:

1) Селективность: соотношение травления диэлектрика относительно скорости травления резиста. Важный параметр, определяющий требуемую толщину маски резиста в процессе литографии. При селективности выше 1 сложно получить требуемый профиль и анизотропию травления.

2) Скорость травления: диапазон допустимых с конструктивной точки зрения толщин диэлектрика в СВЧ транзисторах составляет от 0,05 до 0,2 мкм, что определяет диапазон допустимых значений скоростей травления, которые должны позволять травить щели с заданным значением перетрава, которое обычно находится

в пределах 10-30%. Поэтому скорость травления должна быть не больше 50-70 нм/мин, чтобы время травления диэлектрика было не менее минуты (а время перетравки не менее нескольких секунд). Нижний предел диапазона скорости травления ограничен необходимостью обеспечения разумной производительности установки, это предполагает, что время травления одной пластины не должно превышать несколько минут. При разработке процесса необходимо учитывать эффект уменьшения скорости травления при травлении глубоких щелей с высоким аспектом.

3) Анизотропия травления: уход размера относительно маски должен быть минимальным (желательно равным нулю), при этом размер щели в резисте максимально точно будет перенесен в диэлектрик.

4) Наклон стенок диэлектрика: для некоторых конструкций транзисторов (в частности, для мощных транзисторов), получение угла  $< 90^\circ$  является необходимым для формирования оптимального распределения электрических полей в приборе. Требуемый наклон может достигаться оплавлением края или выбором режимов процесса травления.

Вторая часть требований сводится к необходимости при формировании затворной щели в транзисторах мм-диапазона обеспечить минимальное воздействие на электрофизические параметры двумерного электронного газа в гетероструктуре (подвижность и концентрацию электронов) и минимальную деградацию поверхности гетероструктуры (поскольку удалить дефектный слой невозможно из-за устойчивости материалов гетероструктур на базе GaN к жидкостным травителям).

### **1.3 Современные методы плазменного травления**

#### **1.3.1 Классификация методов плазменного травления**

Множество существующих методов травления можно классифицировать по нескольким признакам. Классификация по используемым механизмам травления [52] различает «мокрое», т.е. жидкостное (англ. *wet*) травление и «сухое» (англ. *dry*) травление, при котором реагентами являются нейтральные молекулы, ионы и радикалы в газах. Среди методов «сухого» травления выделяют газовое (англ. *gas*

*etching*), лучевое травление (англ. *beam etching*) и плазменное (англ. *plasma etching*). В методы лучевого травления входят ионно-лучевое (англ. *ion milling*), реактивное ионно-лучевое (англ. *reactive ion beam etching*) и химическое с ионным пучком (англ. *chemically assisted ion beam etching*). Методы плазменного травления характеризуются сложным физико-химическим взаимодействием различных частиц, формирующихся в плазме с травящимися материалами. Эти взаимодействия включают физическое распыление ионами, химическое травление нейтральными радикалами, физико-химическое травление, травление с ионно-усиленным ингибитором. В существующих методах плазменного травления в разной степени используются эти типы взаимодействия. Среди типов плазменного травления получили распространение распыление (англ. *sputter etching*) и реактивное ионное травление (англ. *reactive ion etching*).

По сравнению с жидкостным травлением лучевое и плазменное травления обладают высокой анизотропией при отсутствии необходимости проведения дополнительных операций для удаления с поверхности продуктов реакции и сторонних примесей.

Оборудование для сухого травления можно классифицировать по имеющимся источникам химически активных частиц (ХАЧ) и ионов, в частности по типам источников плазмы.

Процесс называется радикальным травлением (РТ), если травление идет без контакта со средой плазмы, т.е. травление происходит только свободными атомами и радикалами, без какой-либо стимуляции.

Термином плазмохимическое травление (ПХТ) часто обозначают режимы плазменного травления, в которых важную роль играет взаимодействие материала с химически активными частицами плазмы. Необходимым условием ПХТ является образование продуктов реакции, давление насыщенного пара которых достаточно для десорбции с поверхности при данной температуре поверхности образца. В случае контакта поверхности материала травления со средой плазмы, процесс имеет постоянную стимуляцию в виде ионной и электронной бомбардировки, что также

может усиливать химическую реакцию на поверхности и удаление продуктов реакции с нее.

Реактивное ионное травление (РИТ) – процесс, в котором есть как и физическое распыление ионами, так и химическое взаимодействие ХАЧ с материалом. При контакте плазмы с поверхностью образец подвергается воздействию ионов, свободных атомов, радикалов, электронов и излучению плазмы.

### 1.3.2 Особенности реактивно-ионного травления

Реактивное ионное травление (англ. *Reactive ion etching, RIE*), позволяет решить широкий круг задач по изотропному и анизотропному плазменному травлению широкого спектра материалов в микроэлектронике, микромеханике и нанотехнологиях. В зависимости от конфигурации установки или системы, а также используемых процессных газов, данный метод позволяет создавать щели различной глубины, различные микромеханические системы (МЭМС), отверстия и окна для вытравливания жертвенных слоев при производстве изделий микромеханики или для вскрытия микроэлектронных устройств в реверсивной инженерии. Реактивное ионное травление плазмой позволяет очищать поверхность от различных остатков полимеров, образующихся в результате химической реакции в плазме, например, в газе  $C_4F_8$ . Камера установки реактивно-ионного травления содержит плоский электрод, на который подается ВЧ мощность и на котором располагают образец.

Обязательным элементом конструкции установки РИТ является источник ёмкостно-связанной плазмы (называемый также источник ВЧ плазмы) (англ. *Capacitively Coupled Plasma, CCP* и англ. *RF plasma source*), представляющий собой плоский электрод, на который через конденсатор подается ВЧ сигнал от генератора. Образец для травления располагается прямо на электроде. Поскольку современные установки РИТ могут быть оснащены несколькими источниками плазмы, которые могут использоваться в разных сочетаниях, есть необходимость называть режимы работы установки в соответствии с используемым электродом. Так, режим травления, при котором образец располагается на электроде и ВЧ мощность подается

только на этот электрод, называется режимом реактивного ионного травления (РИТ).

На рисунке 1.10 изображен реактор для травления в режиме РИТ с электродом-подложкодержателем источника ёмкостно-связанной плазмы (ВЧ электродом).

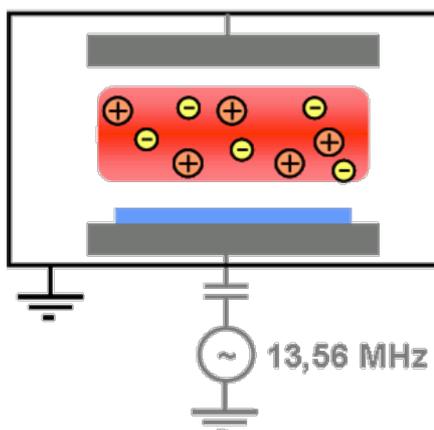


Рисунок 1.9 – Реактор установки реактивного ионного травления [53]

Реактивное ионное травление в индуктивно-связанной плазме (англ. *Reactive Ion Etching with Inductively Coupled Plasma, ICP RIE*), представляет собой развитие технологии реактивного ионного травления. Установки, оснащенные источниками индуктивно связанной плазмы (ИСП) позволяют реализовать режимы работы как с ВЧ мощностью, подаваемой только на ИСП источник, так и режимы с ВЧ мощностью, подаваемой на источники ёмкостно-связанной и индуктивно-связанной плазмы, реализуя режим реактивного ионного травления с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП РИТ). Камера такой установки содержит два источника плазмы (рисунок 1.10).

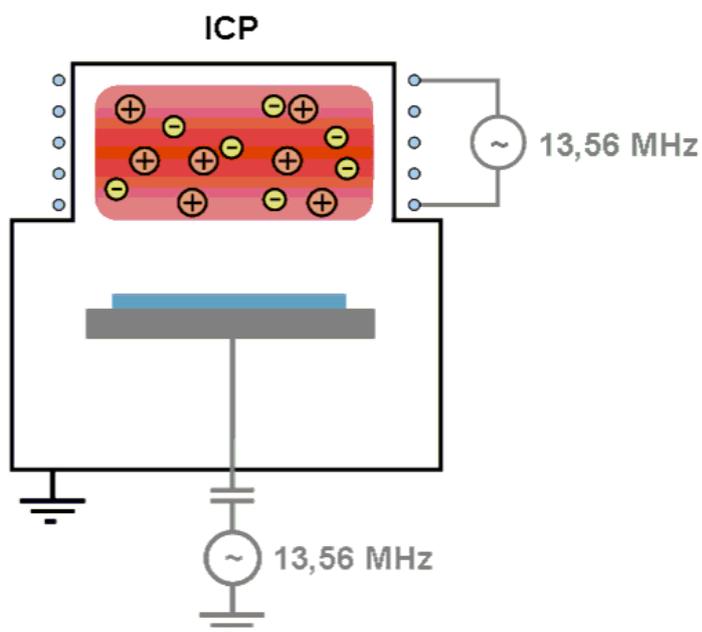


Рисунок 1.10 – Реактор установки реактивного ионного травления с источником индуктивно-связанной плазмы [53]

В зависимости от выбора параметров процесса травления, доминирующими механизмами процесса травления в РИТ будут физическое распыление, стимулированное ионами травление и химическое травление (рисунок 1.11).

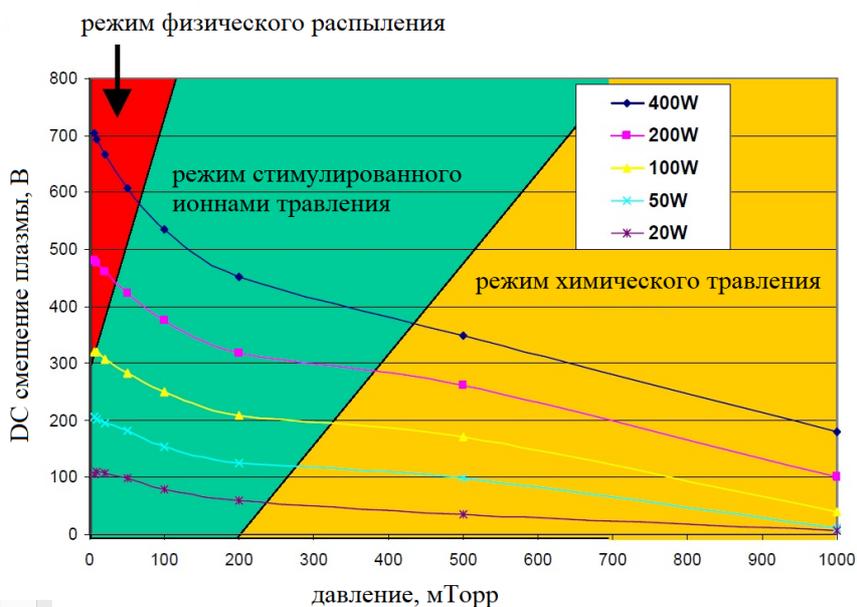


Рисунок 1.11 – Режимы установки реактивного ионного травления [54]

Установка ИСП РИТ для создания плазмы может использовать индуктивный разряд, возникающий во втором электроде, который расположен в верхней части камеры травления. Плотность плазмы, создаваемой индуктивным источником плазмы, достигает значений  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  и существенно превышает плотность плазмы в обычных РИТ системах. Соответственно скорости травления в системах с источниками ИСП оказываются выше скоростей РИТ. Независимое управление энергией ионов в таких системах позволяет значительно улучшить параметры селективности и управления профилем травления. При высоких скоростях травления может наблюдаться перегрев подложек. Для улучшения теплоотвода от подложки к охлаждаемому электроду в пространство между ними осуществляется подача гелия.

Основные преимущества метода ИСП РИТ:

- Высокие скорости травления достигаются за счет высокой плотности ионов ( $> 10^{11} \text{ см}^{-3}$ );
- Контроль за селективностью и повреждениями поверхности образцов осуществляется за счет изменения энергии ионов;
- Источники емкостной и индуктивно-связанной плазмы обеспечивают отдельный контроль над энергией ионов и плотностью ионов, что делает процесс более гибким;
- Использование низкого давления для улучшенного контроля профиля травления;
- Прижим подложки и гелий для охлаждения, обеспечивают отличный температурный контроль.

Важнейшим преимуществом метода реактивного ионного травления с источником индуктивно-связанной плазмы является возможность гибкого выбора режимов травления в зависимости от материала и цели процесса. В установках ИСП РИТ можно реализовать процессы распыления ионами инертных газов, процессы реактивного ионного травления в режиме РИТ (без подачи мощности на электрод ИСП), процессы плазменного травления в ИСП режиме (без подачи ВЧ мощности на электрод емкостно-связанной плазмы), а также режимы травления с одновре-

менно включенными источниками индуктивно-связанной плазмы и емкостно-связанной плазмы. Регулируя ВЧ мощность, подводимую к источнику емкостно-связанной плазмы (для его обозначения часто употребляется термин ВЧ электрод), можно менять энергию бомбардирующей поверхность травящегося образца ионов, а регулируя ВЧ мощность, подводимую к ИСП источнику, можно менять концентрацию ионов в плазме.

#### **1.4 Основные результаты и выводы главы 1**

Спазеры и наногетероструктурные СВЧ транзисторы являются современными приборами наноэлектроники, требующими для своего дальнейшего совершенствования и применения в промышленности разработки технологических процессов, отвечающих специфическим требованиям технологии данных приборов. Для изготовления таких приборов, одной из важнейших задач является разработка новых процессов технологий плазменной обработки поверхности, которые должны обеспечивать формирование наиболее критических элементов конструкции, находящихся в нанометровом диапазоне. Общими требованиями к плазменным процессам травления являются: необходимость получения требуемой селективности, соблюдение минимальных искажений в CD, контроль углов наклона стенки в вытравленном материале. Необходимо также учитывать особенности влияния плазменных процессов на изготавливаемые приборы. Поэтому необходимым условием для решения поставленных задач является возможность гибкого выбора режимов травления в зависимости от выявленных особенностей структур и материалов изготавливаемых приборов. В установках реактивного ионного травления с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП РИТ) можно реализовать целый ряд процессов, отличающихся балансом физической и химической компоненты травления, выбирая в широком диапазоне процессные газы и изменяя энергию и концентрацию ионов в плазме. Это позволяет провести исследование возможности применения данного типа оборудования для решения наиболее критических задач по формированию наноразмерных элементов для спазеров и наногетероструктурных СВЧ транзисторов.

## ГЛАВА 2. ПРОЦЕССЫ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 2.1 Физико-химические аспекты процессов травления

Применяя плазму в качестве рабочего вещества, можно выполнять процессы травления различных материалов:

- Диэлектриков ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}_x$  и т.д.);
- Материалов на основе кремния (Si, поли-Si, a-Si);
- Материалов III-V групп (GaAs, InP, GaN, и т.д.);
- Металлов (Au, Pt, Ti, Ta, W, Al, Ag и т.д.);
- Алмазоподобных пленок;
- Полимеров, фоторезистов, электронных резистов (SPR, ARP, PMMA, SU-8 и т.д.)

Процесс образования плазмы напрямую связан с каскадной ионизацией. При подаче на электроды реактора высокочастотного переменного напряжения под действием электрического поля электроны ускоряются и, сталкиваясь с атомами газа, образуют новую пару - электрон и ион. Когда число образующихся ионов превышает число рекомбинирующих, процесс приобретает лавинообразный характер, что является одним из условий образования плазмы. Когда этот процесс достигает уровня квазилинейности, зажигается плазма [55,56].

В зависимости от материала, который необходимо травить, подбираются процессные газовые смеси. Для травления металлов наиболее подходят хлорсодержащие газы ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{BCl}_3$ ) так как они химически взаимодействуют с металлами, образуя летучие соединения, а также инертные газы (Ar,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ), которые физически распыляют материал. Для травления кремния, оксида кремния, стекла, различных полимеров используют фторсодержащие газы ( $\text{SF}_6$ ,  $\text{C}_4\text{F}_8$ ,  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{CF}_4$ ), поскольку при взаимодействии с ионами фтора образуется легко удаляемый с поверхности материала тетрафторид кремния  $\text{SiF}_4$ . Фтор и хлор имеют самую высокую электроотри-

цательность, что позволяет им эффективно взаимодействовать с различными материалами, создавая активную пару электронов и разбивая химические связи различных молекул [56,57].

Объем плазмы можно условно разделить на несколько областей: область тлеющего разряда и темное катодное пространство. Область тлеющего разряда является одной из самых важных для технологических операций. Эмиссия фотонов из облака электронов и ионов также характеризует плазму по цвету и составу. Энергия фотонов является функцией электронной структуры газовых молекул и их соединений. За областью тлеющего разряда находится темная область, в которой не происходит излучения фотонов. Эта зона наиболее сильно влияет на траектории ионов, участвующих в травлении.

Для описания движения и энергии ионов, применяется две функции: распределение ионов по энергиям (*IEDF*) и распределение ионов по углам (*IADF*) [4]. Функция распределения ионов по углам наиболее влияет на профиль травления (угол наклона стен). Функция распределения ионов по энергии, отвечает за процесс взаимодействия, который может возникнуть, когда ионы достигнут поверхности: пассивация, активация химической реакции, физическое распыление. Эти процессы характеризуют параметры травления, и зависят от напряжения смещения, плотности потока ионов, газовых смесей и длин свободного пробега ионов.

Основными параметрами, задаваемыми при выборе режимов плазменного травления, являются:

- Давление в камере;
- Мощность источника плазмы;
- Температура подложки;
- Потоки газов;
- Время травления;
- Смещение на подложке;
- Скорость откачки.

Скорость откачки, определяемая регулируемой заслонкой и скоростью откачки турбомолекулярного насоса, в сочетании с выбранным рабочим давлением и

потоками газов, определяет такой важный параметр процесса как среднее время нахождения молекул газа в камере (англ. *residence time*). От него во многом зависит концентрация радикалов и ионов в камере, особенно при использовании газов с высокой энергией ионизации ( $N_2$ ).

Еще одним важным параметром процесса травления, зависящим от выбранных режимов, является напряжение смещения (англ. *DC bias*) – усредненная по времени разность потенциалов между плазмой и электродом емкостной плазмы, возникающая в результате выравнивания баланса токов ионов и электронов, попадающих на электрод (рисунок 2.1).

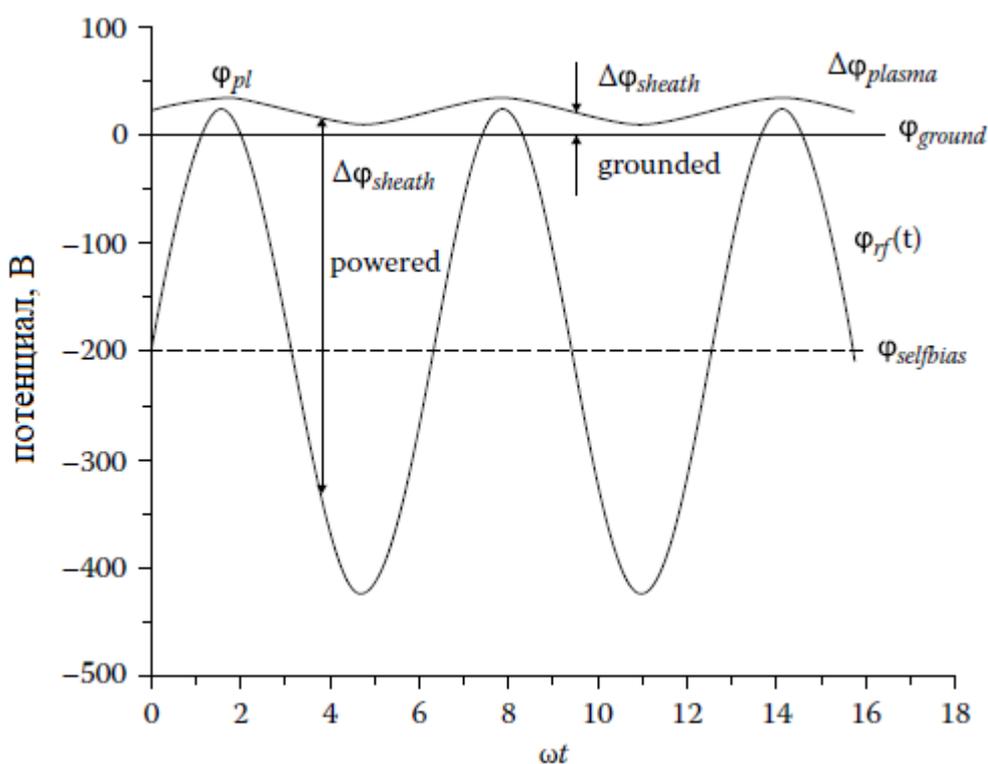


Рисунок 2.1 – Электрические потенциалы в плазме РИТ:  $\phi_{pl}$  – потенциал плазмы,  $\phi_{selfbias}$  – напряжение смещения,  $\phi_{rf}$  – потенциал на электроде емкостной плазмы

Напряжение смещения ускоряет ионы в темном катодном пространстве над электродом емкостной плазмы, направляя их в сторону расположенного на электроде образца (рисунок 2.2).

Ключевыми параметрами, которые характеризуют процесс травления, являются:

- Скорость травления;
- Неравномерность травления по пластине;
- Шероховатость обработанной или полученной поверхности;
- Угол наклона профиля травления;
- Аспектное соотношение;
- Селективность к маске травления;
- Уход линейных размеров топологических элементов.

Скорость травления может быть ограничена как скоростью химической реакции на поверхности, так и скоростью десорбции продуктов реакции с поверхности. В зависимости от этого, на скорость травления могут влиять параметры процесса, которые изменяют плотность потока или энергию радикалов и ионов. К таким параметрам относится подводимая ВЧ мощность. Она определяет электронную температуру плазмы, от которой зависит компонентный состав и концентрация частиц плазмы. С увеличением ВЧ мощности увеличивается как энергия, так и концентрация ионов. В зависимости от выбранного состава газа и материала, от изменения давления скорость и профиль травления может существенно изменяться. Для современных систем диапазон давления составляет  $1 \div 100$  мторр. При повышении давления плотность потока частиц возрастает, но уменьшается длина свободного пробега ионов, соответственно ХАЧ сильнее отклоняются от вертикальной траектории, что приводит к изотропии травления. При высоких давлениях продукты реакции медленнее удаляются из узких и глубоких элементов топологий. Таким образом, изменяя значение давления можно регулировать угол наклона профиля.

Управляя напряжением смещения, также можно регулировать профиль травления. Выбирая подаваемую на источники плазмы ВЧ мощность, давление или состав газов, можно придать более анизотропный характер процессу травления. Ионы, бомбардирующие поверхность, стимулируют химическую реакцию на поверхности образцов, а также могут стимулировать десорбцию продуктов реакции и собственно молекул вещества за счет передачи им кинетической энергии. Энергия ионов также зависит от ВЧ мощности и давления процесса.

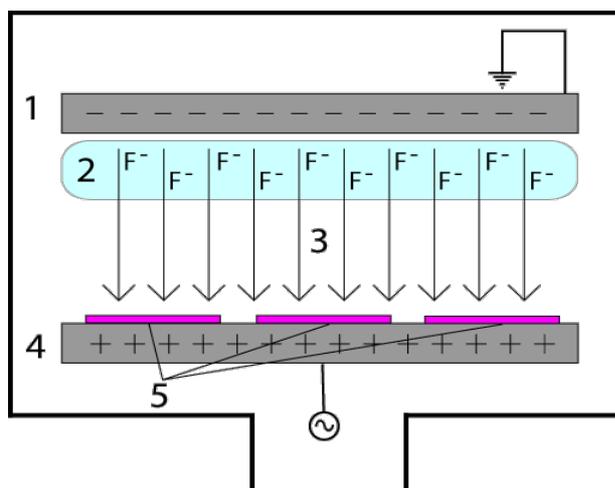


Рисунок 2.2 – Схема формирования напряжения смещения - плазма инициируется в системе с помощью сильного электромагнитного поля на частоте 13,56 МГц.

Электроды (1 и 4), создают электрическое поле (3), предназначенное для ускорения ионов (2) по направлению к поверхности образцов (5) [58]

Энергетический диапазон процесса 30 эВ - 1000 эВ. Функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) – важнейший внутренний параметр плазмы, определяющий кинетику процессов под действием электронного удара и транспортные характеристики заряженных частиц.

Для разрядов при низком давлении, возникающем в ВЧ области, ФРЭЭ и средняя энергия электронов зависит от частоты возбуждения плазмы.

Процесс травления характеризуется также:

- Анизотропией – фактором, характеризующим искажение изображения при переносе его из маски на объект за счет бокового травления [56]. Определяется как отношение скоростей травления материала по нормали и по касательной к поверхности или как отношение глубины травления к боковому травлению. Чем выше анизотропия, тем лучше качество получаемых изделий, но в ряде технологических процессов изотропное травление также применимо.
- Загрузочным эффектом - уменьшением скорости травления с увеличением площади обрабатываемых изделий, связанное с обеднением газовой фазы активными частицами из-за их расхода в процессе травления.

- Температурой поверхности обрабатываемого материала - определяется воздействием излучением плазмы и тепла, выделяющегося в химических реакциях травления, а также условием теплоотвода. Для процессов травления, изменение температуры поверхности образца приводит к изменению скорости травления. Зависимость константы скорости химической реакции  $K$  от температуры  $T$  описывается уравнением Аррениуса:

$$K = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

где  $E_a$  – энергия активации,  $A$  – предэкспоненциальный множитель (фактор частоты). С увеличением температуры скорость химической реакции травления возрастает и тем сильнее, чем ниже энергия активации химической реакции. При реактивном ионном травлении скорость процесса очень слабо зависит от температуры, поскольку ионная бомбардировка поверхности повышает энергию активации реакции травления.

Селективность травления - отношение скоростей травления резиста и удаляемого материала в одинаковых условиях и направлениях. Селективность процесса травления должна быть достаточной для обеспечения травления материала на заданную глубину без полного удаления резиста (маски).

Если процесс плазменного травления можно использовать для формирования микроразмеров, то в принципе можно использовать тот же процесс для травления топологий с наноразмерами. Однако это связано с изменением аспектного соотношения (АС), т.е. отношением линейного размера структуры к ее глубине, что создает следующие проблемы:

- Усложняется процесс доставки частиц ко дну структуры;
- Усложняется процесс удаления продуктов реакции со дна структуры;

В результате происходит замедление скорости травления и уменьшается его селективность. При высоком АС ХАЧ чаще соударяются со стенками, т.к. продукты реакции и частицы летят во всех направлениях, тем самым уменьшая соб-

ственную энергию и повреждая боковые стенки профиля. Телесный угол, в котором находятся ионы, которые могут долететь до дна, уменьшается. Все это обуславливает снижение скорости травления с увеличением глубины. Продуктам реакции после травления сложнее выйти наружу, может происходить их переосаждение на края, стенки маски и травящейся структуры. Отсюда возникают две зависимости травления от АС:

1. Скорость травления замедляется при уменьшении линейного размера топологии;
2. Необходимое для травления на заданную глубину время травления может расти не линейно, а по экспоненте.

Следующим эффектом, который нужно учитывать при травлении наноразмерных структур, является эффект заряженных частиц. На поверхности образца могут скапливаться электроны, отклоняющие ионы от вертикальной траектории, что может повреждать и инициировать травление стенок структуры. Возникает подтрав вбок под маску или растрав поверхности дна. Решением является использование пульсирующего режима плазмы или проводящих ток слоев маски.

Правильный выбор резистивной маски играет ключевую роль в процессах плазменного травления. Электронные резисты, в которых возможно сформировать электронно-лучевой литографией нанометровую топологию, как правило имеют низкую селективность, из-за чего приходится увеличивать толщину резиста. Как следствие возникают следующие проблемы:

- Высокое АС еще до начала процесса травления, т.к. из-за низкой селективности приходится наносить толстые слои литографической маски;
- Ограничение по разрешению;

Для решения проблем с использованием электронно-лучевых резистов, их можно использовать вместе с твердыми масками, например, из диоксида кремния, никеля или вольфрама.

## 2.2 Моделирование процессов травления тонких пленок серебра

Для разработки технологии плазменного травления тонких пленок металлов, с помощью моделирования было проведено исследование зависимостей скоростей травления и получаемых профилей.

Материалом для моделирования процесса травления было выбрано серебро, так как оно имеет наименьшие оптические потери и наибольшую длину пробега плазмон поляритона по поверхности, что является критическим параметром для устройств плазмоники. Моделирование производилось в программном комплексе Silvaco, модуль Athena Elite [59]. По мере усложнения технологических операций, в частности уменьшения линейных размеров, процессы моделирования играют ключевую роль в исследованиях по разработке технологии. Плазменные процессы травления из-за физических особенностей плазмы является сложным для моделирования, так как плазма является многокомпонентным состоянием вещества, в котором присутствует множество физических эффектов. Используя современные программные комплексы, можно предсказать такие важные параметры как скорости травления, углы профиля травления, подтравы, скорость травления резистивной маски и эффекты загрузки.

Программное обеспечение Silvaco включает в себя множество модулей, позволяющих исследовать технологические операции травления, осаждения, литографии или ионной имплантации. Все методы основаны на использовании математических моделей. Исследования процессов травления решаются как геометрическая задача и моделируются как низкотемпературные процессы. Существуют следующие модели травления, по которым протекает процесс плазменной обработки: изотропное травление, модель РИТ, травление с примесями, модель Монте-Карло. Модель изотропного травления подходит как для жидкостного химического процесса, так и для простых изотропных химических процессов, без физической составляющей.

Модель РИТ состоит из двух компонентов: изотропного травления и анизотропного травления, которые определяются скоростями удаления материала в соответствующих направлениях.

Модель плазменного травления, основанная на методе Монте-Карло использует перенос ионов из нейтральной плазмы через темное катодное пространство, окружающее электроды и стенки. Ионы поступают из плазмы, затем их движение ускоряется в электрическом поле между плазмой и электродами. В методе Монте-Карло рассматривается процесс переноса большого количества ионов, включая их столкновения с различными газовыми составляющими [60]. Модель Монте-Карло - рассчитывает распределение ионов, используя для этого потоки ионов, падающих на поверхность подложки. Значение этого потока затем используется для расчета скорости травления, путем интегрирования потока по площади открытой в области травления через резист, в каждой точке на поверхности. Предполагается, что потоки ионов и нейтральных частиц, покидающих плазменную оболочку, представлены функцией распределения скоростей вдоль направления, определяемого заданным пользователем углом падения.

Для моделирования процесса травления были выбрана модель Монте-Карло, поскольку она позволяет задать такие важные параметры процесса травления, как ВЧ мощность, давление, концентрацию ионов и температуру. При этом есть возможность выбора режима травления (ИСП РИТ, РИТ, травление распылением) за счет задания концентрации ионов и разделения физической и химической компоненты реакции.

В процессе плазменного травления серебра, в основном преобладает процесс ионного физического распыления в среде аргона. Для характеристики данного процесса используется параметр  $K_p$ , называемый коэффициентом распыления. Коэффициент распыления вычисляется как количество распыленных атомов, приходящихся на один бомбардирующий ион.

В случае многокомпонентных материалов травления используются парциальные коэффициенты распыления отдельных компонентов или

коэффициент распыления, выраженный в единицах молекула/ион. Для полимерных материалов (фоторезистов, электронных резистов, имеющих молекулы с очень большим числом атомов) понятие коэффициента распыления теряет смысл, поскольку невозможно определить состав продуктов распыления. Скорости распыления, определяются как толщина удаленного слоя материала в единицу времени при заданной мощности ионной обработки. Скорость и коэффициент распыления связаны соотношением:

$$K_p = \frac{e N_a \rho}{j M_2} V_p$$

где  $e$  - заряд электрона, Кл;  $\rho$  - плотность материала, г/см<sup>3</sup>;  $j$  - плотность тока ионов, А/см<sup>2</sup>;  $M_2$  - масса атомов материала, г/моль;  $N_a$  - число Авогадро, моль<sup>-1</sup>;  $V_p = h/t$  - скорость распыления, где  $h$  - толщина стравливаемого слоя материала, см, а  $t$  - время распыления, мин.

После предварительных расчетов и сопоставления полученных результатов с результатами проведенных процессов травления были выбраны следующие начальные условия моделирования процесса травления: коэффициент распыления серебра  $\sim 29$ , толщина маска резиста 130 нм, толщина слоя серебра 100 нм, подложка из кремния, температура на подложке 15 градусов, тип плазмы – РИТ и ИСП РИТ, давление 3 мторр, температура газа – 5500 К, линейные размеры топологии 100, 200 и 500 нм.

Моделирование процесса травления проводилось для единичных отверстий, так как площадь открытой области травления по сравнению со стандартной пластиной диаметром 100 мм  $< 1\%$ , а шаг между отверстиями больше 500 нм, что позволяет пренебречь эффектом загрузки.

В каждом шаге моделирования выполняется 3 вычисления:

1. Расчет потоков ионов, нейтральных частиц и полимерных частиц (пересаживаемые частицы);
2. Расчет скорости травления и скорости пересаживания полимера;
3. Движение частиц по объему и поверхности.

На первом шаге, поток приходящих переотраженных ионов и нейтральных частиц рассчитываются на каждом сегменте (сетке модели), в данном случае размер шага сетки был принят – 0.1 нм. В каждый момент времени генерируется произвольное число частиц на поверхности, располагающихся по нормали и со смещением по углу от нормали по отношению к поверхности. Затем рассчитывается траектория, например, иона, со всеми столкновениями, до тех пор, пока он полностью не адсорбируется на поверхности или не переотразится за пределы симуляции (рисунок 2.3а).

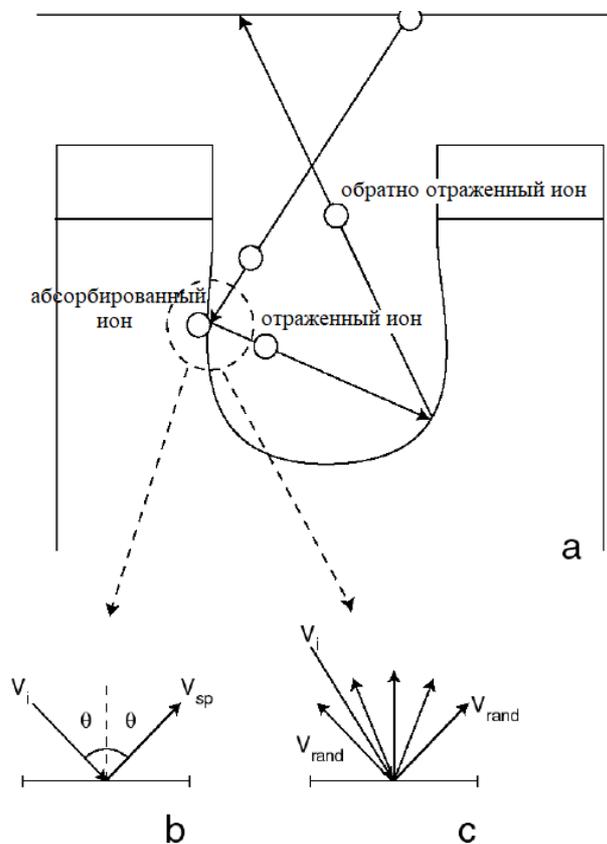


Рисунок 2.3 – Диаграмма алгоритмов потоков в плазме: а) соударения и переотражения ионов внутри структуры b,c) возможные варианты отклонения от нормали [59].

Взаимодействие иона с поверхностью материала зависит от двух факторов. Первый это коэффициент отражения  $P_{refl}$ , который задается двумя переменными  $MC.ALB1$  и  $MC.ALB2$  для двух типов частиц, второй фактор – шероховатость поверхности  $MC.RFLCTDIF$ . Оба фактора зависят от типа материала, выбранного

в симуляции и типа иона. Коэффициент отражения — это вероятность частицы быть отраженной от поверхности. Шероховатость определяет вероятность по направлению, если  $R = 0$  — это случай, показанный на рисунке 2.3b, если  $R = 1$  — это случай, показанный на рисунке 2.3, с. Скорость иона  $v_{refl}$  после соударения с поверхностью может быть представлена, как:

$$V_{refl} = V_{sp} * (1-R) + V_{rand} * R, \text{ если } x > P_{refl}, \text{ где:}$$

$V_{sp}$  - скорость иона после переотражения;

$V_{rand}$  - скорость иона после нескольких соударений;

$x$  – произвольное число.

Каждый поглощенный ион используется для расчета входящего потока на поверхность. Следующие характеристики описывают поток:

$$N_{norm} = N_{abs} * I/N_{traj}, \text{ где:}$$

$N_{norm}$  - нормированное количество поглощенных частиц;

$N_{abs}$  – количество поглощенных частиц;

$N_{traj}$  – количество траекторий заданное аргументами *MC.PART1* и *MC.PART2* для каждой частиц плазмы.

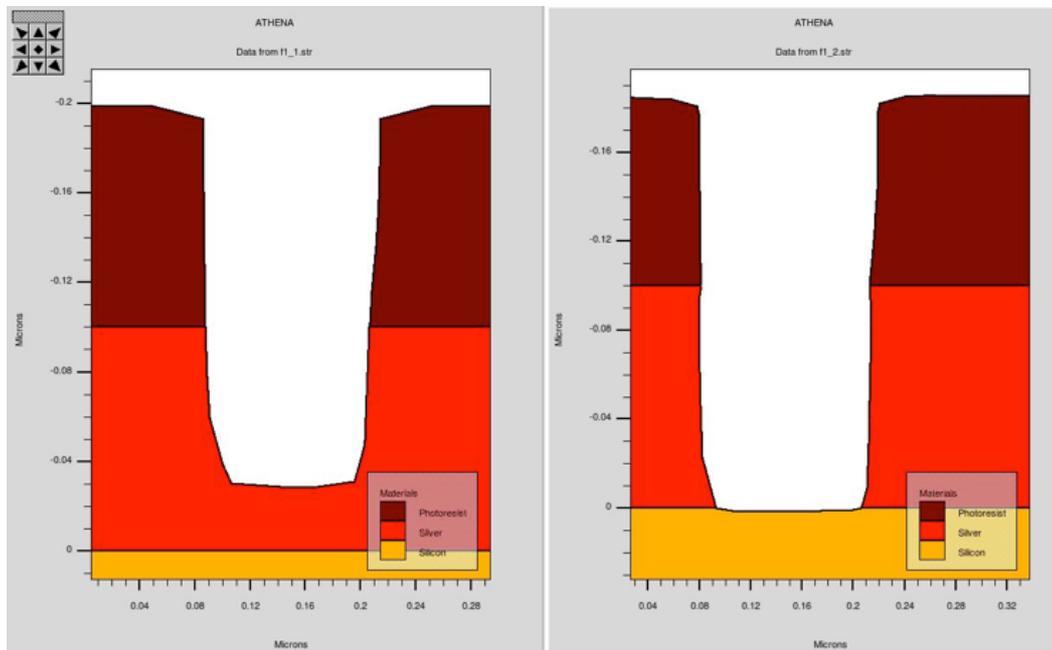
Для расчета скорости травления в модели применяется следующее уравнение:

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

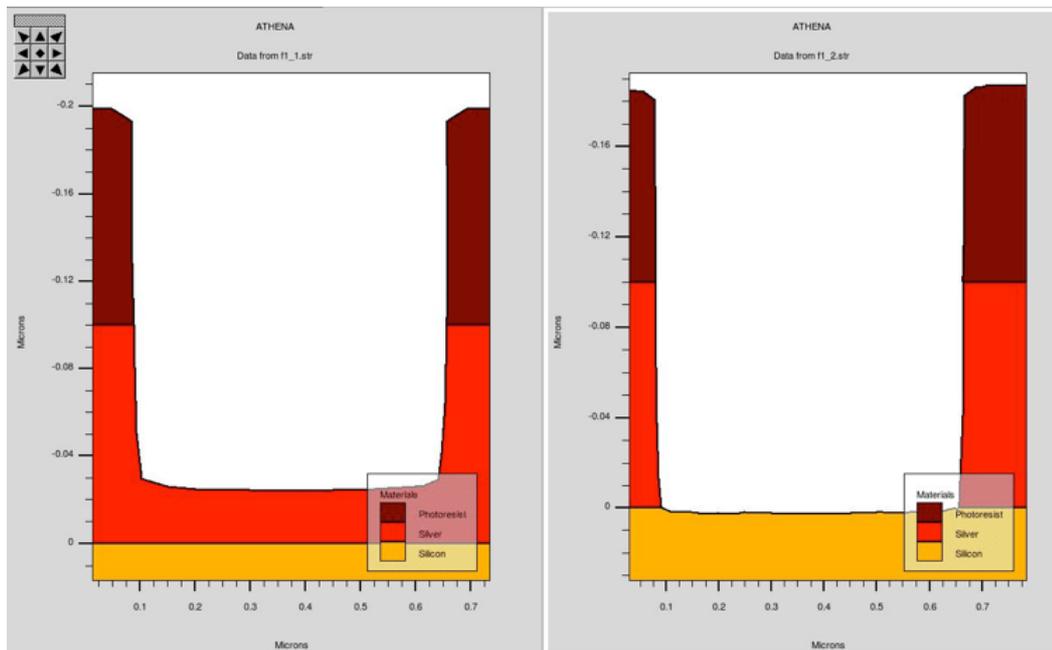
Где  $n$  – количество типов ионов в плазме заданное параметром *ION.TYPES*.  $EP(m, i)$  параметр материала  $m$  и типа иона  $i$  заданного параметрами *MC.ETCH1* и *MC.ETCH2*,  $v_{abs}$  – ионная скорость.

В моделировании процесса плазменного травления серебра модель плазмы была максимально приближена к условиям внутри камеры установки Oxford PlasmaPro 100, на которой в дальнейшем проводились эксперименты. Для этого поток ионов и частиц был задан таким, чтобы соответствовать концентрации ИСП источника установки Oxford. Коэффициент распыления серебра был взят 29. Газ для травления аргон. На рисунке 2.4 (а) и (б) приведены результаты моделирования травления тонкой пленки серебра в режиме реактивного ионного травления без источника ИСП для линейных размеров 100 нм и 500 нм.

Скорость травления серебра в режиме РИТ, полученная при давлении 3 мторр, мощности источника 200 Вт и смещении 245 В составила 15 нм/мин для размера 100 нм и 19 нм/мин для размера 500 нм, селективность резиста к серебру – 0,3:1, угол профиля травления  $87\div 88$  градусов. Моделирование показало, что уменьшение линейного размера до 100 нм приводит к уменьшению скорости травления на 21% при минимальном изменении профиля травления. Для моделирования режима ИСП РИТ была увеличена с  $10^7$  см<sup>-3</sup> до  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> концентрация ионов в плазме. На рисунке 2.5 (а) и (б) приведены результаты моделирования травления пленки серебра в режиме ИСП РИТ для линейных размеров 100 и 500 нм.

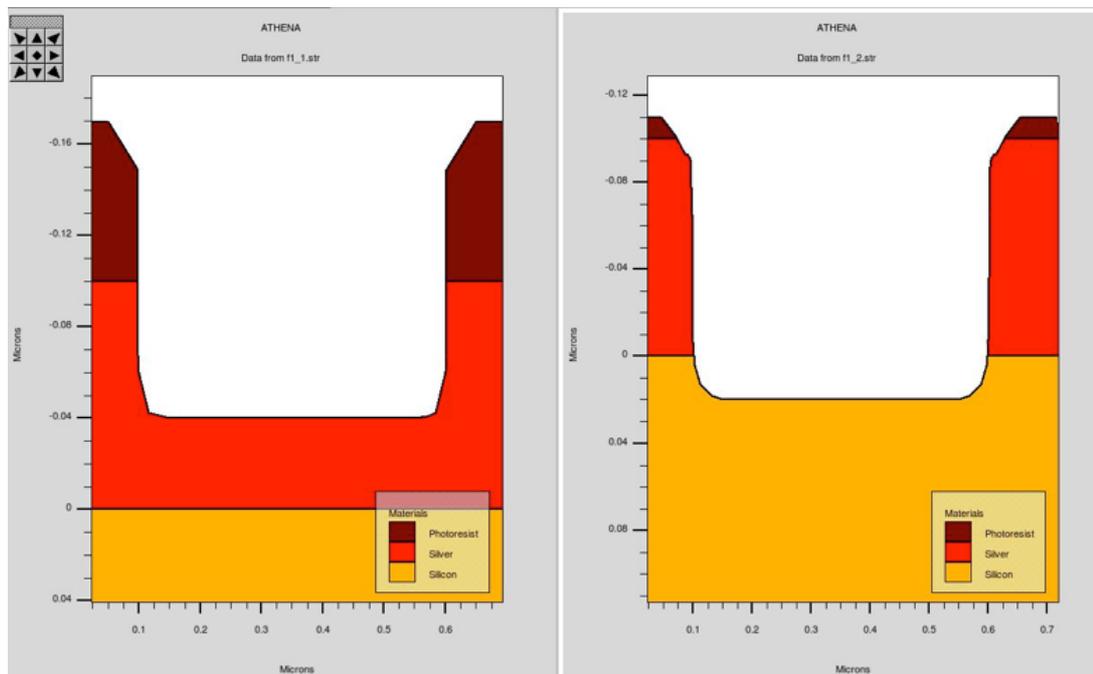


a)

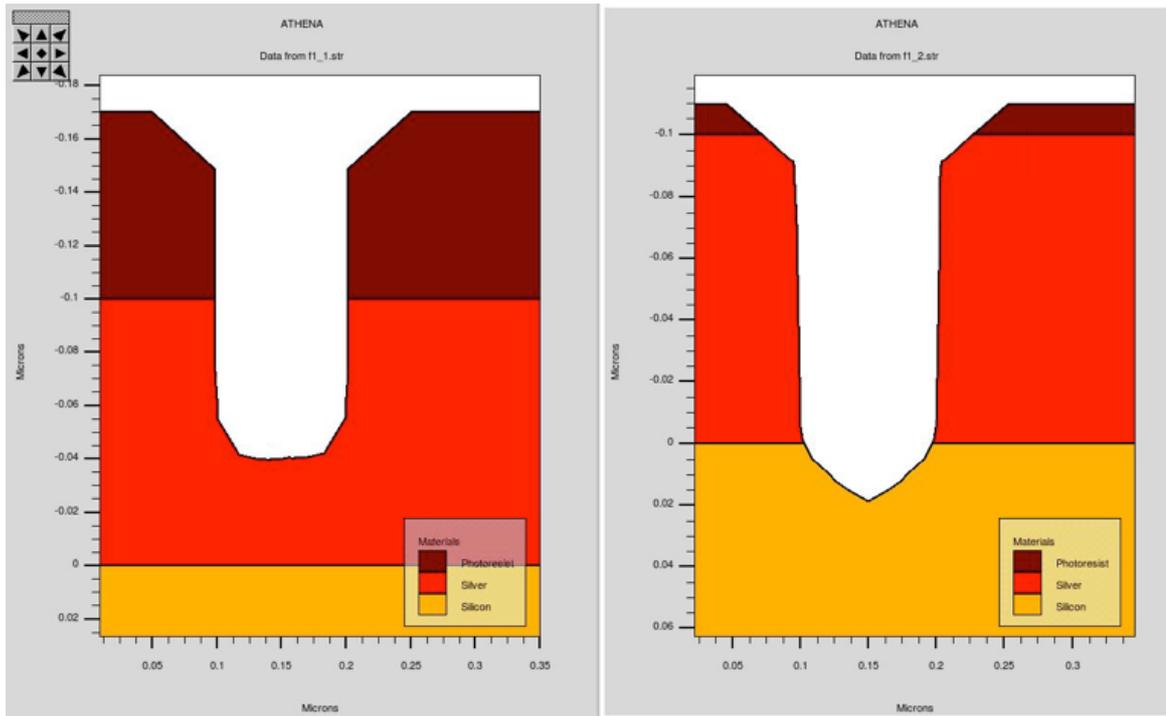


б)

Рисунок 2.4 – Профили травления серебра в режиме РИТ для линейного размера 100 нм (а) и 500 нм (б), слева показан профиль на 50% времени процесса травления, справа – в конце процесса



а)



б)

Рисунок 2.5 – Профили травления серебра в режиме ИСП РИТ для линейного размера 500 нм (а) и 100 нм (б), слева показан профиль на 50% времени процесса травления, справа – в конце процесса

Полученные в результате моделирования зависимости скорости травления в плазме аргона для режима РИТ и ИСП РИТ трех линейных размеров отверстий (100, 200, 500 нм) приведены на рисунках 2.6 (для РИТ) и 2.7 (ИСП РИТ). Скорость травления серебра в режиме ИСП, полученная при давлении 3 мторр, мощности ИСП источника 100 Вт, мощности источника смещения 200 Вт и смещении 150В составила 190 нм/мин для размера 100 нм и 220 нм/мин для размера 500 нм, селективность резиста к серебру 0.95:1, угол профиля травления 85-87 градусов. Уменьшение линейного размера до 100 нм приводит к уменьшению скорости травления на 14% при минимальном изменении профиля травления. Также видно, что в данном режиме есть сильный перетрав в подложку кремния, а также растрав маски резиста и верхней части пленки серебра. Анизотропия процесса РИТ несколько выше, чем в ИСП РИТ, что связано как с разной селективностью, так и с особенностью самого процесса травления.

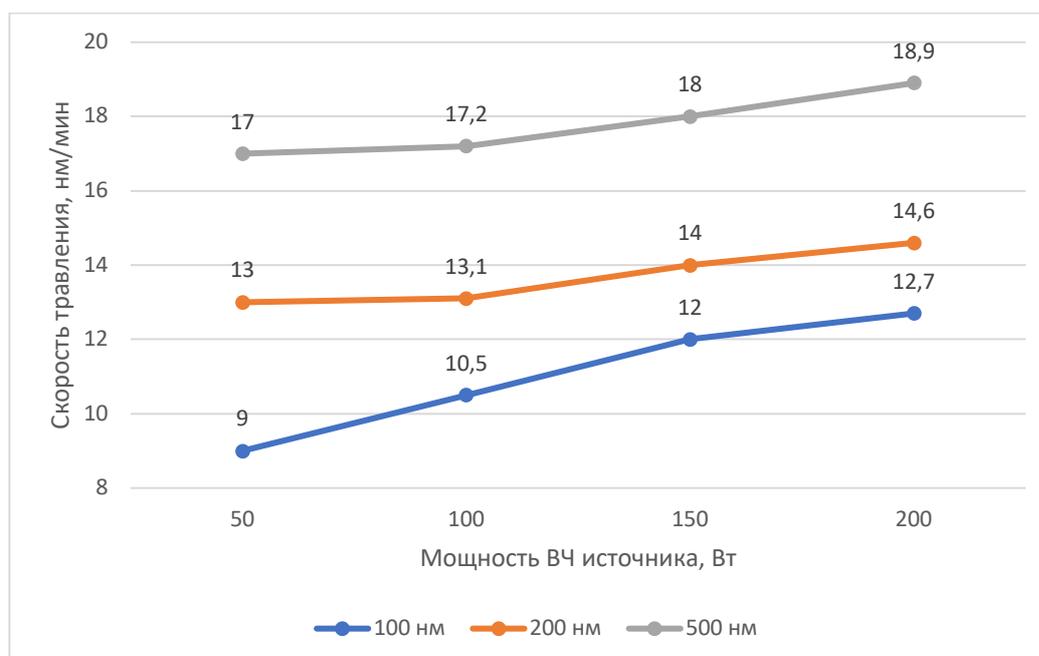


Рисунок 2.6 – Зависимость скорости травления от мощности ВЧ источника, для трех линейных размеров отверстий 100, 200 и 500 нм

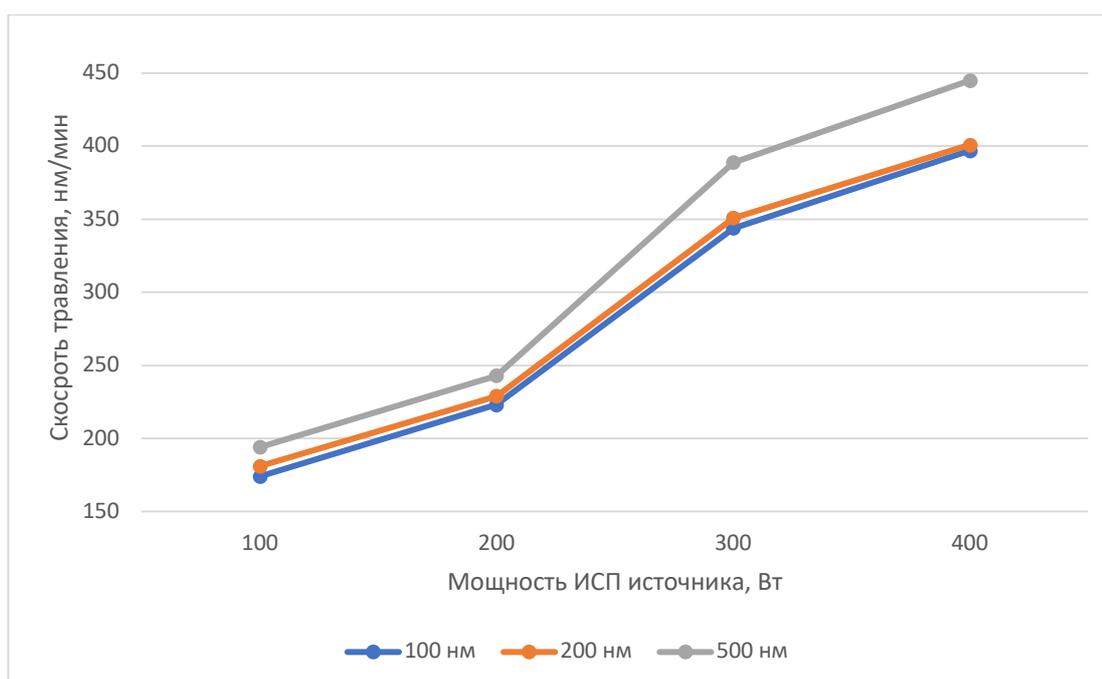


Рисунок 2.7 – Зависимость скорости травления от мощности ВЧ источника, для трех линейных размеров отверстий 100, 200 и 500 нм

Моделирование показало, что требуемые для процессов изготовления спазера профили травления можно получить как для режимов ИСП РИТ, так и для РИТ. Для использования ИСП РИТ необходимо использовать более толстую маску

резиста, а сам процесс из-за более высокой скорости травления является менее контролируемым.

### 2.3 Моделирование процессов травления тонких пленок нитрида кремния

Для разработки технологии плазменного травления тонких пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , с помощью моделирования было проведено исследование зависимостей скоростей травления и получаемых профилей для газа  $\text{SF}_6$ . Моделирование проводилось при следующих условиях: маска резиста толщиной 200 нм,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  100 нм, подложка из кремния, температура на подложке 15 градусов. Тип плазмы – ИСП РИТ и РИТ, давление 3 мторр, температура газа – 5500 К, линейные размеры окна травления составляли 100 нм.

В результате проведенных расчетов было показано, что скорость травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в режиме в режиме РИТ 96 нм/мин, селективность 0.95:1, угол профиля составил 87-88 градусов. Результат моделирования приведен на рисунке 2.8.

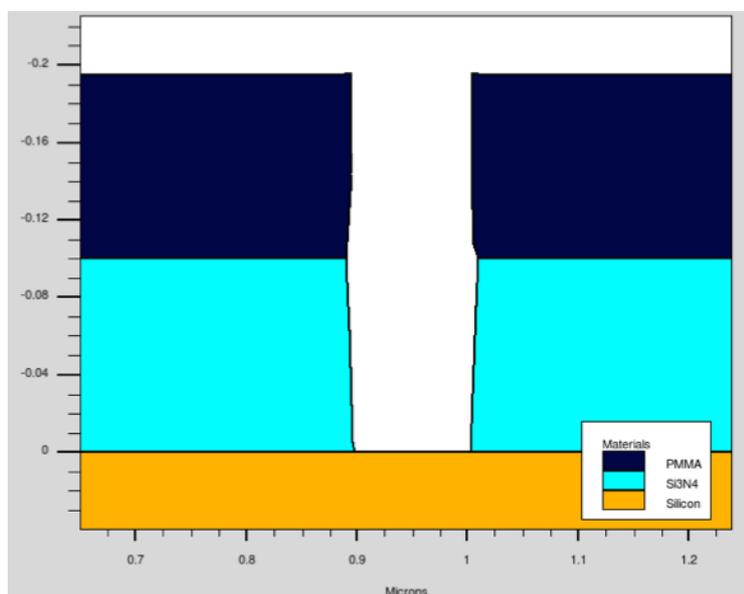


Рисунок 2.8 – Профиль травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  полученный методом РИТ через резистивную маску ПММА

Результат моделирования для режима ИСП РИТ приведен на рисунке 2.9. Скорость травления составила 543 нм/мин, селективность 1:2, угол профиля 88-89°, однако у дна видно скругление профиля, которое связано с анизотропией процесса травления и преимущественно с химической компонентной травления.

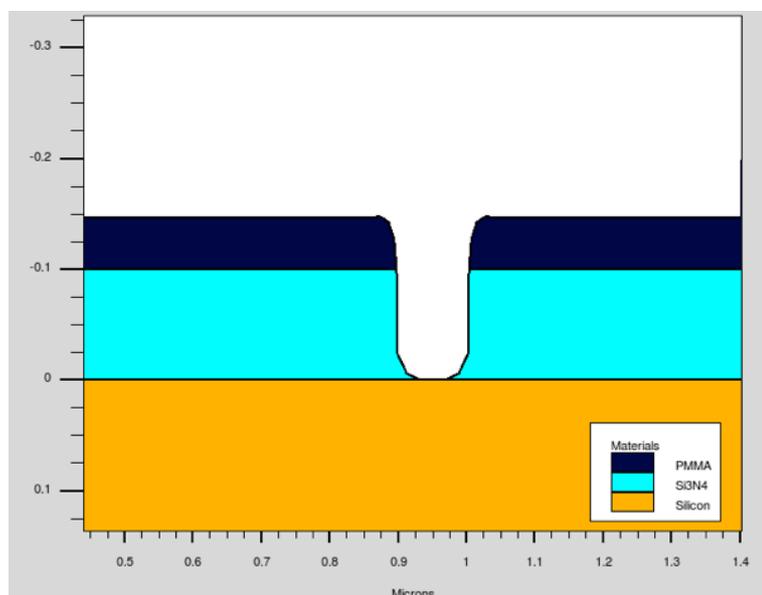


Рисунок 2.9 – Профиль травления Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> полученный методом ИСП РИТ через резистивную маску ПММА

Моделирование показало, что требуемые для процессов изготовления СВЧ транзисторов профили травления можно получить как для ИСП РИТ, так и для РИТ. Для ИСП РИТ в нижней части щели можно получить наклонные, сужающиеся относительно размера в резисте, стенки травления Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, что должно эффективно снижать максимальные значения электрического поля в стоковой стороне канала под затвором.

## 2.4 Основные результаты и выводы главы 2

В результате проведенного моделирования процессов ИСП РИТ и РИТ для травления тонких пленок Ag для спазеров и тонких пленок Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 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 с использованием аргона, так и для травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с использованием  $\text{SF}_6$ ;
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 травлении  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с использованием режима ИСП РИТ возникает наклон стенок вблизи дна затворной щели, что дает сужение размера щели по сравнению с размером в резисте;
4. Результаты моделирования процессов травления показали, что для травления пленок Ag и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  через электронный резист возможно использовать как процессы РИТ, так и процессы ИСП РИТ.

## ГЛАВА 3. ПРОЦЕССЫ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАНОРАЗМЕРНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА

### 3.1 Подготовка образцов и формирование маски для травления

Для разработки плазменных процессов травления элементов наноэлектроники первым этапом является выбор маски для травления. В качестве подложки использовались кремниевые пластины диаметром 100 мм и ориентацией  $\langle 100 \rangle$ , подложки из слюды или подложки из кварца. В качестве маски для травления использовались два варианта: электронный резист ПММА или двухслойная маска ПММА/SiO<sub>2</sub>.

Диоксид кремния был осажден с использованием плазмохимического осаждения из газовой фазы моносилана с использованием источника ИСП. После процесса осаждения были проведены измерения напряжений в пленке, они составили  $< 350$  МПа.

Образец представлял из себя кусок кремниевой пластины с осажденным на него слоем оксида кремния толщиной 200 нм методом плазмохимического осаждения из газовой фазы с использованием индуктивно-связанной плазмы и нанесенным центрифугированием резиста ПММА толщиной в 400 нм. Размеры структур для отработки процесса травления приведены в таблице 3.1. Топология тестового кристалла представлена на рисунке 3.1.

Таблица 3.1 – Размеры структур для отработки процесса травления оксида кремния

Диаметр, нм	Шаг, нм
150	545
175	565
200	585

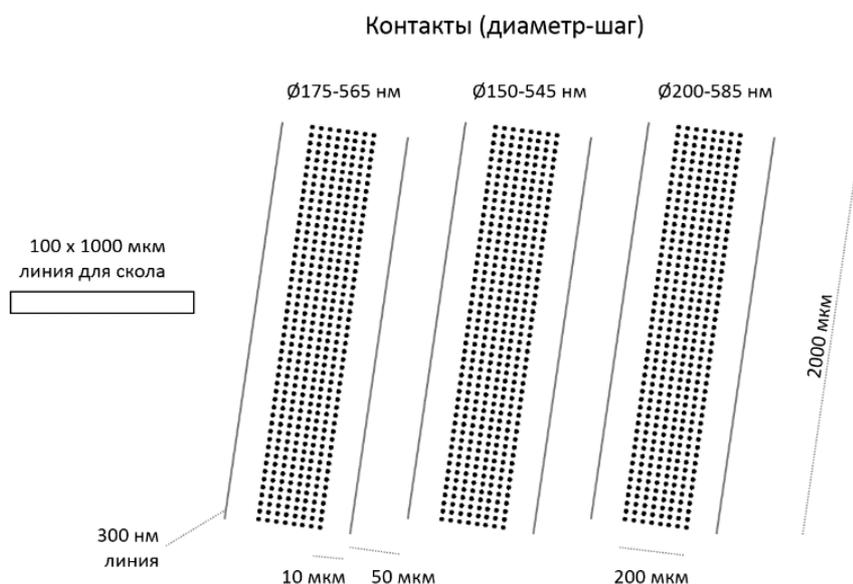


Рисунок 3.1 – Топология тестового кристалла для отработки травления серебра и предварительного формирования маски через резист

Толщина маски резиста была выбрана вдвое больше толщины  $\text{SiO}_2$  с целью сохранения остаточного слоя резиста даже в случае минимально ожидаемой селективности. Скорость травления может отличаться в зависимости от линейных размеров, что было учтено при выборе топологии. Поскольку измерение полученных образцов должно проводиться по сколу, для получения достоверных результатов на СЭМ необходимо, чтобы структуры находились на линии скола. Для облегчения данной задачи все группы контактов было решено сместить на расстоянии, равное  $1/3$  диаметра отверстий.

С помощью электронно-лучевой литографии в электронно-лучевом резисте ПММА формировались отверстия с размерами менее 200 нм. Удаление резистивной маски после травления оксида кремния производилось в растворителе Remover PG.

### 3.2 Формирование твердой маски из $\text{SiO}_2$ для травления серебра

Первым этапом создания наноразмерного источника света является травление маски  $\text{SiO}_2$ . Исходя из оценки селективности скорости травления оксида кремния к серебру, толщина оксида была выбрана равной 250 нм. Процесс

травления производился в режиме РИТ, поскольку в нем выше селективность к электронно-лучевому резисту. Хладоны имеют свойство пассивировать структуры в плазме из-за наличия радикалов  $CF_n$ , поэтому для травления требуется высокое напряжение смещения для преодоления порога пассивации.  $C_4F_8$  по литературным данным имеет меньшую селективность к ЭЛЛ резистам из-за более высокого порога для предотвращения пассивации. Поэтому в качестве газа для травления был выбран  $CHF_3$ .

Травление оксида кремния проводилось в смеси  $CHF_3$  и Ar, в режимах выбранных на основе анализа литературы. В таблице 3.2 приведены полученные в результате эксперимента параметры процесса травления оксида кремния.

Таблица 3.2 – Параметры процесса травления оксида кремния

Параметры	Значение
Процессные газы	$CHF_3 : Ar$
Скорость травления	$> 25$ нм/мин
Неравномерность травления по пластине	$< \pm 5\%$ для 200 мм пластины
Селективность к резисту РММА	1,5:1
Угол профиля	$> 88^\circ$

На рисунке 3.2 приведены полученные с помощью электронного микроскопа снимки скола после травления в выбранном режиме.

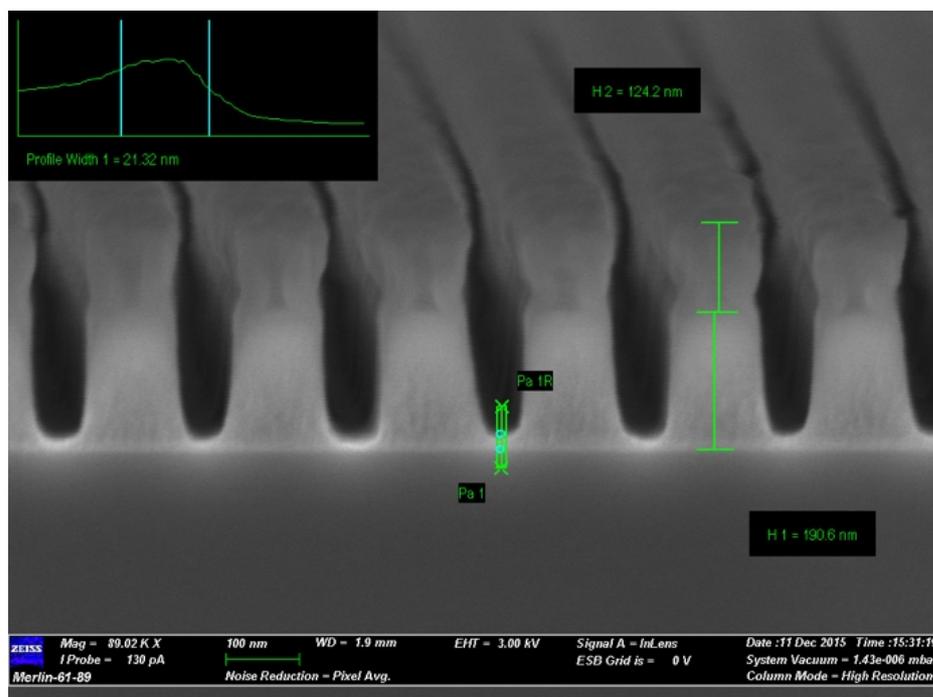


Рисунок 3.2 – Профили травления  $\text{SiO}_2$  в режиме РИТ в  $\text{CHF}_3\text{-Ar}$

Полученная скорость травления составила 32,7 нм/мин, селективность к резисту ПММА 1,8:1. Выбранный режим обладает достаточно высокой селективностью. Угол профиля на структурах составил 85,6°. Стенки в  $\text{SiO}_2$  после травления имеют характерный скругленный профиль. Так как в дальнейшем маска из  $\text{SiO}_2$  должна использоваться для травления пленок серебра, требуется достичь максимально вертикального профиля травления с ровным наклоном стенок.

В результате проведенных исследований режим травления был изменен: давление было уменьшено с 25 мторр до 15 мторр, ВЧ мощность на источнике емкостно-связанной плазмы (далее обозначаемого как мощность ВЧ плазмы) увеличена с 200 до 300 Вт. Профили травления для образца с оптимизированным режимом представлены на рисунке 3.3.

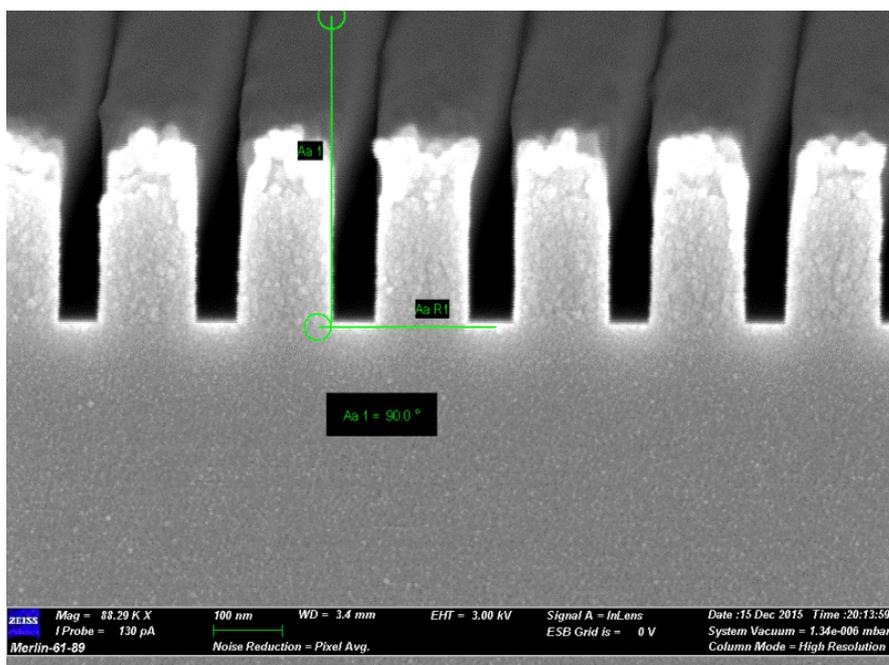


Рисунок 3.3 – Полученные профили травления диоксида кремния оптимизированным режимом

Оптимизированный режим травления имеет следующие параметры: мощность ВЧ плазмы 300 Вт, давление 10 мТорр, поток  $\text{CHF}_3$  12  $\text{см}^3/\text{мин}$ , поток аргона увеличен до 50  $\text{см}^3/\text{мин}$ . Скорость травления составила 28 нм/мин, селективность к ПММА 0,9:1. Увеличение ВЧ мощности позволяет получить ровные стенки в  $\text{SiO}_2$  с углами профиля, близкими к  $90^\circ$ , однако селективность при таком режиме снижается.

### 3.3 Процесс плазменного травления серебра

Формирование наноразмерных структур в металле методами плазменного травления является одной из ключевых операций в технологии изготовления наноисточника света - спазеров.

Особенностью плазменного травления тонких пленок серебра является невозможность образования летучих химических соединений в ходе процесса в камере травления. Для образования летучих соединений частиц серебра в плазме необходимо обеспечить достаточный нагрев подложкодержателя. Данные по температуре кипения и температуре при давлении насыщенного пара  $10^{-4}$  торр ряда

химических соединений серебра приведены в таблице 3.3. В литературе встречаются эксперименты [61], где серебро травится различными смесями, в том числе  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HBr}$ . Однако в таких процессах появляется проблема образования побочных реакций продуктов травления серебра, которые сложно удалить. Температуры для образования летучих частиц, указанные в таблице 3.3, невозможно получить в силу технических ограничений установок и используемых материалов. Например, максимальный нагрев установок Oxford Instruments возможен только до 400 градусов по Цельсию. Поэтому для удаления продуктов реакции необходимо значительно увеличить физический компонент распыления процесса травления, что обеспечивается мощностью источника ВЧ плазмы и выбором состава газовой смеси.

Несмотря на сложность с удалением серебра и его продуктов реакции в процессе реактивного ионного травления, процесс физического распыления серебра ионами инертных газов не требует получения очень высоких энергий ионов. По сравнению с другими металлами серебро обладает очень высокой скоростью распыления ионами инертных газов. При распыления аргоном с энергией 200 эВ и плотностью тока  $1 \text{ mA/cm}^2$  скорость распыления серебра составляет 100 нм/мин, в то время скорость распыления как золота составляет 71 нм/мин [62]. Это дает возможность рассматривать процесс физического распыления серебра ионами аргона как альтернативу реактивному ионному механизму травления.

Таблица 3.3 – Температуры кипения и давления насыщенного пара  $10^{-4}$  торр серебра и некоторых химических соединений серебра

Химическое соединение	Температура кипения, °С	Температура при давлении насыщенного пара $10^{-4}$ торр, °С
Серебро – Ag	2162	1105
Хлорид серебра – AgCl	1547	520
Фторид серебра – AgF	1159	-
Бромид серебра – AgBr	1502	380

За счет выбора мощности источника ВЧ плазмы для травления тонких пленок серебра возможно использовать два варианта процесса: физическое распыление и

реактивное ионное травление со значительным физическим компонентом травления. Поскольку топологические элементы в электронных резистах типа ПММА деформируются при температурах выше 180°C, а перегрев пленки серебра приводит к изменениям в кристаллической структуре пленки, для разработки технологии травления серебра для наноструктурирования света исследовались оба возможных варианта процесса – травление в аргоне или смеси аргона и хлора. Режимы травления выбирались с учетом необходимости сохранить неизменными структуру маски и пленки серебра.

Для физического распыления существует ряд технологических ограничений:

- При травлении в плазме аргона требуется достаточно большая энергия ионной бомбардировки, что снижает селективность маски меньше 1:1;
- Использование источника индуктивно-связной плазмы повышает распределение ионов по энергиям и распределение траектории ионов по углам, что снижает получаемый угол профиля травления;
- Для обеспечения наилучшего угла профиля требуется низкое давление в камере < 10 мторр, что ухудшает зажигание и стабильность горения плазмы.

Из-за низкого давления паров серебра и продуктов его взаимодействия с хлором, фтором и бромом, процесс травления ограничен преимущественно скоростями физического распыления серебра и его продуктов, удаляемых с поверхности образца за счет сообщаемой энергии (>50 эВ). Это позволяет добиваться высокой анизотропии процесса, однако удаляемые частицы металла не образуют летучих соединений и переосаждаются на стенки маски, что приводит к изменению ее профиля и нарушению формы топологических элементов в металле. Для препятствия переосаждению частиц серебра возможно добавление хлора в качестве рабочего газа. Однако хлор подтравливает маску, а также образует нелетучие соединения с серебром, которые частично удаляются в процессе бомбардировки аргоном. После процесса их необходимо удалять в растворе гидроксида аммония. Линейные размеры и форма топологии в маске в этом случае переносятся с большими отклонениями.

Для более анизотропного травления и наименьшего отклонения ионов рабочего газа от вертикальной траектории требуется минимальное рабочее давление в камере, для чего был полностью открыт затвор между высоковакуумным турбомолекулярным насосом и камерой.

Проведенные эксперименты позволили выбрать режим с использованием смеси Ag и Cl<sub>2</sub> с приемлемой величиной скорости травления. Параметры выбранного процесса приведены в таблице 3.4. Толщина слоя Ag на кремнии составляла 150 нм.

Таблица 3.4 – Параметры процесса травления серебра

Параметр	Значение
Давление, мторр	1,5
Мощность источника ИСП, Вт	1000
Мощность источника ВЧ плазмы, Вт	300
Время процесса, с	30
Поток Ag, см <sup>3</sup> /мин	16
Поток Cl <sub>2</sub> , см <sup>3</sup> /мин	8
Глубина травления, нм	97
Скорость травления, нм/мин	184

Ожидаемая скорость травления при заданных параметрах составляет около 180 нм/мин, поэтому для процесса с маскирующим слоем время травления было выбрано 20 с. Результат травления серебра через маску SiO<sub>2</sub> приведен на рисунке 3.4.

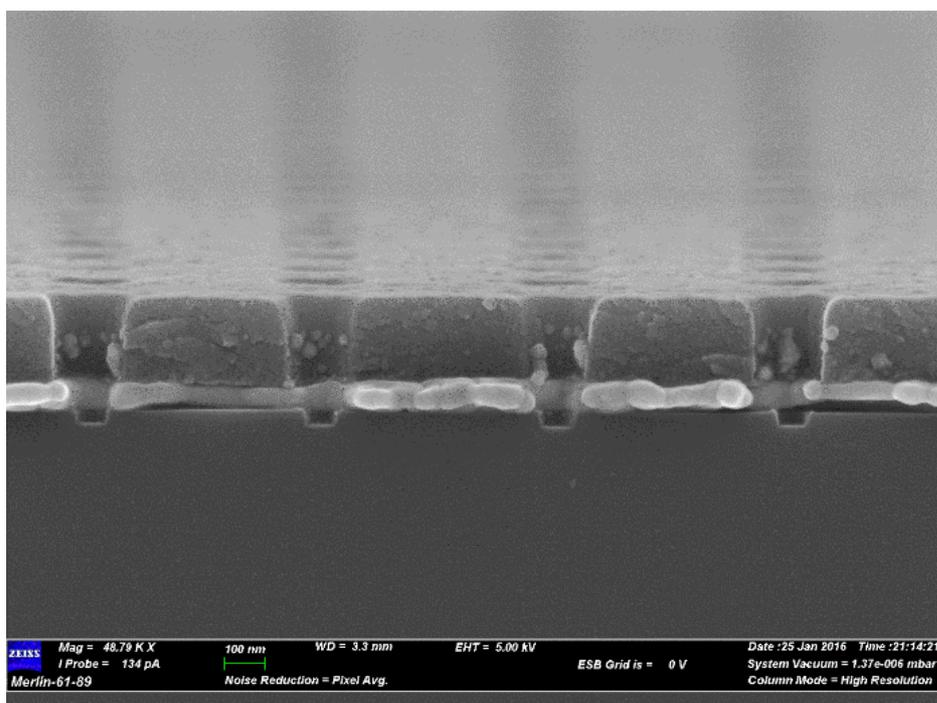


Рисунок 3.4 – Изображение с СЭМ изображение скола образца после травления Ag толщиной 75 нм через маску SiO<sub>2</sub> в плазме Ar/Cl

В результате травления происходит перетрав в подложку кремния, что свидетельствует о высокой скорости травления. Также наблюдается переосаждение частиц серебра на стенки маски SiO<sub>2</sub>. Профиль травления пленки серебра оценить невозможно из-за деформации материала во время скола образца. Для улучшения контроля процесса травления необходимо несколько уменьшить скорость травления.

При уменьшении мощности источника ИСП с 1000 Вт до 500 Вт и мощности источника ВЧ плазмы до 200 Вт скорость травления уменьшается до 160 нм/мин. Результаты травления в течение 35 с показаны на рисунке 3.5.

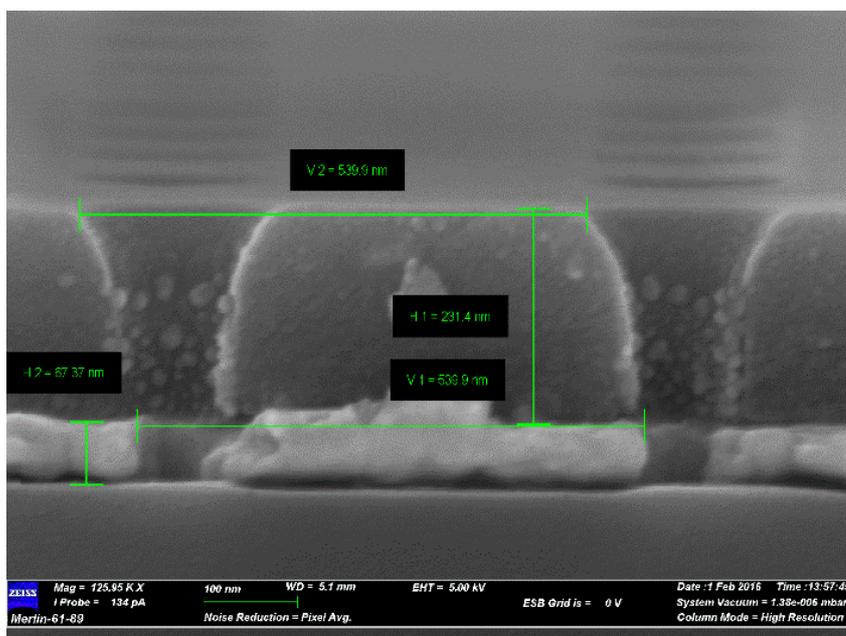


Рисунок 3.5 – Изображение скола с СЭМ образца после травления через маску с уменьшенными мощностями источников плазмы

Несмотря на сниженную мощность, наблюдается переосаждение Ag на стенки маски, при этом стенки маски оказываются деформированными.

Дальнейшее уменьшение мощности ВЧ плазмы до 100 Вт приводит к образованию в отверстиях и на поверхности образца крупных частиц (вероятно, хлорида серебра), что показано на рисунке 3.6. Скорость травления уменьшается до  $60 \div 70$  нм/мин.

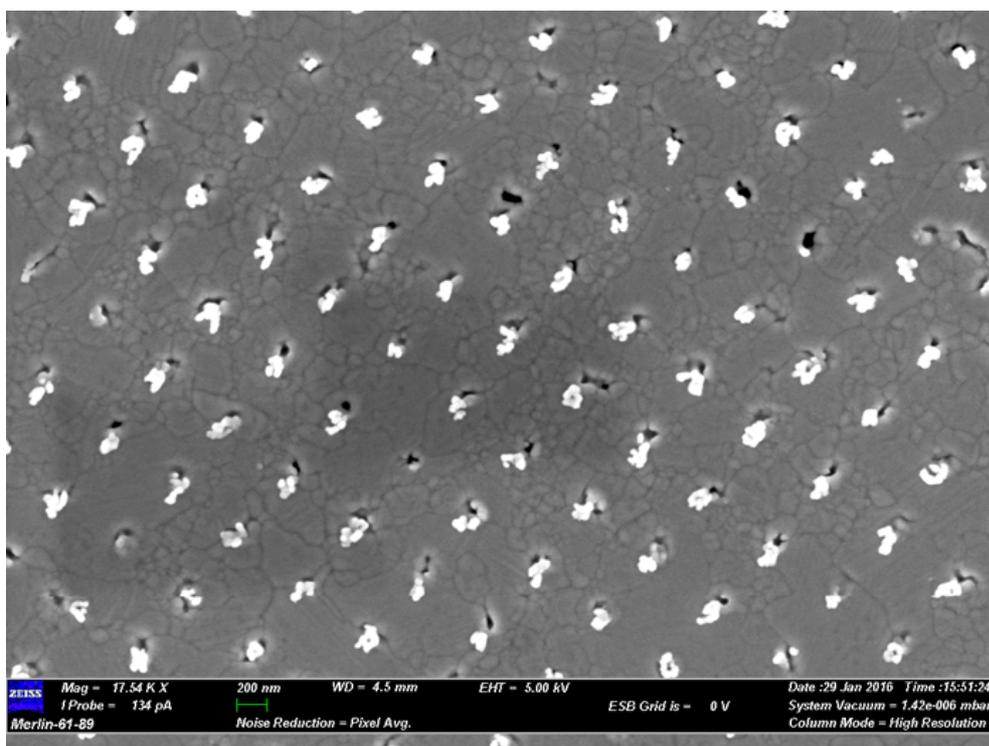


Рисунок 3.6 – СЭМ изображение поверхности образца после травления через маску с уменьшенными мощностями генераторов ИСП и ВЧ

При разработке процессов травления серебра были проведены эксперименты с использованием других газовых смесей ( $\text{Ar}/\text{HBr}$ ,  $\text{Ar}/\text{BCl}_3$ ) для проверки влияния различных примесей на угол и на форму процесса травления. Параметры процесса травления с использованием  $\text{HBr}$  представлены в таблице 3.5, на рисунке 3.7 приведен вид сверху элемента топологии линии шириной 100 нм после травления.

Таблица 3.5 – Режим травления тонкой пленки в плазме  $\text{Ar}$  и  $\text{HBr}$

Шаг	Мощность ИСП, Вт	Мощность ВЧ, Вт	Давление, мторр	Поток газов, см <sup>3</sup> /мин
1	100	300	1	16 ( $\text{Ar}$ )
2	300	300	1	8/8 ( $\text{Ar}/\text{HBr}$ )

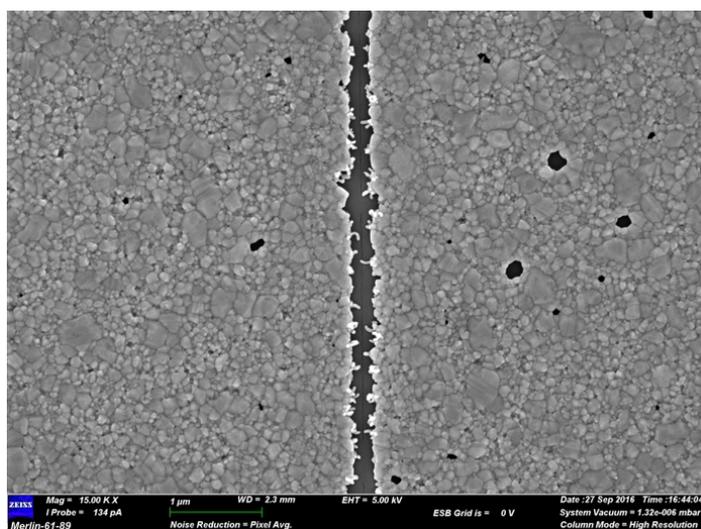


Рисунок 3.7 – Линия 100 нм после травления в плазме Ar и HBr

Параметры травления с использованием  $\text{BCl}_3$  представлено в таблице 3.6, а результат травления на рисунке 3.8.

Таблица 3.6 – Режим травления тонкой пленки в плазме Ar и  $\text{BCl}_3$

Шаг	Мощность ИСП, Вт	Мощность ВЧ, Вт	Давление, мторр	Поток газов, см <sup>3</sup> /мин
1	100	300	1	16 (Ar)
2	300	300	1	8/8 (Ar/ $\text{BCl}_3$ )

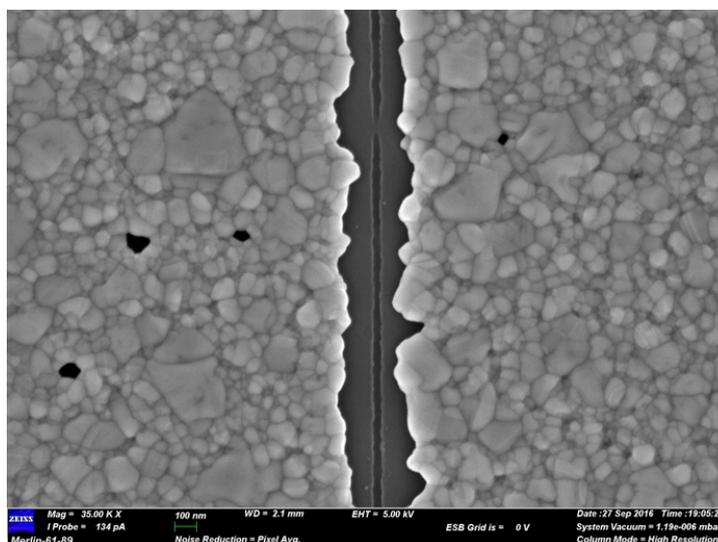


Рисунок 3.8 – Линия 100 нм после травления в плазме Ar и  $\text{BCl}_3$

Из полученных результатов можно сделать вывод, что плазма HBr и  $\text{BCl}_3$  агрессивно воздействует на электронный резист ПММА, из-за чего сильно деформируется край формируемой топологии. На образцах с добавлением этих примесей

топология не сохранилась из-за агрессивного воздействия плазмы на серебро и резист, вызывающее оплавление резиста и разрушение пленки Ag. Данные газовые смеси не подходят для травления.

В ходе экспериментов наблюдалось частичное или полное удаление пленки Ag в ходе жидкостного травления маски SiO<sub>2</sub>. Высокое аспектное соотношение при использовании маски SiO<sub>2</sub>, и переосаждение частиц Ag в ходе травления на стенки маски является еще одной выявленной проблемой. С учетом сохранения высокой скорости травления даже при уменьшенной ВЧ мощности, и накопления на поверхности нелетучих продуктов реакции получение управляемого процесса травления для двухслойной маски ПММА/SiO<sub>2</sub> крайне сложно [63].

Исследование процесса травления с маской из электронного резиста и уменьшенной мощностью ИСП, напротив, позволяет устранить проблемы связанные с очисткой поверхности после травления. Электронные резисты, такие как ПММА, легко удаляются в органических растворителях. Однако для удаления с поверхности продуктов реакции и атомов металла необходимо повышать мощность источника емкостной плазмы. Для реализации процесса травления отверстий через электронный резист он должен иметь устойчивость к воздействию плазмы. Однако ПММА обладает сравнительно низкой плазмостойкостью. В связи с этим, процессы травления серебра имеют узкое процессное окно, так как, с одной стороны, требуется высокая плотность энергии для травления тонких пленок серебра (увеличение энергии для исключения переосаждения металлических частиц на электронный резист и получения наилучшего угла профиля), с другой стороны, при использовании избыточной мощности электронный резист сгорает под действием агрессивной ионной бомбардировки. Для исключения деформации ПММА были проведены серии экспериментов с различными мощностями источников плазмы. Также ПММА обладает низкой стойкостью к хлорсодержащей плазме, в связи с чем процессы травления проводилось в плазме аргона.

Процесс плазменного травления серебра разрабатывался для трех типов подложек: кварца, слюды и кремния. В результате ионной бомбардировки в процессе травления происходит нагрев всей структуры образца. Для исключения

перегрева и деформации электронного резиста ПММА теплоотвод был обеспечен с помощью подачи гелия на обратную сторону подложки и фиксации образца на подложку из кремния на вакуумное масло Fomblin Oil YV LAC 25/6. Данные по теплопроводности различных используемых материалов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Теплопроводность серебра и различных подложек

Материал	Теплопроводность при 25С, Вт/(м*К)
Слюда – МІСА	0,71
Серебро - Ag	429
Кварц – Fused Silica	1,38
Кремний - Si	1,3

Было обнаружено, что из-за особенностей структуры подложки из слюды ее контакт с подложкой, на которой она закреплена во время травления, может быть неплотным, в связи с чем большинство образцов перегреваются и на них деформируется слой резиста ПММА. Деформация ПММА в результате оплавления показана на рисунке 3.9.

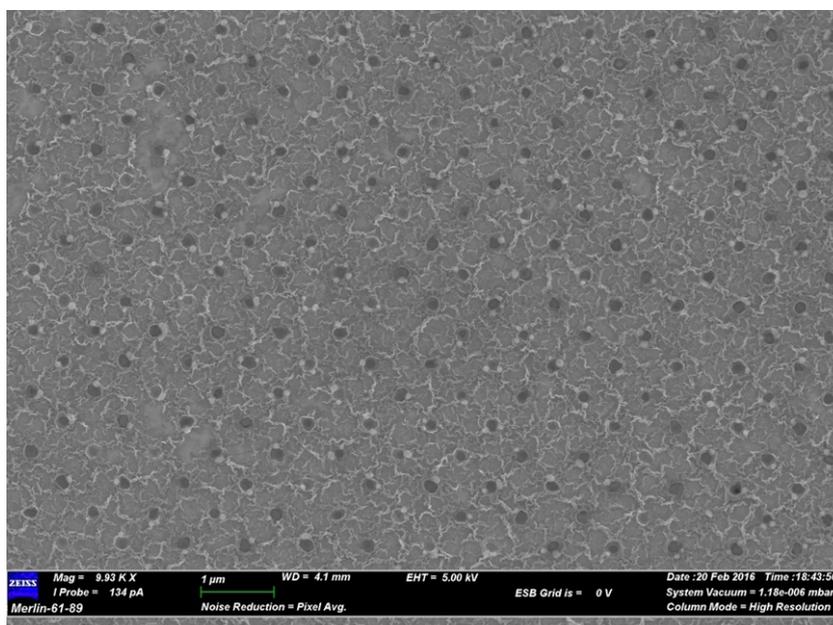


Рисунок 3.9 – Оплавление ПММА при мощности ИСП 1000 Вт

Для минимизации перегрева образца во время процесса травления, помимо фиксации образца на подложку на вакуумное масло Fomblin Oil YV LAC 25/6 с последующим вакуумированием образца в течении 7 минут до вакуума в шлюзе не

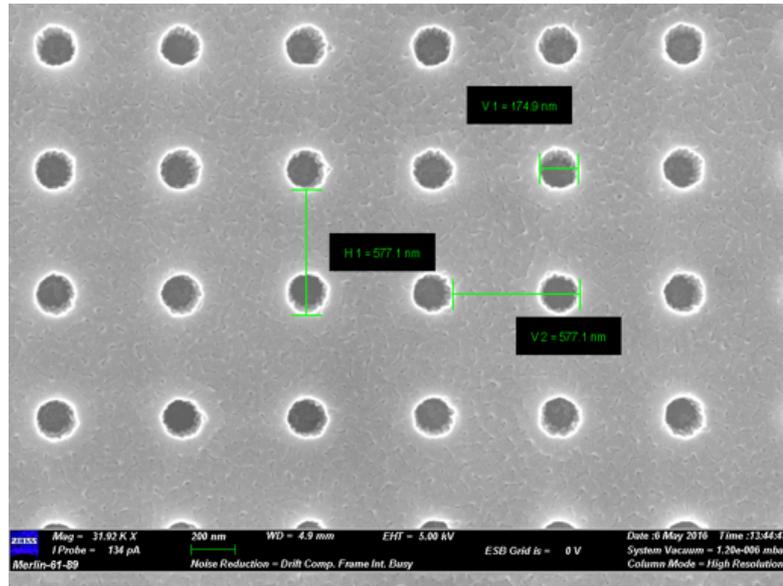
ниже  $5 \cdot 10^{-5}$  мТорр, было увеличено давления гелия до 10 мторр и выдерживание образца в реакционной камере в течение 5 минут для его термостабилизации.

Эксперименты по травлению серебра через ПММА показали, что электронный резист не выдерживает высокие мощности источника ИСП: в течение процесса происходит перегрев резистивного слоя и дальнейшее его оплавление. Результаты исследования и режимы травления через ПММА на подложке из слюды приведены в таблице 3.8.

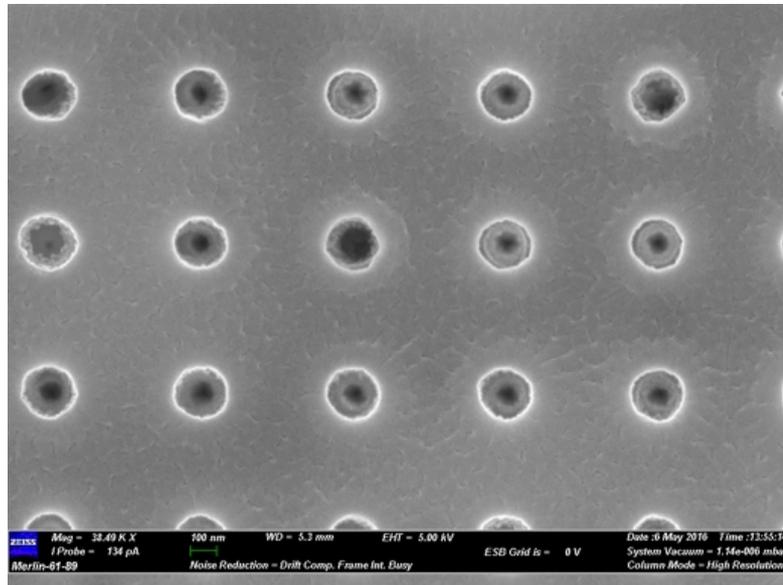
Таблица 3.8 – Режимы плазменного травления пленок серебра через электронно-лучевой резист ПММА

Мощность ИСП, Вт	Мощность ВЧ, Вт	Время, сек	Результат
1000	300	20	Оплавление и деформация резиста
1000	300	10	Оплавление и деформация резиста
500	200	20	Оплавление и деформация резиста
500	100	20	Оплавление и деформация резиста
500	300	10	Оплавление и деформация резиста
100	300	330	Оплавление и деформация резиста
300	300	60	Небольшая деформация на краях отверстий - рисунок 3.8 а)
100	300	240	Небольшая деформация резиста, края почти ровные - рисунок 3.8 б)
100	200	60	Ровные края - рисунок 3.8 в)

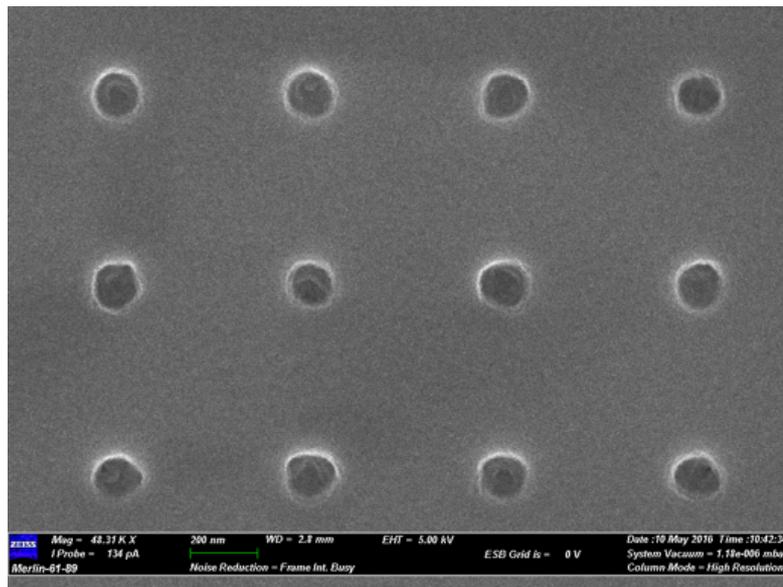
Внешний вид отверстий при различном соотношении мощностей ИСП/ВЧ для времени травления, достаточного для травления слоя Ag, показан на рисунке 3.10.



a)



b)



B)

Рисунок 3.10 – Внешний вид отверстий при соотношении мощностей ИСП/емкостной плазмы 300/300 (а), 100/200 (б), 100/300 (в) при времени травления 60 сек (а, в), 240сек (б)

Результаты экспериментов показали, что резист ПММА не оплавляется за 3÷5 минут на любых типах подложек при обработке в плазме с мощностью источника ИСП меньше чем 300 Вт. Проведенные дополнительные эксперименты с охлаждением подложкодержателя до температур 0°С и ниже не дали положительного результата, поскольку теплопроводность подложки из слюды значительно ниже теплопроводности стола в установке, а нагрев и деформация резиста происходят за первые 20÷30 секунд процесса.

Были проделаны эксперименты с различными термообработками резиста после проявления при температурах от 100°С до 180°С. Результаты после травления представлены на рисунке 3.11.

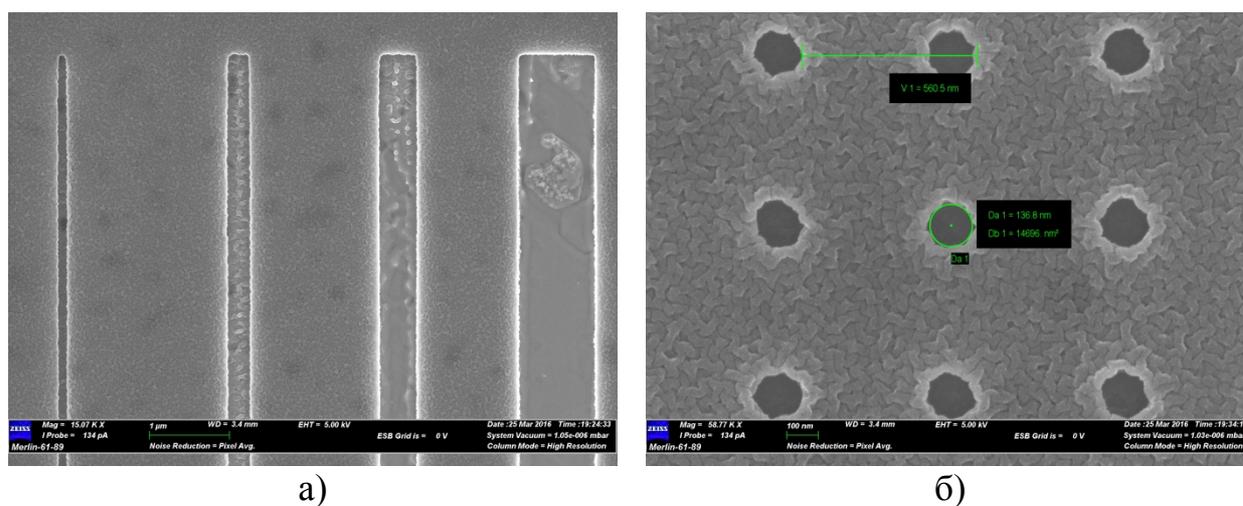


Рисунок 3.11 – Изображение с СЭМ после травления для линий (а) и отверстий (б) в ПММА после термообработки резиста ПММА при 100°С

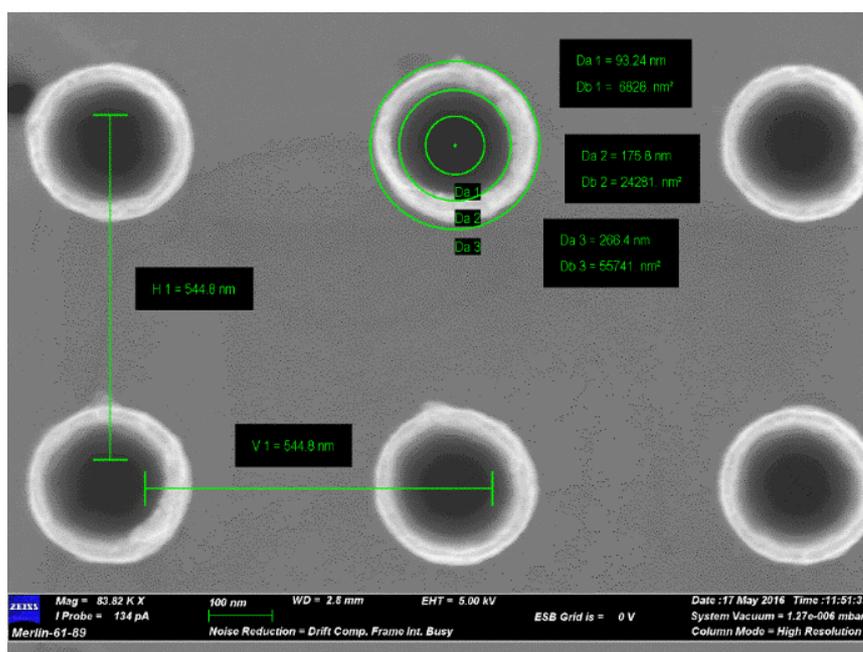
СЭМ снимки показали, что термообработка не позволяет избежать деформации ПММА при травлении с высокой мощностью.

В таблице 3.9 представлены результаты исследования процесса травления серебра в плазме аргона для различных мощностей источников плазмы.

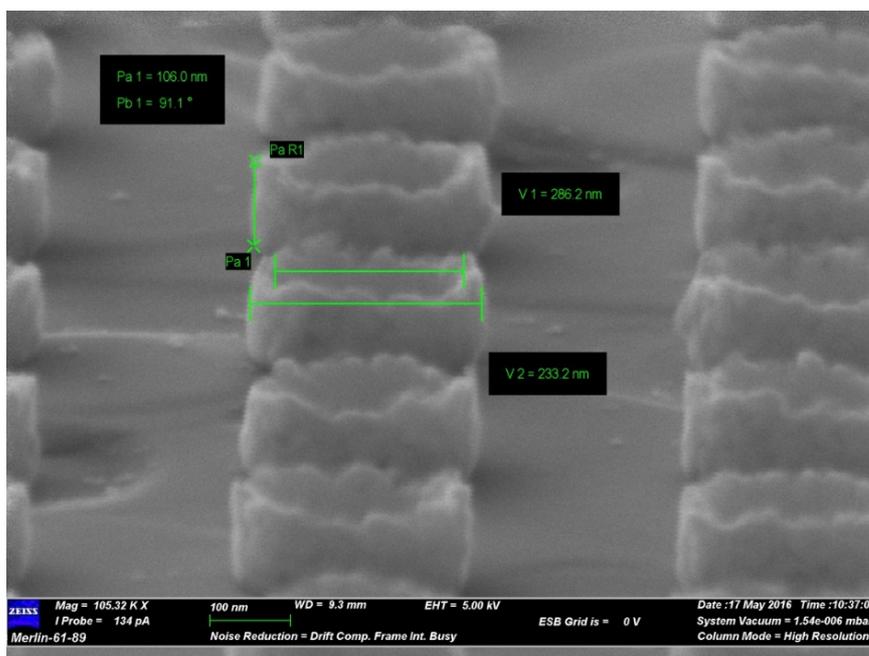
Таблица 3.9 – Скорости травления тонких пленок серебра в плазме аргона с различными мощностями ИСП и ВЧ плазмы

№	Мощность ИСП, Вт	Мощность ВЧ, Вт	Давление, мторр	Поток Ar, см <sup>3</sup> /мин (Аргон)	Время процесса, мин	Скорость травления, нм/мин
1	100	300	1	16	1	48
2	100	300	1	16	2	51
3	100	300	1	16	5,5	47
4	300	150	1	16	0,3	120
5	300	300	1	16	1	161

Результаты травления пленки серебра толщиной 100 нм через ПММА резист толщиной 300 нм на подложке из кремния при выбранных параметрах (мощность источника ИСП 100 Вт, мощность ВЧ плазмы 300 Вт, давление в камере 1 мторр, поток аргона 16 см<sup>3</sup>/мин) представлены на рисунке 3.12.



a)



б)

Рисунок 3.12 – Отверстия, полученные на пленки серебра, вид сверху (а), вид под углом (б)

Как видно из рисунка 3.12 (а,б), вокруг отверстий (резист удален) образовались ореолы из переосажденных на стенки маски частиц серебра. Измерения внутренних диаметров также показали, что профиль травления составляет 65-75 градусов.

Толщина переосажденного слоя приблизительно 10-20 нм. Для устранения этого эффекта были опробованы различные методы:

- Обработка в ультразвуковой ванне;
- Обработка в аргоновой плазме;
- Обработка источником ионов в установке электронно-лучевого осаждения;
- Обработка в мегазвуковой ванне;

Однако не один из методов не смог до конца удалить переосажденные частицы серебра, комбинация методов также не принесла результатов. Причиной возникновения переосаждения является высокое аспектное соотношение диаметра отверстия к толщине слоя ПММА. Для устранения переосаждения толщина маски была уменьшена с 300 нм до 200 нм и, далее, до 130 нм. Три вида переосажденных

на стенки продуктов травления серебра для различных толщин ПММА показаны на рисунке 3.13.

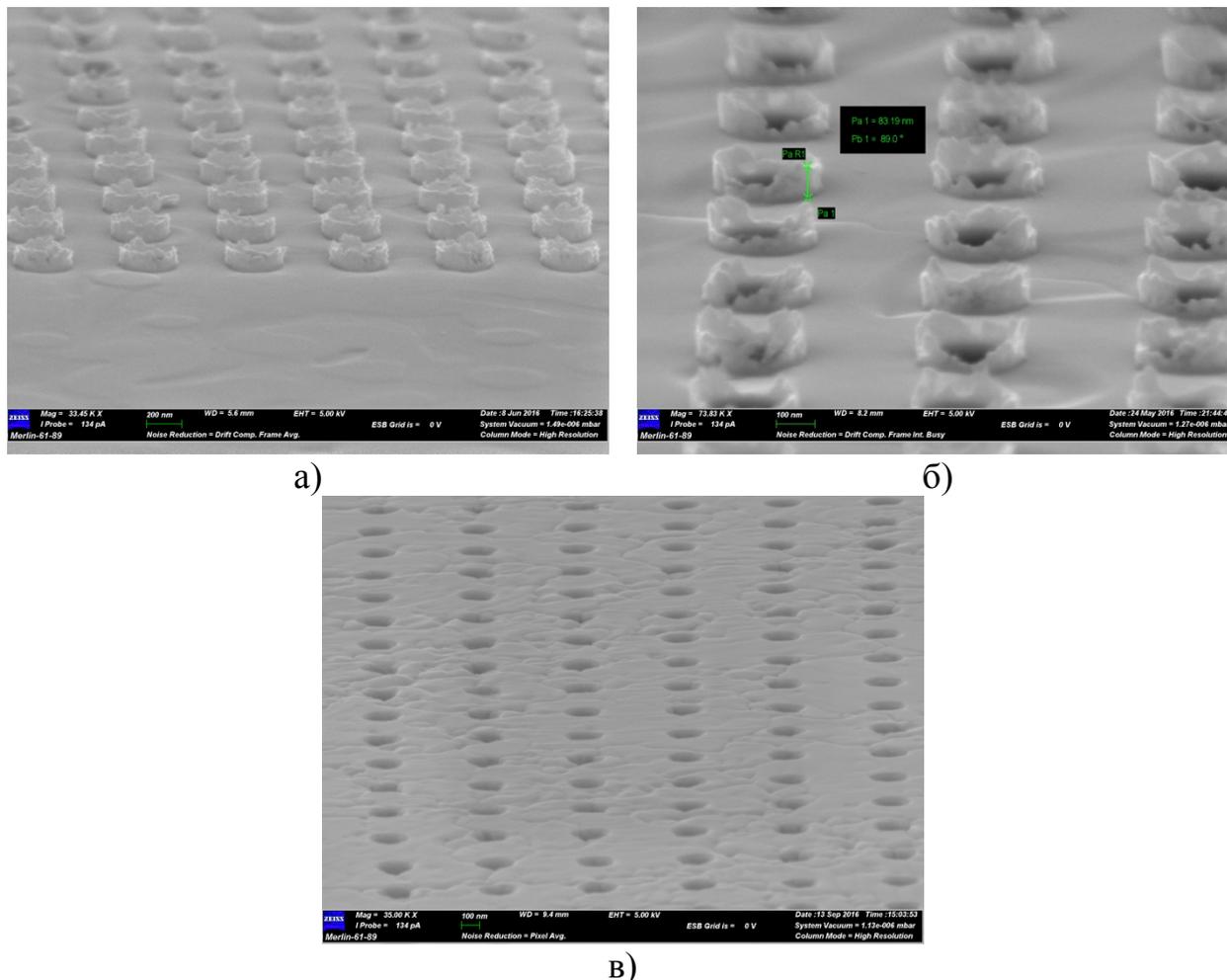


Рисунок 3.13 – Влияние уменьшения толщины маски ПММА на переосаждение серебра на стенки маски: толщина ПММА 300 нм(а); 200 нм (б); 130 нм (в)

Результатом оптимизации толщины маски электронного резиста ПММА до 130 нм является отсутствие переосаждения продуктов травления на стенки маски.

В процессе травления также была выявлена зависимость формы отверстий от размеров кристаллитов пленки серебра. На рисунке 3.14 показаны различные типы полученных элементов.

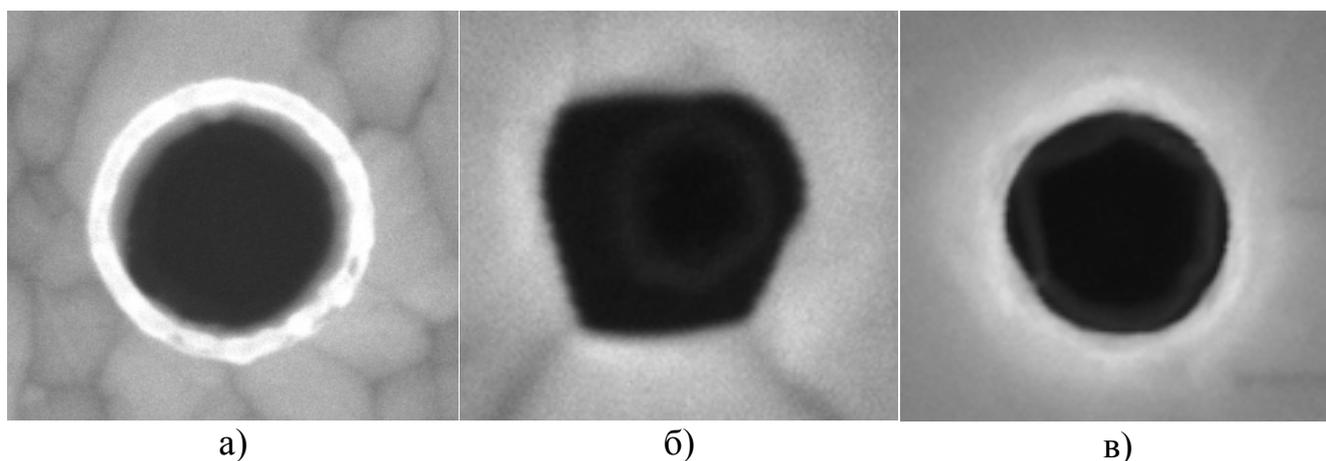


Рисунок 3.14 – Формы получившихся в результате травления отверстий

Травление отверстий первого типа (рисунок 3.14, а) на образцах с тонкопленочным покрытием серебра, имеющих наименьший размер зерна серебра ( $5\div 10$  нм), происходит с переосаждением продуктов травления на маску ПММА, из-за чего образуются структуры, сформированные на кромке, которые формируют ровную форму отверстий.

Второй тип отверстий, представленный на рисунке 3.14 (б), имеет наилучший угол профиля структуры, но наихудшую форму, так как отверстия расположены на границе зерен размером более 500 нм.

Третий тип отверстий, представленный на рисунке 3.14 (в), имеет наилучшую форму и угол профиля, так как попадает на поверхность крупного зерна пленки серебра размером более 1 мкм.

Обнаруженный эффект накладывает дополнительные требования на режимы осаждения и последующей обработки образцов, содержащих слой Ag. Качество получаемых отверстий оказывается напрямую обусловлено параметрами слоя Ag. Известно, что наилучшие оптические свойства и характеристики плазмоники (длина распространения плазмон поляритона) были продемонстрированы при использовании ультратонких монокристаллических пленок [8–10], однако осаждение непрерывных монокристаллических тонких пленок Ag размером менее 100 нм является большой проблемой из-за его сложной природы и необходимости удаления воды с поверхности подложки для температур выше 100 °С. Монокристаллические тонкие пленки Ag могут быть сформированы методами молекулярно-лучевой эпитаксии,

магнетронного распыления и с помощью технологии переноса пленки с подложки-темплейта [64]. Все эти технологии имеют ряд ограничений, которые препятствуют их широкому использованию в массовом производстве плазмонных устройств.

Для формирования качественных отверстий в этой работе были использованы изготовленные с помощью электронно-лучевого напыления тонкие пленки Ag с четко выраженной кристаллической структурой. Однако при формировании маски травления тонкие пленки Ag подвергаются различной термической и плазменной обработке, что может приводить к рекристаллизации и, при повышении температуры, даже к появлению точечных отверстий (рисунок 3.15). Эти факторы приводят к ухудшению оптических свойств пленок [65].

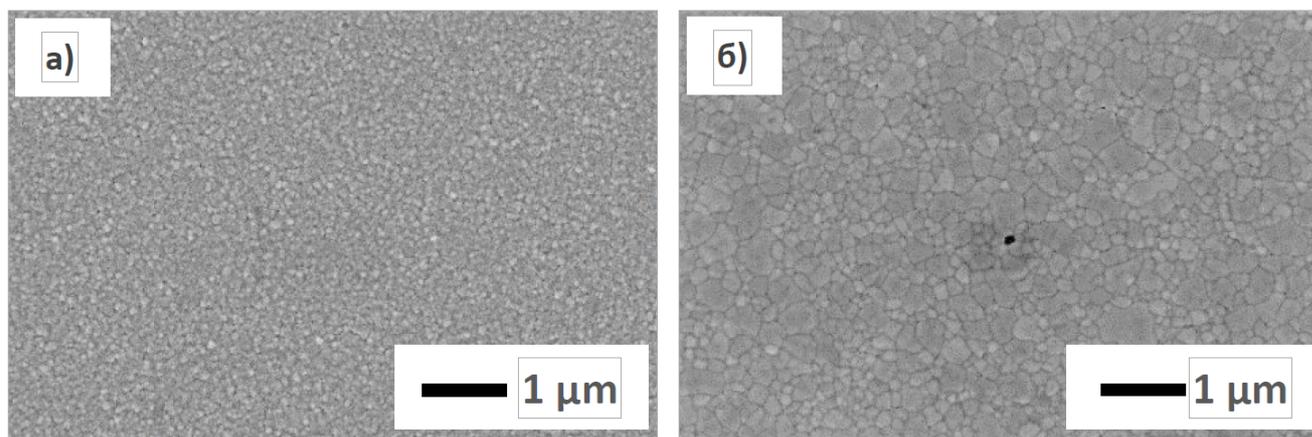


Рисунок 3.15 – Внешний вид пленки Ag толщиной 100 нм после термообработки при 60°C и 180°C

Чтобы исключить рекристаллизацию серебряных пленок, все стандартные обработки на стадии литографии (с максимальной температурой 180° C) были скорректированы: были выбраны температуры обработок, которые совместимы с кристаллической структурой пленки. Чтобы предотвратить рекристаллизацию серебряных пленок, были определены допустимые режимы литографии электронным пучком и режимы (временя и мощность) для процесса плазменного травления (таблицы 3.8, 3.9). Это позволило получить высокую воспроизводимость критических размеров, формы и глубины наноструктур на больших площадях (более 500 × 500 мкм) без повреждения серебряных пленок [66].

На СЭМ измерениях наносточников света в тонких пленках серебра на видах сверху хорошо видны две окружности внутри отверстий, которые свидетельствуют о форме профиля отверстия. Данный эффект связан с особенностью процесса травления в плазме аргона.

С целью улучшения формы отверстий и профиля структуры была проведена оптимизация процесса травления. Для ее реализации был разработан многостадийный процесс травления и определены длительности его стадий. Одним из требований конструкции наносточников света является формирование отверстия в серебре со стенками с углом, близким к 90 градусам. Для этого был разработан двухэтапный процесс травления. На первом этапе травилось 70-80% всей толщины серебра, затем, с большей ВЧ мощностью, а, следовательно, и смещением, травились оставшиеся 20-30% толщины пленки серебра. Время травления с большой мощностью было выбрано с учетом определенных ранее максимально допустимых мощностей и времени обработки как маски ПММА, так и пленки Ag, при которой не наступает как перегрев ПММА, так и рекристаллизация Ag. Увеличение энергии позволяет удалять частицы серебра на большей глубине вплоть до дна получаемых отверстий, а также позволяет улучшить равномерность травления и угол профиля.

На рисунке 3.16 приведены полученные в результате травления на подложке из слюды матрицы отверстий для наносточника света на подложке из слюды. Давление составляло 1 мторр, поток аргона 16 см<sup>3</sup>/мин, температура подложки 30 °С. Время варьировалось в зависимости от толщины пленок серебра.

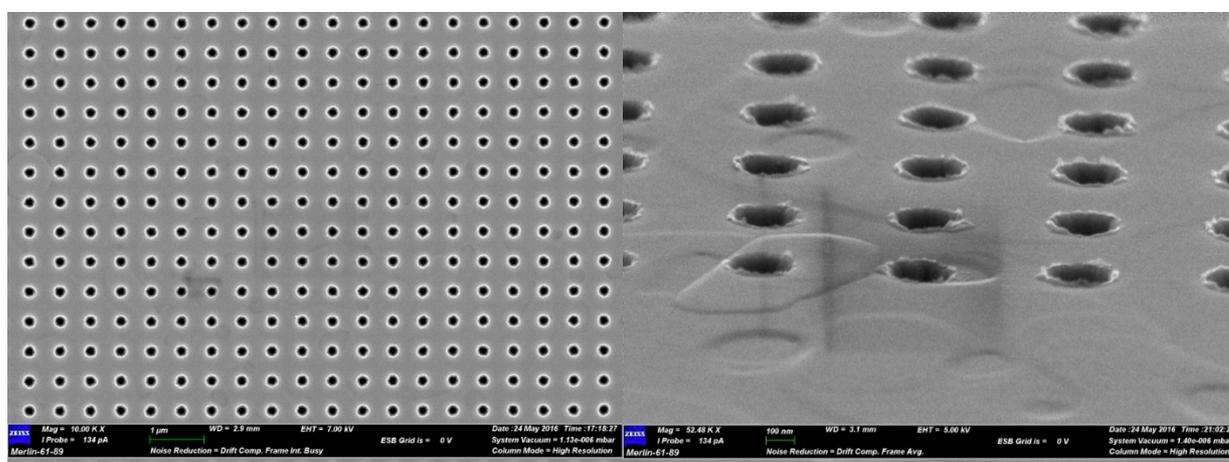


Рисунок 3.16 – Полученные двух этапным травлением серебра матрицы отверстий для создания наносточника света

Первый шаг продолжительностью 2,5 минуты выполнялся при мощности ИСП генератора 100 Вт и ВЧ мощности 300 Вт. Второй шаг длительностью 20 секунд выполнялся при мощности ИСП 300 Вт и ВЧ плазмы 300 Вт. Толщина серебра на образце составляла 112 нм. Как видно из СЭМ снимков, полученные отверстия имеют близкую к окружности форму, не имеют переосаждения, а угол наклона близок к  $85^\circ$ . Аналогичный эксперимент был проведен на подложке из кварца в том же режиме. Результат показан на рисунке 3.17.

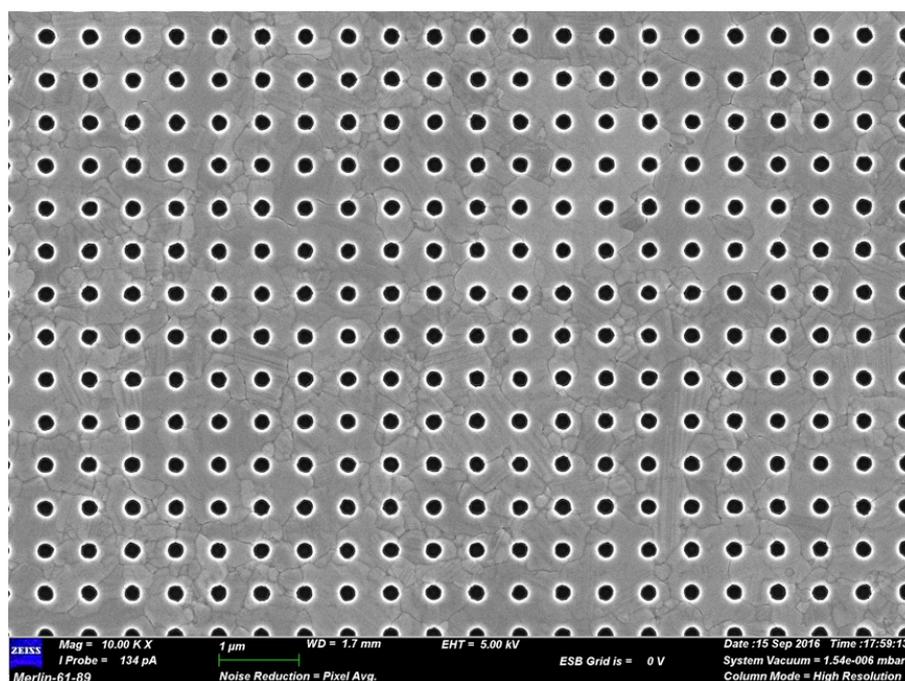


Рисунок 3.17 – Полученные двухэтапным травлением серебра матрицы отверстий для создания наносточника света на подложке из кварца

Анализируя полученные результаты по разработке процесса травления на подложке из кварца и слюды, была выявлена зависимость получаемой формы структур и профиля травления отверстий от типа плёнки серебра. Скорости травления, а также профили полученных отверстий имеют отличия от результатов проведенного во второй главе моделирования в силу особенностей структуры кристаллитов серебра. Моделирование процессов травления не учитывает ряд важных особенностей подложек и режимов работы установки травления. Разработанный режим не требовал корректировки литографии, так как линейные

размеры были сохранены в пределах 3-5%. Был разработан процесс из двух этапов плазменного травления серебра через электронный резист ПММА.

Разработка технологии формирования отверстий в пленке серебра позволила создать плазмонный наносточник света с использованием плазмонного кристалла и молекул красителя в качестве активной среды [2,67]. Резонатор лазера образован массивом нанотверстий в пленке Ag, внешний вид которых показан на рисунке 3.18).

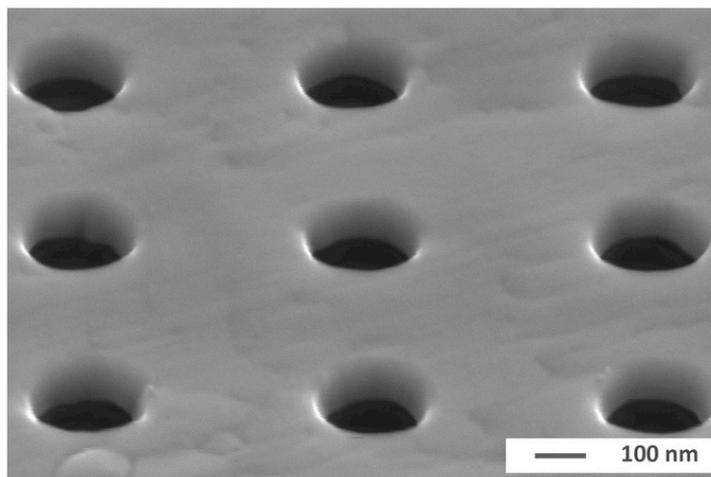


Рисунок 3.18 – Отверстия в пленке Ag плазмонного наносточника света в СЭМ

Были изготовлены кристаллы с различными периодами и диаметром отверстий. Усиливающая среда была образована раствором красителя R101 в диметилсульфоксиде с концентрацией  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Сравнение спектров излучения спазера на основе наночастиц золота и матрицы отверстий в серебре приведены на рисунке 3.19. 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. По сравнению с известными из литературы параметрами спазера на основе наночастиц золота [68], спазер на основе матрицы отверстий в пленке Ag демонстрирует более узкий спектр излучения излучающего 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 (рисунок 3.20).

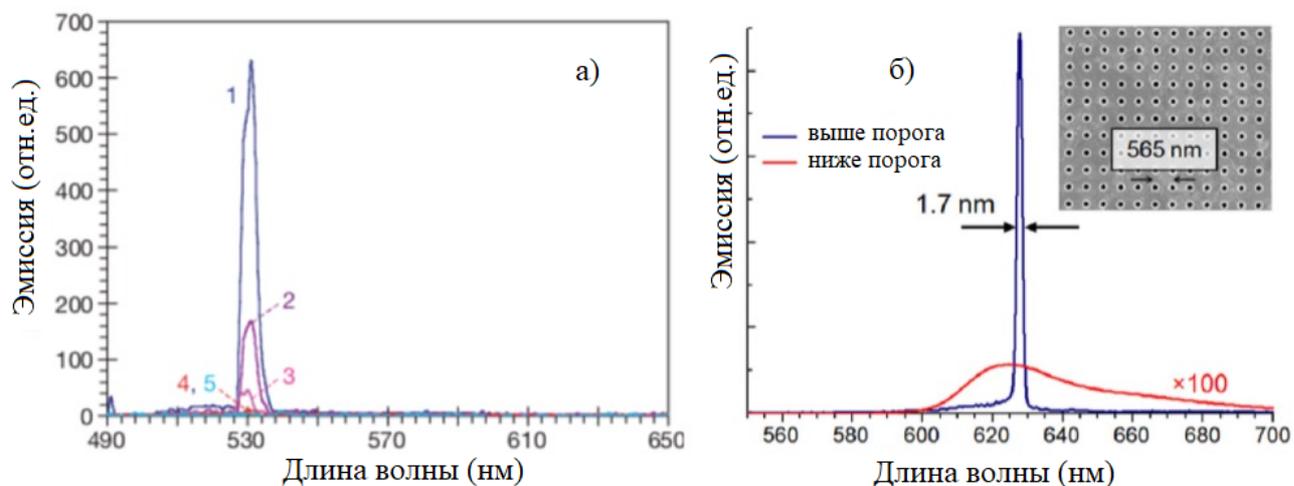


Рисунок 3.19 – Сравнение спектров люминесценции плазмонных спазеров с резонаторами из наночастиц золота [68] (а) и разработанного с применением технологии травления серебра спазера с резонатором из пленки серебра (б).

Уровни накачки ниже и выше порога соответствуют 0,09 и 0,9 МВт/см<sup>2</sup> соответственно. На вставке представлено изображение образца в СЭМ [2]

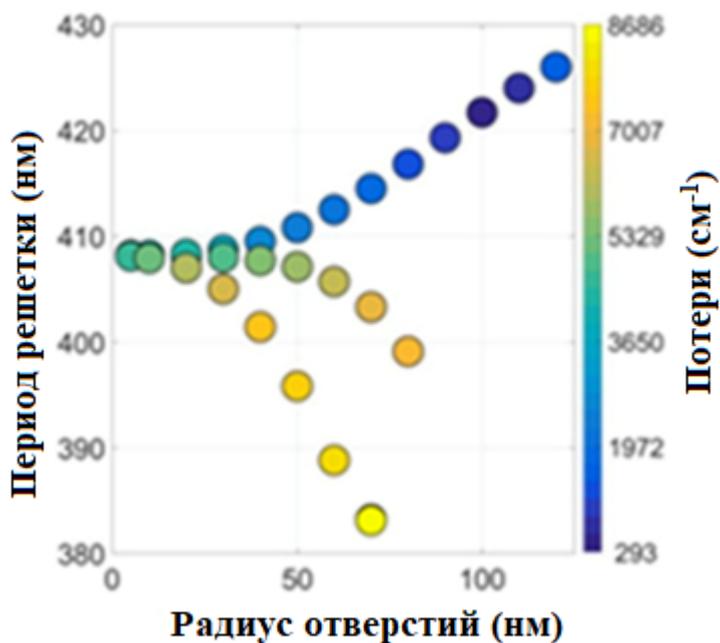


Рисунок 3.20 – Зависимости потерь в спазере от радиуса и периода отверстий в матрице [67]

Резонатор плазмонного спазера характеризуется низкими потерями благодаря использованию высококачественной серебряной пленки и гибридной плазмонно-фотонной моды. Этот результат дает возможность развивать приложения внутрирезонаторной плазмонной лазерной спектроскопии для обнаружения биологических меток и в биосенсорике.

### 3.4 Основные результаты и выводы главы 3

Исследования процессов травления Ag с помощью различных режимов, типов подложек и с использованием различных газовых смесей позволили сделать следующие выводы [69]:

1. В ИСП РИТ возможно проведение процессов травления тонких пленок Ag на различных подложках через жесткую маску SiO<sub>2</sub> в смеси газов Ar+Cl<sub>2</sub>;
2. Получение управляемого процесса травления для двухслойной маски ПММА/SiO<sub>2</sub> крайне сложно из-за вызванного высоким аспектным соотношением в маске SiO<sub>2</sub> переосаждения частиц Ag, сохранения высокой скорости травления при уменьшении мощности на емкостном электроде, накопления на поверхности нелетучих продуктов реакции и удаления пленки Ag в ходе жидкостного травления маски SiO<sub>2</sub>;
3. Использование для травления Ag маски ПММА оптимальной толщины позволяет устранить переосаждение продуктов травления на стенки маски и перегрев слоя ПММА в ходе травления, что позволяет полностью удалить остатки ПММА после окончания процесса травления.
4. Форма отверстий, получаемых в пленке Ag при травлении в плазме Ag, зависит от размеров кристаллитов Ag в данной области пленки, которые, в свою очередь, определяются режимами формирования пленки Ag и температурными режимами выбранными для операций по формированию маски;
5. Выбор значений мощности генераторов при травлении через электронно-лучевые резисты ограничен значениями, не превышающими

экспериментально определенных максимальных уровней мощности, превышение которых приводит к перегреву и деградации маски ПММА;

6. Двухэтапное травление серебра в плазме Ag позволяет получить угол профиля травления  $85\div 88$  градусов и изготовить матрицу нанотверстий для наноразмерного источника света, излучающего на длине волны 628 нм со сверхнизкими потерями.

К основным полученным результатам можно отнести:

1. Обнаружена зависимость получаемой формы структур и профиля травления отверстий от типа и размера кристаллитов серебра в пленке.
2. Разработанный двухэтапный режим плазменного травления серебра через электронный резист ПММА.
3. Разработка технологии формирования отверстий в пленке серебра позволила создать плазмонный наноисточник света с использованием плазмонного кристалла и молекул красителя в качестве активной среды [2,65]. Резонатор спазера образован массивом нанотверстий в пленке Ag, внешний вид которых показан на рисунке 3.18).
4. Разработанный режим применим для создания топологических элементов для устройств плазмоники с пленками серебра в качестве волноводов и резонаторов.

## ГЛАВА 4. ПРОЦЕССЫ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ

### 4.1 Технология изготовления затвора транзисторов

Формирование затвора с «ножкой» в слое диэлектрика предполагает следующую последовательность операций:

1. Нанесение диэлектрика (толщина может варьироваться от 50 до 200 нм), метод нанесения – пиролиз или стимулированное плазмой осаждение из газовой фазы (PECVD);
2. Электронно-лучевая литография (предполагающая последовательное нанесение резиста, экспонирование электронным лучом и проявление резиста);
3. Контроль полученного изображения в электронном микроскопе;
4. Плазменное травление через маску электронного резиста, удаление остатков резиста;
5. Контроль полученной щели в диэлектрике в электронном микроскопе;
6. Литография шляпы затвора (предполагающая последовательное нанесение многослойной резистивной маски, ее экспонирование электронным лучом и проявление резиста);
7. Контроль полученного изображения в электронном микроскопе;
8. Вакуумное напыление и взрывная литография металла затвора.

Существуют варианты маршрута, предполагающие дополнительные операции, такие как оплавление резиста, нанесение адгезивного покрытия под резистом, сочетание жидкостного и плазменное травления, нанесение специальных полимерных покрытий для уменьшения «щели» затвора, использование промежуточных металлических или иных масок и т.д. Но последовательность операций все равно остается схожей с приведенной выше.

Эффект внесения дефектов в двумерный электронный газ гетероструктур на основе GaAs за счет ионной бомбардировки в плазменных процессах известен и был достаточно подробно исследован в 1990-1995 гг. Эффекты плазменного воздействия на параметры двумерного газа в AlGaN/GaN гетероструктурах также

были предметом исследования в 2000-2010 гг. Для толщины барьерного слоя AlGaN 20-30 нм, используемой в конструкциях СВЧ транзисторов для частот до 30 ГГц, значительного воздействия на параметры двумерного газа при травлении в большинстве режимов плазменного травления не наблюдается. Однако для увеличения рабочей частоты приборов «ножку» затвора приходится уменьшать, и, для предотвращения ухудшения управляемости транзистора (т.н. «эффекта короткого канала»), должна пропорционально уменьшаться толщина расположенного сверху барьерного слоя полупроводника в гетероструктуре (в зависимости от конструкции, толщина GaN AlGaN, InAlN или InAlGaN). Приближение проводящего канала к поверхности, происходящее при уменьшении толщины верхнего слоя гетероструктуры, делает двумерный электронный газ более чувствительным к воздействиям ионной бомбардировки поверхности, а изменение аспектного соотношения из-за уменьшения размера щели приводит к замедлению процесса травления. Это делает более сложной задачу нахождения бездефектных режимов травления щелей затвора в гетероструктурах, предназначенных для более высокочастотных диапазонов (для миллиметровых длин волн).

В НЕМТ, предназначенных для работы диапазоне 30–90 ГГц длина затвора должна быть  $L_g = 50\text{--}150$  нм, и соотношение между  $L_g$  и расстоянием затвор – канал должно быть больше, чем 10:1 [49,50]. Поэтому для исследования влияния параметров плазменной обработки на электрофизические свойства 2DEG была выбрана конструкция гетероструктуры с расстоянием от 2DEG до поверхности 6 нм. Гетероструктуры  $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  были выращены методом MOVPE на подложках SiC и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Эпитаксиальные слои включали в себя зародышевый слой AlN, изолирующий буферный слой, промежуточный слой AlN толщиной  $1\div 1,5$  нм, слой  $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}$  толщиной  $5\div 6$  нм и осажденный *in situ*  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 5 нм. Подвижность электронов, их слоевая концентрация в 2DEG и слоевое сопротивление гетероструктуры составляли около  $1100 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ,  $2,1\div 2,5\cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $220\div 270 \text{ Ом}/\square$  соответственно. Межприборная изоляция осуществлялась ионной имплантацией бора. Омические контакты формировались на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au с

последующим быстрым термическим отжигом. Для формирования ножки Т-образного затвора на поверхность гетероструктуры был осажден  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 100 нм. В процессе ЭЛЛ использовались резист на основе ПММА (PMMA950K) и плазмостойкий резист AR-P 6200 (CSAR62). Деграция электрофизических параметров двумерного электронного газа (2DEG) в образцах оценивалась по изменению слоевого сопротивления ( $R_s$ ) в тестовых элементах и изменению тока насыщения в транзисторах. Основными методами плазменного травления, используемыми для формирования затворной щели в транзисторах, являются реактивное ионное травление (РИТ) и реактивное ионное травление с индуктивно-связанной плазмой (ИСП РИТ). Плазменное травление проводилось в РИТ и ИСП РИТ режимах в установках травления Corial 200IL, Oxford PlasmaPro и Oxford Plasmalab133. Для очистки поверхности гетероструктур от остатков резиста и проявителя в процессах литографии используется режим плазменного травления в среде кислорода, поэтому помимо исследования влияния РИТ и ИСП РИТ процессов было исследовано влияние плазменной обработки в среде кислорода на свойства гетероструктуры. Очистка поверхности проводилась в установке YES-CV200RFS. Контроль размеров щели в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  осуществлялся в сканирующем электронном микроскопе Raith 150TWO.

#### **4.2 Влияние плазменной обработки на параметры гетероструктуры НЕМТ**

Для определения допустимых режимов плазменной обработки было проведено исследование влияние плазменной обработки на параметры InAlN/GaN гетероструктур для СВЧ НЕМТ. Чувствительность 2DEG в InAlN/GaN НЕМТ к ионной обработке поверхности проявляется при очистке поверхности в  $\text{O}_2$ -плазме – процессе, применяемом на всех стадиях изготовления НЕМТ для удаления остатков фоторезиста. Основными параметрами процесса очистки поверхности в  $\text{O}_2$ -плазме является подводимая к реактору ВЧ мощность и рабочее давление. Высокое давление (0,75 торр) и конструкция реактора делает потенциал плазмы и ионную компоненту процесса обработки незначительными для большинства типов гетероструктур с достаточно большим расстоянием от поверхности до проводящего канала с

2DEG, в том числе и гетероструктур типа AlGaIn/GaN. Однако эксперименты показали, что гетероструктуры InAlN/AlN/GaN с тонким барьерным слоем обладают высокой чувствительностью к плазменной обработке поверхности. Влияние ВЧ-мощности, подводимой к источнику плазмы установки плазменного травления, на слоевое сопротивление ( $R_s$ ) 2DEG и плотность тока ( $I_{ds}$ ) в InAlN/GaN HEMT показано на рисунке 4.1. Зависимость была получена для типичного времени очистки поверхности в  $O_2$  плазме после проявления, составляющего 2 мин.

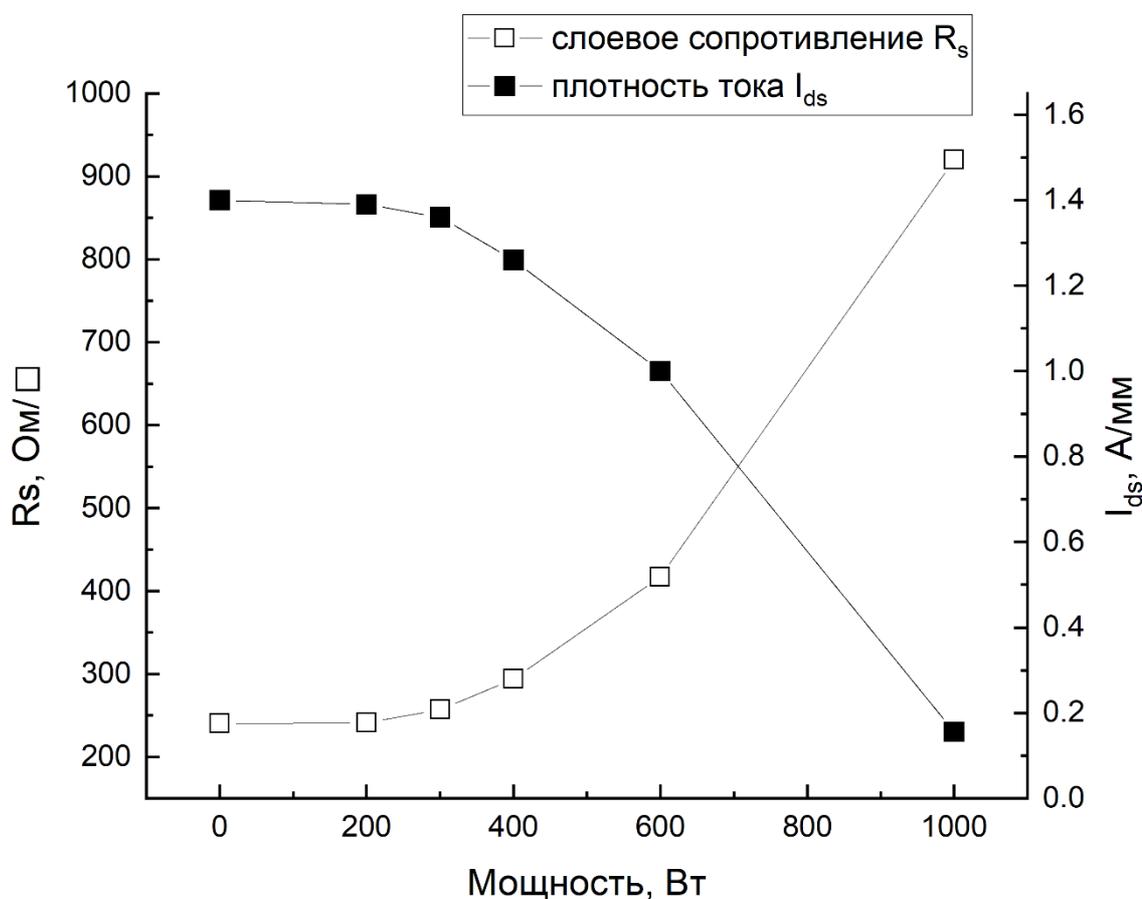


Рисунок 4.1 – Влияние ВЧ-мощности при плазменной обработке поверхности в  $O_2$  на  $R_s$  и  $I_{ds}$  InAlN/GaN HEMT. Нулевой мощности и смещению соответствуют параметры до обработки

Полученные данные показывают, что, начиная с 300 Вт мощности, воздействие кислородной плазмы на поверхность транзисторов на гетероструктурах InAlN/GaN приводит к значительной деградации параметров. Увеличение мощности плазмы приводит к возрастанию слоевого сопротивления полупроводника, что

делает невозможным изготовление качественных НЕМТ на основе InAlN/GaN и накладывает дополнительные ограничения на возможные методы обработки и очистки пластин. Поэтому для технологии формирования затворов на гетероструктурах с тонким барьерным слоем режимы плазменной очистки поверхности должны быть скорректированы в сторону снижения подводимой мощности, в частности для установки YES-CV200RFS, мощность должна составлять менее 300 Вт (при том что в производстве AlGaIn/GaN НЕМТ широко используются процессы в диапазоне мощностей 300 – 600 Вт).

Параметрами процесса РИТ, в наибольшей степени влияющем на деградацию 2DEG, являются мощность, подводимая к плазме, и газовый состав плазмы. Оба в значительной степени определяют напряжение смещения в плазме – параметр процесса, связанный с ионной компонентой травления. Для исследования деградации электрофизических параметров гетероструктур в режиме ИСП РИТ были проведены эксперименты по обработке поверхности гетероструктуры в плазме Ar. Давление в камере было выбрано равным 5 мторр, мощность источника ИСП плазмы выбиралось минимально достаточной для поддержания стабильного режима горения плазмы, вместе с значениями ВЧ мощности записывались значения напряжения смещения.

Влияние напряжения смещения плазмы при 1-минутной обработке в Ar в ИСП РИТ режиме плазмы на слоиное сопротивление ( $R_s$ ) 2DEG и плотность тока ( $I_{ds}$ ) в InAlN/GaN НЕМТ показано на рисунке 4.2.

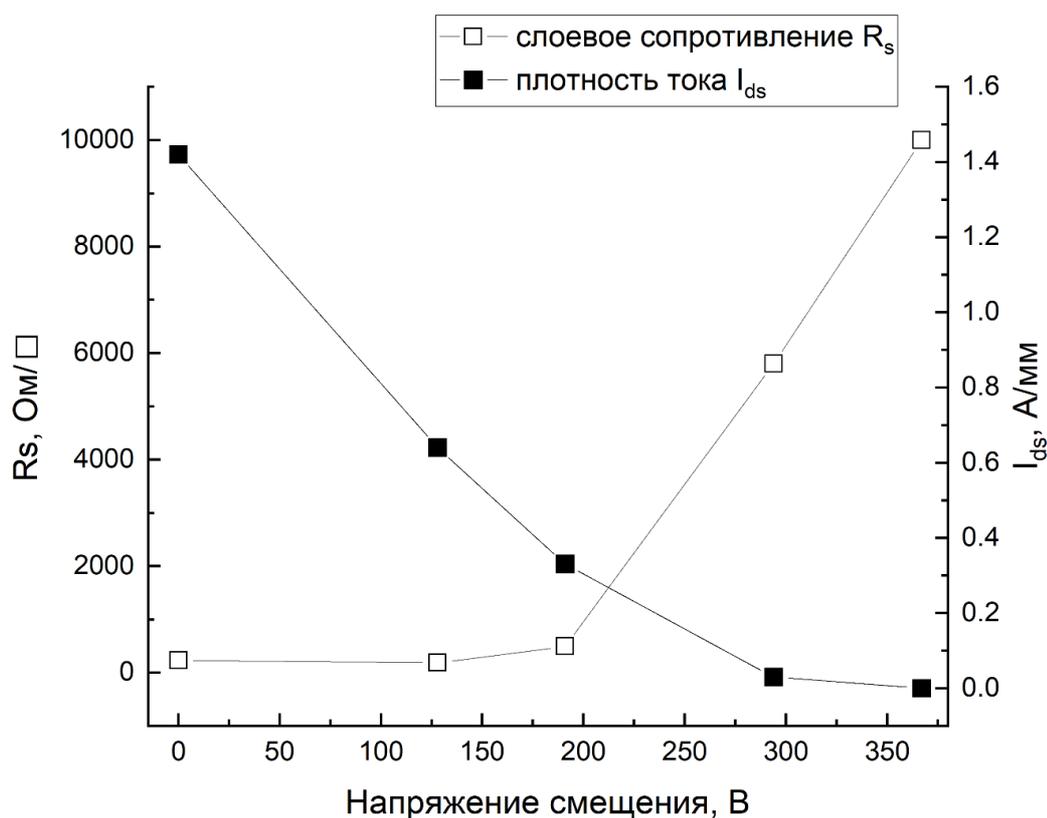


Рисунок 4.2 – Влияние ВЧ мощности при плазменной обработке поверхности в Ar на  $R_s$  и  $I_{ds}$  InAlN/GaN HEMT. Нулевой мощности и смещению соответствуют параметры до обработки.

Характер полученной зависимости показывает, что для плазменных процессов на InAlN/GaN-гетероструктурах с тонким барьерным слоем могут быть использованы только режимы с небольшой мощностью и смещением.

Проведенные серии экспериментов показали, что допустимые диапазоны ВЧ мощности и смещения плазмы различаются в зависимости от используемого состава газовой смеси и режима плазмы [70]. Так, при напряжении смещения 10 В обработка в РИТ плазме  $SF_6$  в течение 1 мин увеличивает слоевое сопротивление InAlN/GaN-гетероструктуры на 10% (рисунок 4.3). Селективность травления для резистов ПММА (PMMA950K) и AR-P 6200 для всех выбранных режимов составляет около 0,45 и 0,7 соответственно, что накладывает ограничение на толщину используемого при ЭЛЛ резиста.

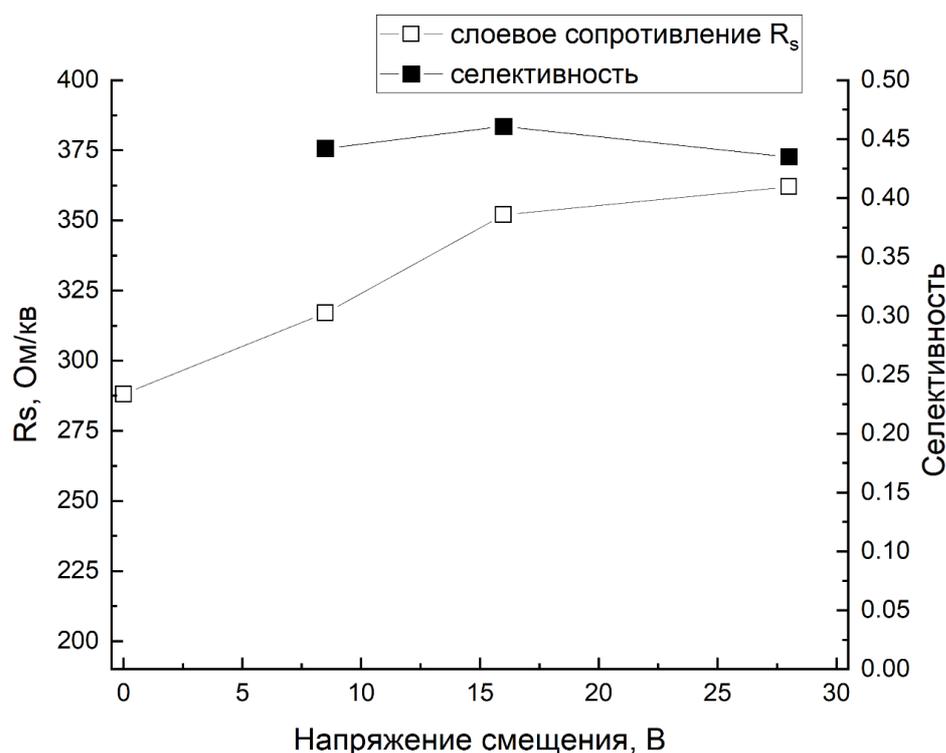


Рисунок 4.3 – Зависимость слоевого сопротивления InAlN/GaN-гетероструктуры и селективности травления PMMA/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> от напряжения смещения для РИТ в SF<sub>6</sub>.

Нулевому смещению соответствуют параметры структуры до травления

Использование ПММА для изготовления щелей с размерами менее 0,1 мкм и РИТ травлением в SF<sub>6</sub> проблематично, т.к. из-за низкой селективности толщина электронного резиста должна быть не менее 0,35 мкм, а скорость травления в щели начинает снижаться из-за высокого аспектного соотношения. Это, в свою очередь, вынуждает увеличивать толщину резиста, что затрудняет получение малых размеров в электронном резисте из-за эффекта рассеяния электронного луча в пленке резиста и необходимости увеличивать время проявления для более толстых слоев резиста. Использование плазмостойких резистов, таких как AR-P 6200, позволяет снизить толщину резиста в 1,5÷2 раза, что упрощает получение и перенос в пленку Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> топологических размеров менее 100 нм.

### 4.3 Травление Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в газовых смесях на основе SF<sub>6</sub> через маску ПММА

При выборе газовой среды для травления затворной щели в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> InAlN/GaN НЕМТ необходимо учитывать обнаруженную высокую чувствительность поверхности к плазменным обработкам. Травление Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> можно проводить в различных фторсодержащих газах, среди которых SF<sub>6</sub> отличается высокой степенью ионизации при низкой подаваемой ВЧ мощности [71], разлагаясь с выделением фтора. Продукты реакции Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с фторсодержащими газами легко удаляются с поверхности, поскольку у SiF<sub>4</sub> давление паров 1 торр при температуре -144°С а второй продукт реакции – азот.

Проблема, связанная с низкой селективностью травления через маску ПММА, может быть решена за счет смены резиста, либо за счет выбора других газовых смесей. Проведенные эксперименты по добавлению в газовую смесь на основе SF<sub>6</sub> других газов – Ar, He, CHF<sub>3</sub> позволили выявить ряд закономерностей:

1. Добавление CHF<sub>3</sub> позволяет значительно увеличить селективность травления. В частности, для газовой смеси SF<sub>6</sub>:CHF<sub>3</sub>:He=10:5:2 для режима РИТ с постоянной ВЧ мощностью 20 Вт селективность растет с повышением давления (Таблица 4.1). С ростом давления относительное увеличение слоевой проводимости гетероструктуры  $\Delta R_s/R_s$ , % растет, достигая 9% за 1 минуту процесса.

Таблица 4.1 – Параметры процесса травления Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в плазме SF<sub>6</sub>:CHF<sub>3</sub>:He

№	Давление, мТорр	V(Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ), нм/мин	V(ПММА), нм/мин	Селективность к ПММА950К	$\Delta R_s/R_s$ , %
1	40	34	25	1:1,4	4
2	60	27	12	1:2,3	6
3	80	20	6,3	1:3,2	9

2. Травление в смеси SF<sub>6</sub>:CHF<sub>3</sub> в режиме ИСП РИТ позволяет получать селективность в диапазоне 1:1,5÷3, при этом селективность растет с уменьшением соотношения потоков SF<sub>6</sub>:CHF<sub>3</sub>, что позволяет считать легко образующий полимеры на стенках щели CHF<sub>3</sub> основной причиной роста селективности. Для процесса

характерен сильный разогрев резиста в ИСП плазме. Скорость травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  может составлять  $50\div 150$  нм/мин, при этом в результате ионной бомбардировки происходит значительное изменение слоевого сопротивления  $R_s$  (Таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Параметры процесса травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в плазме  $\text{SF}_6:\text{CHF}_3$

№	Соотношение потоков $\text{SF}_6:\text{CHF}_3$	Напряжение смещения, В	Время процесса, мин	$V(\text{Si}_3\text{N}_4)$ , нм/мин	$\Delta R_s/R_s$ , %
1	1:10	53	2	61	47

3. Травление в смеси  $\text{SF}_6:\text{He}$  при соотношении потоков 2:3 для режима ИСП РИТ с ВЧ мощностью  $20\div 60$  Вт позволяет получить селективности в диапазоне  $1:0,6\div 1,2$  и скорости травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$   $25\div 70$  нм/мин, при этом наибольшей селективности соответствует минимальная мощность на емкостном электроде (далее – ВЧ мощность). Эксперименты с режимами ИСП РИТ были проведены для времени процесса 30 сек, поскольку скорость травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  значительно возрастает. Для большинства исследованных режимов травления характерно значительное увеличение слоевого сопротивления (Таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Параметры процесса травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в плазме  $\text{SF}_6:\text{He}$

№	Соотношение потоков $\text{SF}_6:\text{He}$	ИСП/ВЧ мощность, Вт	Напряжение смещения, В	$V(\text{Si}_3\text{N}_4)$ , нм/мин	$\Delta R_s/R_s$ , %
1	2:3	1200/10	7,5	94	7
2	2:3	1200/20	7,5	150	17
3	2:3	1200/30	8,5	188	66
4	2:3	1200/40	10,0	>200	119
5	2:3	1200/50	18,0	>200	393

4. Влияние параметров процесса травления в режиме ИСП РИТ в смеси  $\text{CHF}_3:\text{SF}_6:\text{Ar}$  на  $R_s$  и плотность тока транзистора носит сложный характер. Увеличение мощности, подаваемой как на ВЧ, так и на электрод ИСП, приводит к росту  $R_s$ . Такой же эффект имеет увеличение потока аргона. Рост  $R_s$  меньше 5% достигается при низких потоках аргона (менее 10% от общего потока), либо при соотно-

шении мощностей ИСП/ВЧ больше 20. Однако эти режимы не могут быть применены, поскольку присутствие  $\text{CHF}_3$  в газовой смеси не позволяет сильно снижать ионную компоненту травления из-за возможности образования полимеров на дне щели. По этой же причине время перетрава, которое необходимо добавлять к процессу травления для устранения остатков пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на дне отверстия, должно быть увеличено по сравнению с процессами без  $\text{CHF}_3$ . В результате для большинства исследованных процессов травления характерно значительное увеличение слоевого сопротивления (Таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Параметры процесса травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в плазме  $\text{SF}_6:\text{CHF}_3:\text{Ar}$

№	Соотношение потоков $\text{SF}_6:\text{CHF}_3:\text{Ar}$	ИСП/ВЧ мощность, Вт	Время процесса, мин	$V(\text{Si}_3\text{N}_4)$ , нм/мин	$\Delta R_s/R_s$ , %
1	5:12:1,5	400/30	1	45	14
2	5:12:3	400/15	2	43	17
3	5:10:3	400/20	2	32	88
4	5:10:3	600/20	2	60	421
5	5:12:3	400/30	2	45	817

5. Для процессов травления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в плазме  $\text{SF}_6$  с добавкой  $\text{CHF}_3$  характерной особенностью является сужение профиля на дне щели. Этот эффект усиливается при повышении давления и снижении ВЧ мощности, что можно объяснить образованием предотвращающих травление полимеров на боковой стенке и на краю щели (рисунок 4.4). Для устранения данного эффекта необходимо увеличивать время травления, либо увеличивать ВЧ мощность по мере заглубления щели, что в равной степени неприемлемо при травлении гетероструктур с тонким барьерным слоем. Для сформированных в результате травления в смеси  $\text{SF}_6:\text{CHF}_3$  щелей в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  наблюдается неровный (волнистый) край, что дополнительно ограничивает возможности снижения размеров.

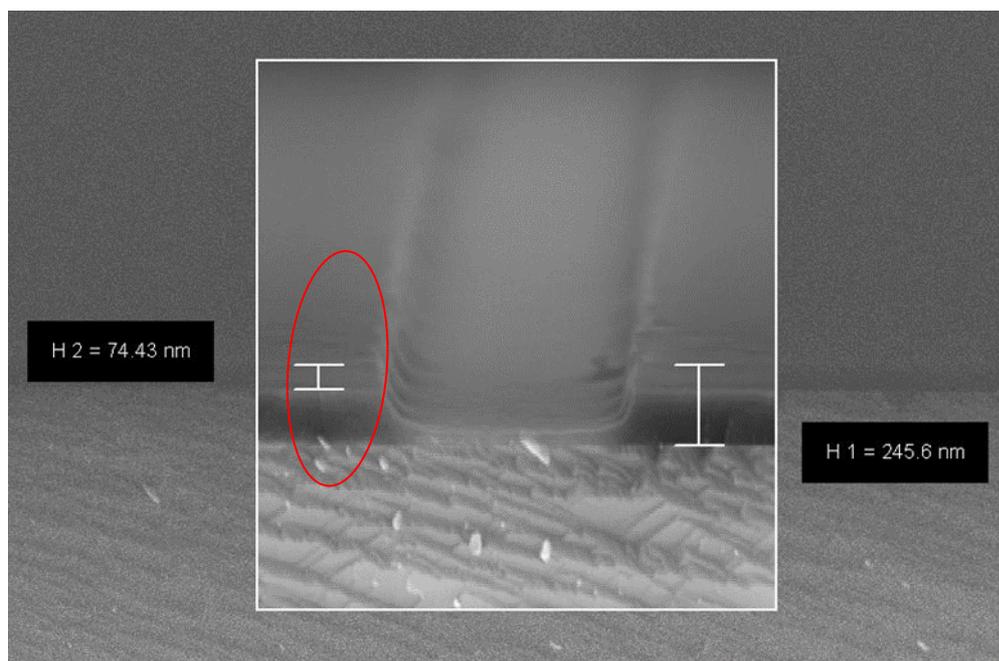


Рисунок 4.4 – Профиль травления щели в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , сформированный в результате травления в смеси  $\text{SF}_6:\text{CHF}_3$ .

На основании выявленных закономерностей можно сделать вывод о том, что добавление  $\text{CHF}_3$  в газовую смесь, несмотря на увеличение селективности, усложняет получение ровных границ затворной щели без внесения значительных дефектов от ионной бомбардировки поверхности полупроводника. Добавление  $\text{Ar}$  в газовую смесь увеличивает вызванный бомбежкой рост слоевого сопротивления полупроводника. Добавление  $\text{He}$ , несколько снижает скорость травления, не приводит к значительным изменениям других параметров процесса.

#### 4.4 Травление $\text{Si}_3\text{N}_4$ в $\text{SF}_6$ через маску резиста AR-P 6200

Проведенные эксперименты показали, что плазма  $\text{SF}_6$  является наименее агрессивной средой для гетероструктур с точки зрения внедрения дефектов от ионной бомбардировки, что может быть объяснено большой атомной массой образуемых в плазме ионов. В плазме  $\text{SF}_6$  (как для режима РИТ, так и для ИСП РИТ) можно реализовать режимы с низкими значениями напряжения, что ограничивает энергию ионов, бомбардирующих поверхность образца. Низкая скорость и большой размер ионов, бомбардирующих поверхность материала при травлении, ограничивают глубину проникновения ионов в полупроводник, что обуславливает минимальное

изменение электрофизических параметров 2DEG – концентрации и подвижности. При этом высокая скорость распыления ПММА затрудняет использование  $SF_6$  для травления затворной щели InAlN/GaN HEMT. Добавление в газовую смесь  $CHF_3$  несмотря на увеличение селективности, также не позволяет получить оптимальные параметры процесса травления из-за снижения слоевого сопротивления при ионной бомбардировке. Решением является использование плазмостойких электронных резистов, в частности AR-P 6200. Для нахождения оптимальных режимов травления были исследованы процессы травления в плазме  $SF_6$  в режимах РИТ и ИСП РИТ.

Результаты исследования процесса травления в режиме РИТ (рисунок 4.3), показывают, что травление затворных щелей в  $Si_3N_4$  на гетероструктурах InAlN/GaN с тонким барьерным слоем должно проводиться при ВЧ мощности, создающей напряжение смещения не более 10 В. Проведенные эксперименты с процессами ИСП РИТ показали, что допустимые параметры травления находятся в очень узком диапазоне, поскольку ИСП плазма для  $SF_6$  не обладает стабильностью при мощностях ниже 1000 Вт, при этом минимизировать процессы деградации свойств 2DEG удается при напряжении смещения порядка 15 В, что соответствует минимальной ВЧ мощности, необходимой для стабильности ВЧ плазмы (Таблица 4.5). Для зажигания плазмы  $SF_6$  в режиме ИСП РИТ разработан алгоритм, позволяющий в течении короткого (3 сек) времени зажечь и стабилизировать горение плазмы подачей высокой ВЧ мощности с последующим снижением ВЧ мощности до уровня, обеспечивающего безопасный для электрофизических параметров наногетероструктур уровень напряжения смещения. Следовательно, процесс ИСП РИТ для гетероструктур с тонким барьерным слоем должен выбираться исходя из минимально допустимой для данной конструкции камеры травления ИСП мощности и ВЧ мощности, обеспечивающей напряжение смещения не более 15 В.

Таблица 4.5 – Параметры процессов травления в плазме SF<sub>6</sub>

№	ИСП/ВЧ мощность, Вт	Напряжение смещения, В	Время процесса, мин	V(Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ), нм/мин	Селективность к PMMA950K	Селективность к AP-R 6200	ΔRs/Rs, %
1	0/30	5,5	1	90	1:0,63	1:1,0	5
2	1000/50	26	0,5	360	1:0,38	-	162
3	1200/50	38	0,5	660	1:0,35	-	339
4	1200/20	15	0,5	230	1:0,56	1:1,4	4

Стойкий к плазме резист AR-P 6200 имеет значительное преимущество в селективности перед резистом на основе ПММА, при этом для режима ИСП РИТ полученные значения селективности отличаются более чем в 2,5 раза. 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, применяемая для процесса ИСП РИТ, может быть уменьшена до 0,15 мкм, что должно позволять формировать затворные щели размером 50÷70 нм с сохранением аспектного соотношения для щели не более 3 и толщине слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Оба режима травления Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в плазме SF<sub>6</sub> позволяют свести к приемлемому уровню потери в слоевом сопротивлении гетероструктуры InAlN/GaN. Приведенные в Таблице 4.5 данные соответствуют изменению слоевого сопротивления за время процесса, достаточное для травления Si<sub>3</sub>N<sub>3</sub> толщиной 105 нм, что соответствует 100% перетраву при травлении затворной щели. Таким образом, оба режима травления дают большой запас как по времени плазменного воздействия на 2DEG, так и по селективности травления при формировании затворной щели.

Выбранные режимы травления в SF<sub>6</sub> плазме были применены для формирования затворных щелей в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

#### 4.5 Формирование затворных щелей в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Еще одним важным параметром, который необходимо учитывать при выборе режима травления, является отклонение перенесенных в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> субмикронных топологических размеров от номинала, сформированного в маске электронного резиста.

В таблице 4.6 приведены размеры элементов топологии после проявления резиста и после процессов травления щели в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Несмотря на более высокую селективность травления, травление в режиме ИСП РИТ в смеси  $\text{CHF}_3/\text{SF}_6/\text{Ar}$  приводит к значительному и пропорциональному ( $\approx 40\%$ ) увеличению всех топологических размеров. Напротив, RIE в  $\text{SF}_6$  приводит к незначительному увеличению суб-100-нм размеров (4 %) и более значительному изменению остальных элементов топологии (на 15–25 %).

Таблица 4.6 – Изменение размеров элементов топологии

Операции	Размер элементов топологии, нм		
	60	90	120
Номинал топологии	60	90	120
После проявления резиста	76	105	130
РИТ в $\text{SF}_6$	80	120	163
ИСП РИТ в $\text{SF}_6$	84	114	153
ИСП РИТ в $\text{CHF}_3/\text{SF}_6/\text{Ar}$	110	145	185

При использовании режима РИТ в  $\text{SF}_6$  со смещением 8 В и маски из AR-P 6200 были изготовлены НЕМТ с длиной основания затвора 60 и 99 нм (рисунок 4.5). Вид затворных щель щелей в электронном микроскопе демонстрирует близкий  $90^\circ$  угол наклона стенок, а также признаки незначительного сужения размера щели вблизи дна.

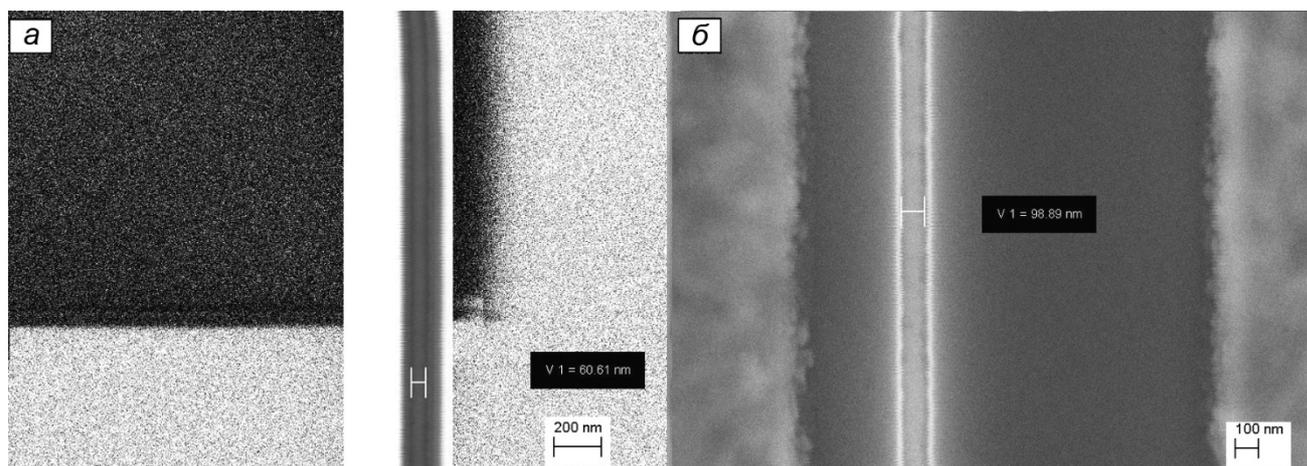


Рисунок 4.5 – Затворные щели в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  шириной 60 нм (а) и 99 нм (б), полученные травлением в режиме РИТ в  $\text{SF}_6$

Травление в режиме ИСП РИТ в  $\text{SF}_6$  было проведено в режиме процесса №4 (Таблица 4.5) через маску AR-P 6200. В результате были изготовлены НЕМТ с длиной основания затвора 84, 114 и 153 нм (рисунок 4.6).

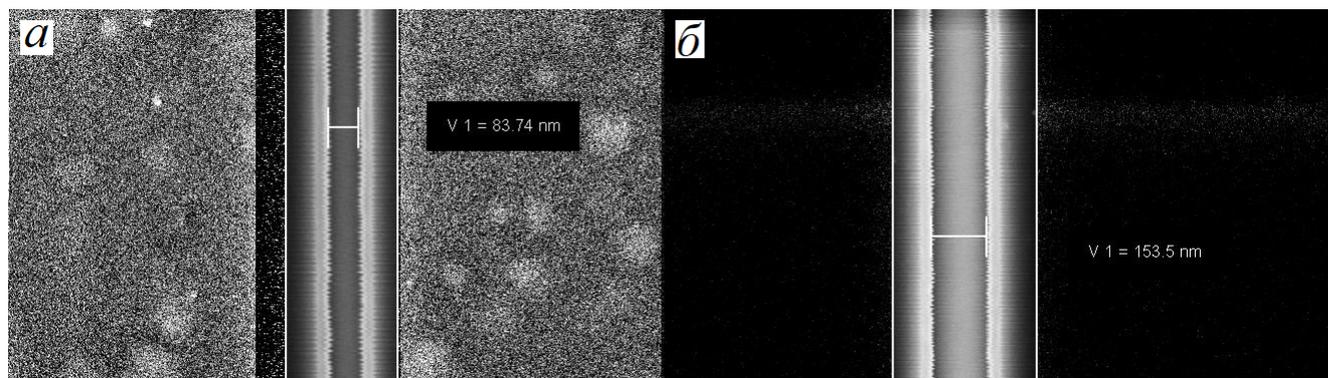


Рисунок 4.6 – Затворные щели в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  шириной 84 нм (а) и 153 нм (б), полученные травлением в режиме ИСП РИТ в  $\text{SF}_6$

Вид затворных щель щелей в электронном микроскопе демонстрирует близкий к  $75^\circ$  угол наклона стенок, в то время как наклон стенок для РИТ режима ближе к  $90^\circ$ . Для подтверждения данного предположения с помощью фокусированного ионного пучка (FIB) были получены изображения сколов затворов полученных СВЧ транзисторов, изготовленными с помощью процессов РИТ и ИСП РИТ. Уточненные диапазоны углов наклона стенок затворной щели составили  $80\div 90^\circ$  (РИТ) и  $75\div 85^\circ$  (ИСП РИТ);

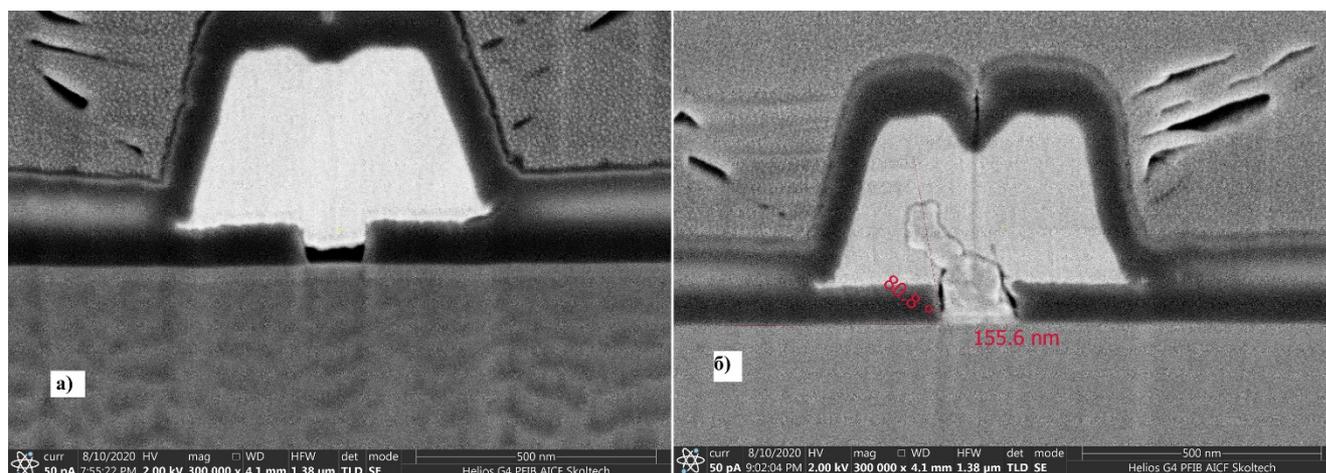


Рисунок 4.7 – Затворные щели в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , полученные травлением в  $\text{SF}_6$  в режиме ИСП РИТ (а) и РИТ (б)

Таким образом, использование ИСП РИТ позволяет изменить наклон стенок в щели. Поскольку наклонная форма затворной щели позволяет снизить пиковые значения электрических полей в транзисторе, это свойство процесса ИСП РИТ позволяет обойтись без дополнительных технологических шагов (таких как оплавление резиста) для получения такой формы щели, что является еще одним преимуществом такого процесса.

Разработанные процессы плазменного травления были применены при изготовлении образцов мощных наногетроструктурных СВЧ транзисторов на основе  $\text{InAlN}/\text{GaN}$ , предназначенных для работы в миллиметровом диапазоне длин волн. Сравнение вольт-амперных характеристик транзисторов на основе  $\text{InAlN}/\text{GaN}$  гетероструктур с параметрами аналогичных транзисторов, разработанных компанией Fujitsu, показывает преимущество полученного в рамках данной работы транзистора по плотности тока при нуле на затворе (рисунок 4.8)

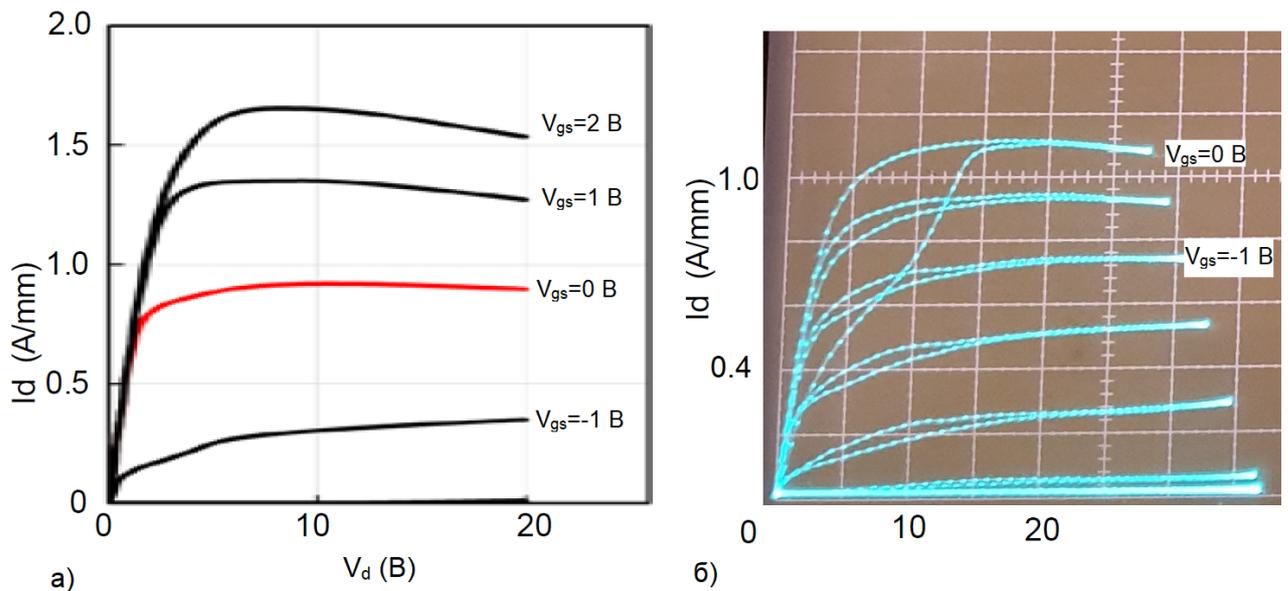


Рисунок 4.8 – Сравнение вольт-амперных характеристик транзисторов на InAlN/GaN наногетероструктурах, изготовленных по технологии с травлением щели в  $Si_3N_4$  компанией Fujitsu (а) и в рамках данной работы (б)

Для изготовленных транзисторов были созданы малосигнальная и больше-сигнальная СВЧ модели и получены значения мощностных характеристик для частоты 30 ГГц (рисунок 4.9). КПД по добавленной мощности полученных транзисторов ( $PAE$ ) составил более 46 % при выходной мощности 483 мВт (4,83 Вт/мм).

Проведенные исследования показали, что найденные закономерности и режимы травления могут быть использованы для формирования щелей затвора наногетероструктурных СВЧ транзисторов как на основе AlGaN/GaN и InAlN/GaN. Чувствительность AlGaN/GaN гетероструктур к плазменному воздействию ниже, поэтому для травления  $Si_3N_4$  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 AlGaN/GaN и InAlN/GaN гетероструктур приведены в Таблице Таблица 4.7.

Таблица 4.7 – Параметры изготовленных транзисторов

	0.25 мкм AlGaN/GaN HEMT	0.15 мкм AlGaN/GaN HEMT	0.15 мкм InAlN/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 (10ГГц)	3 Вт/мм (30ГГц)*	4÷4.8 Вт/мм (30ГГц)*
КПД по добавленной мощности (PAE), %	50% (10ГГц)	45÷50% (30 ГГц)	45÷50% (30 ГГц)
Коэффициент усиления по мощности (MaxGain), дБ	>14 дБ (10ГГц)	>12дБ (30ГГц)	>14дБ (30ГГц)

\*расчет

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<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с суб-200-нм размерами 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.

Применение разработанных режимов травления Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> для изготовления In<sub>0,14</sub>Al<sub>0,86</sub>N(6нм)/AlN(1нм)/GaN позволяет, по сравнению с AlGaN/GaN HEMT, увеличить усиление и выходную мощность транзистора.

## Мощностные характеристики на частоте 30 ГГц

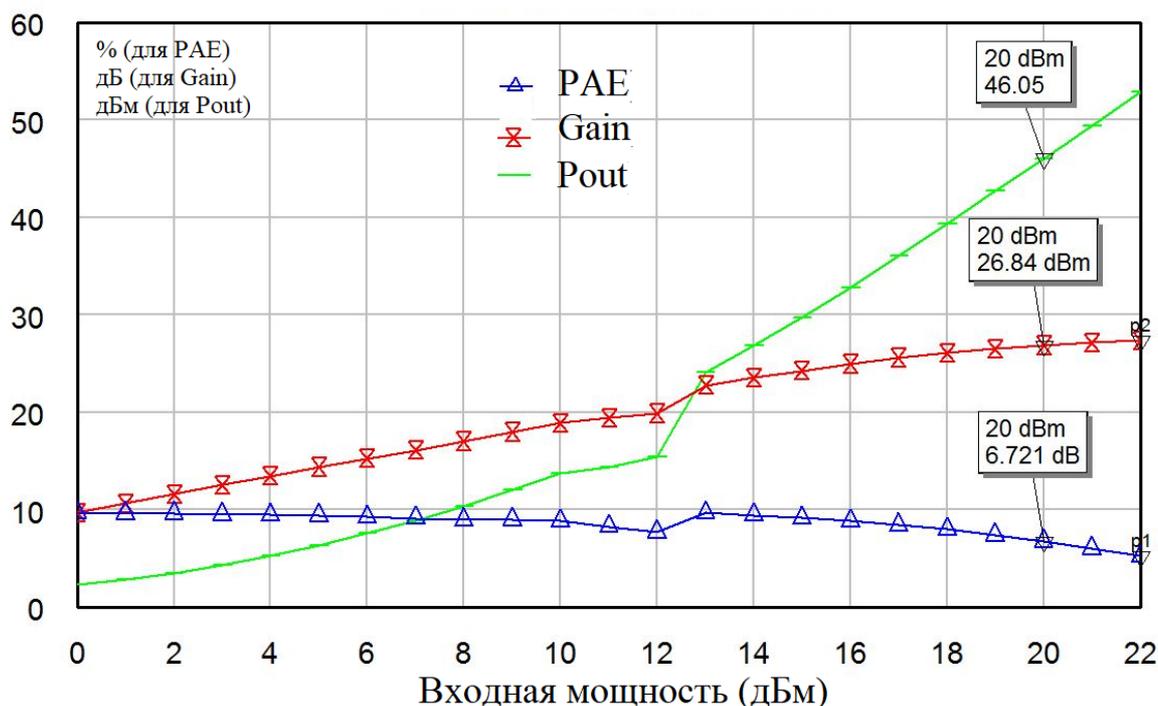


Рисунок 4.9 – Мощностные характеристики СВЧ транзистора на InAlN/GaN наногетероструктурах, изготовленного по технологии с травлением щели в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Применение РИТ и ИСП РИТ позволило изготовить образцы СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона, обладающих высокими плотностями тока, усилением и выходной мощностью, что подтверждает незначительную деградацию электрофизических параметров наногетероструктуры InAlN/GaN в ходе плазменного травления.

#### 4.6 Основные результаты и выводы главы 4

Исследование процессов травления щели в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с помощью различных режимов, типов подложек и с использованием различных газовых смесей позволило сделать следующие выводы [3,70,72]:

1. Для успешного изготовления InAlN/GaN HEMT необходимо уменьшать время и мощность плазменного воздействия на 2DEG даже для таких стандартных процессов микронной технологии, как очистка в кислородной плазме;

2. Процесс РИТ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в  $\text{SF}_6$ -плазме с низким напряжением сочетает высокую анизотропию травления, небольшой рост слоевого сопротивления, а также приемлемую селективность;

3. Использование  $\text{CHF}_3$  и  $\text{Ar}$  для травления затворных щелей в них приводит к пропорциональному увеличению размеров топологических элементов, что ограничивает возможность их применения для формирования затворных щелей с суб-10-нм размерами. Улучшение анизотропии для этого процесса затруднительно из-за ограничений, накладываемых чувствительностью гетероструктур  $\text{InAlN}/\text{GaN}$  к ионной бомбардировке и нестабильности ИСП при малых мощностях;

4. Для процессов РИТ в  $\text{SF}_6$ , а также для смеси  $\text{Ar}/\text{CHF}_3/\text{SF}_6$ , необходимо выбирать режимы с низкой ВЧ мощностью [3];

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Исследовано влияние плазмы на слоевое сопротивление 2DEG в гетероструктурах  $\text{InAlN}/\text{GaN}$  с толщиной барьерного слоя равной 6 нм.

2. Продемонстрирована возможность формирования затвора наногетероструктурного СВЧ транзистора длиной 60 нм в слое  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 105 нм. Разработанный процесс РИТ щелей в нитриде кремния с суб-200-нм размерами можно использовать для формирования затворов гетероструктурных транзисторов с тонким (менее 7 нм) барьерным слоем без внесения дефектов, приводящих к значительной (более 10 %) деградации электрофизических параметров материала [3].

3. Показано, что процесс ИСП РИТ в  $\text{SF}_6$  обладает селективностью при травлении через маску AR-P 6200, и дает возможность получать наклонный ( $75\div 85^\circ$ ) угол в щели травления (для ИСП РИТ), в то время как угол в щели при травлении в режиме РИТ находится в диапазоне  $80\div 90^\circ$  (РИТ) .

4. Продемонстрировано, что разработанные процессы РИТ и ИСП РИТ в  $\text{SF}_6$  обладают низким уровнем вносимых в гетероструктуру дефектов.

5. Показано, что при напряжении смещения менее 10 В (для РИТ) и 15 В (для ИСП РИТ) плазму  $\text{SF}_6$  можно использовать при формировании затворных щелей  $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  наногетеротранзисторов с тонким (менее 7 нм) барьерным

слоем без внесения дефектов, приводящих к значительной (более 10%) деградации слоевого сопротивления двумерного газа в гетероструктуре.

6. Изготовлены образцы СВЧ транзисторов миллиметрового диапазона с применением разработанных процессов травления, обладающие высокой плотностью тока и усилением в СВЧ диапазоне [72].

## 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 результаты, полученные в работе:

1. Определены расчетные зависимости профилей и скоростей травления от параметров процесса плазменного травления.

2. Продемонстрирована возможность получения управляемого процесса травления Ag через маску ПММА, характеризующегося отсутствием переосаждения продуктов травления на стенки маски и перегрева ПММА в ходе травления.

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

4. Предложен процесс двухэтапного травления серебра в плазме Ar, позволяющий получить изготовить матрицу наноотверстий для спазера, излучающего на длине волны 628 нм со сверхнизкими потерями.

5. Проведено исследование влияния плазменных обработок поверхности наногетероструктур InAlN/AlN/GaN на слоевое сопротивление 2DEG.

6. Обнаружено, что использование  $\text{CHF}_3$  и Ar для травления затворных щелей приводит к пропорциональному увеличению размеров топологических элементов, что ограничивает возможность их применения для формирования затворных щелей с суб-100-нм размерами. Улучшение анизотропии для этого процесса затруднительно из-за ограничений, накладываемых чувствительностью гетероструктур InAlN/GaN к ионной бомбардировке и нестабильности ИСП при малых мощностях.

7. Показано, что процесс ИСП РИТ в  $\text{SF}_6$  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  $90^\circ$ .

8. Разработанный режим плазменного травления серебра применим для создания топологических элементов для устройств плазмоники с пленками серебра в качестве волноводов и резонаторов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Филиппов И.А. Плазмохимическое травление в индуктивной связной плазме // 18-ая международная конференция “Научно-технологические системы и интеллектуальные системы.” Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. P. 208–213.
2. Filippov I. et al. Plasmonic nanolaser for intracavity spectroscopy and sensorics // *Appl. Phys. Lett.* 2017. Vol. 111, № 21. P. 213104.
3. Филиппов И.А. et al. Плазменное травление в технологии InAlN/GaN HEMT // *Известия высших учебных заведений. Физика.* 2020.
4. Shearn M. et al. *Advanced Plasma Processing: Etching, Deposition, and Wafer Bonding Techniques for Semiconductor Applications* // *Semiconductor Technologies* / ed. Grym J. InTech, 2010.
5. Bentley S. et al. Fabrication of 22nm T-gates for HEMT applications // *Microelectron. Eng.* 2008. Vol. 85, № 5–6. P. 1375–1378.
6. Krichler M. Formation of Slanted Gates for GaN-Based HEMTs by Combined Plasma and Wet Chemical Etching of Silicon Nitride - Publications & Patents | Ferdinand-Braun-Institut [Electronic resource]. URL: <https://www.fbh-berlin.com/en/publications-patents/publications/title/formation-of-slanted-gates-for-gan-based-hemts-by-combined-plasma-and-wet-chemical-etching-of-silico> (accessed: 21.11.2019).
7. Филиппов И.А. Проектирование чувствительного элемента микроакселерометра для систем контроля доступа // 16-ая международная конференция “Научно-технологические системы и интеллектуальные системы.” Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. P. 167–174.
8. Wu Y. et al. Intrinsic Optical Properties and Enhanced Plasmonic Response of Epitaxial Silver // *Adv. Mater.* 2014. Vol. 26, № 35. P. 6106–6110.
9. Malureanu R., Lavrinenko A. Ultra-thin films for plasmonics: a technology overview // *Nanotechnol. Rev.* 2015. Vol. 4, № 3.
10. Park J.H. et al. Single-Crystalline Silver Films for Plasmonics // *Adv. Mater.* 2012. Vol. 24, № 29. P. 3988–3992.
11. Xing W. et al. InAlN/GaN HEMTs on Si With High  $f_T$  of 250 GHz // *IEEE Electron Device Lett.* 2018. Vol. 39, № 1. P. 75–78.

12. Zhu G. et al. Quaternary InAlGaN barrier high-electron-mobility transistors with  $f_{max} > 400$  GHz // *Appl. Phys. Express*. 2017. Vol. 10, № 11. P. 114101.
13. Xu D. et al. 0.1  $\mu\text{m}$  InAlN/GaN High Electron-Mobility Transistors for Power Amplifiers Operating at 71–76 and 81–86 GHz: Impact of Passivation and Gate Recess // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2016. Vol. 63, № 8. P. 3076–3083.
14. Niida Y. et al. 3.6 W/mm high power density W-band InAlGaN/GaN HEMT MMIC power amplifier // 2016 IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications (PAWR). Austin, TX, USA: IEEE, 2016. P. 24–26.
15. Ostermaier C. et al. Characterization of Plasma-Induced Damage of Selectively Recessed GaN/InAlN/AlN/GaN Heterostructures Using  $\text{SiCl}_4$  and  $\text{SF}_6$  // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 49, № 11. P. 116506.
16. Clinton E.A. et al. Observation and mitigation of RF-plasma-induced damage to III-nitrides grown by molecular beam epitaxy // *J. Appl. Phys.* 2019. Vol. 126, № 1. P. 015705.
17. Агранович В.М., Гинзбург В.Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. Москва: Наука, 1965. 376 p.
18. Zaki A.O., Kirah K., Swillam M.A. Hybrid plasmonic electro-optical modulator // *Appl. Phys. A*. 2016. Vol. 122, № 4. P. 473.
19. Messner A. et al. Integrated ferroelectric plasmonic optical modulator // 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). 2017. P. 1–3.
20. Fang Y., Sun M. Nanoplasmonic waveguides: towards applications in integrated nanophotonic circuits // *Light Sci. Appl.* 2015. Vol. 4, № 6. P. e294–e294.
21. Mubeen S. et al. An autonomous photosynthetic device in which all charge carriers derive from surface plasmons // *Nat. Nanotechnol.* 2013. Vol. 8, № 4. P. 247–251.
22. Kumar A. et al. Dielectric-loaded plasmonic waveguide components: Going practical // *Laser Photonics Rev.* 2013. Vol. 7, № 6. P. 938–951.
23. Guler U. et al. Local Heating with Lithographically Fabricated Plasmonic Titanium Nitride Nanoparticles // *Nano Lett.* 2013. Vol. 13, № 12. P. 6078–6083.
24. Ananthanawat C. et al. Surface plasmon resonance study of PNA interactions with double-stranded DNA // *Biosens. Bioelectron.* 2011. Vol. 26, № 5. P. 1918–1923.

25. Deeb C., Pelouard J.-L. Plasmon lasers: coherent nanoscopic light sources // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2017. Vol. 19, № 44. P. 29731–29741.
26. Krasavin A.V., Zayats A.V. Silicon-based plasmonic waveguides // *Opt. Express.* 2010. Vol. 18, № 11. P. 11791.
27. Markov A. et al. Photonic bandgap plasmonic waveguides // *Opt. Lett.* 2011. Vol. 36, № 13. P. 2468.
28. Gosciniak J., Rasras M. High-bandwidth and high-responsivity waveguide-integrated plasmonic germanium photodetector // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2019. Vol. 36, № 9. P. 2481.
29. Grandidier J. et al. Gain-Assisted Propagation in a Plasmonic Waveguide at Telecom Wavelength // *Nano Lett.* 2009. Vol. 9, № 8. P. 2935–2939.
30. Shkondin E. et al. High Aspect Ratio Plasmonic Nanotrench Structures with Large Active Surface Area for Label-Free Mid-Infrared Molecular Absorption Sensing // *ACS Appl. Nano Mater.* 2018. Vol. 1, № 3. P. 1212–1218.
31. Ishii S. et al. Sub-wavelength interference pattern from volume plasmon polaritons in a hyperbolic medium: Sub-wavelength interference in a hyperbolic medium // *Laser Photonics Rev.* 2013. Vol. 7, № 2. P. 265–271.
32. Sorger V.J. et al. Ultra-compact silicon nanophotonic modulator with broadband response // *Nanophotonics.* 2012. Vol. 1, № 1. P. 17–22.
33. Einsle J.F. et al. Hybrid FIB milling strategy for the fabrication of plasmonic nanostructures on semiconductor substrates // *Nanoscale Res. Lett.* 2011. Vol. 6, № 1. P. 572.
34. Lee Y.-J. et al. Characteristics of Ag Etching using Inductively Coupled Cl<sub>2</sub> -based Plasmas // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 42, № Part 1, No. 1. P. 286–290.
35. Andryieuski A. et al. Direct Characterization of Plasmonic Slot Waveguides and Nanocouplers // *Nano Lett.* 2014. Vol. 14, № 7. P. 3925–3929.
36. Kostiučenko O. et al. Surface plasmon polariton dispersion relation at organic/dielectric/metal interfaces // *Opt. Commun.* 2014. Vol. 331. P. 77–81.

37. Shinohara K. et al. Scaling of GaN HEMTs and Schottky Diodes for Submillimeter-Wave MMIC Applications // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60, № 10. P. 2982–2996.
38. Anwar A. GaN Market Update – Opportunities and Outlook // Power Electron. P. 155.
39. Bouzid-Driad S. et al. Optimization of AlGaIn/GaN HEMT Schottky contact for microwave applications // 2012 7th European Microwave Integrated Circuit Conference. 2012. P. 119–122.
40. Bentley S. et al. Two methods of realizing 10nm T-gate lithography // Microelectron. Eng. 2009. Vol. 86, № 4–6. P. 1067–1070.
41. Engelmann S.U. et al. Nitride etching with hydrofluorocarbons. I. Selective etching of nitride over silicon and oxide materials by gas discharge optimization and selective deposition of fluorocarbon polymer // J. Vac. Sci. Technol. B. 2017. Vol. 35, № 5. P. 051803.
42. Marchack N. et al. Nitride etching with hydrofluorocarbons. II. Evaluation of C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>F for tight pitch Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> patterning applications // J. Vac. Sci. Technol. B Nanotechnol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom. 2018. Vol. 36, № 3. P. 031801.
43. Miyazoe H. et al. Nitride etching with hydrofluorocarbons III: Comparison of C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>F and CH<sub>3</sub>F for low-k nitride spacer etch processes // J. Vac. Sci. Technol. B Nanotechnol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom. 2018. Vol. 36, № 3. P. 032201.
44. Lee H.K., Chung K.S., Yu J.S. Selective Etching of Thick Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub> and Si by Using CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> and C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> Gases with or without O<sub>2</sub> or Ar Addition // J. Korean Phys. Soc. 2009. Vol. 54, № 5(1). P. 1816–1823.
45. Li Y.X. Selective reactive ion etching of silicon nitride over silicon using CHF<sub>3</sub> with N<sub>2</sub> addition // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct. 1995. Vol. 13, № 5. P. 2008.
46. Smith C.J.M. et al. Use of polymethylmethacrylate as an initial pattern transfer layer in fluorine- and chlorine-based reactive-ion etching // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct. 1999. Vol. 17, № 1. P. 113.

47. E-Beam Resist AR-P 6200 series (CSAR 62) [Electronic resource] // Allresist EN. URL: <https://www.allresist.com/portfolio-item/e-beam-resist-ar-p-6200-series-csar-62/> (accessed: 14.08.2020).
48. Krichler M. Fabrication technology of GaN/AlGaN HEMT slanted sidewall gates using thermally reflowed ZEP resist and CHF<sub>3</sub>/SF<sub>6</sub> plasma etching - Publikationen & Patente | Ferdinand-Braun-Institut [Electronic resource]. URL: <https://www.fbh-berlin.de/publikationen-patente/publikationen/title/fabrication-technology-of-ganalgan-hemt-slanted-sidewall-gates-using-thermally-reflowed-zep-resist> (accessed: 21.11.2019).
49. Medjdoub F. Gallium Nitride (GaN): Physics, Devices, and Technology. 1st ed. CRC Press, 2015.
50. Jessen G.H. et al. Short-Channel Effect Limitations on High-Frequency Operation of AlGaIn/GaN HEMTs for T-Gate Devices // IEEE Trans. Electron Devices. 2007. Vol. 54, № 10. P. 2589–2597.
51. Lugani L. Leakage mechanisms and contact technologies in InAlN/GaN high electron mobility transistors [Electronic resource]. 2015. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/1652/4a011620ea787bd083658805a464007ac881.pdf> (accessed: 15.10.2019).
52. Nonthermal Plasma Chemistry and Physics. 0 ed. / ed. Meichsner J. et al. CRC Press, 2012.
53. Crystec Technology Trading GmbH. Plasma Etcher [Electronic resource] // crystec.com. URL: <https://www.crystec.com/trietche.htm> (accessed: 13.08.2020).
54. Training Course –Etch Process Chemistries. Oxford Instruments Plasma Technology, 2003.
55. Miyamoto K. Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Fusion. NIFS-PROC-48, 2000. 325 p.
56. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing: Lieberman/Plasma 2e. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

57. Boris D.R. Electron Beam Generated Plasmas Produced in Fluorine-Containing Gases: Characterizing Plasma Parameters Presented at the 62nd AVS Symposium in San Jose CA. Unpublished, 2015.
58. Hakemi G. Fabrication, development and analysis of film bulk acoustic resonators on flexible polymer substrates. 2010.
59. Silvaco Support - Athena User Manuals [Electronic resource] // <https://dynamic.silvaco.com/>. URL: <https://dynamic.silvaco.com/dynamicweb/jsp/downloads/DownloadManualsAction.do?req=silentmanuals&nm=athena> (accessed: 13.08.2020).
60. Guerra V., Marinov D. Dynamical Monte Carlo methods for plasma-surface reactions // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016. Vol. 25, № 4. P. 045001.
61. Escoffier C. et al. Plasma Chloriding of Thin-Film Silver // *J. Electrochem. Soc.* 2002. Vol. 149, № 4. P. H98.
62. *Thin Film Processes*. Elsevier, 1991.
63. 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.
64. McPeak K.M. et al. Plasmonic Films Can Easily Be Better: Rules and Recipes // *ACS Photonics*. 2015. Vol. 2, № 3. P. 326–333.
65. Guillén C., Herrero J. Plasmonic characteristics of Ag and ITO/Ag ultrathin films as-grown by sputtering at room temperature and after heating // *J. Phys. Appl. Phys.* 2013. Vol. 46, № 29. P. 295302.
66. 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.
67. Philippov I.A. et al. Plasmonic nanolaser based on a hybrid mode of plasmonic crystal // *DAYS on DIFFRACTION 2017 Abstracts*. St. Petersburg, 2017. P. 96–97.

68. Noginov M.A. et al. Demonstration of a spaser-based nanolaser: 7259 // Nature. 2009. Vol. 460, № 7259. P. 1110–1112.
69. 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.
70. Filippov I.A. et al. InAlN/GaN and AlGaN/GaN HEMT Technologies Comparison for Microwave Applications // Тезисы докладов международной конференции IFOST 2019. Tomsk, Russia, 2019.
71. Shih M. et al. Decomposition of SF<sub>6</sub> in an RF Plasma Environment // J. Air Waste Manag. Assoc. 2002. Vol. 52, № 11. P. 1274–1280.
72. Филиппов И.А. et al. Заключительный отчет по ПНИЭР “Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического применения”: отчет за 3 этап (заключительный) ПНИЭР 3. Томск, ТГУ, 2019.