

ОТЗЫВ

официального оппонента,
кандидата физико-математических наук
Мяконьких Андрея Валерьевича
на диссертацию Филиппова Ивана Андреевича
«Особенности применения плазменных технологий для формирования
наноразмерных элементов плазмоники и гетероструктурных СВЧ
транзисторов», представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 01.04.04
– Физическая электроника

Актуальность темы

Технология плазменного травления становится все более значимой частью процесса изготовления структур микро- и нанoeлектроники, оптоэлектроники, микромеханики, силовой и СВЧ электроники. Растущие требования по точности изготовления микроструктур, отсутствию загрязнений их поверхности и дефектов кристаллической структуры полупроводников, а также расширяющийся спектр применяемых материалов ставят задачи по разработке новых процессов плазмохимического травления.

Автором исследованы новые режимы плазменного травления для решения задач создания оптоэлектронных приборов нового поколения – спазеров. Актуальность этой задачи подтверждается публикацией результатов исследования изготовленного прибора с применением подходов, предложенных автором. Второе направление применения прецизионных технологий плазмохимического травления, исследованное автором, – формирование затвора СВЧ НЕМТ транзисторов, также представляется актуальным, поскольку позволяет оптимизировать конструкцию затвора транзистора, уменьшить вносимые при плазменных процессах дефекты, снижающие подвижность двумерного электронного газа.

Научная новизна работы

1. Выявлены особенности плазмохимических процессов травления наноразмерных элементов, формируемых в тонких пленках Ag.
2. Обнаружено влияние размеров кристаллитов в тонких пленках Ag на форму наноотверстий, получаемых при плазменном травлении.
3. Показана возможность использования процессов реактивного ионного травления (РИТ) и реактивного ионного травления с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП РИТ) в SF₆ для формирования

затворных щелей в 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 слоевое сопротивление двумерного газа $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ наногетеротранзисторов с тонким барьерным слоем.

Практическая значимость

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 слоевого сопротивления двумерного газа эпитаксиальных гетероструктур $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Содержит 111 стр. машинописного текста, 49 рисунков и 16 таблиц. Библиография включает 72 наименования.

В первой главе диссертации описаны методы плазменного травления применяемые в современной микро- и наноэлектронике, СВЧ-электронике и оптоэлектронных приложениях.

Вторая глава содержит описание физико-химических основ процесса плазменного травления и результаты моделирования процессов травления тонких пленок серебра и нитрида кремния, полученные автором при помощи пакета Silvaco (Athena Elite).

В третьей главе приведены экспериментальные результаты исследования процессов плазменного травления оксида кремния (в качестве жесткой маски) и серебра для изготовления спазера с наноразмерными элементами.

В четвертой главе исследовано применение плазменных процессов для процессов формирования СВЧ-транзисторов. Показано влияние общепринятых процессов плазменной обработки на подвижность электронного газа, исследованы закономерности травления нитрида кремния

при использовании разных резистивных масок. Показаны подходы формирования затворных щелей с требуемым профилем боковых стенок.

Основные результаты работы

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 наноотверстий 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 Si_3N_4 , формируемой в СВЧ транзисторах на основе GaN плазмохимическим травлением в SF_6 , с 90° до 75° .

4. Уменьшение напряжения смещения в плазме SF_6 до 10-15 В при травле-

нии затворной щели в Si_3N_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 десятками процентами рост слоевого сопротивления двумерного электронного газа.

Достоверность результатов диссертации

Достоверность результатов диссертации подтверждается использованием современных экспериментальных методов исследования, применением теоретически обоснованных физических моделей, верификацией результатов независимыми методиками. Результаты выполненных расчетов хорошо согласуются с наблюдаемыми при плазменном травлении особенностями профиля структур.

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

Замечания по диссертации

1. В тексте диссертации отсутствует подробное описание установок травления, на которых выполнялись эксперименты, автор ограничивается указанием только их коммерческого названий, зачастую нельзя понять в

какой именно установке выполнен конкретный процесс (Corial 200IL, Oxford PlasmaPro и Oxford Plasmalab133). Как правило, серия установок выпускается производителем с разными размерами электрода и разными конфигурациями ИСР-источника плазмы. Без сведений о размерах электрода и размерах камеры реактора довольно затруднительно сопоставлять данные данной работы с другими источниками.

2. Хотя автор упоминает в работе эффект загрузки, он при этом нигде не указывает ни размеры обрабатываемых образцов, ни размер применяемых пластин-носителей. Однако известно, что наличие кремниевого носителя большой площади в реакторе существенно изменяет химический состав плазмы SF_6 за счет расхода радикалов фтора.

3. Для приведенных в разделе 2.3 результатов моделирования процессов травления было бы интересно проанализировать не только конечные результаты, но и полученные параметры плазмы (концентрация электронов, электронная температура, концентрации основных активных частиц). Также представляется завышенным значение температуры газа (5500 К) принятое для расчетов в этом разделе. Не указаны источники такой оценки.

4. Объяснение наблюдаемой в разделе 3.3 деформации резиста, термическим нагревом недостаточно обосновано. С одной стороны, хорошо известно, что в установках данного типа удается выдерживать температуру образца с точностью не хуже $5^{\circ}C$, что подтверждается многочисленными экспериментами по температурной кинетике травления. Хотя автор и приводит значения теплопроводностей материалов подложки, отсутствие данных по их толщине не позволяет сделать количественные сопоставления. С другой стороны, также известно, что при воздействии хлорсодержащей плазмы возможно разрушение полимерных цепей резиста, сопровождающееся его растеканием.

5. В тексте диссертации имеется значительное количество опечаток и грамматических ошибок.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости работы и не ставят под сомнение сформулированные автором научные положения, выносимые на защиту.

Общая оценка диссертации

Диссертация Филиппова И.А. имеет ясную логическую структуру, содержит рисунки, таблицы и графики, поясняющие суть проведенного исследования, приведены многочисленные изображения изготовленных микроструктур, полученные на растровом электронном микроскопе.

В автореферате диссертации изложены основные идеи и выводы диссертации, показан вклад автора в проведенное исследование, степень

новизны и практическая значимость приведенных результатов исследований. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Филиппова И.А. является законченной научно-квалификационной работой, соответствует паспорту специальности 01.04.04 – Физическая электроника, а также требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ. Автор диссертации Филиппов И.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по паспорту специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории Микроструктурирования
и субмикронных приборов
ФГБУН Физико-технологический институт
им. К.А. Валиева Российской академии наук
(ФТИАН им. К.А. Валиева РАН)


03 декабря 2020

Мяконьких Андрей Валерьевич

117218, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 34,
Телефон: (499) 129-00-46,
Сайт: <http://ftian.ru/>,
Электронная почта организации: director@ftian.ru.

Подпись Мяконьких А.В. заверяю.
Начальник Отдела кадров
Сосина В.П.

03.12.2020



