

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 537.534.2; 621.384.637

ЯСЮНАС
Александр Алексеевич

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ГИДРОФОБНЫХ И ИЗНОСОСТОЙКИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ ВИДИМОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы
(в материаловедении)

Минск 2020

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель

Котов Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, директор Инженерно-образовательного центра нанотехнологий «Изовак-БГУИР» 4.13 научной-исследовательской части учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

Грабчиков Сергей Степанович, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»
Ковальчук Наталья Станиславовна, к.т.н., доцент, заместитель главного инженера ОАО «Интеграл» - управляющая компания холдинга «Интеграл»

Оппонирующая организация

Государственное научное учреждение «Физико-технический Институт Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «04» июня 2020 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « » апреля 2020 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор физико-математических наук

С. К. Лазарук

ВВЕДЕНИЕ

Повышение технических требований к эксплуатационным свойствам оптических изделий с одновременным расширением областей применения индикаторных устройств, а также широкое внедрение оптических элементов в изделия гражданской и военной техники способствуют развитию технологий формирования защитных покрытий. Легко повреждаемые функциональные слои на оптических покрытиях электронных устройств защищаются от загрязнений, механических воздействий, неблагоприятного химического воздействия при помощи модифицирования защитными гидрофобными и сверхгидрофобными покрытиями. В настоящее время усилия многих исследователей направлены на разработку технологий формирования таких покрытий на различных типах поверхностей, включая антибликовые и антиотражающие функциональные слои. Развитие технологий изготовления наноматериалов способствует использованию в качестве защитных покрытий наноструктур оксида кремния, модифицированных пленками фторорганических полимеров. Данные наноразмерные структуры позволяют достичь высоких эксплуатационных характеристик, а улучшение их временной устойчивости к деградации обеспечивает долговременную стабильность при хранении и эксплуатации, что, однако, требует разработки новых технологий и оборудования.

В работе представлены исследования методов изготовления покрытий оксида кремния с наноструктурированной поверхностью, которая модифицирована нанометровыми пленками фторорганического полимера; взаимосвязанность структурной организации покрытий с их эксплуатационными свойствами и технологическими режимами их формирования. Оксид кремния обеспечивает адгезию гидрофобизирующего агента, а развитая наноструктурированная поверхность – улучшение эксплуатационных свойств обрабатываемого изделия.

Для изготовления покрытий оксида кремния с наноструктурированной поверхностью в работе используются методы плазмохимического осаждения и плазмохимического травления с применением плазмы высокой плотности. Представлены методики контроля параметров технологической плазмы при формировании наноструктурированного рельефа поверхности оксида кремния, а также методики проектирования технологического реактора с применением плоского источника плазмы высокой плотности.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами и темами

Тема диссертации соответствует подразделу 6.7 «Нанотехнологии, наноструктуры и наноматериалы в электронике, оптике, оптоэлектронике» перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016 – 2021 годы, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2015 № 785.

Диссертационная работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках заданий Республиканских научно-технических программ, грантов, проектов, финансируемых Фондом фундаментальных исследований Республики Беларусь, а также хозяйственных договоров:

– ГКПНИ «Электроника», задание 1.40 «Разработка технологии создания и исследования микроэлектромеханических переключателей для интегральных микросхем с использованием лазерной бесшаблонной фотолитографии» (ГБЦ 06-3003), срок выполнения с 08.02.2010 по 30.06.2010;

– Хозяйственный договор № 10-1007 «Разработка источника плазмы высокой плотности на основе индуктивно-связанного разряда и постановка технологии плазмохимического травления для формирования топологии кристаллов изделий силовой электроники» с ОАО «Интеграл» филиал «Транзистор»;

– Хозяйственный договор № 12-1060 «Разработка и исследование магнитных систем источников ионов, источников плазмы и магнетронных распылительных устройств» с частным предприятием ООО «ИЗОВАК Технологии»;

– Договор № 16-1180 Б/2 «Разработать технологию нанесения защитных и просветляющих алмазоподобных углеродных покрытий ИК диапазона на поверхность оптических изделий из германия» по заданию 1.1.4 научнотехнической программы Союзного государства «Разработка комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств и перспективной продукции других отраслей» («Технология-СГ»);

– Хозяйственный договор № 18-1063 «Разработка экспериментальной конструкции плоского источника индуктивно-связанной плазмы высокой плотности. Расчет эффективности магнитного поля в ускорительном канале ассистирующего низкоэнергетического источника ионов по КД Заказчика» с предприятием ООО «ВакТайм».

Цель и задачи исследования

Целью исследования является установление закономерностей и разработка технологии формирования защитных гидрофобных и сверхгидрофобных покрытий с наноструктурированной поверхностью на стеклянных подложках, сформированных методами плазмохимического осаждения и плазмохимического травления в реакторе на базе плоского источника газоразрядной низкотемпературной плазмы высокой плотности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ современных подходов и методов формирования тонкопленочных покрытий и наноструктур с гидрофобными и сверхгидрофобными свойствами. Изучить технологические возможности современных методов плазмохимического осаждения и плазмохимического травления диэлектрических материалов, а также определить применимость этих методов для создания покрытий с развитым нанорельефом.

2. Выбрать методы исследования морфологии, структуры, износостойкости, гидрофобных и оптических свойств полученных наноразмерных структур, а также параметров технологических процессов.

3. Разработать экспериментальный комплекс формирования защитных покрытий с наноструктурированной поверхностью методами плазмохимического осаждения диэлектрических материалов на плоские подложки при температуре менее 100 °С, а также плазмохимического травления диэлектрических материалов во фторсодержащей плазме газового разряда с равномерностью не хуже $\pm 5\%$ на плоских подложках диаметром до 200 мм.

4. Исследовать оптические, механические и гидрофобные свойства защитных многослойных просветляющих покрытий с модифицированной поверхностью, сформированных методом низкотемпературного плазмохимического осаждения, выявить методы повышения устойчивости вышеуказанных свойств покрытий при механических истираниях.

5. Разработать метод формирования наноструктурированного рельефа на поверхности оксида кремния плазмохимическим травлением через островковую маску. Установить закономерности изменения краевого угла смачивания наноструктурированной поверхности водой от ее морфологии и определить режимы плазмохимической обработки, при которых покрытие приобретает сверхгидрофобные свойства.

В качестве *объекта исследования* выбраны покрытия на основе оксида кремния с наноструктурированной поверхностью, обладающие гидрофобными и сверхгидрофобными свойствами, оборудование и технология их формирования с применением плазмы высокой плотности.

Предмет исследования – зависимости и закономерности изменения гидрофобных, защитных и оптических свойств наноструктурированной поверхности покрытий на основе оксида кремния от режимов их формирования в плазме высокой плотности.

Научная новизна

В работе представлены результаты исследований по формированию защитных гидрофобных многослойных просветляющих покрытий с наноструктурированной поверхностью методом химического осаждения с активацией низкотемпературной плазмой высокой плотности, что обеспечивает изготовление покрытия оксида кремния на подложках из химически закаленного стекла.

Установлено влияние ионной обработки слоя оксида кремния, осажденного в плазме высокой плотности, на его структуру и морфологию поверхности, а также устойчивость к механическим истираниям гидрофобной наноструктурированной поверхности такого оксида после обработки кремнийорганическим фторсодержащим гидрофобизирующим соединением.

Впервые установлено влияния технологических режимов плазмохимического травления оксида кремния через квазипериодическую островковую металлическую маску на морфологию поверхности, шероховатость и ее гидрофобные свойства после обработки гидрофобизирующим соединением.

Впервые представлены результаты исследований разработанного технологического комплекса для формирования развитого нанорельефа на основе высокочастотного плоского источника индукционного газового разряда как системы. В работе установлено влияние компонентов системы на режимы технологического процесса при формировании наноструктурированной поверхности оксида кремния, представлена методика расчета импеданса источника индукционного разряда и методика проектирования согласующей цепи. Приводятся результаты исследований влияния конфигурации и величины внешнего постоянного магнитного поля и конструкции индуктора плоского источника индукционного разряда на равномерность генерируемой плазмы и осаждаемого покрытия.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный плоский источник индукционного разряда и на его основе реактор плазмохимического осаждения с индукцией внешнего постоянного магнитного поля, возрастающей от оси реактора к его краю в диапазоне от 0,05–0,1 мТл до 0,7–0,8 мТл и от плоскости антенной системы к плоскости обработки в диапазоне от 0,01–0,05 мТл до 0,7–0,9 мТл, обеспечивают снижение температуры плазмохимического осаждения оксида кремния с традиционных 350 °С до менее 100 °С, исключают воздействие на подложку электронов с высокой энергией, уменьшают неравномерность плазменной обработки до $\pm 0,5$ % на диаметре 200 мм за счет снижения рабочего давления с $8 \cdot 10^{-1}$ до $4,6 \cdot 10^{-2}$ Па, увеличения степени ионизации плазмы вплоть до 3 %, сохранения низкой температуры электронов плазмы $T_e < 5$ эВ и улучшения равномерности распределения концентрации плазмы на 10–11 %.

2. Пленки оксида кремния толщиной 80–100 нм, сформированные методом плазмохимического осаждения с применением плазмы индукционного разряда при температуре менее 100 °С, выступающие верхним слоем просветляющего покрытия с интегральным пропусканием более 95 % в видимом спектральном диапазоне длин волн, подвергнутые ионной обработке и финишным покрытием гидрофобизирующим слоем на основе фторированного органического полимера, обеспечивают повышение в 3–5 раз устойчивости к механическим истираниям гидрофобных покрытий с углом смачивания водой $\theta = 115$ –120 градусов по отношению к покрытиям, в которых фторированный органический полимер наносился непосредственно на просветляющее покрытие, за счет снижения шероховатости поверхности с $R_q < 5$ нм до $R_q < 1$ нм и менее, а также модифицирования структуры приповерхностного слоя.

3. Плазмохимическое травление оксида кремния с применением разработанного источника индукционного разряда через квазипериодическую островковую серебряную маску приводит к формированию мультимодальной морфологии поверх-

ности с размером островков 30–350 нм и среднеквадратичной шероховатостью более 16 нм за счет высокой селективности процесса травления, обусловленной отсутствием частиц с высокой энергией, поверхность при нанесении гидрофобизирующего агента на основе фторированного органического полимера приобретает сверхгидрофобные свойства, характеризующиеся статическим углом смачивания водой, увеличенным до $\theta = 155 \pm 5$ градусов.

Личный вклад соискателя ученой степени

Вклад соискателя состоит в постановке задач исследований, разработке методик и проведении экспериментальных исследований, формулировке выводов и практических рекомендаций, разработке и оформлении технологических решений в виде патентных материалов, обработке, анализе и интерпретации экспериментальных результатов, полученных автором лично и в соавторстве в БГУИР – В. А. Савич, А. Н. Кутько и на частном предприятии ООО «ИЗОВАК Технологии» – Е. А. Хохлов, В. Я. Ширипов, А. С. Мысливец. Основные результаты диссертации получены автором лично. Научный руководитель кандидат технических наук, доцент Дмитрий Анатольевич Котов координировал и оказывал консультативную помощь при выполнении исследований, обсуждении и обобщении научных результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались автором на следующих конференциях: Международная научно-практическая конференция «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров» (Минск, 2008); 6-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ2010» (Украина, Севастополь, 2010); XVIII, X, XI международная научно-практическая конференция аспирантов, магистрантов, и студентов. «Физика конденсированного состояния» (Беларусь, Гродно, 2010, 2012, 2013); VI, VII International Conference «Plasma Physic and Plasma Technology» (Belarus, Minsk, 2009, 2012); 19-й Международный симпозиум «Перспективные технологии дисплеев и полупроводниковой осветительной техники» (Беларусь, Логойск, 2011); 9-я, 10-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Беларусь, Минск, 2011, 2013); 3-rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter «High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows» (Russia, Tomsk, 2012); XX Международный симпозиум «Передовые дисплейные и световые технологии» (Украина, Крым, 2012); XII, XIII Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология» (Россия, Москва, 2017, 2018).

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертации опубликованы 6 статей в рецензируемых научных журналах, 14 статей в сборниках материалов конференций, 3 тезиса докладов на конференциях, 1 евразийский патент на изобретение, 1 международная заявка на изобретение. Общий объем публикаций по теме диссертации соответствует пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений с материалами практического использования результатов работы.

Общий объем диссертационной работы составляет 146 страниц, из них 97 страниц основного текста, 96 рисунков на 32 страницах, 7 таблиц на 3 страницах, библиография из 129 наименований, включая 25 публикаций автора на 8 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава диссертации посвящена обзору сложившихся и перспективных подходов к формированию защитных оптических покрытий с гидрофобными и сверхгидрофобными свойствами. В ней объясняется влияние морфологии и поверхностной энергии на гидрофобные свойства поверхности, определены основные достоинства и проблемы существующих на рынке защитных покрытий с гидрофобными свойствами и технологий их формирования, представлено описание современных методов подготовки поверхности перед нанесением гидрофобизирующего агента. Проведен анализ современного состояния и возможностей технологий плазмохимического осаждения (ПХО) и плазмохимического травления (ПХТ) при формировании наноструктурированных адгезионных диэлектрических слоев. Показано, какие технологические преимущества обеспечивает использование реакторов на базе источников индукционного разряда (ИИР) при ПХО и ПХТ.

Во **второй главе** представлены методики определения оптических характеристик морфологии поверхности и структуры покрытий, а также методики определения защитных и гидрофобных свойств покрытий. Описаны методики зондовых измерений параметров плазмы высокочастотных разрядов низкого давления с использованием одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра со схемой компенсации высокочастотных (ВЧ) колебаний области пространственного заряда.

В **третьей главе** представлена методика разработки технологических реакторов плазмохимической обработки наноструктурированных материалов с применением ИИР. В работе исследуется влияние антенной системы: ее геометрии и электрических характеристик на параметры формируемой в технологическом

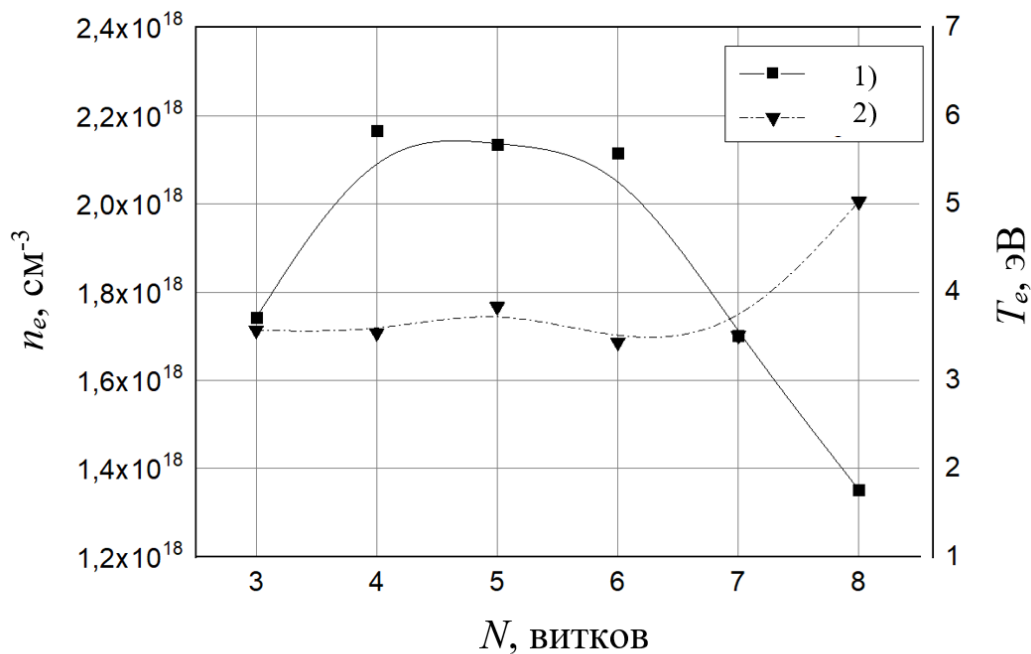
реакторе плазмы (равномерность, температуру, концентрацию электронов) и технологические режимы обработки (рабочее давление, температура образца, равномерность осаждения покрытия и др.).

Одним из основных факторов, определяющих параметры плазмохимической обработки, является концентрация и температура плазмы. Равномерность распределение плазмы определяется величиной и равномерностью распределения электромагнитного поля, генерируемого источником индукционного разряда, а также конфигурацией внешнего постоянного магнитного поля в технологическом реакторе.

Электрические характеристики ИИР определены на основе трансформаторной модели индукционного разряда и исследуются экспериментально путем зондовых измерений.

Установлено, что с ростом концентрации электронов сопротивление разрядной системы сначала возрастает, из-за «скинирования» электромагнитного поля, а затем падает вследствие роста проводимости плазмы. Реактивная составляющая импеданса разрядной системы постоянно растет, следуя увеличению концентрации носителей зарядов и их общей инерции.

Результаты экспериментального исследования влияния индуктивности антенной системы ИИР на параметры формируемой плазмы представлены на рисунке 1.



1 – концентрация электронов; 2 – температура электронного газа

Рисунок 1. – Зависимость концентрации электронов плазмы и температуры электронного газа от количества витков индуктора

Максимальная концентрация плазмы генерируется при количестве витков индуктора N от четырех до шести. Уменьшение концентрации плазмы при количестве витков индуктора менее четырех связано с недостаточным диапазоном

изменения импеданса согласующей цепи и ростом отраженной мощности. Снижение концентрации плазмы при увеличении количества витков индуктора более шести вызвано потерями в согласующей цепи. Увеличение индуктивности антенной системы ведет к росту напряженности электромагнитного поля, генерируемого индуктором, а следовательно, и к увеличению электронной температуры T_e с 3,5 до 5 эВ. Анализ экспериментальных данных позволил установить диапазон напряженности вихревого электрического поля, необходимый для инициации и поддержания индукционного разряда, при котором сохраняется низкая энергия электронов плазмы.

В работе представлено исследование влияния геометрии антенной системы плоского ИИР на равномерность генерируемого электромагнитного поля на основе аналитического выражения, полученного из закона Био – Савара – Лапласа. Результаты расчетов распределения электрического поля для одно-, и четырехзаходной антенн диаметром 200 мм, полученные в пакете компьютерной математики Mathematica 6, приведены на рисунке 2.

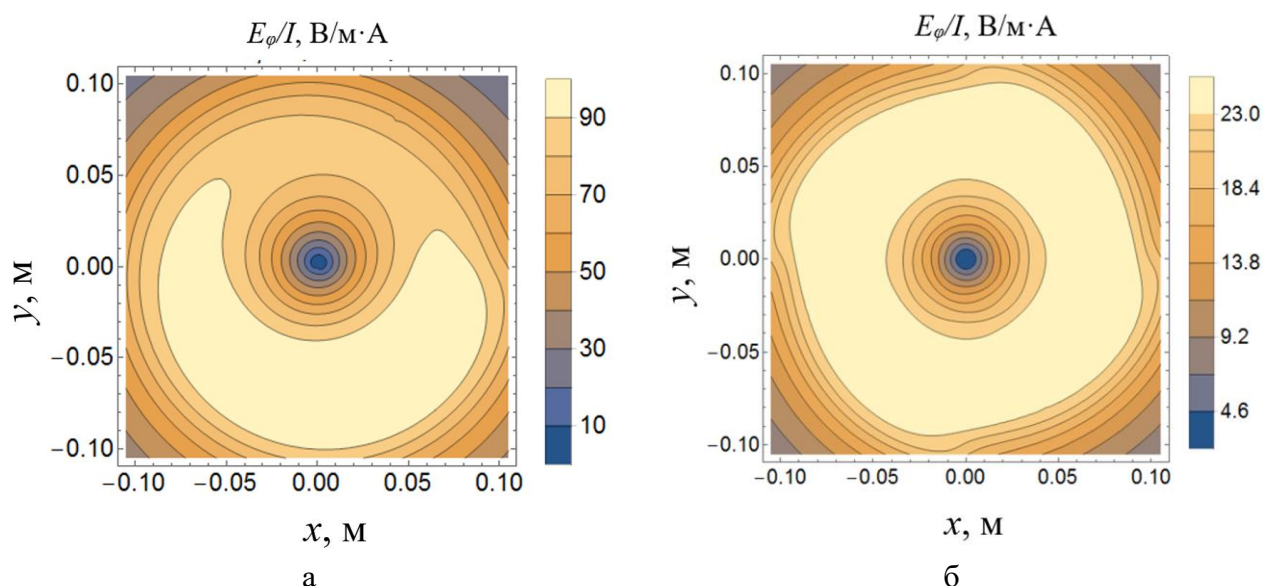
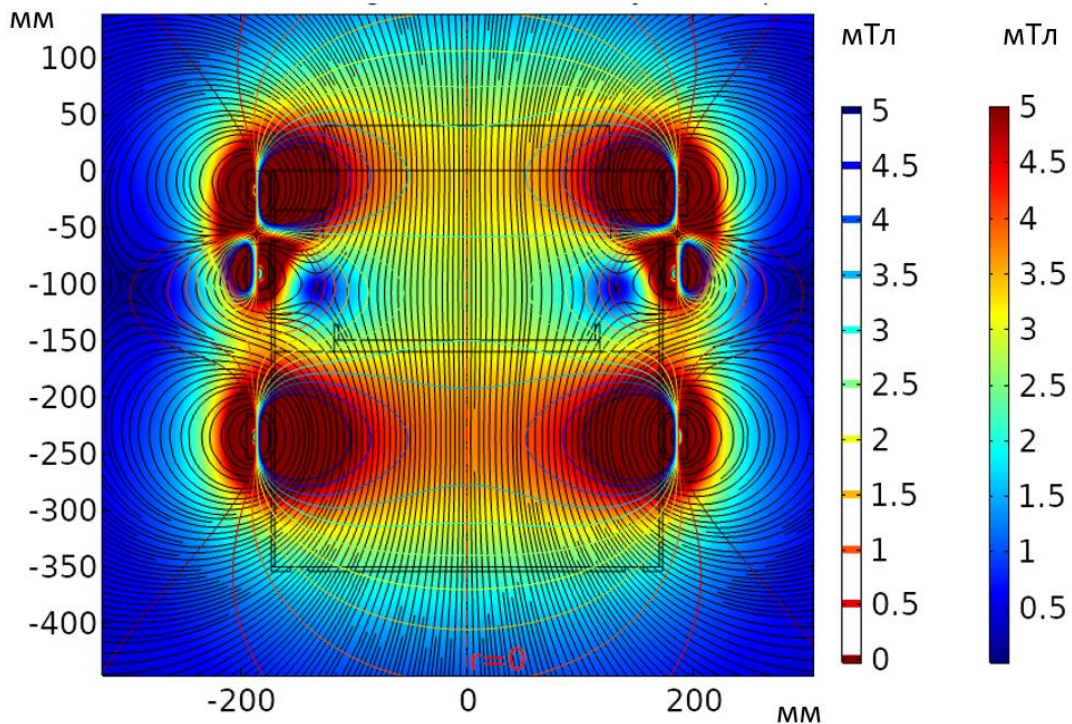


Рисунок 2. – Распределение отношения индукции электрического поля к току индуктора (азимутальная проекция) для однозаходной (а) и четырехзаходной антенн (б) диаметром 200 мм на расстоянии 8 мм от антенны

Проведенное моделирование позволило установить основной недостаток однозаходной антенной системы: генерируемое поле не имеет радиальной симметрии, что усложняет ее использование при статической обработке образцов. Электрическое поле, формируемое четырехзаходными антенными системами, обладает радиальной симметрией четвертого порядка, что позволяет использовать их для статической обработки образцов. Источники индукционного разряда, отличающиеся геометрией антенных систем, также отличаются и выходным импедансом. Условия технологического процесса могут быть воспроизводимы и контролируемы только при условии согласования выходного сопротивления высокочастотного генератора с сопротивлением источника плазмы. Для этого необходимо использовать специальные согласующие цепи. В работе представлена

методика проектирования согласующих цепей технологических систем ВЧИ разряда, с использованием которой показано, что для согласования разрядной системы необходимо использовать Г-четырёхполюсники на реактивных элементах, когда активная составляющая импеданса нагрузки не превышает выходное сопротивление высокочастотного генератора, и П-четырёхполюсники на реактивных элементах в остальных случаях. Нами установлено, что диапазон работы согласующей цепи должен совпадать или незначительно превышать диапазон изменения импеданса разрядной системы.

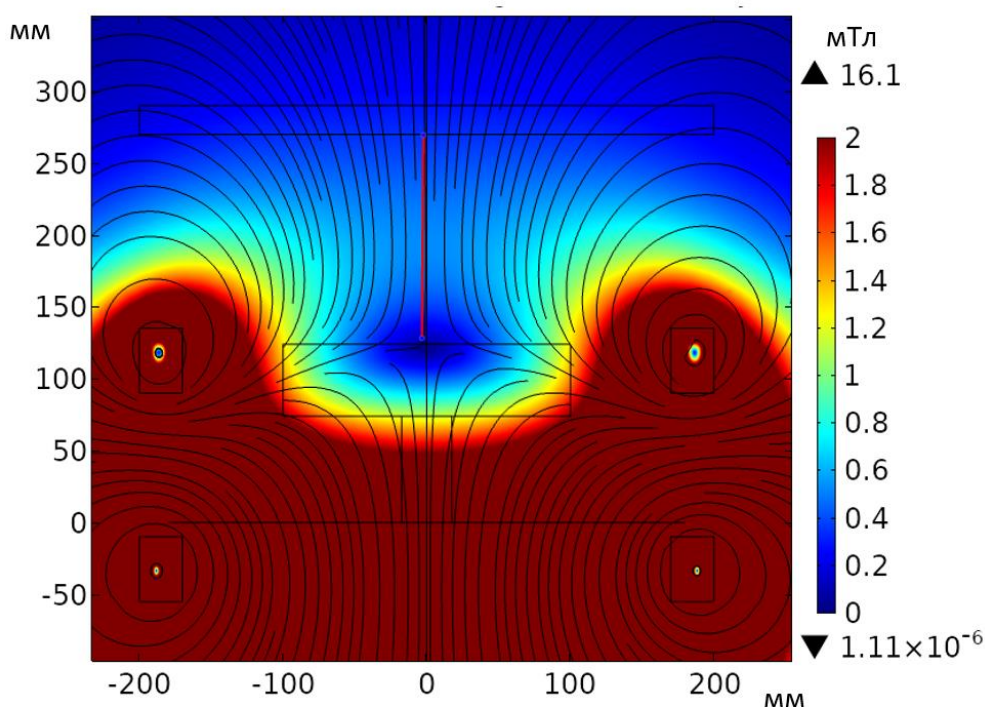
Исследование влияние внешнего постоянного магнитного поля на параметры плазмы ВЧИ разряда проводилось в разработанном цилиндрическом реакторе из нержавеющей стали внутренним диаметром 320 мм. В реакторе соосно размещались генератор плазмы диаметром 200 мм с антенной системой в виде четырехзаходной спирали Архимеда и держатель образцов. Генерацию внешнего постоянного магнитного поля обеспечивали три соленоида. Последовательное включение двух крайних соленоидов генерирует в реакторе аксиальное магнитное поле, встречное им включение центрального соленоида позволило при определенном соотношении токов сформировать в реакторе тороидальную магнитную ловушку с нулевой индукцией магнитного поля (рисунок 3). Распределение магнитного поля в реакторе было получено моделированием методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysic. Для измерения концентрации плазмы применялся зонд Ленгмюра, закрепленный на системе сканирования в плоскости, параллельной плоскости антенной системы ИИР.



Силовые линии магнитного поля; градиентный график – индукция магнитного поля, мТл; контурный график – индукция аксиального магнитного поля, мТл
Рисунок 3. – Распределение магнитного поля в реакторе при встречном включении соленоидов

На основании зондовых измерений установлено, что снижение рабочего давления в реакторе с приложенным внешним магнитным полем ~ 1 мТл ведет к резкому росту степени ионизации при прочих равных условиях. Тороидальная магнитная ловушка оказывает влияние на равномерность распределения плазмы над зоной обработки подложек, но не увеличивает степень ионизации и не расширяет рабочий диапазон существования индукционного разряда.

Определение влияния постоянного магнитного поля на распределение концентрации плазмы в технологическом реакторе и зоне обработке проводилось для аксиальной конфигурации магнитного поля с радиальным и аксиальным градиентами (рисунок 4).



Силовые линии магнитного поля; градиентный график – индукция магнитного поля, мТл

Рисунок 4. – Распределение магнитного поля в реакторе с аксиальным и радиальным градиентом

На основании полученных зависимостей распределения зондового ионного тока насыщения установлено, что максимальная концентрация плазмы находится над центром антенной системы ИИР. Постоянное магнитное поле позволяет управлять размером области равномерного распределения плазмы. Наилучшая равномерность достигается, когда индукция внешнего постоянного магнитного поля возрастает от оси антенной системы к ее краю в диапазоне от 0,05–0,1 мТл до 0,7–0,8 мТл и от плоскости антенной системы к плоскости обработки в диапазоне от 0,01–0,05 мТл до 0,7–0,9 мТл.

В ходе исследования установлены зависимости, позволяющие улучшить равномерность распределения концентрации заряженных частиц плазмы на 10–12 %, снизить рабочее давления вплоть до 0,046 Па при одновременном

увеличении степени ионизации плазмы до 3 % и сохранении низкой температуры электронов плазмы $T_e < 5$ эВ.

Четвертая глава посвящена исследованию процесса формирования наноструктурированной поверхности оксида кремния, полученного методом ПХО с применением ИИР, для увеличения износостойкости просветляющих гидрофобных покрытий на основе слоев $\text{SiO}_x\text{-SiN}_y$.

Для изготовления многослойных покрытий с требуемыми оптическими характеристиками необходимо использовать слои с заданными коэффициентами преломления и поглощения. Поэтому было проведено исследование зависимости значений этих коэффициентов от параметров технологического процесса. На рисунке 5 представлены зависимости коэффициента преломления и поглощения для пленок нитрида и оксида кремния от отношения потока моносилана к потоку кислорода (азота) в газовой смеси при постоянной рабочей мощности.

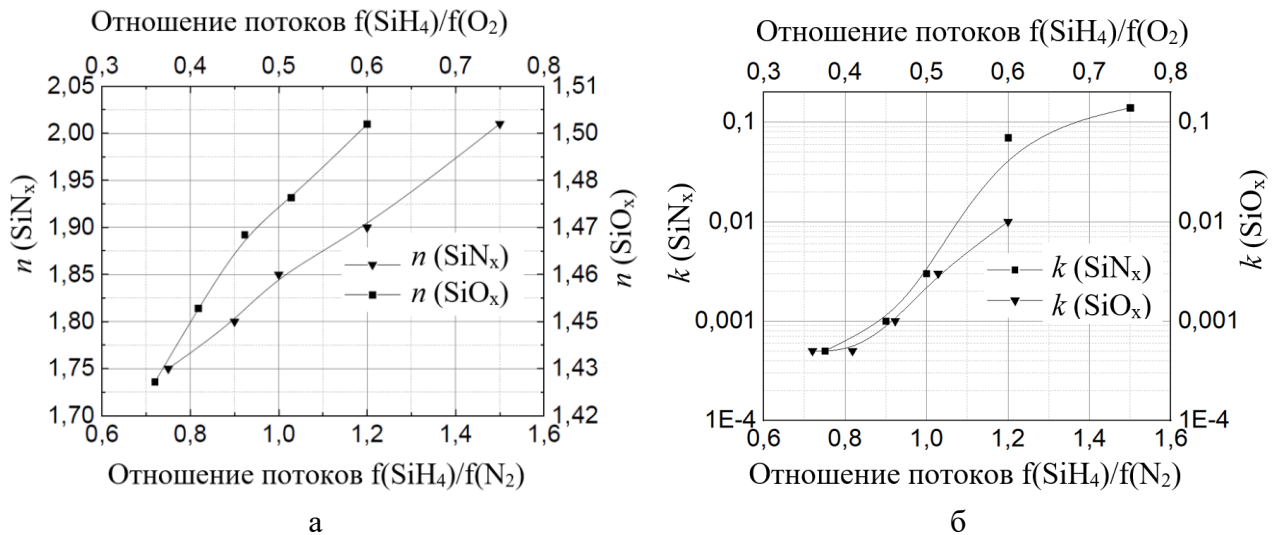


Рисунок 5. – Зависимости коэффициента преломления (а) и поглощения (б) для нитрида и оксида кремния от отношения потока моносилана к потоку кислорода (азота) в газовой смеси при постоянной рабочей мощности

Установлено, что метод ПХО с применением ИИР позволяет формировать пленки оксида и нитрида кремния при температуре подложек 100 °С и менее с показателями преломления 1,45 и 1,82 и коэффициентом поглощения менее 0,001.

Для стабилизации комбинированного оптического покрытия и придания ему таких свойств как гидрофобность и износостойкость, на его поверхность методом осаждения из парогазовой фазы наносился защитный слой кремнийорганического фторсодержащего полимера толщиной ~ 8–10 нм.

Защитное гидрофобное покрытие, нанесенное непосредственно на просветляющее покрытие, не выдерживает более 2000 циклов абразивных истираний. Для увеличения износостойкости на поверхности просветляющего покрытия создают адгезионный слой оксида кремния SiO_x толщиной около 20 нм, который дополнительно подвергают ионному модифицированию. На рисунке 6 представлены РЭМ изображения пленки оксида кремния до и после ионной обработки.

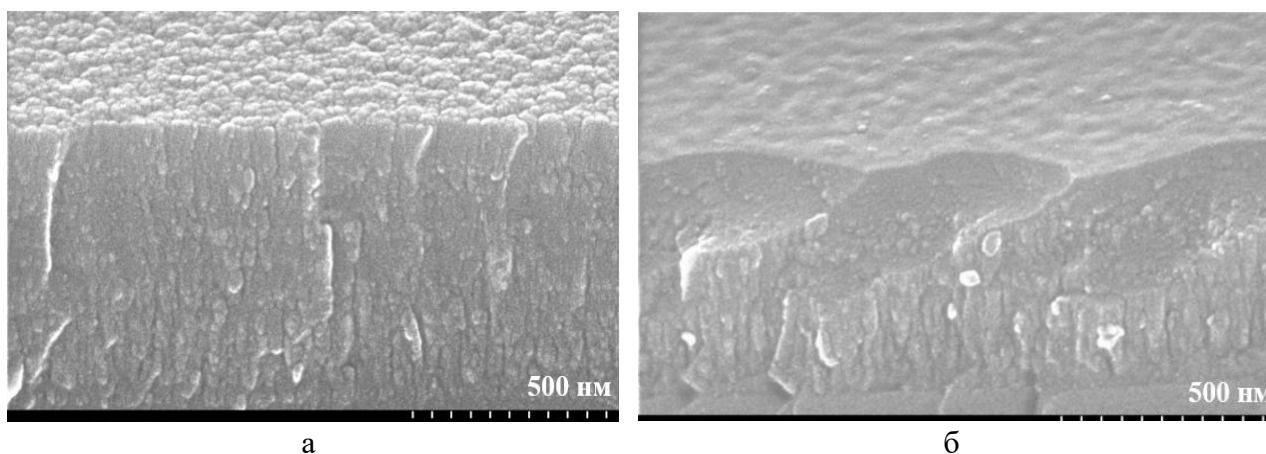
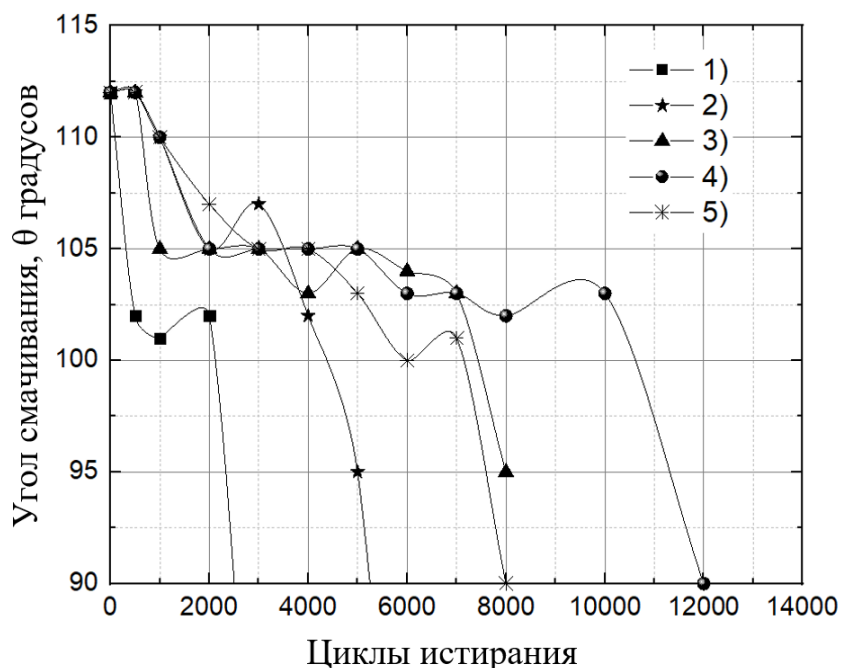


Рисунок 6. – Структура пленки SiO_x , сформированной методом ПХО с применением ИИР без ионной обработки (а) и после ионной обработки (б)

Обработка в аргоне снижает шероховатость поверхности более чем в 8 раз по сравнению с шероховатостью образца и приводит к изменению структуры приповерхностного слоя покрытия (см. рисунок 6).

Тестирования на истирание подтвердили улучшение износостойкости покрытий подвергнутых ионной обработке, рисунок 7.



1 – ПХО без ионной обработки; 2 – 2 мин обработки ионами O_2 ;
 3 – 5 мин обработки ионами O_2 ; 4 – 5 мин обработки ионами Ar ;
 5 – 2 мин обработки ионами Ar

Рисунок 7. – Зависимость статического угла смачивания поверхности водой от количества циклов истирания для образцов, полученных в различных технологических условиях

При помощи атомно-силовой микроскопии и тестов на истирание показано, что ионная обработка уменьшает шероховатость поверхности с 1,8 до 0,2 нм и увеличивает ее механическую устойчивость более чем в 3–5 раз.

В пятой главе представлены результаты исследования по формированию покрытия с наноструктурированной поверхностью со сверхгидрофобными свойствами на основе пленки плазмохимически осажденного оксида кремния.

Выявлены зависимости равномерности толщины, скорости осаждения и оптических свойств пленок оксида кремния в области обработки, полученного методом низкотемпературного ПХО с применением индукционного разряда, от технологических режимов. Установлено, что при увеличении давления от 0,2 до 8 Па неравномерность осаждения увеличивается с $\pm 0,5$ до $\pm 1,3$ %, одновременно наблюдается рост скорости осаждения с 7 до 38 нм/мин.

В работе представлен комплекс экспериментов по влиянию режимов плазмохимического травления оксида кремния через маску из самоорганизованной островковой пленки серебра на мультимодальный микро- и нанорельеф поверхности. Отработка режимов плазмохимического травления для создания мультимодального рельефа поверхности проводилась на стеклянных подложках с верхним слоем оксида кремния SiO_x (280 нм), на который наносилась пленка серебра толщиной 30 нм. Образцы отжигались в вакууме в течение 30 мин. Снимки РЭМ, полученных после отжига структур, представлены на рисунке 8.

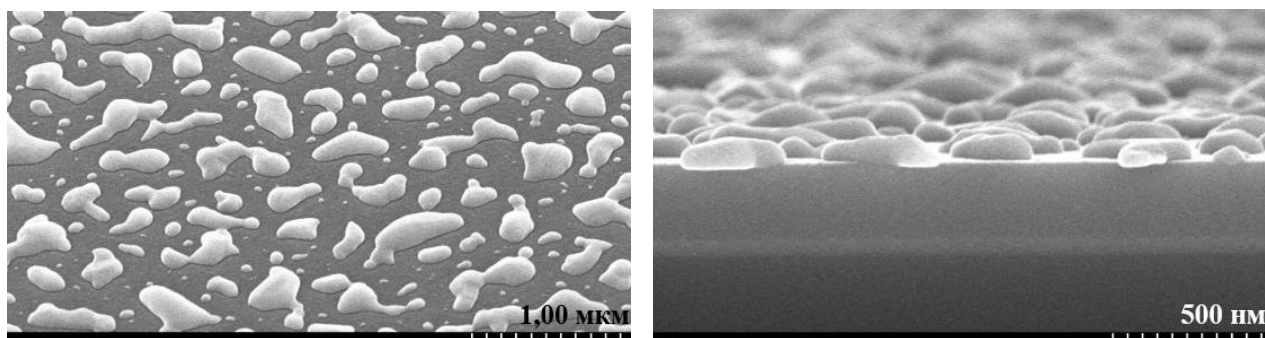


Рисунок 8. – Снимки РЭМ образцов после отжига

На рисунке 9 приведены снимки РЭМ поверхности образцов после плазмохимического травления через полученную квазипериодическую металлическую маску. Поверхность образца образована островками размером 300–400 нм с более мелкими образованиями размером около 30–50 нм.

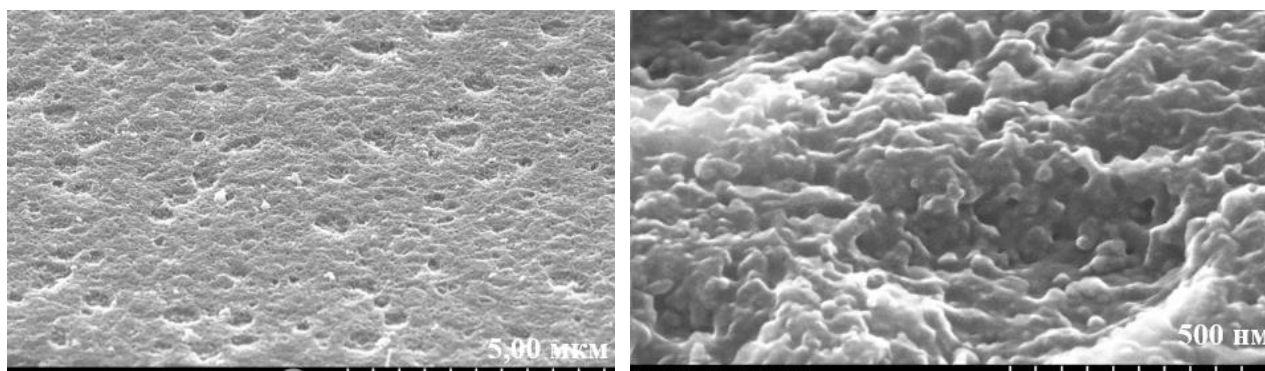


Рисунок 9. – Снимки РЭМ поверхности оксида кремния после ПХТ в плазме CF_4 и O_2

На рисунке 10 представлена зависимость статического угла смачивания обработанной поверхности водой и шероховатости от времени плазмохимического травления. Увеличение отношения потока реактивных газов CF_4/O_2 более 0,7 приводит к снижению шероховатости поверхности и статического угла смачивания поверхности водой.

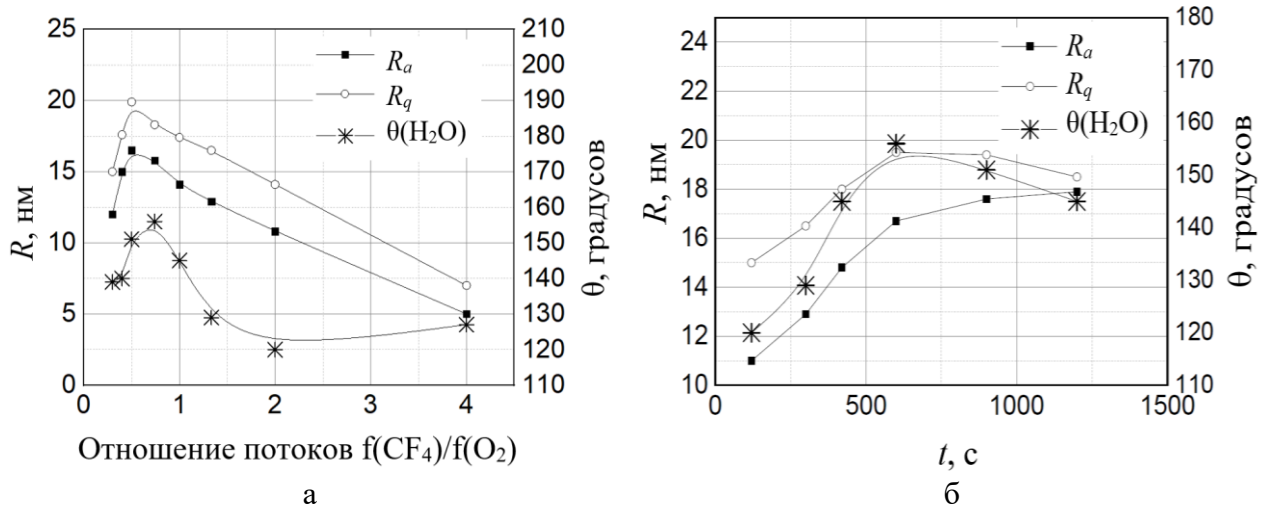


Рисунок 10. – Зависимость среднеарифметической шероховатости, среднеквадратичной шероховатости и угла смачивания поверхности водой от отношения потоков CF_4/O_2 в газовой смеси (а) и от времени обработки при отношении потока $\text{CF}_4/\text{O}_2 = 0,7$ (б)

Такой же эффект наблюдается и при увеличении времени обработки: на первом этапе происходит увеличение шероховатости поверхности за счет протравливания пленки под маску, далее шероховатость поверхности почти не изменяется и не происходит увеличение ее гидрофобных свойств. Снижение гидрофобности можно объяснить стравливанием элементов рельефа наноразмерного диапазона.

Разработанная и исследованная технология формирования высоко- и сверхгидрофобных покрытий позволяет создавать на поверхности образца пленку оксида кремния с развитой мультимодальной морфологией, которая после нанесения гидрофобизирующего агента приобретает высокогидрофобные или сверхгидрофобные свойства. Максимальному полученному статическому углу смачивания водой $\theta = 155^\circ$ соответствуют среднеарифметическое отклонение профиля поверхности $R_a = 16,5$ нм и среднеквадратичное отклонение профиля поверхности $R_q = 19$ нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика расчета электромагнитного поля, генерируемого антенной системой источника индукционного разряда, которая позволяет рассчитывать равномерность и интенсивность электромагнитного поля при проектировании разрядной системы источника индукционного разряда. С использованием данной методики разработан планарный источник индукционного разряда, имеющий спиральную антенную систему с четвертым порядком радиальной симметрии генерируемого электромагнитного поля, который обеспечивает формирование плазмы высокой плотности и равномерности в реакторах плазмохимического осаждения и травления наноструктурированных материалов. Источник необходим в технологии изготовления наноматериалов, наноструктур и изделий из них [1, 6, 8, 9, 14, 21, 23].

2. Разработаны методики построения элементов реакторов плазмохимического осаждения и плазмохимического травления для формирования наноструктурированных слоев на основе высокочастотных разрядных систем индукционного разряда, методики повышения равномерности обработки при плазмохимическом осаждении и травлении путем формирования аксиальных и тороидальных магнитных ловушек [1, 3, 6].

3. Выявлены зависимости износостойкости многослойных оптических покрытий с наноструктурированной поверхностью, сформированных методом плазмохимического осаждения при температуре менее 100 °С, от режимов ионной бомбардировки за счет модификации их структуры и морфологии поверхности, которые позволили разработать технологию формирования износостойких многослойных гидрофобных просветляющих покрытий с интегральным пропусканием более 95 % в видимом спектральном диапазоне длин волн, углом смачивания водой 110–115 градусов и износостойкостью к механическим истираниям, увеличенной в 3–5 раз, представляющих собой периодическую структуру из слоев оксида и нитрида кремния, сформированных в плазме высокой плотности, верхний наноструктурированный слой которой подвергается ионному модифицированию и покрывается гидрофобизирующим слоем на основе фторированного органического полимера [5, 11, 13, 15, 20, 24, 25].

4. Установлены зависимости шероховатости мультимодального нанорельефа поверхности оксида кремния и гидрофобных свойств такой поверхности от отношения потоков рабочих газов и режимов плазмохимической обработки, позволивших разработать технологию анизотропного плазмохимического травления оксида кремния в плазме высокой плотности через квазипериодическую металлическую маску, при отношении потока рабочих газов $CF_4/O_2 = 0,7 \pm 0,1$, которая обеспечивает формирование на поверхности подложки мультимодального рельефа с размером элементов 30–350 нм, среднеквадратичной шероховатостью поверхности $19 \pm 0,5$ нм, который при нанесении гидрофобизирующего агента обеспечивает придание поверхности сверхгидрофобных

свойств, характеризующих статическим углом смачивания водой, увеличенным до 155 градусов [2, 4, 10, 12, 16, 17, 19, 22].

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

Полученные в ходе выполнения работы результаты предназначены для использования в технологии изготовления электронных устройств, оптических и полупроводниковых приборов, МЭМС, дисплеев и в солнечной энергетике.

1. Разработанная методика проектирования реакторов плазмохимической обработки на основе источников индукционного разряда предназначена для использования при проектировании технологических комплексов плазмохимического травления и осаждения наноструктурированных полупроводниковых и диэлектрических материалов и успешно апробирована при проектировании технологических реакторов в серии установок САА-PECVD/AF на ООО «ИЗОВАК Технологии», а также при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в НИЧ БГУИР.

2. Разработанная технология изготовления комбинированных гидрофобных многослойных просветляющих покрытий из слоев оксида и нитрида кремния, сформированных в плазме индукционного разряда с последующим нанесением фторированного органического полимера (перфторполиэфира) (евразийский патент EA034006 (B1), международная заявка WO2017156614), может быть использована в производстве широкого спектра оптических приборов: дисплеев, линз, прозрачных экранов для защиты солнечных батарей или других устройств. Успешно применена в серии установок осаждения гидрофобных и олеофобных покрытий САА-PECVD/AF на ООО «ИЗОВАК Технологии».

3. Разработанная технология формирования сверхгидрофобных покрытий на основе наноструктурированных слоев оксида кремния может быть использована в технологии изготовления приборов микро- и наноэлектроники, элементов МЭМС для защиты от химического воздействия окружающей атмосферы и улучшения стабильности их характеристик.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Котов, Д. А. Исследование интегральных параметров разряда ВЧ источника индуктивно-связанной плазмы / Д. А. Котов, А. А. Ясюнас, Л. Т. Кирия // Доклады БГУИР. – 2010. – № 8. – С. 20–25.

2. Low-temperature deposition of silicon dioxide films in high density plasma / A. Yasunas, D. Kotov, V. Shiripov, U. Radzionau // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2013. – Vol. 16, № 2. – P. 216–219.

3. Ясюнас, А. А. Влияние распределения магнитного поля на разрядные параметры источника индукционного разряда / А. А. Ясюнас, Д. А. Котов // Молодежь в науке – 2014 : приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» : в 5 ч. / НАН Беларуси, Совет молодых ученых НАН Беларуси. – Минск, 2015. – Ч. 3 : Серия физико-технических наук ; Серия физико-математических наук / редкол.: С. Я. Килин, П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – С. 49–53.

4. Магнетронная распылительная система для формирования резистивных функциональных слоев / Г. В. Зеневич, А. А. Ясюнас, Я. И. Шукевич, Д. А. Котов // Молодежь в науке – 2014: приложения к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» : в 5 ч. / НАН Беларуси, Совет молодых ученых НАН Беларуси. – Минск, 2015. – Ч. 3 : Серия физико-технических наук ; Серия физико-математических наук / редкол.: С. Я. Килин, П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – С. 19–21.

5. Плазмохимическое осаждение пленок оксида и нитрида кремния для создания просветляющих покрытий / А. А. Ясюнас, А. С. Мысливец, Е. А. Хохлов, Д. А. Котов // Молодежь в науке – 2015 : приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» : в 5 ч. / НАН Беларуси, Совет молодых ученых НАН Беларуси. – Минск, 2016. – Ч. 4 : Серия физико-математических наук ; Серия физико-технических наук / редкол.: С. Я. Килин, П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – С. 85–88.

6. Yasunas, A. A. ICP source antenna system / A. A. Yasunas, D. A. Kotov // Известия вузов. Физика – 2016. – Т. 59, № 93. – С. 219–224.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7. Ясюнас, А. А. Технологическая система для проведения глубокого плазмохимического травления / А. А. Ясюнас, Д. А. Котов. // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 апреля 2008 г. : в 3 ч. / Мин. гос. высш. радиотехн. колледж ; под общ. ред. Н. А. Цырельчука. – Минск, 2008. – Ч. 1. – С. 160–162.

8. Kotov, D. A. Research of process energy transfer to plasma of RF inductively coupled discharge / D. A. Kotov, A. A. Yasunas // Plasma physics and plasma technology PPPT-6 : VI Intern. conf., Minsk, Sept. 28 – October 2, 2009 : contributed papers : in 2 vol. / Nat. Acad. of Sciences of Belarus [et al.] ; ed. board: V. M. Astashynski (managing ed.), V. S. Burakov, L. E. Krat'ko. – Minsk, 2009. – Vol. 2. – P. 527–530.

9. Ясюнас, А. А. Исследование импеданса разрядной системы индуктивно-связанной плазмы / А. А. Ясюнас, Г. В. Зеневич, Д. А. Котов // Физика конденсированного состояния : материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 21–23 апреля 2010 г. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Е. А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2010. – С. 342–344.

10. Размерное реактивное ионное травление тонких пленок на основе титана во фторуглеродной плазме / Д. А. Котов, Ю. А. Родионов, А. С. Тымощик, А. А. Ясюнас // Перспективные технологии дисплеев и полупроводниковой осветительной техники : материалы 19-го Междунар. симпозиума, Логойск, 28 февраля – 4 марта 2011 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: А. Г. Смирнов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 136–139.

11. Родионов, Ю. А. Многоапертурный ионно-лучевой источник в технологии формирования тонкопленочных структур дисплеев / Ю. А. Родионов, Д. А. Котов, А. А. Ясюнас // Перспективные технологии дисплеев и полупроводниковой осветительной техники : материалы 19-го Междунар. симпозиума, Логойск, 28 февраля – 4 марта 2011 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: А. Г. Смирнов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 145–150.

12. Котов, Д. А. Процесс плазменного травления при создании структуры МЭМС-переключателя / Д. А. Котов, А. А. Ясюнас // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20–22 сентября 2011 г. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: В. М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 49–50.

13. Котов, Д. А. Ионные источники для обработки подложек большой площади / Д. А. Котов, А. А., Ясюнас, Ю. А. Родионов // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20–22 сентября 2011 г. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: В. М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 464–465.

14. Yasunas, A. The influence of antenna system configuration on the parameters of the inductively coupled plasma / A. Yasunas, D. Kotov // Plasma physics and plasma technology PPPT-7 : VII intern. conf., Minsk, 17–21 September 2012 / Nat. Acad. of Sciences of Belarus [et al.] ; ed. board: V. M. Astashynski (managing ed.), V. S. Burakov, I. I. Filatova. – Minsk, 2012. – P. 639–642.

15. Кутько, А. Н. Определение равномерности нанесения тонких пленок ионно-плазменными методами / А. Н. Кутько, С. Д. Жук, А. А. Ясюнас // Физика конденсированного состояния: ФЛС : сб. науч. ст. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Е. А. Ровба (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2012. – Ч. 2. – С. 79–82.

16. Кутько, О. М. Комар, А. А. Ясюнас // Физика конденсированного состояния : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 18–19 апреля 2013 г. / Гродн. гос. ун-т; редкол.: Г. А. Хацкевич (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2013. – С. 185–186.

17. Оптические свойства и структура пленок низкотемпературного плазмохимического диоксида кремния / А. А. Ясюнас, Д. А. Котов, О. М. Комар, В. Я. Ширипов // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 10-й Междунар. конф., Минск, 24–27 сентября 2013 г. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: В. М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 323–325. Кутько, А. Н. Низкотемпературное осаждение диоксида кремния в плазме высокой плотности / А. Н.

18. PECVD установки поштучной обработки кремниевых пластин серии LabNITIZ для формирования гетеропереходов в структурах солнечных элементов НТТ / А. А. Ясюнас, Е. А. Хохлов, А. С. Мысливец, С. М. Насточкин, В. Я. Ширипов, С. Ю. Герасименко, М. А. Региневич // Вакуумная техника, материалы и технология: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 11–13 апреля 2017 г. / под ред. С. Б. Нестерова. – М., 2017. – С. 220–223.

19. Yasunas, A. Stochastic surface relief with superhydrophobic properties formation by plasma etching method / A. Yasunas, V. Savich, D. Kotov // 17th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations, Minsk, 26 – 27 October 2017. – Minsk, 2017. – P. 639–642.

20. PECVD оборудование для нанесения $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ / А. А. Ясюнас, Е. А. Хохлов, А. С. Мысливец, В. Я. Ширипов // Вакуумная техника, материалы и технология : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конференции, Москва, 24–26 апреля 2018 г. – М., 2018. – С. 159–162.

Тезисы докладов на научных конференциях

21. Ясюнас, А. А. Распределение электромагнитного поля, формируемого плоским источником индуктивно-связанного разряда / А. А. Ясюнас // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ2010: тез. докл. 6-й Междунар. молодежн. науч.-техн. конф., Севастополь, Украина, 19–24 апреля 2010 г. – Севастополь, 2010. – 164 с.

22. Анализ методов формирования слоев SiO_2 функциональных структур дисплеев / Д. А. Котов, Ю. А. Родионов, А. А. Ясюнас, А. Х. Хисамов, В. Я. Ширипов // Передовые дисплейные и световые технологии: тез. докл. XX Междунар. симпозиума. – Крым, 2012. – 38 с.

23. Kotov, D. The influence of antenna system configuration on the discharge parameters of the inductively coupled plasma source / D. Kotov, A. Yasunas // 3rd International congress on radiation physics and chemistry of condensed matter, high current electronics and modification of materials with particle beams and plasma flows, Tomsk, 17–21 September 2012. – Tomsk, 2012. – P. 308–309.

Патенты и заявки на изобретения

24. Комбинированное оптическое покрытие и способ его изготовления (варианты): пат. ЕА034006 (В1) / В. Я. Ширипов, Г. К. Жавнерко, Е. А. Хохлов, А. А. Ясюнас, А. С. Мысливец, П. А. Розель. – Оpubл. 18.12.2019.– [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eapo.org/ru/patents/reestr/patent.php?id=34006>. – Дата доступа: 22.01.2020.

25. Vacuum assembly for applying thin-film coatings and method for applying optical coatings to same: application WO2017156614(A1) / E. A. Khokhlov, A. A. Yasunas, K. E. Miasnikou, S. M. Nastochkin. – Publ. date 16.03.2016. – [Electronic resource]. – Mode of access: <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=WO&NR=2017156614A1&KC=A1&FT=D>. – Date of access: 26.10.2018.

РЭЗІЮМЭ

Ясюнас Аляксандр Аляксеевіч

Тэхналогія і асаблівасці пабудовы абсталявання для фарміравання нанаструктураваных гідрафобных і зносаўстойлівых аптычных пакрыццяў для бачнага спектральнага дыяпазону

Ключавыя словы: ахоўныя нанаструктураваныя пакрыцці, мультымадальны рэльеф, індукцыйны разрад, плазмахімічнае траўленне, плазмахімічнае асаджэнне.

Мэта працы: распрацоўка тэхналогіі фарміравання нанаструктураваных ахоўных пакрыццяў з гідрафобнымі і звышгідрафобнымі ўласцівасцямі на шкляных падкложках, дзе базавым слоём выступае нанаструктураваны аксід крэмнію, сфарміраваны метадам плазмахімічнага асаджэння і плазмахімічнага траўлення ў рэактары на базе плоскай крыніцы газаразраднай нізкатэмпературнай плазмы высокай шчыльнасці.

Метады даследавання: спектрафотаметрычны метады, метады растравай электроннай мікраскапіі, зондавы метады дыягностыкі плазмы, метады вызначэння гідрафобных уласцівасцей пакрыццяў па статычнаму вуглу змочвання, метады вызначэння ахоўных уласцівасцей пакрыццяў па ўстойлівасці да сцірання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: у працы прадстаўлены вынікі даследаванняў па фарміраванні нанаструктур ахоўных гідрафобных шматслойных прасвятляльных пакрыццяў пры тэмпературах менш за 100 °С метадам плазмахімічнага асаджэння з актывацыяй нізкатэмпературнай плазмай высокай шчыльнасці.

Упершыню праведзена даследаванне ўплыву тэхналагічных рэжымаў плазмахімічнага траўлення на мультымадальную марфалогію паверхні аксиду крэмнію, сфарміраваную метадам плазмахімічнага траўлення з актывацыяй нізкатэмпературнай плазмай высокай шчыльнасці праз маску з астраўковай металічнай плёнкі, а таксама гідрафобных уласцівасцяў такой паверхні пры нанясенні на яе крэмнійарганічнага фторзмяшчальнага гідрафабізуючага злучэння.

Упершыню прадстаўлены вынікі даследавання ўплыву канфігурацыі знешняга пастаяннага магнітнага поля ў тэхналагічным рэактары на базе крыніцы індукцыйнага разраду на параметры і раўнамернасць генерыруемай плазмы і асаджаемага пакрыцця.

Ступень выкарыстання: атрыманыя ў працы вынікі ўключаны ў вытворчы працэс на прадпрыемстве «ИЗАВАК Тэхналогіі», навуковы і вучэбны працэс у БДУІР.

Вобласць прымянення: машынабудаванне, электроніка, оптыка, МЭМС, тэхналогія тонкіх плёнак.

РЕЗЮМЕ

Ясюнас Александр Алексеевич

Технология и особенности построения оборудования для формирования наноструктурированных гидрофобных и износостойких оптических покрытий для видимого спектрального диапазона

Ключевые слова: защитные наноструктурированные покрытия, мультимодальный рельеф, индукционный разряд, плазмохимическое травление, плазмохимическое осаждение.

Цель работы: разработка технологии формирования наноструктурированных защитных покрытий с гидрофобными и сфергидрофобными свойствами на стеклянных подложках, базовым слоем в которых выступает наноструктурированный оксид кремния, сформированный методами плазмохимического осаждения и плазмохимического травления в реакторе на базе плоского источника газоразрядной низкотемпературной плазмы высокой плотности.

Методы исследования: спектрофотометрический метод, метод растровой электронной микроскопии, зондовый метод диагностики плазмы, метод определения гидрофобных свойств покрытий по статическому углу смачивания, метод определения защитных свойств покрытий по устойчивости к истиранию.

Полученные результаты и их новизна: в работе представлены результаты исследований по формированию наноструктур защитных гидрофобных многослойных просветляющих покрытий при температурах менее 100 °С методом плазмохимического осаждения с активацией низкотемпературной плазмой высокой плотности.

Впервые проведено исследование влияния технологических режимов плазмохимического травления на мультимодальную морфологию поверхности оксида кремния, сформированную методом плазмохимического травления с активацией низкотемпературной плазмой высокой плотности через маску из островковой металлической пленки, а также гидрофобных свойств таких поверхностей при нанесении на нее кремнийорганического фторсодержащего гидрофобизирующего соединения.

Впервые представлены результаты исследования влияния конфигурации внешнего постоянного магнитного поля в технологическом реакторе на базе источника индукционного разряда на параметры и равномерность генерируемой плазмы и осаждаемого покрытия.

Степень использования: полученные в работе результаты внедрены в производственный процесс на предприятии «ИЗОВАК Технологии», научный и учебный процесс в БГУИР.

Область применения: машиностроение, электроника, оптика, МЭМС, технология тонких пленок.

SUMMARY

Yasunas Aleksandr Alekseevich

Technology and equipment designing features of the formation of nanostructured hydrophobic and wear-resistant optical coatings for visible spectral range

Keywords: protective nanostructured coatings, multimodal relief, induction discharge, plasma chemical etching, plasma chemical deposition.

Object of work: development of a technology of nanostructured coatings with hydrophobic and superhydrophobic properties formation on glass substrates, where the basic layer is represented by a nanostructured silicon oxide formed by methods of plasma chemical deposition and plasma chemical etching in a reactor on the basis of an inductively coupled low-temperature high-density plasma source.

Methods of research: spectrophotometric method, scanning electron microscope method, probe method of plasma diagnostics, a method for determining the hydrophobic properties of coatings using a static wetting angle, a method for determining the protective properties of coatings for abrasion resistance.

Obtained results and their novelty: the work shows the results of the research for the formation of nanostructure protective hydrophobic multilayer antireflecting coatings at a temperature below 100 °C with the use of method of plasma-chemical deposition with activation by low-temperature high-density plasma.

For the first time it was conducted a research upon the influence of processing methods of plasma chemical etching on the multimodal morphology of silicon oxide surface, formed with the use of plasma chemical etching with activation by low-temperature high-density plasma through a mask of island metal film, and also of hydrophobic properties of such surfaces when depositing a silicone fluorine-containing hydrophobic compound.

For the first time the results of the influence of an external constant magnetic field configuration in a technological reactor on the basis of an inductively coupled plasma source on parameters and uniformity of the generated plasma and a deposited coating are provided.

Degree of utilization: the obtained results have been implemented into the manufacturing process at the company «IZOVAC Technologies», scientific and educational processes at BSUIR.

Sphere of application: mechanical engineering, electronics, optics, MEMS, thin film technology.

Научное издание

Ясюнас Александр Алексеевич

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ГИДРОФОБНЫХ И ИЗНОСОСТОЙКИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ ВИДИМОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы
(в материаловедении)

Подписано в печать .04.2020.

Гарнитура «Таймс».

уч. изд. л. 1,4.

Формат 60x84 1/16.

Отпечатано на ризографе.

Тираж 65 экз.

Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,63.

Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,

распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск