

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 16.04.01 Техническая физика
 Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Влияние условий осаждения на свойства а-С:H:SiO_x пленок

УДК 621.793.1:539.216.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Елгин Юрий Игоревич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга	Юрьева А.В.	к.т.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер-исследователь ИСЭ СО РАН	Гренадёр А.С.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Меньшикова Е.В.	к.ф.н, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения общих технических дисциплин	Винокурова Г.Ф.	к.т.н, доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель НОЦ Б.П. Вейнберга	Кривобоков В.П.	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2019 г.

**Результаты обучения магистров
направления 16.04.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
P1	Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-2, ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий	Требования ФГОС (ОПК-1). СУОС ТПУ (УК 2, УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты	Требования ФГОС (ОПК-5, ОПК-7, ПК-5, ПК- 8). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ОПК-6, ПК-6, 7). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учётом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.	Требования ФГОС (ПК-12,13,14). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P6	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты	Требования ФГОС (ПК-15, 16). СУОС ТПУ (УК 2, УК3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
	проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии.	FEANI
P7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). СУОС ТПУ (УК 1, УК3, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Владеть приёмами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	Требования ФГОС (ОПК-3). СУОС ТПУ (УК 1, УК3). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 (п. 2.4) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоёмкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.	Требования ФГОС (ПК-5). СУОС ТПУ (УК 1, УК2). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять своё научное мировоззрение.	СУОС ТПУ (УК 6). Критерий 5 (п. 2.6) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения	Требования ФГОС (ОПК - 7). СУОС ТПУ (УК4, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 3.3). Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОПК,3 ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 16.04.01 Техническая физика
 Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ: Руководитель ООП
 _____ Кривобоков В.П.
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации (магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ71	Елгину Юрию Игоревичу

Тема работы:

Влияние условий осаждения на свойства а-C:H:SiO_x пленок	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Технические характеристики экспериментальной установки ННВ-6, основанной на турбомолекулярном насосе ТМН-1500 и оснащенной плазмогенератором с накальным катодом; приложение для составления таблиц и вычислений Microsoft Excel; приложение для математических и инженерных вычислений Mathcad.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор литературных источников по исследуемой тематике; выбор методик исследования; проведение теоретических расчётов; проведение серии экспериментов по аналитическому исследованию кремний-углеродных пленок; анализ полученных результатов; экономическая часть магистерской работы (Расчет себестоимости НИОКР); социальная ответственность.</p>

<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Титульный лист; 2. Кристаллическая решетка графита; 3. Кристаллическая решетка алмаза; 4. Содержание водорода в водородосодержащих углеродных покрытиях; 5. Вакуумная система; 6. Общий вид плазмотрона; 7. Установка для анализа адгезионной прочности NST компании CSEM Instrument; 8. Схема интерферометра Майкельсона; 9. Изображение зондового датчика; 10. Зависимость краевого угла смачивания (с водой) от расхода азота в процессе нанесения a-C:H:SiO_x пленок; 11. ИК-Фурье спектры кремний-углеродных пленок для различного расхода азота N₂; 12. Твердость и модуль упругости формируемых a-C:H:SiO_x пленок; 13. Результаты исследования морфологии поверхности a-C:H:SiO_x пленок методом атомно-силовой микроскопии.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН, к.ф.н., Меньшикова Е.В.
Социальная ответственность	Доцент ООД, к.т.н., Винокурова Г.Ф.
Иностранный язык	Старший преподаватель ОИЯ, Демидова О.М.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение

Глава 1. Материалы и методы их получения

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга	Юрьева А.В. (руководитель)	к.т.н.		
Инженер-исследователь ИСЭ СО РАН	Гренадёр А.С. (консультант)	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Елгин Юрий Игоревич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ71	Елгину Юрию Игоревичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	– Бюджет затрат НИИ 258401 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Тариф на электроэнергию – 5.8 руб. за 1 кВт·ч
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	– Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 27.1 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	– Сравнение с другими схожими материалами
2. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет</i>	– Иерархическая структура работ; – SWOT-анализ; – определение трудоемкости работ.
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Бюджет научно-технического исследования: – расчет материальных затрат; – расчет основной платы исполнителей темы; – накладные расходы; – формирование бюджета затрат.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Матрица SWOT
2. Альтернативы проведения НИ
3. График проведения и бюджет НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Елгин Ю.И.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ71	Елгину Юрию Игоревичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Тема ВКР:

Влияние условий осаждения на свойства а-С:H:SiO_x пленок	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Достигнуть наилучших механических и трибологических характеристик пленок.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> - ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; - ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения; - ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> - вредные вещества; - повышенный уровень шума; - повышенный уровень вибрации; - электромагнитные поля; - повышенное напряжение.
3. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> - попадания газа в окружающую атмосферу.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> - ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в ЧС. - ГОСТ Р 12.1.004-91 ССБТ Пожарная безопасность.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения общих технических дисциплин	Винокурова Г.Ф.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Елгин Ю.И.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 102 с., 15 рис., 25 табл., 43 источника.

Ключевые слова: алмазоподобные углеродные, углерод, покрытия, плазмогенератор, твердость, адгезия, азотирование.

Объектом исследования являются алмазоподобные углеродные покрытия, полученные методом плазмохимического осаждения в смеси Ar/N₂ и паров полифенилметилсилосана.

Целью работы является комплексное исследование свойств a-C:H:SiO_x пленок, формируемых методом плазмохимического осаждения в смеси Ar/N₂ и полифенилметилсилосана с приложением к подложке импульсного биполярного напряжения смещения.

В результате исследования были получены кремний-углеродные пленки с краевым углом смачивания с водой до 94°. Установлено, что с увеличением расхода азота N₂ происходит снижение механических характеристик получаемых пленок (твердость с 16,3 ГПа до 12,5 ГПа; сопротивление пластической деформации с 196 МПа до 110 МПа). увеличение расхода N₂ приводит к росту среднеквадратичной шероховатости поверхности (с 1,2 нм до 11,1 нм).

Область применения: повышение срока службы медицинского инструмента; износостойкие, механически прочные покрытия.

Оглавление

Введение	12
1. Материалы и методы их получения	14
1.1 Объект исследования	14
1.1.1 Алмазоподобный аморфный углерод	18
1.1.2 Графитоподобный аморфный углерод	18
1.1.3 Тетраэдральный аморфный углерод	18
1.1.4 Полимероподобный аморфный углерод	19
1.1.5 Тетраэдральный гидрогенизированный аморфный углерод	19
1.1.6 Гидрогенизированный аморфный углерод	19
1.1.7 Гидрогенизированный аморфный углерод легированный оксидом кремния ($\alpha\text{-C:H:SiO}_x$)	20
1.2 Методы осаждения кремний-углеродных пленок	20
1.2.1 Плазмохимический метод осаждения на постоянном токе	21
1.2.2 Метод высокочастотного плазмохимического осаждения	24
1.2.3 Плазмохимический метод с использованием импульсного биполярного электропитания	26
Вывод к разделу	27
2. Экспериментальное и аналитическое оборудование	29
2.1 Экспериментальная (вакуумная) установка	29
2.2 Методы аналитического исследования КУП	31
2.2.1 Измерение адгезионной прочности	31
2.2.2 Измерение твердости	32
2.2.3 Исследование ИК-Фурье спектроскопии	33
3. Результаты исследований	36
3.1. Результаты измерений краевого угла смачивания	36
3.2 Результаты ИК-Фурье спектроскопии	37
3.3 Результаты измерения твердости и модуля упругости	38
3.4 Результаты измерения адгезионной прочности	39
3.5 Атомно-силовая микроскопия	40

4.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	42
4.1	Предпроектный анализ	43
4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	43
4.1.2	Анализ конкурентных технических решений	43
4.1.3	SWOT-анализ	45
4.1.4	Планирование научно-исследовательских работ	48
4.2	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	52
4.2.1	Расчет материальных затрат НТИ	52
4.2.2	Основная заработная плата исполнителей темы	54
4.2.3	Дополнительная заработная плата исполнителей темы	57
4.2.4	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	58
4.2.5	Накладные расходы	59
4.2.6	Формирование бюджета затрат НИП	59
4.2.7	Реестр рисков проекта	60
	Вывод к разделу	63
5.	Социальная ответственность	64
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	65
5.1.1	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.	65
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.	66
5.2	Профессиональная социальная безопасность.	69
5.2.1	Анализ вредных и опасных производственных факторов.	69
5.2.2	Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.	70
5.3	Экологическая безопасность.	73
5.3.1	Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду.	73
5.3.2	Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.	73
5.4	Электробезопасность	74

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	77
Вывод к разделу	80
Заключение	82
Список использованных источников	84
Приложение А	88

Введение

Углерод — вещество с самым большим числом аллотропических модификаций. Атомы углерода могут быть устроены в различных многоатомных структурах. Алмазоподобные покрытия состоят из атомов углерода с алмазными и с графитоподобными связями.

На сегодняшний день алмазоподобные углеродные пленки представляют огромный интерес, поскольку обладают уникальными физико-механическими, оптическими и трибологическими свойствами, в частности: высокая твердость (до 100 ГПа), низкая скорость износа и широкий диапазон коэффициента трения (0,05 – 0,20), химическая инертность, коррозионная стойкости. Также, для алмазоподобных пленок характерен большой коэффициент теплопроводности и высокая биосовместимость с биологической средой человека, что, в свою очередь, значительно расширяет диапазон возможного применения данного материала.

Алмазоподобные углеродные плёнки применяются в качестве защитных функциональных покрытий, что обусловлено высоким содержанием фазы углерода с sp^3 -гибридизацией валентных электронов (до 80%) в них [1]. Данные покрытия применяются для увеличения срока службы деталей, работающих при сверлении, фрезеровании, вырубке, прокатке и т.д., где требуется защитить поверхность деталей от износа и выработки, повысить твердость поверхности детали, а также снизить коэффициент трения.

Тем не менее, высокий уровень внутренних напряжений сжатия в покрытиях ($> 3-7$ ГПа) может приводить к разрушению и отслаиванию пленки при формировании толщины больше 500 нм [1].

Одними из методов снижения внутренних напряжений являются отжиг и легирование. В ряде случаев, не все материалы подложек позволяют использовать процедуру отжига, таким образом, необходимо искать альтернативные методы снижения величины внутренних напряжений сжатия. В качестве легирующих добавок, с целью уменьшить количество связей

углерод-углерод, в аморфную структуру углеродной пленки могут быть включены атомы элементов, таких как Si, O, F, N или металлов [11 – 13]. Легирование углеродных пленок такими элементами приводит к снижению содержания фазы углерода с sp^3 -гибридизацией валентных электронов, что снижает прочностные характеристики пленок. Образование новых связей в структуре пленки приводит к еще большему разнообразию их свойств, что, в свою очередь, расширяет область их применения. Наиболее популярным является легирование пленок в процессе синтеза путем введения легирующего компонента в состав плазмы [2,4].

Легирование кислородом и кремнием позволяет снизить внутренние напряжения до величины менее 1 ГПа, что дает возможность формировать пленки толщиной десятки микрометров. Такие пленки получили название кремний-углеродные ($a-C:H:SiO_x$) или алмазоподобный нанокompозит (diamond like nanocomposites). Для данных пленок характерен низкий коэффициент трения во влажных средах (0,02 – 0,15), твердость 10-20 ГПа, низкая скорость износа менее 10^{-5} мм/Н·м, а также термическая стабильность до 400 - 450 °С.

Данная работа посвящена комплексному исследованию свойств $a-C:H:SiO_x$ пленок, формируемых методом плазмохимического осаждения в смеси Ar/N₂ и полифенилметилсилосана с приложением к подложке импульсного биполярного напряжения смещения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение серии экспериментов по формированию $a-C:H:SiO_x$ пленок при различных парциальных давлениях N₂ в рабочей камере;
2. Исследование структуры $a-C:H:SiO_x$ пленок, формируемых в смеси Ar/N₂;
3. Исследование физико-механических свойств полученных $a-C:H:SiO_x$ пленок;
4. Выявление зависимостей свойств $a-C:H:SiO_x$ пленок от парциального давления N₂ в рабочей камере.

1. Материалы и методы их получения

1.1 Объект исследования

Углерод может существовать в чистом виде в различных модификациях: в аморфной форме, то есть со случайным расположением атомов (подробное описание этой формы углерода будет ниже) и в двух различных кристаллических формах, алмаза и графита. Эти две кристаллические модификации различаются по структуре решетки. Кристаллическая решетка определяет основные свойства материала, такие как твердость, эластичность и плотность. [11]

В кристаллической форме типа графита атомы углерода расположены следующим образом, три атома углерода лежат в плоскости четвертого атома (рисунок 1). Такие атомные плоскости представляют собой атомные слои, состоящие из шестиугольников. Углерод в кристаллической форме графита имеет высокую внутреннюю прочность, такой результат из-за маленьких межатомных расстояний между атомами, лежащими в одной плоскости (0,142 нм). Тем не менее, существует относительно большое расстояние (0,333 нм) между атомными слоями. Атомные слои, следовательно, могут быть легко друг относительно друга под воздействием внешних сил. Из-за таких скользящих плоскостей графит обладает такими свойствами, как низкой твердостью, низким удельным электрическим сопротивлением и высокой степенью износа, в сочетании с низким коэффициентом трения.

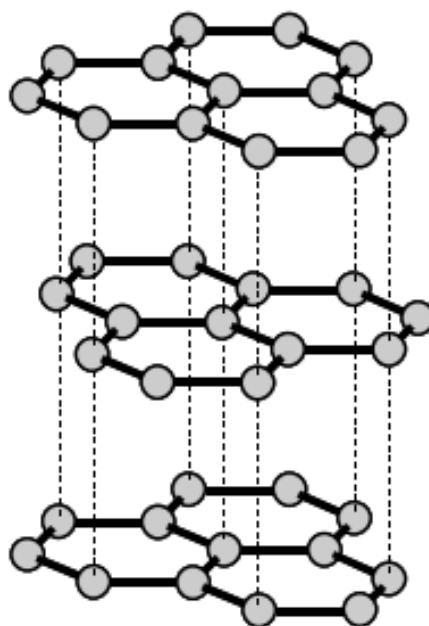


Рисунок 1. Кристаллическая решетка графита [12]

В кристаллической форме типа алмаза, каждый атом углерода образует связи с четырьмя соседними атомами, другими словами алмаз имеет четырехгранное расположение (Рисунок 2). В этом четырехгранном расположении все межатомные расстояния малы и имеют одно значение (0,154 нм). Поэтому появляются очень высокие связывающие силы между атомами во всех направлениях в пространстве. Это приводит к чрезвычайно высокой твердости, высокой теплопроводности, высокому электрическому сопротивлению, химической инертности, оптической прозрачности, широкой запрещенной зоне и низкой степени износа в различных трибологических системах.

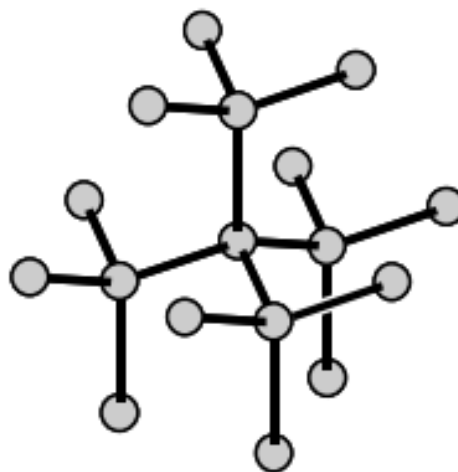


Рисунок 2. Кристаллическая решетка алмаза [13]

Кристаллические типы атомных связей алмазоподобных покрытий классифицируются sp^2 - и sp^3 -гибридизациями. Гибридизация орбиталей — это процесс смешения близких по энергии орбиталей атома углерода, с возникновением того же числа новых гибридных орбиталей, имеющих одинаковую энергию и форму. Другими словами, гибридизация атомных орбиталей получается при возникновении ковалентной связи между атомами пленки. Буквы s и p обозначают орбитали, на которых находятся электроны. В типах кристаллической решетки алмаза или графита электроны атомов углерода находятся в так называемых "гибридных состояниях" sp^3 и sp^2 соответственно. Sp^2 - гибридизация соответствует кристаллической решетке графита, каждый атом углерода, таким образом, соединен с тремя другими атомами. Кристаллическая решетка алмаза имеет sp^3 -гибридизацию, в котором каждый атом углерода соединен с четырьмя соседними атомами.[14]

Эти гибридизации имеют место не только в кристаллических решетках твердых тел с определенным расположением атомов, но и в кристаллических решетках аморфных твердых телах, в которых атомы расположены в случайном порядке. Гибридизация тогда существуют только между несколькими атомами, а не во всем множестве атомов. Типы связей оказывают значительное влияние на свойства аморфных углеродных покрытий. Преобладание в кристаллической решетке sp^2 -связей делает покрытие мягче и наоборот, преобладание sp^3 -связей придает покрытию более твердую структуру.

Типы кристаллических решеток можно определить с помощью методов спектроскопии комбинационного рассеяния света, так же можно оценить соотношение sp^2 - и sp^3 - гибридизаций в кристаллических и аморфных углеродных покрытиях.

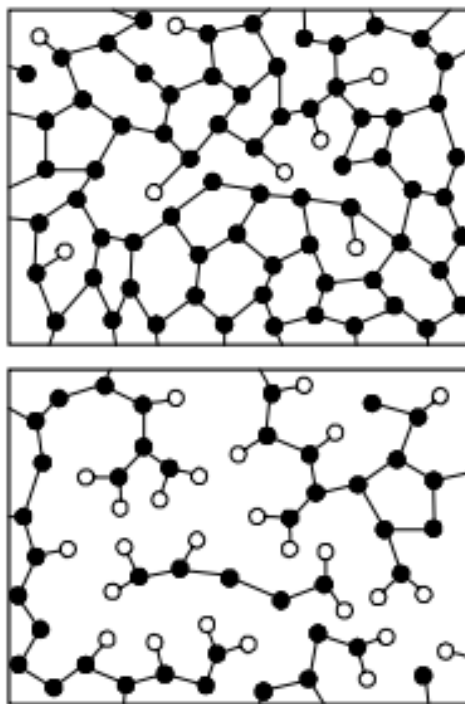


Рисунок 3. Содержание водорода в водородосодержащих углеродных покрытиях[15]

Черные - атомы углерода

Белые – атомы водорода

Верхнее изображение: от 15 до 25%, твердый слой

Нижнее изображение: от 30 до 50%, мягкий слой

На рисунке 3 схематически представлены кристаллические типы двух разных аморфных водородсодержащих углеродных покрытий. Очевидно, что с увеличением содержания водорода в структуре покрытия, уменьшается количество связей углерод-углерод. Это приводит к ослаблению жесткости покрытия, пленка становится мягкой. От количества содержания водорода в структуре покрытия зависят такие свойства, как твердость, ширина запрещенной зоны, плотность и др.

Интерес к углеродным пленкам возник благодаря универсальности свойств углерода, которые зависят от гибридизации атомных орбиталей. Как уже говорилось выше, атом углерода имеет четыре валентных электрона, что позволяет образовывать различные гибридизованные состояния: sp^1 , sp^2 и sp^3 .

В зависимости от содержания sp^3 гибризированных атомов в структуре углеродной пленки, концентрации водорода и наличия легирующих примесей, их можно классифицировать следующим образом: алмазоподобный (DLC), тетраэдральный (ta-C), полимероподобный (PAC), графитоподобный (GAC), гидрогенизированный (a-C:H), тетраэдральный гидрогенизированный аморфный углерод (ta-C:H).

1.1.1 Алмазоподобный аморфный углерод

Согласно литературным данным первые пленки DLC были созданы Айзенбергом и Чаботом в 1971 г. [16]. Эти пленки были получены из потока ускоренных ионов углерода в плазме аргона при комнатной температуре подложки. Концентрация sp^3 гибризированных атомов углерода в покрытии составляет ~40-60%, концентрация водорода ~20-40%, твердость 15-25 ГПа и ширина оптической зоны 0,8-4,0 эВ [17, 18]. На сегодняшний день одним из основных методов получения DLC, является магнетронное распыление, зарекомендовавшие себя с наилучшей стороны [19-21].

Углерод в аморфной форме представляет из себя материал, оптические, электрические и механические свойства которого возможно изменять в широких диапазонах во время его формирования, что предоставляет возможность применения этих покрытий в разнообразных устройствах, механизмах и инструментах.

1.1.2 Графитоподобный аморфный углерод

Как правило, GAC пленки обладают низкой шириной запрещенной зоны 0-0,6 эВ, очень низким содержанием sp^3 гибризированных атомов углерода 0-30%, но высоким содержанием sp^2 типов гибридизации и, как и пленки полимероподобного углерода, имеют мягкую структуру [17]. Одна из первых работ по исследованию структуры и свойств таких пленок была опубликована в 1976 г. [22].

1.1.3 Тетраэдральный аморфный углерод

Тетраэдральный углерод обладает наивысшей твердостью из семейства пленок аморфного углерода. Первые работы по осаждению ta-C относятся к

1978 г. В этом году посредством источника фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы были получены первые пленки тетраэдрального углерода [23]. Концентрация sp^3 гибридизированных атомов углерода в покрытии составляет ~60-85%, концентрация водорода ~0-30%, твердость 40-65 ГПа и ширина оптической зоны 1,6-2,6 эВ [17]. Наиболее используемыми методами осаждения *ta-C* пленок является метод лазерного напыления [24, 25], распыление [26, 27] и ионные пучки [28, 29].

1.1.4 Полимероподобный аморфный углерод

Пленки полимероподобного аморфного углерода имеют мягкую структуру из-за большого количества водорода. Одна из первых работ по получению РАС пленок была опубликована в 1989 г. [30]. Для таких пленок концентрация sp^3 гибридизированных атомов углерода в покрытии составляет ~60-80%, концентрация водорода ~40-65%, твердость 1-5 ГПа и ширина оптической зоны 2-5 эВ [17]. Для получения таких пленок используют углеродсодержащие прекурсоры (бензол, циклогексан, н-гексан, пентан). Несмотря на высокое содержание sp^3 типа гибридизации, пленки являются мягкими за счет наличия высокой доли водорода, который не способен связать атомы углерода в пленке.

1.1.5 Тетраэдральный гидрогенизированный аморфный углерод

Пленки тетраэдрального гидрогенизированного углерода осаждаются из плазмы высокой концентрации, например источника плазменного пучка [33] или плазмы электрон-циклотронного резонанса [34]. Содержание водорода в пленках больше, чем в *a-C:H*. Совокупность большого содержания sp^3 гибридизированных атомов углерода (~75%) и низкое содержание водорода (чем в *a-C:H* пленках) способствует тому, что существует больше С-С связей с sp^3 типом гибридизации атомов углерода, по сравнению с *a-C:H* [17].

1.1.6 Гидрогенизированный аморфный углерод

Алмазоподобный аморфный углерод содержащий высокую долю водорода называется гидрогенизированным. Первая работа по получению

таких пленок была проведена в 1976 г. с использованием высокочастотного плазмохимического осаждением из паровой фазы [31]. Эти пленки показали интересные механические и оптические характеристики. Как показали исследования, свойства пленок зависят от энергии падающего иона приходящейся на один атом углерода [32]. Синтезирование пленок происходит с использованием газовых смесей – метана, ацетилен и бензола. Концентрация sp^3 гибридных атомов углерода в покрытии составляет ~20-60%, концентрация водорода ~30-60% и ширина оптической зоны 1,8-4 эВ [17].

1.1.7 Гидрогенизированный аморфный углерод легированный оксидом кремния (a-C:H:SiO_x)

Кремний-углеродные пленки - это покрытия, которые применяются в качестве твердых смазочных материалов для промышленного назначения, благодаря повышенной стабильности в экстремальных условиях окружающей среды, по сравнению с аморфным гидрогенизированным углеродом.

Твердость кремний-углеродных пленок в работе [5] составила 20 ГПа при минимальном коэффициенте трения 0.16 и степени износа $1.3 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3 \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Кремний-углеродные пленки обладают хорошими механическими свойствами не только из-за большого содержания алмазоподобной структуры, но также из-за лучшего взаимодействия (когезии) между атомами покрытия и низкими внутренними сжимающими напряжениями.

1.2 Методы осаждения кремний-углеродных пленок

Осаждение углеродных покрытий всегда основывалось на методах, связанных с вакуумом, другими словами, нанесение углеродных покрытий происходит при давлении газа ниже атмосферного. В газовой фазе образуются покрытия из отдельных атомов, молекул или соответствующих кристаллов. Наиболее популярным методом формирования кремний-углеродных пленок является метод плазмохимического осаждения и

различные его модификации. Самые распространенные из них: плазмохимическое осаждение на постоянном токе (DC PACVD) [11, 12], высокочастотное плазмохимическое осаждение (RF PACVD) [13, 14], комбинированный метод плазмохимического и физического осаждения (PACVD/PVD) [15].

1.2.1 Плазмохимический метод осаждения на постоянном токе

В зарубежных источниках данный метод называется plasma-assisted chemical vapor deposition (PA CVD). В процессе PACVD пленки на подложке формируются в ходе химических реакций, которые активируются электрическим разрядом в газовой фазе. Важной особенностью формирования качественных пленок данным методом является точность контроля скорости газовых потоков и интенсивности испарения прекурсоров [15].

Одним из основных преимуществ настоящего метода является то, что при формировании пленок, температуры подложек не превышают 300 °С. Также, использование настоящего метода позволяет достичь лучшей покрывающей способности и адгезии, процесс формирования пленок легче контролируется. Вместо тепловой энергии газы реагенты активируются быстрыми электронами.

Также, основное преимущество процесса PACVD заключается в достижении более высоких скоростей формирования пленок, по сравнению с обычным (термическим) CVD процессом осаждения. Настоящее преимущество предоставляет большие возможности в выборе различных технологических параметров, но тем не менее, контролировать настоящий процесс оказывается труднее.

Основными недостатками данного процесса PACVD является то, что получение чистых материалов этим методом практически невозможно (за исключением полимеров). Это связано с тем, что почти все недесорбируемые газы удерживаются осаждаемым покрытием. Так же, еще одним недостатком является сильное взаимодействие плазмы с формируемым покрытием.

Высокая скорость осаждения требует более тщательной отладки рабочего процесса. [9]

В работе [10] Randeniya, L.; Bendavid, A. и др. получали кремний-углеродные пленки плазмохимическим методом осаждения с постоянным током. За основу рабочего газа выступала смесь аргона Ar и водорода H₂. В качестве прекурсора была использована смесь метана (CH₄) и тетраметилсилана Si(CH₃)₄. Пленки формировались на подложках монокристаллического кремния и имели толщину в 1,5 мкм.

В данной работе было исследовано влияние значения расхода $\frac{\text{Si(CH}_3)_4}{\text{Si(CH}_3)_4 + \text{CH}_4}$ (%) на структуру и механические свойства получаемых пленок. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства кремний-углеродных пленок при различном расходе рабочего прекурсора Si(CH₃)₄

№	$\frac{\text{Si(CH}_3)_4}{\text{Si(CH}_3)_4 + \text{CH}_4}$	sp ³ связи, %	H, ГПа	σ, ГПа
1	0	30	14	1,53
2	4	36	12,4	1,1
3	9	47	12,2	1,05
4	13	55	12.1	1
5	17	-	12	<1

где H – твердость пленки, σ – внутренние напряжения.

С увеличением расхода тетраметилсилана Si(CH₃)₄ механические свойства пленок становятся лучше, за исключением твердости. Увеличение скорости формирования пленок объясняются более низким ионизационным потенциалом Si(CH₃)₄ в сравнении с более высоким ионизационным потенциалом CH₄ в плазме. В данной статье авторы представили линейную зависимость доли sp³ от содержания кремния в пленке. Рост доли sp³-гибридизированного углерода можно объяснить тем, что при повышении напуска Si(CH₃)₄ повышается концентрация водорода в пленках, что приводит к полимерному образованию sp³ C-H связей, которые, в свою очередь, меняют соединительные ограничения sp³-гибридизированного

углерода. Твердость получаемых пленок зависит от количества sp^3 связей углерода в покрытии. Тем не менее, в данной работе ухудшение твердости пленок объясняется тем, что повышенная концентрация водорода ведет к образованию полимерных sp^3 C-H связей, ограничивающих sp^3 связи углерода, и в результате, так же уменьшаются и внутренние напряжения в пленке. Также уменьшение внутренних напряжений можно объяснить формированием более длинных связей Si-C по сравнению с C-C.

В работе [11] Randeniya, L.; Bendavid, A. и др. представили анализ механических характеристик пленок $a-C:H:SiO_x$, сформированных плазмохимическим методом. Результаты проведенной работы представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость твердости кремний-углеродных пленок от параметров осаждения

Содержание Si, ат.%	H, ГПа
5	17,00
9	12,00
13	11,80
17	9,00
22	10,00

Из результатов работы видно, что с ростом концентрации Si происходит снижение твердости. Это объясняется уменьшением межатомных связей типа C-C. В пленках SiO_x присутствует в виде цепных силоксанов и циклосилоксанов, которые связаны с алмазоподобной углеродной сетью посредством связей O-Si-C₂. Для 13% < Si, $a-C:H:SiO_x$ образуется в виде одной фазы с силоксаном через O-Si-C₂ связи. Для пленок с Si>13%, силоксановые связи DLC-сетей и SiO_x -осадок образуются одновременно в виде сегрегированных фаз.

1.2.2 Метод высокочастотного плазмохимического осаждения

В зарубежных источниках данный метод обозначается аббревиатурой RF (radio frequency) PA CVD. Основным параметром высокочастотного (ВЧ) генерирования разряда с полым катодом является частотно-модулированное постоянное напряжение V_S (самосмещение) в слое пространственного разряда у высокочастотного электрода на значении частоты 13,56 МГц. Высокочастотная плазма представляет собой виртуальный анод, в то время, когда слой пространственного заряда представляет собой область катодного падения в разряде с постоянным током. В системе с высокочастотным полым катодом подложки находятся в пространственном заряде, который провоцирует ионную бомбардировку покрытия в процессе ее формирования. На сегодняшний день высокочастотный тлеющий разряд часто применяется в промышленности, но проблема формирования пленок на подложки с большой площадью и высокой однородностью толщины остается актуальна[20].

В работе [12] Neha Sharma, N.Kumar и др. для получения кремний-углеродных пленок использовался метод высокочастотного плазмохимического осаждения. Рабочим газом авторы данной работы использовали инертный газ аргон. В качестве рабочего прекурсора была использована смесь метана (CH_4) и гексаметилдисилоксана ($C_6H_{18}OSi_2$). Пленки формировались на подложках из нержавеющей стали 316 (с повышенным содержанием хрома).

Результаты, полученные в настоящей работе представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства кремний-углеродных пленок при различных напряжениях смещения

№	U_s, V	I_D/I_G	$H, ГПа$	μ
1	-25	0,45	3,8	~ 0,2
2	-100	0,1	5	< 0,05
3	-175	0,08	7,5	0,1
4	-225	0,06	12	0,15

где H – это твердость покрытия, а μ – коэффициент трения

Рост процентного содержания sp^3 связей можно объяснить тем, что при повышении напряжения смещения растет концентрация водорода, который в свою очередь приводит к образованию полимерных sp^3 соединений C-H. Твердость пленок улучшается благодаря интенсивной ионной бомбардировке растущего покрытия, что в свою очередь приводит к уплотнению и упорядочиванию поверхности пленки. При напряжении смещения -100В поверхность пленок получается очень гладкой (низкий коэффициент трения). Такой результат можно объяснить образованием t-aC с a-C и sp^2 -гибридизированным углеродом. t-aC обеспечивает низкие поверхностные напряжения, а a-C и sp^2 -гибридизированный углерод способствует легкому скольжению на поверхности пленки. При уменьшении процентного содержания sp^3 -гибридизированного углерода коэффициент трения увеличивается. Тем не менее, в случае повышения процентного содержания sp^3 -углерода коэффициент трения увеличивается. Также низкий коэффициент трения можно объяснить наличием SiO-(H) и SiO₂, формирующие граничную смазку.

Авторы работы [13] Batory D., Jedrzejczak A. и др. дали подробное описание влияния параметров осаждения на физические и трибологические свойства a-C:H:SiO_x пленок, сформированных высокочастотным плазмохимическим методом. Результаты настоящей работы представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики a-C:H:SiO_x покрытий

Us, В	H, ГПа	sp^2 , (%)	sp^3 , (%)
200	13,84	64,1	17,4
400	18,34	69,8	18,9
600	16,47	65,2	26,0
800	13,94	67,10	22,70

С увеличением разности потенциалов между катодом и подложкой (Us) наблюдается нелинейная зависимость твердости получаемых пленок. Кислородсодержащая плазма, особенно при высоких отрицательных

напряжения смещения, может участвовать в поверхностном травлении sp^2 гибридного углерода. Это может отразиться на увеличении содержания sp^3 гибридного углерода и в то же время может быть причиной отсутствия осадков SiO_x , которые при высоких отрицательных потенциалах смещения могут быть просто вытравлены.

Разнообразие свойств покрытий a-C:H:SiO_x, формируемых в широком диапазоне параметров процесса, позволяет создавать структуру, фазовый и химический состав изготовленных пленок по широкому спектру применения.

1.2.3 Плазмохимический метод с использованием импульсного биполярного электропитания

В настоящей работе для формирования кремний-углеродных пленок был использован метод несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом.

Несамостоятельный дуговой разряд с накальным катодом является одним из типов дугового разряда. В данном методе для генерации электронов применяется термоэлектронная эмиссия. Для этого необходимо искусственно разогреть катод вспомогательным устройством. Сгенерированные электроны обеспечивают возникновение и поддержание горения разряда. Почти все напряжение между его электродами находится вблизи катода, а остальное пространство вакуумной камеры заполняется однородной плазмой, имеющей отрицательный потенциал (анод). Сгенерированные накаленным катодом электроны имеют практически одинаковые скорости и ионизуют газ, формируя плазму, которая в свою очередь заполняет остальной объем вакуумной камеры. Ионизация осуществляется прямыми и ступенчатыми ударами. Настоящий метод позволяет формировать однородную газоразрядную плазму высокой плотности в объеме до нескольких кубических метров.

Данный метод осаждения пленок заключается в формировании кремнийуглеродсодержащей плазмы с использованием смеси паров

полифенилметилсилоксанового (ПФМС) прекурсора и рабочего газа - аргона. Ионизация аргона осуществляется за счет термоэлектронной эмиссии с накаливаемого катода. Благодаря напряжению смещения, прикладываемому на подложкодержатель, формируется пленка, содержащая решетку гидрогенизированного аморфного углерода ($a\text{-C:H}$), стабилизированного водородом и решетку кремния, стабилизированного кислородом (Si:O).

Вывод к разделу

Из проведенного анализа литературы видно, что наиболее популярным методом формирования кремний-углеродных пленок является плазмохимическое осаждение и различные его модификации, такие как: плазмохимическое осаждение на постоянном токе (DC PACVD), высокочастотное плазмохимическое осаждение (RF PACVD), комбинированный метод плазмохимического и физического осаждения (PACVD/PVD).

К недостаткам плазмохимического процесса синтеза пленок можно отнести то, что получение покрытий чистых материалов этим методом невозможно, потому что почти все недесорбируемые газы удерживаются осаждаемым покрытием. Также недостаток плазмохимического метода – это взаимодействие плазмы с формируемой пленкой.

Применение высокочастотного напряжения смещения обусловлено ростом диэлектрической $a\text{-C:H:SiO}_x$ пленки и возможной «потерей» анода. Недостатком использования высокочастотного оборудования является высокая стоимость, сложность согласования нагрузки и питания, невозможность использования в промышленном производстве.

Кремний-углеродные пленки, получаемые плазмохимическим методом с использованием импульсного биполярного электропитания, обладают хорошими характеристиками за счет некоторых особенностей используемого метода: постоянная ионная бомбардировка растущей пленки,

стимулирующая различные процессы на осаждаемой поверхности. Использование импульсного биполярного электропитания позволяет избежать недостатки использования ВЧ смещения и легко масштабируется. Совокупность особенностей данного метода позволяет формировать пленки, способные не уступать свойствам аналогичных материалов, сформированных другими способами, а в некоторых случаях даже превосходить их.

2. Экспериментальное и аналитическое оборудование

2.1 Экспериментальная (вакуумная) установка

Для проведения экспериментальных исследований и технологических процессов была использована вакуумная камера, размеры которой составляют $600 \times 600 \times 600$ мм, основанная на турбомолекулярном насосе ТМН-1500. В настоящей работе, формирование $a\text{-C:H:SiO}_x$ пленок производилось из плазмы несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом. Для этих целей вакуумная камера была оснащена плазмотроном с накальным катодом.

Вакуумная система (Рисунок 4) обеспечивает откачку газа из рабочей камеры.

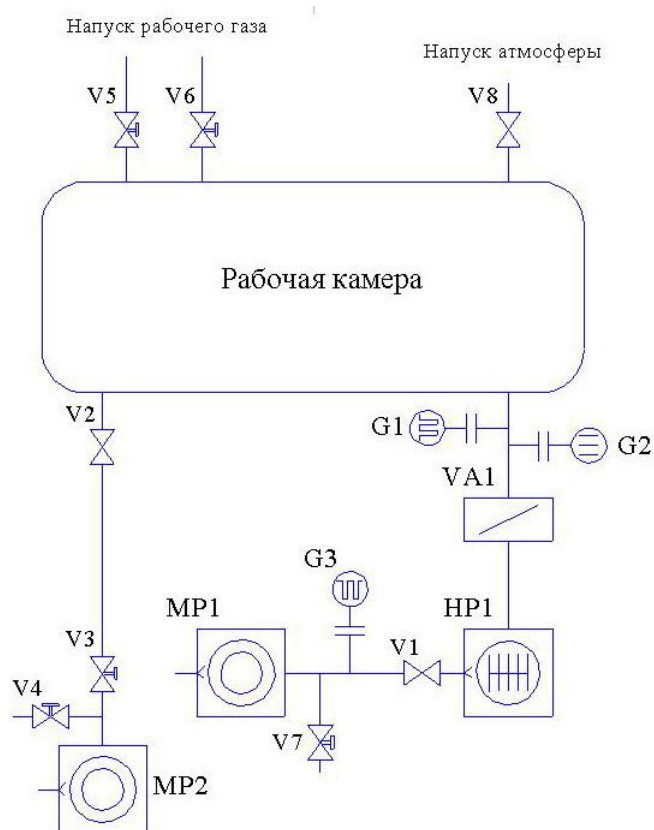


Рисунок 4. Вакуумная система

На данной установке осуществляется двухступенчатая система откачки. Из камеры, в форвакуумном диапазоне давления, ведется откачка турбомолекулярным насосом ТМН-1500 (HP1); с выхода ТМНа газ откачивается пластинчато-роторным насосом HE-200 (MP1). Перед тем, как

запустить высоковакуумную откачку ТМНом, в вакуумной камере формируется предварительный вакуум насосом золотникового типа АВЗ-180 (MP2).

Измерение давления производится вакуумметром ВИТ-3 термодатчиками (G1, G3) датчиками ПМТ-2 и ионизационным ПМИ-10-2 (G2) в соответствующих магистралях вакуумной системы.

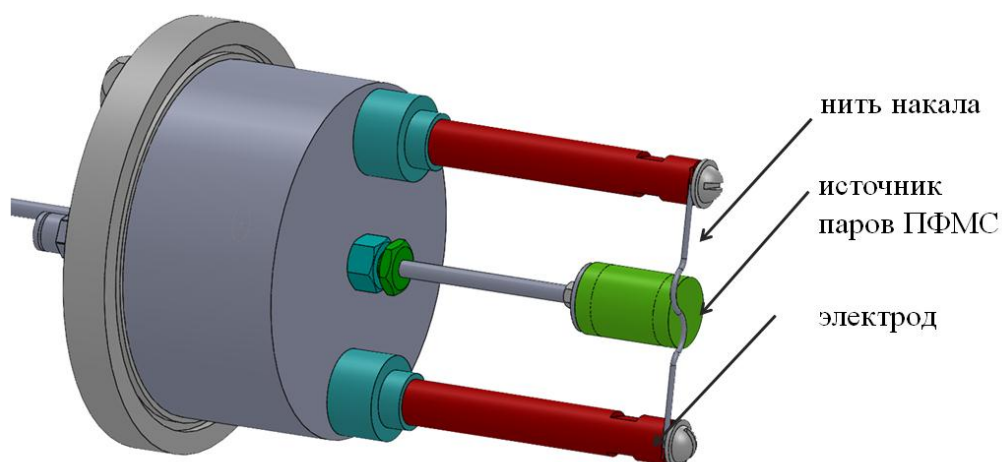


Рисунок 5. Общий вид плазмотрона

Плазмогенератор, основанный на несамостоятельном дуговом разряде с накальным катодом, фиксируется на боковом фланце вакуумной камеры. Вольфрамовая проволока длиной 12 мм и диаметром 1 мм используется в качестве накального катода. Рабочий газ - аргон, давление которого составляет 0,1-0,3 Па. Рабочим прекурсором была использована кремнийорганическая жидкость – полифенилметилсилоксан (ПФМС). Напряжение 10В от источника питания накала подводится к электродам для нагрева вольфрамовой проволоки. Ток вольфрамовой проволоки составляет около 42 А. Напряжение 100 – 170 В, прикладываемое между камерой и одним из электродов необходимо для поддержания разряда. Ток разряда составляет около 6 – 10 А. Стенки вакуумной камеры имеют отрицательный потенциал и служат анодом. Основным источником электронов для ионизации газа является термоэлектронная эмиссия, для этих целей катод искусственно разогревается от вспомогательного устройства. Источник

паровой фазы полифенилметилсилоксана (ПФМС) нагревается до температуры порядка 400-700 °С за счёт косвенного излучения вольфрамового катода. При достижении рабочей температуры в источник паровой фазы непрерывно подается ПФМС, где происходит его переход из жидкой в паровую фазу и на выходе формируется направленный поток паров ПФМС, состоящий из длинных атомных цепочек, подвергающихся распаду на атомы и радикалы из которых формируется покрытие на подложке.

В настоящей работе использовались следующие источники электропитания: источник питания для поддержания разряда с выходным током 8 А и мощностью 5 кВт, источник питания накала с выходным током 150 А, биполярный источник питания смещения подложки для реализации высокоэнергетической ионной бомбардировки поверхности растущей пленки с выходным током 1,5 А и мощностью 1,5 кВт.

2.2 Методы аналитического исследования КУП

2.2.1 Измерение адгезионной прочности

Одними из распространённых методов количественного исследования величины адгезионной прочности являются методы вдавливания различными инденторами, прямого отрыва плёнки от подложки, а также метод склерометрии (царапанья) [36]. При изучении адгезионной прочности методом склерометрии происходит прорыв плёнки до чистой подложки и ее отслоения. Для количественного изучения адгезии необходимо точное измерение величины критической нагрузки, приводящей к отслоению покрытия. В основе этого метода лежит теория о том, что сцепление с подложкой обеспечивает слой покрытия, непосредственно прилегающий к ней.

Анализ адгезионной прочности проводился на установке Nano-Scratch Tester (NST) компании CSEM Instrument. Установка представлена на рисунке 6. Данный прибор имеет автоматизированный привод, встроенный оптический микроскоп и позволяет изучить силу сопротивления царапанию,

глубину процарапанной полосы, твердость, модуль упругости. Царапанье пленки осуществляется алмазным индентором при однократном и многократных проходах.



Рисунок 6. Установка для анализа адгезионной прочности NST компании CSEM Instrument.

После установки экспериментального образца на подвижный подложкодержатель динамометром определяется необходимое значение вертикальной нагрузки на алмазную иглу. В процессе движения подложкодержателя происходит сцарапывание покрытия. Ширина царапины измеряется с помощью встроенного оптического микроскопа. Царапающим острием используется алмазный индентор с радиусом закругления острия ~ 100 мкм. Определение адгезионных свойств покрытий проводилось при нагрузках на индентор от 0,01 до 22 Н и скорости перемещения индентора 10 мм/мин.

2.2.2 Измерение твердости

Для количественного определения твердости была использована методика Оливера-Фарра с использованием наноиндентора NanoTest 600 (MicroMaterials, Великобритания).

Согласно данной методике наконечник индентора (в нашем случае это наконечник Берковича, представляющий собой пирамиду на треугольном основании) располагался перпендикулярно к поверхности исследуемого образца. На индентор подавалась возрастающая (до заранее заданной величины 20 мН) нагрузка, под действием которой наконечник индентора вдавливался в образец. Такое вдавливающее воздействие с максимальной нагрузкой выдерживалось строго определённое время, а затем постепенно сила вдавливания снижалась. В результате происходила так называемая упруго-пластическая деформация, при которой поверхность материала под индентором частично возвращалась в исходное состояние.

Прибор имеет автоматизированный привод, встроенный оптический микроскоп с увеличением до 1000 раз и позволяет оценить глубину продавленной поверхности, твердость, модуль упругости.

По результатам проведенных испытаний образца исследуется площадь проекции получаемого отпечатка и исходя из соотношения этой площади и приложенной на максимуме нагрузки как раз и определяется искомая твердость.

2.2.3 Исследование ИК-Фурье спектроскопии

ИК-Фурье спектрометр - это модифицированный дополнительными приборами, в частности подвижным зеркалом и другими сервисными функциями интерферометр Майкельсона.

Свет от источника (рисунок 7 - 1) или белый свет от источника, пропускающийся через образец диссоциируется на два когерентных пучка с помощью полупрозрачного плоскопараллельного зеркала – светоделителя (рисунок 7 - 2). Первый пучок направлен к неподвижному плоскому зеркалу (рисунок 7 - 3) и отражается от него на светоделитель, второй пучок идет к плоскому подвижному зеркалу (рисунок 7 - 4), которое позволяет менять разность хода лучей, и также возвращается, на светоделителе они соединяются. Два данных когерентных пучка интерферируют между собой, в

результате они могут либо усиливать, либо ослаблять друг друга в зависимости от разности хода между ними. Степень ослабления или усиления интенсивности для различных длин волн зависит от разности хода лучей в пучках.

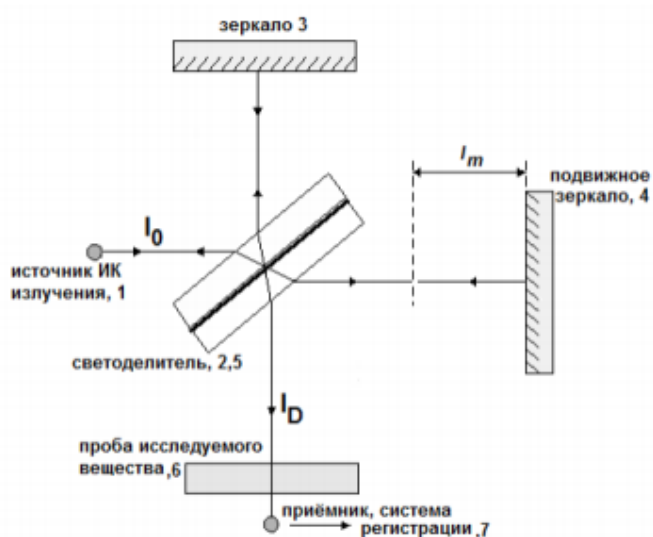


Рисунок 7. Схема интерферометра Майкельсона

2.2.4 Исследование морфологии поверхности методом АСМ

При изучении морфологии поверхности пленок в основном используется атомно-силовая микроскопия. За основу методики АСМ взяты Ван-дерВаальсовы взаимодействия. Такие взаимодействия осуществляются между зондом и поверхностью пленки. На рисунке 8 представлена схема кантилевера атомно-силовой микроскопии, с помощью которого происходит изучение поверхности покрытия. В настоящем методе изучения морфологии регистрируется значение отклонения консоли, которое возникает под действием силы, направленной со стороны пленки на зонд.

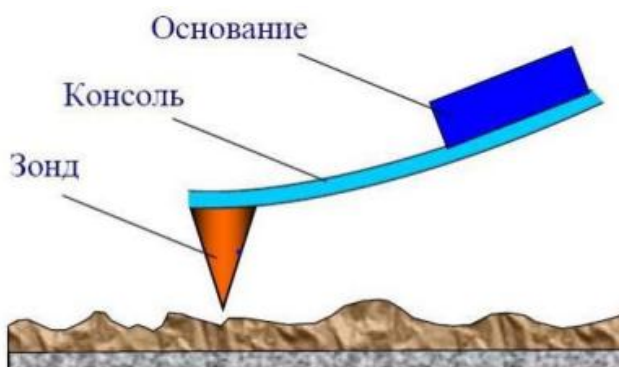


Рисунок 8. Изображение зондового датчика

Установка может работать в двух режимах – бесконтактный и полуконтактный. В бесконтактном режиме (режиме притяжения) консоль с помощью пьезокристалла отклоняется над исследуемой пленкой с амплитудой ~ 2 нм, которая в свою очередь превышает расстояние между зондом и образцом. По разности амплитуды или сдвигу резонансной частоты колебаний в процессе исследования пленки определяется сила притяжения и формируется изображение поверхности. Полуконтактный режим аналогичен бесконтактному режиму с тем отличием, что игла консоли в нижней точке своих колебаний слегка касается поверхности образца.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. Через такую оценку ученый может найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов такого исследования и открытия бизнеса.

Целью данной главы является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определённый товар или услуга.

Получение алмазоподобных углеродных покрытий позволяют повысить срок службы промышленных механизмов, медицинский инструментов, отдельных деталей машин в несколько раз. Возможность легирования таких покрытий атомами различных металлов позволяет менять свойства покрытий в широком диапазоне.

Потенциальными потребителями готовой продукции являются различные промышленные предприятия, медицинская отрасль, космонавтика, кораблестроение и др.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 7. В качестве конкурирующих покрытий были приняты: твердые пленки нитрида титана – К1 и кремний-углеродные пленки – К2. Данные конкурирующие покрытия так же могут использоваться как барьерные слои на термоэлектрических модулях.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 7, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Выбранные критерии оценки конкурентоспособности покрытий были обоснованы ранее в разделе литературного обзора.

Таблица 7 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вес оценки	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Антидиффузионные свойства покрытий	0.11	4	4	3	0.44	0.44	0.44
2. Простота в получении покрытий	0.07	5	5	5	0.35	0.35	0.35
3. Адгезионная прочность пленок	0.1	5	4	3	0.5	0.4	0.3
4. Устойчивость к износу	0.11	5	4	4	0.55	0.44	0.44
5. Безопасность в получении пленок	0.09	5	5	5	0.45	0.45	0.45
6. Простота в эксплуатации	0.08	5	5	5	0.4	0.4	0.4
7. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.12	5	4	5	0.6	0.48	0.6
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность покрытий	0.05	4	4	4	0.2	0.2	0.2
2. Цена покрытий	0.08	4	4	4	0.32	0.32	0.32
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0.07	5	5	4	0.35	0.35	0.28
4. Область использования покрытий	0.04	5	5	5	0.2	0.2	0.2
5. Затраты на получение пленки	0.05	3	4	4	0.15	0.2	0.2
6. Срок выхода на рынок	0.03	3	5	5	0.09	0.15	0.15
Итого	1				4.6	4.38	4.33

По результатам, представленным в оценочной карте, можно сделать следующий вывод – предлагаемые кремний-углеродные пленки являются перспективным конкурентом на рынке износостойких покрытий. Итоговый

критерий конкурентоспособности (4,6) является самым высоким из всех рассмотренных аналогов.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, является заметное преимущество углеродных покрытий на фоне конкурентной продукции. Преимущества имеются как в технических критериях оценки, так и в экономических. На самом деле, углеродные покрытия имеют большой интерес в области технических наук и поэтому данной разработке необходимо уделять больше внимания.

4.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Сильными сторонами разработки методики можно назвать следующие свойства и особенности:

- Высокое качество готового продукта;
- Эффективность технологии;
- Более простой метод получения покрытий по сравнению с другими;
- Квалифицированный персонал;
- Наличие бюджетного финансирования.

Слабыми сторонами данной разработки можно назвать следующие свойства и особенности:

- Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой;
- Сильные конкуренты, уже присутствующие на рынке;
- Отсутствие компании, которая может поставить производство в больших количествах;

- Недостаток финансовых средств;
- Слабая маркетинговая политика.

К возможностям данной разработки методики можно отнести:

- Модернизация материалов хоз.товаров, повышение срока службы материалов;
- Из-за низкой стоимости и высокой эффективности данная технология модернизирования может стать передовой;
- Снижение стоимости материала.

К угрозам можно отнести:

- Отсутствие спроса на новые технологии производства;
- Развитие альтернативных технологий и аналогов оборудования;
- Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.

В таблице 8 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	0	-	0	-
	B2	+	+	+	-	-
	B3	+	+	+	-	-
Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	+	+	+	0	-
	У2	+	0	0	-	-
	У3	0	+	-	-	+
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5

	B1	+	-	+	0	+
	B2	+	0	+	0	-
	B3	-	-	-	+	-
Слабые стороны проекта						
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
Угрозы проекта	B1	+	+	+	-	+
	B2	+	0	0	-	+
	B3	-	-	-	+	-

Подобные матрицы были построены для анализа сильных сторон и угроз проекта, для анализа слабых сторон и возможностей проекта, а также для анализа слабых сторон и угроз проекта.

В таблице 9 представлен SWOT-анализ, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 9 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Широкий диапазон использования КУП; С2. Использование биполярного напряжения смещения; С3. Более простой метод получения покрытий по сравнению с другими; С4. Наличие нитридных связей в пленках;</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие полного спектра аналитического оборудования; Сл2. Производство КУП в больших объемах; Сл3. Уменьшение sp^3-гибридизации углерода; Сл4. Недостаток финансовых средств</p>
<p>Возможности: В1. повышение срока службы производственных материалов/инструментов; В2. Из-за низкой стоимости и высокой эффективности данная технология модернизирования может стать передовой; В3. Снижение стоимости материала.</p>	<p>1. Улучшение характеристик инструмента с использованием покрытия при малых финансовых затратах. 2. Повышения срока службы материалов, а также придание им дополнительных уникальных свойств при низкой стоимости и эффективности технологии модернизации являются основополагающими для продвижения продукции и повышении его качества.</p>	<p>1. Придание материалам уникальных свойств. 2. Низкая стоимость и высокая эффективность технологии позволит привлечь к себе большое внимание потенциальных потребителей и, тем самым, «перетянуть» их к себе от существующих конкурентов.</p>
<p>Угрозы: У1. Использование традиционных методов</p>	<p>1. Изготовленный продукт, имеет основополагающие сильные стороны, для</p>	<p>1. Устранение слабой маркетинговой политики поможет решить проблему с</p>

упрочнения инструментов; У2 Развитие альтернативных технологий и аналогов оборудования; У3. Трудности с проведением аналитических исследований КУП;	предотвращения угроз. 2. Высокое качество готового продукта, квалифицированный персонал и эффективность технологии позволит создать и постоянно поддерживать спрос на технологию. 3. Эффективность технологии и опытный персонал позволят вести разработки в целях улучшения продукта, что предотвратит развитие альтернативных технологий.	поиском потребителей. 2. Повышение технологического пакета данной разработки способствует решить проблему с поиском потребителей и созданием альтернативных технологий. 3. Привлечение финансовых средств позволит модернизировать и усовершенствовать методику получения и контроля покрытий.
---	--	---

Проанализировав характер научно-технической работы можно сделать вывод, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Эта стратегия выбрана, так как необходимо найти стабильный рынок заказов и сбыта товара.

Данные покрытия находятся в стадии разработки и технических исследований. SWOT – анализ показал, что данные покрытия имеют ряд преимуществ и недостатков, которые на данный момент ни как не устранены практически, но в теории уже есть возможности устранения этих проблем. Так же имеются очень хорошие возможности и сильные стороны проекта, которые в дальнейшем могут быть реализованы и в процессии реализации все негативные стороны проекта будут сведены к минимуму.

4.1.4 Планирование научно-исследовательских работ

4.1.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого

участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информацию представлена в табличной форме (табл. 10)

Таблица 10 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, час.
	Гренадёрв Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий".	Руководитель проекта	Координирует деятельность участников проекта	198
	Елгин Юрий Игоревич, Инженерная школа ядерных технологий, магистрант	Исполнитель по проекту	Выполняет отдельные работы по проекту	498
ИТОГО:				696

4.1.4.2 Планирование управления научно-техническим проектом

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 11 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	400000
3.1.1. Источник финансирования	РНФ
3.2. Сроки проекта:	01.02.2019-01.06.2019
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.02.2019
3.2.2. Дата завершения проекта	01.06.2019
3.3. Прочие ограничения и допущения*	Ограничение по времени до защиты магистерской диссертации

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

4.1.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Линейный график представляется в виде таблицы (табл. 12).

Таблица 12 – Календарный план проекта

Номер работы	Название	Длительность, раб.	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Составление технического задания	2	01.02.19	02.02.19	Р
2	Подбор и изучение литературы	17	03.02.19	21.02.19	М
3	Календарное планирование работ по теме	5, 6	22.02.19	27.02.19	М, Р
4	Проведение теоретических расчетов и обоснований	4	28.02.19	5.03.19	Р
5	Выбор оптимальных параметров для проведения экспериментов	5	6.03.19	11.03.19	Р
6	Разработка методик для проведения формирования КУП	5	12.03.19	17.03.19	М
7	Оценка правильности полученных результатов	18, 2	18.03.19	07.04.19	М, Р
8	Построение зависимостей для различных методик анализа	20, 8	8.04.19	07.05.19	М, Р

	полученных КУП				
9	Анализ полученных результатов	18,6	08.05.19	31.06.19	М, Р
Итого		95			

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 13 — Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код работ	Вид работ	Исполнители	Тк, кал, дн.	Продолжительность выполнения работ																	
				февраль				март				апрель				май					
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
1	Составление технического задания	Р	2	■																	
2	Подбор и изучение литературы	М	19	▨	▨	▨	▨	▨													
3	Календарное планирование работ по теме	М, Р	5,7				■	▨													
4	Проведение теоретических расчетов и обоснований	М	7					▨													
5	Выбор оптимальных параметров для проведения экспериментов	М	7							▨											
6	Разработка методик для проведения формирования КУП	М	7								▨										

4.2.1 Расчет материальных затрат НИИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле (4.5):

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи},$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования; $N_{расхи}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.); C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.); k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы. Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – студент.

Основные работы для ВКР проводились на установке Булат 6. Время, проведенное работой на установке, прием равным 90 часам. Мощность установки: 9 кВт. Работа на ноутбуке велась примерно 300 часов. Мощность ноутбука: 0,8 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 5,8 \cdot (9 \cdot 90 + 300 \cdot 0,8) = 6090,$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч); P – мощность оборудования, кВт; $F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 6090 рублей.

Материальные затраты, необходимые для выполнения представленных в проекте расчетов разработки, представлены в таблице 14.

Таблица 14 — Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Катод графитовый	шт.	1	1000	1200
2. Смесь аргон-азот	шт.	1	2000	2000
3. Фольга	м ²	10	100	1000
4. Магнитик	шт.	1	10	10
5. Доступ в интернет	месяц	3	350	1050
Итого				9958

Из затрат на материальные ресурсы, включаемых в себестоимость продукции, исключается стоимость возвратных отходов.

Под возвратными отходами производства понимаются остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, теплоносителей и других видов материальных ресурсов, образовавшиеся в процессе производства научно-технической продукции, утратившие полностью или частично потребительские качества исходного ресурса (химические или физические свойства) и в силу этого используемые с повышенными затратами (понижением выхода продукции) или вовсе не используемые по прямому назначению.

4.2.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя

из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда).

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (1)$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от **предприятия** (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (2)$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 19);

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_M \cdot M}{F_d}, \quad (3)$$

где $З_M$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 15).

Таблица 15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный доклад работника с учетом районного коэффициента для Томска $k_p = 1.3$, вычисляется:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot 1.3. \quad (4)$$

Данные и результаты расчета основной заработной платы приведены в таблице 4.12, например, для руководителя расчет основной заработной платы, зная, что его оклад 47104 руб./месяц, проводится следующим образом:

- находим месячный должностной оклад:

$$Z_M = 47104 \cdot 1,3 = 61235 \text{ руб./месяц} \quad (5)$$

- рассчитываем среднедневную заработную плату:

$$Z_{дн} = \frac{61235 \cdot 10.4}{251} = 2537 \text{ руб./день} \quad (6)$$

- рассчитываем основную заработную плату:

$$Z_{осн} = 2537 \cdot 24 \cdot \frac{1}{3} = 20296 \text{ руб.} \quad (7)$$

Подобный расчет проводится для вычисления основной заработной платы инженера.

Расчет основной заработной платы приведён в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_{TC} , руб.	k_p	Z_M , руб./месяц	$Z_{дн}$, руб./день	T_p , раб. Дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	47104	1,3	61235	2537	33	83721
Инженер	12664	1,3	16437	681	83	56523
Итого $Z_{осн}$						140244

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

- оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор (см. «Положение об оплате труда», приведенное на интернет-странице Планово-финансового отдела ТПУ);

- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д;

- иные выплаты; районный коэффициент.

4.2.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы

$$Z_{\text{доп}} = 0,1 \cdot 83721 = 8372$$

Дополнительная заработная плата представлена в таблице 17.

Таблица 17. Дополнительная заработная плата

Исполнитель	$k_{\text{доп}}$	$Z_{\text{осн}}$	$Z_{\text{доп}}$
Руководитель	0,1	83721	8372
Магистрант	0,1	56523	5652
Итого			14024

4.2.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников [24].

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.9)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

$$k_{\text{внеб}} = k_{\text{пф}} + k_{\text{с}} + k_{\text{пн}}, \quad (4.10)$$

где $k_{\text{пф}}$ – коэф. отчисления в пенсионный фонд; $k_{\text{с}}$ – коэф. Отчисления страховых взносов; $k_{\text{пн}}$ – коэф. отчисления в подоходный налог. $k_{\text{внеб}} = 0,271$

Таблица 18 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Магистрант
Основная заработная плата, руб.	83721	56523
Дополнительная заработная плата, руб.	8372	5652

Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Сумма отчислений	24957	16849
Итого	41806	

4.2.5 Накладные расходы

Накладные расходы составляют 30 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (12)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Таблица 19 – Накладные расходы

Исполнитель	Руководитель	Студент
Основная заработная плата, руб.	83721	56523
Дополнительная заработная плата, руб.	8372	5652
Коэффициент накладных расходов	0,3	0,3
Сумма накладных расходов	27627,9	18652,5
Итого	46279,5	

4.2.6 Формирование бюджета затрат НИИ

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	9958
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	140244
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	14024
Отчисления во внебюджетные фонды	41806
Накладные расходы	46279
Прочие прямые затраты	6090
Бюджет затрат НИИ	258401

4.2.7 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по данному разделу была сведена в таблицу 21.

Таблица 21 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность	Влияние	Уровень риска*	Способы смягчения риска
1	Проблемы с проведением аналитических экспериментов	Сложности корреляции расчетных и реальных результатов	1	3	Низкий	Предоставление научному коллективу доступ к аналитическому оборудованию
2	Поломка экспериментальной установки	Затруднение проведения экспериментальных исследований	3	4	Выше среднего	Предоставление рабочей группе персонала, отвечающего за корректную работу экспериментального оборудования

Реестр рисков проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (14)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (15)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведен в форме таблицы (табл. 22).

Исп.1 – Формирование алмазоподобных кремний-углеродных пленок в среде N_2 -Ar с использованием биполярного напряжения смещения;

Исп.2 – Формирование алмазоподобных кремний-углеродных пленок в среде Ar без приложения напряжения смещения к подложке;

Таблица 22 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Соответствие теории и эксперимента	0,25	4	4
2. Сложность реализации процесса осаждения	0,10	5	5
3. Механические характеристики КУП	0,30	5	2
4. Стоимость реализации экспериментов	0,20	4	3
5. Время проведения экспериментов	0,15	4	4
ИТОГО	1	22	18

$$I_{p-исп1} = 4*0,25 + 5*0,1 + 5*0,30 + 4*0,20 + 4*0,15 = 4,4 \quad (16)$$

$$I_{p-исп2} = 4*0,25 + 5*0,1 + 2*0,30 + 3*0,20 + 4*0,15 = 3,3 \quad (17)$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}}, \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}} \text{ и т.д.} \quad (18)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.23) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (19)$$

Таблица 23 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4.4	3.3

3	Интегральный показатель эффективности	4.4	3.3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.33	0.75

Вывод к разделу

В данном разделе рассмотрена экономическая эффективность настоящей выпускной работы. Проведенный SWOT-анализ позволил выявить сильные и слабые стороны проекта, помог выявить возможности и угрозы, которые нужно учитывать при дальнейшем развитии проекта. Сравнение с аналогами позволило выявить преимущества, на которые стоит уделять особое внимание. Построенный график работ позволил рассчитать реальную заработную плату для всех участников проекта. Для того чтобы показать, что данный проект имеет место быть в научной и экономической сфере, был проведен анализ эффективностью данной работы и сравнен с эффективностью других работ.

5. Социальная ответственность

Введение

Одна из основных задач социальной ответственности заключается в обеспечении безопасности труда человека, то есть создание таких условий труда, при которых исключается воздействие на работающих опасных вредных производственных факторов.

При разработке мер защиты от выявленных вредных производственных факторов необходимо дать описание применяемым мерам защиты с учетом требований нормативных документов.

Соблюдение правил и норм по безопасности жизнедеятельности позволяет улучшить и облегчить условия труда, обеспечить широкие возможности для высокопроизводительной работы.

Именно поэтому необходимо провести анализ рабочего пространства, а так же рабочего оборудования. Выявить проблемы и предложить способы их устранения.

Охрана труда – это система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека во время труда.

Полностью безопасных и безвредных производств не существует. Задача охраны труда — свести к минимуму вероятность поражения или заболевания работающего с одновременным обеспечением комфорта при максимальной производительности труда. Реальные производственные условия характеризуются, как правило, наличием некоторых опасных и вредных производственных факторов.

Опасным производственным фактором согласно [34] называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

Тема данной магистерской диссертации: “Осаждение кремний-углеродных $a\text{-C:H:SiO}_x$ пленок в смеси Ar-N_2 на подложки монокристаллического кремния” затрагивает процессы получения износостойких пленок, а так же исследование их механических и трибологических свойств.

Задача состоит в следующем: в данной работе осуществляется проведение ряда экспериментов по получению кремний-углеродных пленок. Необходимо выявить экспериментальным путем зависимости механических характеристик кремний-углеродных пленок от условий их формирования.

При выполнении настоящей работы были использованы: вакуумная установка ННВ-6, персональная электронно-вычислительная машина. Приведен анализ вредных и опасных производственных факторов, а также комплекс защитных мероприятий.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальное удостоверение.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в Журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники, которые будут работать на нем, должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости изображены на рисунке 14.

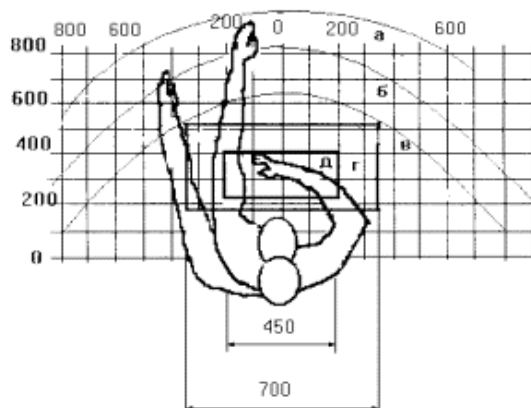


Рисунок 14 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования:

- высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм;
- высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм;
- рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм;
- должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Организация рабочего места показана на рисунке 15.

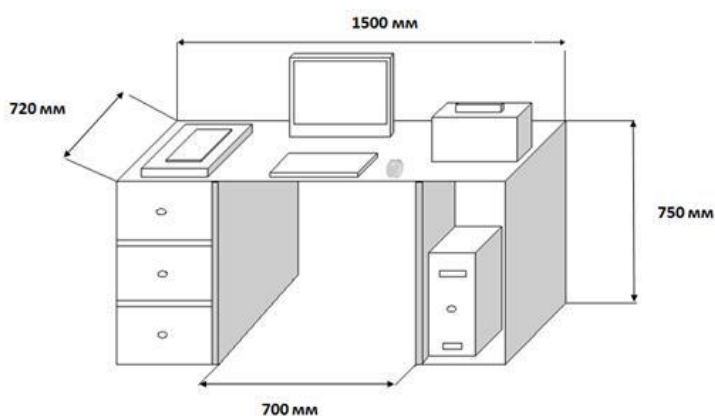


Рисунок 15 – Схема организации рабочего места

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглаблённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того, должна быть

возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

К работе на установке ННВ-6 допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы с данной установкой, ознакомленные с инструкцией по эксплуатации прибора и имеющие не менее II группы по электробезопасности.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с химическими веществами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

5.2 Профессиональная социальная безопасность.

5.2.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов.

Под опасным производственным фактором понимается фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме (высота, огонь, электрический ток, движущиеся предметы, взрыв). Вредным производственным фактором является фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию (неблагоприятный микроклимат, повышенный уровень шума, вибрации, плохое освещение, неблагоприятный состав воздуха).

Согласно [34] при работе на установке ННВ-6 и ПЭВМ на сотрудников могут воздействовать опасные и вредные факторы, приведенные в таблице 24.

Таблица 24. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Исследо вание	
1. Превышение уровня шума	+	+	+	- СанПиН 2.2.2.542-96; - ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности; - ГОСТ Р ИСО 1410-2010. Экологический менеджмент. - ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность; - ГОСТ Р 12.1.004-91 ССБТ Пожарная безопасность. - ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в ЧС. Основные положения.
2. Повышенное электромагнитное излучение	+	-	-	
3. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	-	
4. Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по

группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

На инженера, работающего на установке ННВ-6 и ПЭВМ, воздействуют следующие факторы:

температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, освещённость. Воздействие электромагнитного излучения было сведено к минимуму, так как при работе на ПЭВМ использовался жидкокристаллический монитор;

Основные мероприятия для устранения вышеуказанных факторов представлены в последующих разделах.

5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.

Основные параметры, характеризующие условия труда, – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата и приведены в таблице 25.

Таблица 25. – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Теплый	23-25	40	0,1

Температура – степень нагретости воздуха в рабочем помещении. По закону при восьмичасовом рабочем дне температура воздуха в офисном помещении должна составлять 23-25°C в теплое время года и 22-24 °С в холодное (при относительной влажности 40-60%). Отклонение от нормы разрешено лишь на 1-2 °С. Допустимое колебание температуры во время рабочего дня – не больше 3-4 °С.

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. При объеме помещения до 20 м³ в него должно подаваться, не менее 30 м³/ч наружного воздуха на одного человека. В случае объема помещения более 40 м³ на одного человека допускается естественная циркуляция, но с учетом отсутствия выделения вредных веществ.

В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что подача приточного воздуха идет в помещения без предварительной очистки и подогрева.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

В работе [35] приведены следующие значения уровня шума в помещениях офисов, проектных и научно-исследовательских организаций:

- допустимый уровень – 45 дБ;
- максимальный уровень – 60 дБ;
- оптимальный уровень – 50 дБ.

При выполнении работы на ЭВМ уровень шума в рабочем помещении не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [36] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [37] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света. В производственном помещении применяется общее равномерное освещение с помощью люминесцентных ламп. Согласно требованиям [38] освещенность рабочих поверхностей должна быть не менее 200 лк.

5.3 Экологическая безопасность.

5.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду.

В настоящей работе, для формирования кремний-углеродных пленок используются следующие газы: азот, аргон.

Чтобы происходила ионизация нужен газ, а без газа не будет ионизации. Обычно газ хранится в специальных газовых баллонах, но и они могут пропускать газ. Рассмотрим опасность используемых газов:

Азот – газ без цвета и запаха. При испарении паров азота, содержащего небольшое количество кислорода, в первую очередь испаряется азот, в результате чего концентрация кислорода в жидкости увеличивается и может достигнуть значений, при которых возникает опасность загорания и взрыва в ней ряда веществ и материалов [39].

Аргон – газ без цвета и запаха. Аргон тяжелее воздуха и может скапливаться в приямках, колодцах, тупиках, вытесняя при этом воздух. Содержание кислорода может снижаться ниже предельных величин. Выравнивание концентрации за счет диффузии происходит медленно и зависит от объемов, геометрических форм, притока аргона в атмосферу, его температуры [40].

5.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.

Основными потенциальными источниками воздействия на окружающую среду в настоящей работе являются рабочие газы. Чтобы не происходило вышеперечисленных опасностей, нужно принять следующие меры безопасности:

Для азота:

- Баллоны с азотом не следует ронять и поднимать, держась за колпак или вентиль.
- Перевозка баллонов осуществляется при помощи тележек.

- Недопустимо перегревание емкостей с азотом.

Для **аргона**:

- дистанционный контроль содержания кислорода в воздухе ручными или автоматическими приборами; объем кислорода в воздухе должен составлять не меньше 19%;
- при работе с жидким аргоном, способным вызвать обморожение кожи и поражение слизистой оболочки глаз, необходимо использовать защитные очки и спецодежду;
- при работе в атмосфере аргона необходимо использовать шланговый противогаз или изолирующий кислородный прибор.

5.4 Электробезопасность

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества. Безопасной для человека является величина переменного тока – 10 мА, постоянного – 50 мА, безопасное напряжение 12 В.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Характер и последствия поражения зависят от величины, частоты и пути прохождения тока; продолжительности воздействия.

При работе на ПЭВМ существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта электрических приборов;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании.

Работа на установке ННВ-6 предполагает использование высокого напряжения блока питания (до 15 кВ) и напряжения сети 380\220 В, которое может привести к поражению электрическим током. Источником поражения электрическим током могут быть незащищенные и неизолированные электропровода, поврежденные электродвигатели, открытые коммутаторы, не заземленное оборудование и др.

Проходя через живые ткани, электрический ток оказывает термическое, электролитическое и биологическое воздействия. Это приводит к различным нарушениям в организме, вызывая как местное поражение тканей и органов, так и общее поражение организма [41]. Самый опасный – переменный ток частотой 50 – 60 Гц.

Электрозщитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть сблокированы с устройствами,

отключающими рабочее напряжение при снятии; – изолирующие устройства и покрытия;

– устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;

– устройства дистанционного управления;

– предохранительные устройства и др.

Для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала необходимо предусмотреть:

– защитное заземление всех металлических нетоковедущих частей электрооборудования $R_3 \leq 4 \text{ Ом}$;

– раздельное размещение аппаратуры с напряжением до 1000 В и свыше 1000 В;

– полное ограждение от прикосновения к аппаратуре с напряжением выше 1000 В;

– отключение всех источников питания установки общим рубильником.

При поражении работника электрическим током необходимо:

1. освободить пострадавшего от действия электрического тока и оценить состояние пострадавшего;
2. вызвать скорую медицинскую помощь или врача, либо принять меры для транспортировки пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение;
3. если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока или продолжительное время находился под действием тока, ему до прибытия врача необходимо обеспечить полный покой и в дальнейшем медицинское наблюдение в течение 2-3 часов;
4. при отсутствии признаков жизни (отсутствие дыхания, пульса, реакции зрачка на свет) нельзя считать пострадавшего мертвым. Ему должна быть оказана первая медицинская помощь в виде искусственного дыхания и непрямой массаж сердца. Искусственное дыхание и

непрямой массаж сердца следует делать непрерывно до прибытия врача;

5. переносить пострадавшего в другое место следует только в тех случаях, когда ему или лицу, оказывающему помощь, продолжает угрожать опасность или когда оказание помощи на месте невозможно.

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Мероприятия по защите персонала. С получением информации об угрозе возникновения чрезвычайной ситуации комитет по чрезвычайным ситуациям объекта начинает функционировать в режиме повышенной готовности и принимает на себя непосредственное руководство всей деятельностью объектового звена РСЧС. Их в последовательности, определяемой обстановкой. Осуществление мероприятий по защите персонала объекта, предупреждению ЧС или уменьшению возможного ущерба от них комиссия проводит на основе плана по предупреждению и ликвидации ЧС, в который вносят уточнения с учетом ожидаемого вида (типа) ЧС и складывающейся обстановки.

Руководитель объекта — председатель КЧС с возникновением угрозы ЧС привлекает всех членов комиссии, руководителей структурных подразделений и командиров формирований, организует и проводит на объекте следующие основные мероприятия:

- осуществляет наблюдение и контроль за состоянием окружающей среды, обстановкой на потенциально опасных участках объекта и прилегающих к ним территориях;
- прогнозирует возможность ЧС на объекте, ее масштабы и последствия;
- проверяет системы и средства оповещения и связи;
- готовит к возможной эвакуации персонал и население прилегающих к объекту участков города (поселка), а при необходимости проводит ее (в загородную зону — только по распоряжению вышестоящей

КЧС).

С возникновением ЧС по распоряжению руководителя объекта вводится чрезвычайный режим функционирования объектового звена РСЧС и организуется выполнение соответствующих мероприятий.

Первый этап: принятие экстренных мер по защите персонала, предотвращению развития ЧС и осуществление АСР.

К экстренным мерам защиты персонала объекта относятся:

- оповещение об опасности и информирование о правилах поведения;
- медицинская профилактика и использование средств защиты исходя из обстановки;
- эвакуация работников с участков, на которых существует опасность поражения людей;
- оказание пострадавшим первой медицинской и других видов помощи.

Для предотвращения или уменьшения последствий ЧС осуществляются предусмотренные планом действия по локализации аварии при остановке или изменении технологического процесса производства, а также по предупреждению взрывов и пожаров.

Работы, связанные со спасением людей, проводятся до полного их завершения. При необходимости председатель КЧС (руководитель работ на участке) организует смену и отдых личного состава формирований на месте работ или в установленных районах. Руководство АСР и ДНР осуществляется на принципах единоначалия в соответствии со ст. 14 Федерального закона от 22 августа 1995 г. № 151-ФЗ "Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей".

Основные мероприятия по жизнеобеспечению пострадавшего и эвакуируемого населения проводятся под руководством КЧС местных территориальных органов власти с привлечением КЧС объектов и включают:

- временное размещение населения, оставшегося без крова;

- обеспечение людей незагрязненными (незараженными) продуктами питания, водой и предметами первой необходимости;
- создание условий для нормальной деятельности предприятий коммунального хозяйства, транспорта и учреждений здравоохранения;
- проведение необходимых санитарно-гигиенических и противоэпидемических мероприятий;
- проведение работы среди населения по снижению последствий психического воздействия ЧС, ликвидации шоковых состояний;
- расселение эвакуируемого населения в безопасных районах, обеспечение продовольствием, предметами первой необходимости, медицинской помощью.

О возникшей чрезвычайной ситуации, ходе ее ликвидации и окончательных результатах в установленном порядке представляются донесения в вышестоящую комиссию по ЧС и органы управления ГО и ЧС.

Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [42], по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д. Категории помещений и зданий определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений помещений и характеристик проводимых в них технологических процессов. Помещение, в котором выполняется данная работа, по степени пожаровзрывоопасности относится к категории Г (умеренная пожароопасность), т.е. включает в себя негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени, и (или) горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному).
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112.
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Вывод к разделу

Вопросы, связанные с социальной ответственностью, характеризуются не только трудовыми процессами, но и окружающей санитарно - гигиенической обстановкой. Если при трудовом процессе нагрузка падает на мышечную и нервную систему человека, то окружающая обстановка (температура воздуха, его влажность, загрязнение) вызывают изменения в функционировании дыхания, зрения, слуха, кровообращения, т.к. каждый из этих факторов отрицательно влияет на трудовую деятельность человека, утомляет, ослабляет внимание, что ведет к наибольшей вероятности травмы.

Тема данной магистерской диссертации: “Осаждение кремний-углеродных $a-C:H:SiO_x$ пленок в смеси $Ar-N_2$ на подложки монокристаллического кремния” затрагивает процессы получения износостойких пленок, а так исследование их механических и трибологических свойств.

При выполнении настоящей работы были использованы: вакуумная установка ННВ-6, персональная электронно-вычислительная машина. Приведен анализ вредных и опасных производственных факторов, а также комплекс защитных мероприятий.

В данном разделе были рассмотрены различные опасные и вредные воздействия на организм человека при работе на экспериментальной

установке ННВ-6 и ПЭВМ, а также правила работы с ними в целях предотвращения несчастных случаев.

Заклучение

Настоящая работа посвящена комплексному исследованию свойств а-С:Н:SiO_x пленок, формируемых плазмохимическим методом осаждения в смеси Ar/N₂ и паров полифенилметилсилосана с приложением к подложке импульсного биполярного напряжения смещения.

Благодаря уникальным механическим, оптическим и трибологическим свойствам, а-С:Н:SiO_x пленки получили широкое распространение для использования в качестве антифрикционных, защитных и износостойких покрытий. Наиболее распространенным методом для осаждения а-С:Н:SiO_x пленок является метод плазмохимического осаждения с использованием высокочастотного смещения (RF PACVD). Для нанесения а-С:Н:SiO_x пленок в работе используется импульсное биполярное смещение, имеющее ряд преимуществ по сравнению с высокочастотным смещением – отсутствие систем согласования, большее количество варьируемых параметров импульсов и возможность последующего масштабирования технологии. Такой подход позволил получить а-С:Н:SiO_x пленки с высокими механическими, трибологическими и оптическими свойствами сопоставимые с зарубежными аналогами, формируемыми с использованием высокочастотного смещения.

Основываясь на литературных данных, включение в структуру углеродной пленки соединений с азотом позволяет повысить гемосовместимость плёнок. Немаловажным является исследование механических свойств, играющих важное значение в случае применения плёнок в медицинских устройствах и инструментах.

- Показано, что включение N₂ в структуру кремний-углеродных а-С:Н:SiO_x:N_x пленок позволяет повысить краевой угол смачивания с водой от 80° до 94° за счет увеличения содержания новых функциональных групп в плёнках, таких как C≡N и N-H;

- Установлено, что с увеличением расхода азота N₂ происходит снижение механических характеристик получаемых пленок (твердость

с 16,3 ГПа до 12,5 ГПа; сопротивление пластической деформации с 196 МПа до 110 МПа) за счет образования новых центров sp^2 -фазы;

- Показано, что с увеличением расхода азота N_2 , в процессе формирования пленок, адгезионная прочность практически не изменяется и составляет 20 Н.

- Показано, что увеличение расхода N_2 приводит к росту среднеквадратичной шероховатости поверхности (с 1,2 нм до 11,1 нм) за счет высокоинтенсивной ионной бомбардировки растущей плёнки.

Список используемых источников

[1]. Chen SW, Chiu CN (2007) Unusual cruciform pattern interfacial reactions in Sn/Te couples. Scripta Mater. 56(2):97–99. doi: 10.1016/j.scriptamat.2006.09.018

[3]. Lan YC, Wang DZ, Chen G, Ren ZF (2008) Diffusion of nickel and tin in pp-type $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ and nn-type $\text{Bi}_2(\text{Te,Se})_3$ thermoelectric materials. Applied Physics Letters 92:101910. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2896310>

[5]. Патент RU 2173911 «Получение электродуговой плазмы в криволинейном плазмоведе / Додонов А.И.; Башков В.М.

[6]. R.D. Mansaro, R. Ruas, A.P. Mousinho et al / Use of Diamond-like Carbon with Tungsten (W-DLC) films as Biocompatible materials // Surface & Coatings Technology, 2008. V. 202. P. 2813-2816.

[7]. Klaus Bewilogua, Dieter Hofmann / History of Diamond-like Carbon Films – From First Experiments to Worldwide Applications // Surface & Coatings Technology, 2014. V. 242. P. 214-225.

[8]. Elinson VM, Sleptsov VV, Laymin AN, et al (1999) Barrier properties of carbon films deposited on polymer-based devices in aggressive environments. Diamond Relat. Mater. 8(12):2103–2109. doi:10.1016/S0925-9635(99)00177-6

[9]. В.П.Новиков, А.Т. Матвеев, Л.Л. Климкович / Метод «селективного травления» в электрохимическом синтезе метастабильных форм углерода // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. ст. к 40-летию ИФТТП НАН Беларуси и 90-летию его основателя акад. Н. Н. Сироты / Н. М. Олехнович . – Минск : Беларуская навука, 2003, с. 532-757.

[10]. Титов, к. т. н., Научнотехнический центр компании «ГлобусСталь» Покрытия для режущего инструмента // НМ ОБОРУДОВАНИЕ. 2004 год. С 24 – 27.

[11]. Sundgren J.-E., Hentzell T.G. A review of the present state of art in hard coatings grown from the vapor phase // J. Vac. Sci. and Technol A. - 1968. - V. 4 - N5. - P.2259-2279.

- [12]. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2840 // Kohlenstoffschichten Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften // Januar 2004 p. 4.
- [13]. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2840 // Kohlenstoffschichten Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften // Januar 2004 p. 5.
- [14]. Preparation of diamond like carbon thin film on stainless steel and its SEM characterization // KAMLESH KUMARI††, S BANERJEE† , T K CHINI† and N R RAY* // Bull. Mater. Sci., Vol. 32, No. 6, December 2009, pp. 563–567.
- [15]. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2840 // Kohlenstoffschichten Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften // Januar 2004 p. 3.
- [16]. Aisenberg S., Chabot R. / Properties and applications of diamondlike carbon films // J. Appl. Phys., 1971. V. 42, pp.2953-2957.
- [17]. Ravi S., Silva P. Properties of Amorphous Carbon – INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2003. – p. 385.
- [18]. Neerinck D., Persoone P., Sercu M., Goel A., Venkatraman C. et al. / Diamond-like Nanocomposite Coatings for Low-wear and Low-friction Applications in Humid Environments // J. Thin solid films, 1998. V. 317, pp. 402 – 404.
- [19]. N. Sawides // J. Appl. Phys., 1986. V.59, p. 4133.
- [20]. J. Schwan et al // J. Appl. Phys., 1996. V.79, p. 1416.
- [21]. Оскомов К.В., Соловьёв А.А., Работкин С.В. / Твердые углеродные покрытия, наносимые методом магнетронного импульсного сильноточного магнетронного распыления // Журнал технической физики, 2014. Т. 84, с. 73-76.
- [22]. Junkins G.M., Kawamura K. // in Polymeric Carbons-Carbon Fibre, Glass and Char, Cambridge University Press, 1976.
- [23]. Aksenov I.I., Belous V.A., Padalka V.G., Khoroshikh V.M. // Sov. J. Plasma Phys., 1978. V.4, p.425.
- [24]. Scheibe HJ., Schultrich B. // Thin Solid Films, 1994.V.246, p.92.
- [25]. Voevodin A.A., Donley M.S. // Surf. Coat. Technol., 1996. V.82, p. 199.

- [26]. Schwan J. et al // J. Appl. Phys., 1996. V.79, p. 1416.
- [27]. Kleber R. et al // Diam. Relat. Mater., 1991. V.2, p.246.
- [28]. Miyazawa T., Misawa S., Yoshida S., Gonda S. // J. Appl. Phys., 1984. V.55, p. 188.
- [29]. Hofsass H., Ronning C. // in Proc. Int. Conf on Beam Processing of Advanced Materials ASM International, 1996. P.29-56.
- [30]. Koidl P., Wild C., Dischler B., Wagner J., Ramsteiner M. // Mater. ScL Forum, 1989. V.52, p.41
- [31]. Randeniya, L.; Bendavid, A.; Martin, P. J.; Amin, M. S.; Preston, E. W. Molecular structure of SiO_x-incorporated diamond-like carbon films; evidence for phase segregation. Diamond and Related Materials. 2009; 18(9):1167-1173
- [32].NehaSharmaN.KumarS.DashC.R.DasR.V.Subba RaoA.K.TyagiBaldevRaj Scratch resistance and tribological properties of DLC coatings under dry and lubrication conditions
- [33]. Batory D., Jedrzejczak A., Kaczorowski W., Szymanski W., Kolodziejczyk L., Clapa M., Niedzielski P.: Influence of the process parameters on the characteristics of silicon incorporated a-C:H:SiO_x coatings. Surf. Coat. Tech. 271 (2015) 112–118
- [34]. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181–ФЗ.
- [35]. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности;
- [36]. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
- [37]. СанПин 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
- [38]. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.

[39]. ГОСТ 9293-74 (ИСО 2435-73) Азот газообразный и жидкий. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправками N 1, 2)

[40]. ГОСТ 10157-2016 Аргон газообразный и жидкий. Технические условия

[41]. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

[42]. Пожаро и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность.

[43]. ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в ЧС. Основные положения.

Приложение А

Раздел 1

Влияние условий осаждения на свойства α -C:H:SiO_x пленок

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Елгин Юрий Игоревич		

Консультант НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Демидова О.М.	Старший преподаватель		

The deposition of silicon – carbon a–C:H:SiO_x films in an Ar – N₂ mixture on monocrystalline silicon substrates

Introduction

Carbon is the substance with the largest number of allotropic modifications. Carbon atoms can be arranged in various polyatomic structures. Diamond–like coatings consist of carbon atoms with diamond and graphite–like bonds.

Presently, diamond–like carbon films are of great interest because they have unique physical-mechanical, optical and tribological properties, in particular: high hardness (up to 100 GPa), low wear rate and wide range of friction coefficient (0.05 – 0.20), chemical inertness, corrosion resistance. Also, diamond–like films are characterized by a high coefficient of thermal conductivity and high biocompatibility with the human biological environment, which, in turn, greatly expands the possible use range of this material.

Diamond–like carbon films are used as protective functional coatings, which is caused by a high content of carbon phases with sp³–hybridization of valence electrons (up to 80%) in them. Coatings can be designed to increase the service life of parts that work during drilling, milling, cutting, rolling, extrusion, etc., where you want to protect the surface from wear and abrasion, increase the surface hardness of the part, as well as reduce the coefficient of friction and provide increased wear resistance .

However, a high level of internal compressive stresses in coatings (> 3–7 GPa) can lead to the destruction and peeling of the film during the formation of a thickness greater than 500 nm.

One of the methods for reducing internal stresses is annealing and doping. In some cases, not all substrates materials allow the annealing procedure to be used; thus, it is necessary to look for alternative methods for reducing the magnitude of internal compressive stresses. As alloying additives, in order to reduce the number of carbon–carbon bonds, various atoms of elements such as Si, O, F, N or metals can be incorporated into the amorphous carbon lattice. The doping of carbon films with such elements leads to a decrease in the content of the carbon phase with sp³–

hybridization of valence electrons, which reduces the films strength characteristics. The formation of new bonds in the structure of the film leads to an even greater variety of their properties, which, in turn, expands the area of their application. The most popular is the doping of films in the process of synthesis by introducing the doping component into the plasma.

Doping with oxygen and silicon allows reducing internal stresses to less than 1 GPa, which makes it possible to form films with a thickness of micrometers tens. Such films are called silicon carbon ($a\text{-C:H:SiO}_x$) or diamond like nanocomposites. These films are characterized by a low coefficient of friction in humid environments (0.02 – 0.15), a hardness of 10–20 GPa, a low wear rate of less than 10^{-5} mm/N·m, and also a thermal stability up to 400 – 450 °C.

This work is devoted to an integrated study of the $a\text{-C:H:SiO}_x$ films properties formed by plasma chemical deposition in a mixture of Ar/N₂ and polyphenylmethylsilosane with pulsed bipolar bias voltage applied to the substrate

To achieve this goal the following tasks were solved:

5. Conducting a series of experiments on the $a\text{-C:H:SiO}_x$ films formation at different partial pressures of N₂ in the working chamber;
 6. Study of the $a\text{-C:H:SiO}_x$ films structure, formed in the Ar/N₂ mixture;
 7. Research of physicomechanical properties of obtained $a\text{-C:H:SiO}_x$ films;
- Identification of the $a\text{-C:H:SiO}_x$ film properties dependencies on the partial pressure N₂ in the working chamber.

1. Materials and methods for their production

1.1 Subject of research

Carbon can exist in its pure form in various modifications: in amorphous form, that is, with a random atoms arrangement (a detailed description of this carbon form will be below) and in two different crystalline forms, diamond and graphite. These two crystalline modifications differ in the structure of the lattice. The crystal lattice determines the basic material properties, such as hardness, elasticity and density.

In the crystalline form of graphite type, carbon atoms are arranged as follows; three carbon atoms lie in the plane of the fourth atom (figure 1). Such atomic planes are atomic layers consisting of hexagons. Carbon in the crystalline form of graphite has a high internal strength, such a result due to the small interatomic distances between the atoms lying in the same plane (0.142 nm). However, there is a relatively large distance (0.333 nm) between atomic layers. Atomic layers, therefore, can be easily relative to each other under the external forces influence. Because of such sliding planes, graphite has such properties as low hardness, low electrical resistivity and a high degree of wear, in combination with a low friction coefficient.

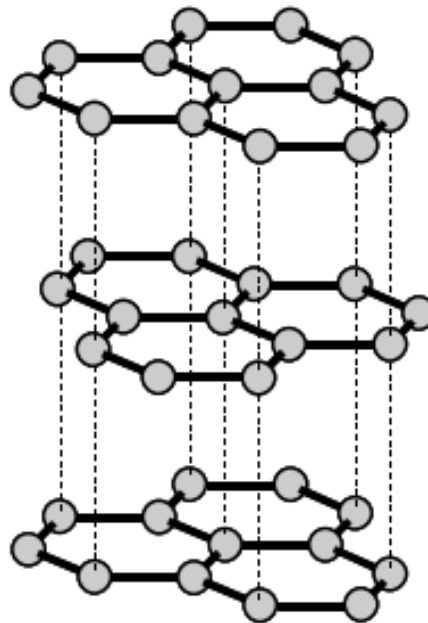


Figure 1. Crystal lattice of graphite

In a diamond-like crystal form, each carbon atom forms bonds with four neighboring atoms, in other words, the diamond has a tetrahedral arrangement (figure 2). In this tetrahedral arrangement, all interatomic distances are small and have the same value (0.154 Hm). Therefore, there are very high bonding forces between atoms in all directions in space. This leads to extremely high hardness, high thermal conductivity, high electrical resistance, chemical inertness, optical transparency, a wide band gap, and a low degree of wear in various tribological systems.

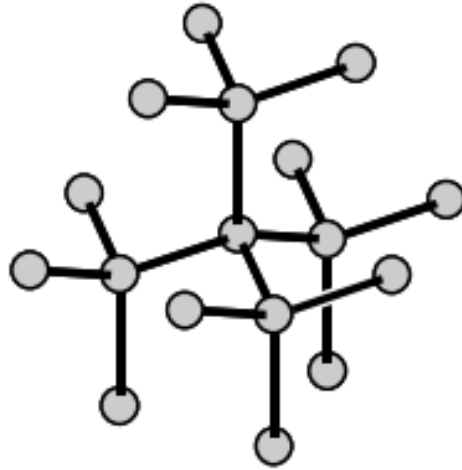


Figure 2. Crystal lattice of diamond

Crystalline atomic bonds of diamond-like coatings are classified by sp^2 - and sp^3 - hybridizations. The orbitals hybridization is the concept of mixing different, but close in energy orbitals of a given atom, with the emergence of the same new hybrid orbitals number that are identical in energy and shape. Atomic orbitals hybridization occurs when a covalent bond between atoms occurs. Letters s and p designate orbitals on which there are electrons. In the crystal lattice types of diamond or graphite, the carbon atoms electrons are in the so-called "hybrid states" sp^3 and sp^2 , respectively. Sp^2 -hybridization corresponds to the graphite crystal lattice; each carbon atom is thus connected to three other atoms. The diamond lattice has sp^3 -hybridization, in which each carbon atom is connected to four neighboring atoms. These hybridizations take place not only in crystal lattices of solids with a specific atoms arrangement, but also in crystal lattices of amorphous solids in which the atoms are arranged in a random order. Hybridization then exists only between several atoms, and not in the whole atoms set. Bonds types have a significant impact on the amorphous carbon coatings properties. The sp^2 -bonds predominance in the crystal lattice makes the coating softer and vice versa, the predominance of sp^3 -bonds gives the coating a more solid structure.

The types of crystal lattices can be determined using Raman spectroscopy methods, and the ratio of sp^2 - and sp^3 - hybridizations in crystalline and amorphous carbon coatings can also be estimated.

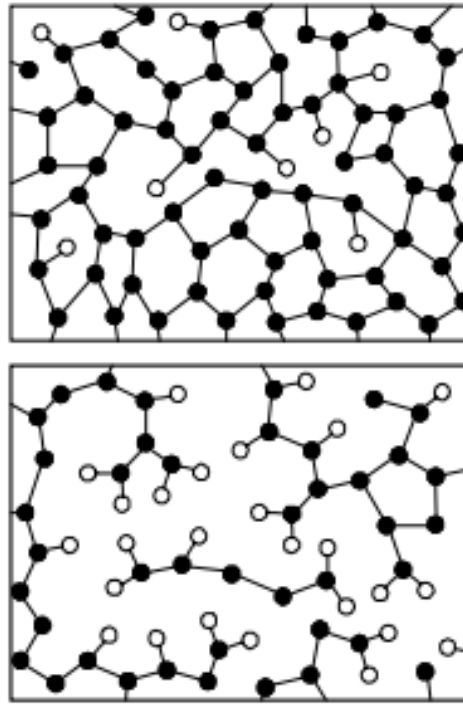


Figure 3. Hydrogen content in hydrogen-containing carbon coatings.

Black is carbon atoms; white is hydrogen atoms.

Top picture: from 15 to 25%, solid layer. Bottom picture: from 30 to 50%, soft layer.

Figure 3 shows schematically the crystalline types of two different amorphous hydrogen-containing carbon coatings. Obviously, with an increase in the hydrogen content in the coating structure, the number of carbon – carbon bonds decreases. This leads to a weakening of the hardness of the coating, the film becomes soft. The amount of hydrogen content in the coating structure depends on such properties as hardness, width of the forbidden zone, density, etc. Interest in carbon films has arisen due to the universality of carbon properties, which depend on the atomic orbitals hybridization. As mentioned above, the carbon atom has four valence electrons, which allows to form different hybridized states: sp^1 , sp^2 and sp^3 .

Depending on the content of sp^3 hybridized atoms in the carbon film structure, hydrogen concentration and the dopants presence, they can be classified as follows: diamond-like (DLC), tetrahedral (ta-C), polymer-like (PAC), graphite-like (GAC), hydrogenated (a-C: H), tetrahedral hydrogenated amorphous carbon (ta-C: H).

1.1.1 Diamond-like amorphous carbon

According to literary data, the first DLC films were created by Eisenberg and Chabot in 1971. These films were obtained from a stream of accelerated carbon ions in an argon plasma at room temperature of the substrate. The concentration of sp^3 hybridized carbon atoms in the coating is $\sim 40\text{--}60\%$, the hydrogen concentration is $\sim 20\text{--}40\%$, the hardness is $15\text{--}25$ GPa and the width of the optical zone is $0.8\text{--}4.0$ eV. Today, one of the main methods for producing DLC is magnetron sputtering.

Amorphous carbon is a material whose optical, electrical and mechanical properties can be varied over a wide range during their deposition, which gives many possibilities for using these films in various devices, mechanisms and tools. The combination of transparency in the infrared region of the spectrum with mechanical strength makes it possible to use them in optical lenses of lasers and other optical mechanisms as barrier and antireflection coatings of optical layers. Carbon films that absorb radiation in the visible region of the spectrum are used to effect optical isolation between recording and reading light in optical liquid-crystal light modulators of a reflective type. Polymer-like films that are transparent in the visible region of the spectrum are used as alignment layers for liquid crystals.

1.1.2 Graphite-like amorphous carbon

As a rule, GAC films have a low band gap of $0\text{--}0.6$ eV, a very low content of sp^3 hybridized carbon atoms $0\text{--}30\%$, but a high content of sp^2 types of hybridization and, like polymer-like carbon films, have a soft structure. One of the first studies on the structure and properties of such films was published in 1976.

1.1.3 Tetrahedral amorphous carbon

Tetrahedral carbon has the highest hardness from the amorphous carbon family of films. The first works on the ta – C deposition belong to 1978. This year, the first tetrahedral carbon films were obtained by means of a source of filtered vacuum – arc plasma. The concentration of sp^3 hybridized carbon atoms in the coating is $\sim 60\text{--}85\%$, the hydrogen concentration is $\sim 0\text{--}30\%$, the hardness is 40--

65 GPa, and the optical bandwidth is 1.6-2.6 eV. The most used methods of a – C films deposition are the laser deposition method, sputtering, and ion beams.

1.1.4 Polymer-like amorphous carbon

Polymer-like amorphous carbon films have a soft structure due to the large amount of hydrogen. One of the first papers on obtaining PAC films was published in 1989. For such films, the concentration of sp^3 hybridized carbon atoms in the coating is ~ 60–80%, the hydrogen concentration is ~ 40–65%, the hardness is 1–5 GPa, and the width of the optical zone is 2–5 eV. To obtain such films using carbon precursors (benzene, cyclohexane, n-hexane, pentane). Despite the high content of sp^3 type of hybridization, the films are soft due to the presence of a hydrogen high proportion that is not able to bind the carbon atoms in the film.

1.1.5 Tetrahedral hydrogenated amorphous carbon

Tetrahedral hydrogenated carbon films were deposited from a high concentration plasma, for example, a plasma beam source or an electron – cyclotron resonance plasma. The hydrogen content in the films was higher than that in a – C:H. The combination of the maximum sp^3 content of hybridized carbon atoms (~ 75%) and a lower hydrogen content than in the a – C:H films means that there are more C–C bonds with the sp^3 type of hybridized carbon atoms compared to a–C: H.

1.1.6 Hydrogenated amorphous carbon

Diamond-like amorphous carbon containing a high proportion of hydrogen was called hydrogenated. The first work to obtain such films was carried out in 1976 using high-frequency plasma-chemical vapor deposition. These films showed interesting mechanical and optical characteristics. Studies have shown that the films properties depend on the energy of the incident ion per carbon atom. Films were synthesized using gas mixtures - methane, acetylene and benzene. The concentration of sp^3 hybridized carbon atoms in the coating was ~ 20–60%, the hydrogen concentration was ~ 30–60%, and the optical zone width –1.8–4 eV.

1.1.7 Hydrogenated amorphous carbon doped with silicon oxide (a-C:H:SiO_x)

Silicon – carbon coatings were thin amorphous films used as solid lubricants for industrial applications due to their increased stability under extreme environmental conditions compared to amorphous hydrogenated carbon.

The silicon – carbon films hardness in was 20 GPa with a minimum friction coefficient of 0.16 and a wear degree of $1.3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{H}^{-1} \text{m}^{-1}$. Silicon – carbon coating has good mechanical properties not only because of the diamond-like phase higher content, but also because of the better cohesion between the film particles and low internal compressive stresses.

1.2 Silicon-carbon film deposition methods

The carbon coatings deposition has always been based on methods related to vacuum, in other words, the carbon coatings deposition occurs at a gas pressure below atmospheric. In the gas phase, coatings are formed from individual atoms, molecules or corresponding crystals. The most popular method for the silicon – carbon films formation is the plasma chemical deposition method and its various modifications. The most common ones are direct current plasma chemical deposition (DC PACVD), radio frequency plasma chemical deposition (RF PACVD), combined method of plasma chemical and physical vapor deposition (PACVD/PVD).

1.2.1 Direct current plasma chemical deposition

In foreign sources, this method is called plasma–assisted chemical vapor deposition (PA CVD). In the PACVD process, the coating on the substrate is synthesized during chemical reactions activated by an electrical discharge in the gas phase. An important condition for obtaining high-quality coatings by this method is the accuracy of controlling the gas flows velocity and the precursors evaporation rate.

One of the main advantages of this method is that relatively low substrate temperatures (of the order of 300 °C) are used. Also in the PACVD process, the

best covering ability and adhesion are achieved, the process is easier controlled. Instead of heat energy, the gas reactants are activated by fast electrons.

Another advantage of the PACVD process is that higher deposition rates are often achieved as compared to the thermal CVD process. This feature provides great opportunities in choosing various technological parameters, but it is more difficult to control this method.

The disadvantages of this PACVD process can be attributed to the fact that the pure materials deposition by this method is virtually impossible (except for polymers), because almost all non-desorbable gases are retained by the formed film. Another drawback is the strong plasma interaction with the film being formed. High sedimentation rate requires more careful workflow setup.

In Randeniya, L.; Bendavid, A. et al. formed silicon-carbon films by PA CVD. The working gas was a mixture of argon gases Ar and hydrogen H₂. A mixture of methane (CH₄) and tetramethylsilane Si(CH₃)₄ was used as precursors. The coatings were deposited on a silicon substrate and had a thickness of about 1.5 microns. In paper studied influence of $\frac{\text{Si(CH}_3)_4}{\text{Si(CH}_3)_4 + \text{CH}_4}$ (%) flow rate on the structure and coatings properties. The results are presented in table 1.

Table 1 – Properties of silicon–carbon films with different working precursor Si(CH₃)₄ consumption

№	$\frac{\text{Si(CH}_3)_4}{\text{Si(CH}_3)_4 + \text{CH}_4}$	sp ³ bonds, %	H, GPa	σ, GPa
1	0	30	14	1.53
2	4	36	12.4	1.1
3	9	47	12.2	1.05
4	13	55	12.1	1
5	17	–	12	<1

H – coatings hardness, σ – initial stresses.

With an increase in Si(CH₃)₄ tetramethylsilane consumption, the mechanical properties of the films are improved with the hardness exception. An increase in the film growth rate can be explained by a lower ionization potential of Si(CH₃)₄ in comparison with a higher CH₄ ionization potential in the plasma. In this article, the authors presented a linear dependence of the sp³ fraction on the silicon content

in the film. The increase in the proportion of sp^3 – hybridized carbon is explained by the fact that with an increase in the $Si(CH_3)_4$ consumption, the hydrogen concentration in the coating increases, which leads to the polymer formation of sp^3 C–H bonds, which change the connecting limits of the sp^3 carbon bonds. The coating hardness is determined by the amount of sp^3 carbon bonds in the film. However, in this case, a decrease in the coating hardness is explained by the fact that an increase in the hydrogen concentration leads to the formation of polymeric sp^3 C–H bonds that limit the sp^3 carbon bonds, and as a result, the internal stresses in the film also decrease. The decrease in internal stresses is explained, as was said at the beginning of the chapter, by the formation of longer Si–C bonds as compared to the length of the C–C bond.

Authors Randeniya, L.; Bendavid, A. et al. presented an analysis of the a–C:H:SiO_x films mechanical characteristics, formed by the plasma-chemical method. The results of this work are presented in table 2.

Table 2 - Dependence of the silicon – carbon films hardness on deposition parameters

Content of Si, at. %	H, GPa
5	17.00
9	12.00
13	11.80
17	9.00
22	10.00

From the work results it is seen that with increasing Si concentration, a decrease in hardness occurs. This is explained by a decrease in C–C interatomic bonds. In films the SiO_x parts present in the form of chain siloxanes and cyclosiloxanes, which are connected to the diamond-like carbon network through O–Si–C₂ bonds. For 13% < Si, a–C:H:SiO_x films form as a single phase with a siloxane through an O–Si–C₂ bonds. For films with Si>13%, siloxane bonds of DLC networks and SiO_x–precipitate are formed simultaneously in the segregated phases form.

1.2.2 Radio frequency plasma chemical deposition

In foreign sources, this method is indicated by the RF (radio frequency) PACVD abbreviation. The basis of radio frequency (RF) discharge generation with a hollow cathode is frequency-modulated constant voltage VS (self-bias) in the spatial discharge layer at the RF electrode at the 13.56 MHz frequency. RF plasma plays the virtual anode role and the space charge layer resembles a cathode fall region in a discharge with a constant current. In a system with an RF hollow cathode, the substrates are surrounded by a space charge layer which causes ion bombardment of the film during its deposition. At present, high-frequency glow discharge is widely used in industry, but there is still the problem of coating a large area with a high uniformity of coating thickness.

In Neha Sharma, N.Kumar et al. to obtain silicon carbon films, the RF PACVD method was used. The authors used inert gas argon as a working gas. A mixture of methane (CH₄) and hexamethyldisiloxane (C₆H₁₈OSi₂) was used as a precursor. Films formed on 316 stainless steel substrates (with high chromium content).

The results obtained in this work are presented in table 3.

Table 3 – Silicon–carbon films properties at different bias voltages

№	U _s , B	I _D /I _G	H, ГПа	μ
1	-25	0.45	3.8	~ 0.2
2	-100	0.1	5	< 0.05
3	-175	0.08	7.5	0.1
4	-225	0.06	12	0.15

H – coatings hardness, μ – friction coefficient.

The increase in the sp³ bonds proportion is explained by the fact that with an increase in the self-bias voltage value, the hydrogen concentration increases which leads to the formation of polymeric sp³ C–H compounds. Coatings hardness increased by intense ion bombardment of a growing film, leading to the coating compaction. Friction coefficient is very low at self-displacement voltage –100 B. This is due to the formation ta–C with a–C and sp²– hybridized bonds of carbon fractions. The ta–C fraction promotes low surface energies, a–C and sp² hybridized carbon is characterized by a slight slip in the priority direction. At a smaller

fraction of the sp^3 phase, the friction coefficient is higher than in films deposited at -25 V because of the high density in the plane of π - π bonds. However, in the case of an increase in the sp^3 phase proportion, a high sp^3 bonds density causes chemical blocking of the sliding surface due to the σ - σ covalent bonds interaction. The low coefficient of friction is also explained by the presence of SiO-(H) and SiO₂ which providing boundary lubrication. Authors Batory D., Jedrzejczak A. et al. gave a detailed description of the effect of deposition parameters on the physical and tribological properties of a-C:H:SiO_x films formed by the radio frequency plasma-chemical method. The results of this work are presented in table 4.

Table 4 – Characteristics of a-C:H:SiO_x films

Us, V	H, GPa	sp ² , (%)	sp ³ , (%)
200	13.84	64.1	17.4
400	18.34	69.8	18.9
600	16.47	65.2	26.0
800	13.94	67.10	22.70

With increasing potential difference between the cathode and the substrate (Us), nonlinear dependence of the obtained films hardness is observed. Oxygen-containing plasma, especially at high negative bias voltages, can participate in surface etching of sp^2 hybridized carbon. This may affect the increase in the content of sp^3 hybridized carbon and at the same time may be the reason for the absence of SiO_x precipitation, which at high negative bias potentials can be simply etched.

The variety of a-C:H:SiO_x coatings properties formed in a wide range of process parameters allows the structure, phase and films chemical composition to be made for a wide range of applications.

1.2.3 Plasma-chemical method using pulsed bipolar power supply

In this work for the silicon-carbon films formation, the method of obtaining coatings from the plasma of a non-self-sustained arc discharge with a heated cathode was used.

One type of arc discharge is a non-self-sustained arc discharge with a heated cathode. In this discharge, the main electrons source from the cathode is thermionic emission, for which the cathode is artificially heated from an auxiliary device. The electrons emitted by the incandescent cathode contribute to the occurrence and burning of the discharge. Almost all the voltage between its electrodes falls on the area near the cathode, and the rest of the chamber is filled with homogeneous plasma having an anode potential. The electrons emitted by the incandescent cathode fly out at almost identical speeds and ionize the gas, forming plasma that fills the volume rest. Ionization is provided by direct and stepped strikes. The arc discharge of this type allows obtaining homogeneous gas-discharge plasma with a high density in volumes up to several cubic meters.

The method of obtaining the coating is to create silicon-carbon-containing plasma by means of a polyphenylmethylsiloxane (PFMS) precursor and argon vapor mixture. Ionization of the working gas was due to thermionic emission from the hot cathode. Due to the bias applied to the substrate, a coating was formed containing a hydrogenated amorphous carbon (a-C:H), lattice stabilized by hydrogen and an oxygen stabilized silicon lattice (Si:O).

Conclusion to chapter

The literature analysis shows that the most popular method for the formation of silicon – carbon films is plasma chemical deposition and its various modifications, such as: plasma chemical deposition on direct current (DC PACVD), radio frequency plasma chemical deposition (RF PACVD), combined method of plasma chemical and physical deposition (PACVD/PVD).

The plasma-chemical process disadvantages of synthesizing films include the fact that the pure materials film formation by this method is impossible, because almost all non-sorbed gases are retained by the deposited film. Another drawback of plasma-chemical film formation is the strong interaction of the plasma with the substrate.

The use of radio frequency bias voltage is due to the growth of the dielectric a-C:H:SiO_x film and the possible anode “loss”. The disadvantage of using high-

frequency equipment is the high cost, the complexity of the load and power coordination, the inability to use in industrial production.

Silicon–carbon films obtained by the plasma-chemical method using pulsed bipolar power supply have good characteristics due to some features of the method used: constant ion bombardment of the growing film, which stimulates various processes on the deposited surface. The use of a pulsed bipolar power supply avoids the disadvantages of using RF bias and is easily scalable. The features combination allows obtaining coatings that are not inferior to the properties of similar coatings obtained by other methods, and in some moments even exceeding them.