

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Исследовательская школа химических и биомедицинских технологий
Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

**Исследование электрохимических свойств электродов, выполненных на основе
лазерно-индуцированного графена**

УДК 621.3.035.2:661.666.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Фаткуллин Максим Ильгизович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Родригес Р. Д.	Ph. D		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Якимова Т.Б.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романова С.В.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП 18.04.01 Химическая технология	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Пестряков А.Н.	Д.Х.Н.		

Томск – 2021 г.

**Планируемые результаты освоения ООП
«Перспективные химические и биомедицинские технологии»**

Код компетенции	Наименование компетенции
Общекультурные (универсальные) компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языках (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определить и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности;
ОПК(У)-2	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия;
ОПК(У)-3	Способность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов в соответствии с направлением и профилем подготовки
ОПК(У)-4	Готовность к использованию методов математического моделирования материалов и технологических процессов, к теоретическому анализу и экспериментальной проверке теоретических гипотез;
ОПК(У)-5	Готовность к защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на объекты интеллектуальной собственности
Профессиональные компетенции выпускников	
ПК(У)-1	Способность организовывать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую работу, разрабатывать планы и программы проведения научных исследований и технических разработок, разрабатывать задания для исполнителей
ПК(У)-2	Готовность к поиску, обработке, анализу и систематизации научно-технической информации по теме исследования, выбору методик и средств решения задачи
ПК(У)-3	Способность использовать современные приборы и методики, организовывать проведение экспериментов и испытаний, проводить их обработку и анализировать их результаты
ПК(У)-18	Способность и готовность к созданию новых экспериментальных установок для проведения лабораторных практикумов
ПК(У)-19	Готовность к разработке учебно-методической документации для реализации образовательных программ
ДПК(У)-1	Готовность к созданию химических соединений, материалов и изделий биомедицинского назначения и (или) их физико-химического анализа с учетом требований охраны здоровья и безопасности труда, защиты окружающей среды.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Исследовательская школа химических и биомедицинских технологий
Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
18.04.01 Химическая технология
_____ А.Н.
Пестряков
15.03.2021 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
9ДМ91	Фаткуллин Максим Ильгизович

Тема работы:

Исследование электрохимических свойств электродов, выполненных на основе лазерно-индуцированного графена

Утверждена приказом директора (дата, номер)

103-24/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

11.06.2021 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

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>	Объектом исследования является лазерное облучение пленок металлических наночастиц на поверхности полиэтилентерефталата. Предметом исследования является лазерно-индуцированный графен, получаемый путем облучения пленок. Облучение проводилось с импульсным воздействием лазера длиной волны 450 нм на воздухе
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Литературный обзор 2. Объекты и методы исследования, постановка задач 3. Разработка методик лазерного облучения 4. Результаты проведенного исследования

<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>	5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 6. Социальная ответственность 7. Заключение 8. Раздел на иностранном языке
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Романова С.В., старший преподаватель
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Якимова Т.Б., доцент, к.э.н.
Раздел ВКР на иностранном языке	Кобзева Н.А., доцент, к.п.н.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Разделы, написанные на русском языке: литературный обзор, объекты и методы исследования, результаты проведенного исследования, финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение, социальная ответственность	
Разделы, написанные на иностранном языке: литературный обзор	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.03.2021 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Р. Д. Родригес Контрерас	Ph. D		15.03.2021 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Фаткуллин М. И.		15.03.2021 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Исследовательская школа химических и биомедицинских технологий
Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология
Уровень образования магистратура
Период выполнения весенний семестр 2020/2021 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

11.06.2021 г.

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.03.2021 г.	Разработка раздела «Введение»	10
05.04.2021 г.	Разработка раздела «Литературный обзор»	10
19.04.2021 г.	Разработка раздела «Объекты и методы исследования»	10
10.05.2021 г.	Разработка разделов «Результаты проведенного исследования».	10
24.05.2021 г.	Разработка разделов «Социальная ответственность» и «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	10
04.06.2021 г.	Оформление ВКР	10
16.06.2021 г.	Представление ВКР	40

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Р. Д. Родригес Контрерас	Ph. D		15.03.2021

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП 18.04.01 Химическая технология	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Пестряков А.Н.	д.х.н.		15.03.2021

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
9ДМ91	Фаткуллин Максим Ильгизович

Школа	ИШХБМТ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	18.04.01 Химическая технология

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами. Оклады в соответствии с окладами сотрудников «НИ ТПУ».
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- районный коэффициент- 1,3; - коэффициент дополнительной заработной платы -0,15; - накладные расходы – 15%; - норма амортизации 15%.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- страховые взносы во внебюджетные фонды 30,2%.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ потенциальных потребителей результатов исследования, конкурентных технических решений, оценка готовности проекта к коммерциализации, проведение SWOT-анализа.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Определение целей и результатов проекта, организационной структуры проекта.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика проекта: - определение структуры работ; - определение трудоемкости работ;- Формирование бюджета затрат проекта.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Расчет показателей сравнительной эффективности проекта, интегрального показателя ресурсоэффективности
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. <i>Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений</i> 2. <i>Матрица SWOT</i> 3. <i>Оценка готовности проекта к коммерциализации</i> 4. <i>Календарный план</i> 5. <i>Бюджет НИ</i>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	15.03.2021
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н		15.03.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Фаткуллин Максим Ильгизович		15.03.2021

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
9ДМ91	Фаткуллин Максим Ильгизович

Школа	ИШХБМТ	Отделение (НОЦ)	ИШХБМТ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	18.04.01 Химическая технология

Тема ВКР:

Исследование электрохимических свойств лазерно-индуцированного графена	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Объект исследования – композит на основе гетероструктуры политэтилена терефталата и наночастиц алюминия, железа и кремния, облученного лазерным облучением. Методом анализа композита является спектроскопия комбинационного рассеяния и циклическая вольтамперометрия. Область применения – гибкая электроника, сенсоры</i> <i>В разделе рассматриваются аудитории 306 и 207 научного парка ТПУ, а также аудитории Технологического университета города Хемниц, Германия</i>
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. 	– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021)
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– Недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны – Повышенный уровень электромагнитных излучений – Шум – Отклонения показателей микроклимата – Выполнение работ с химическими веществами и наноматериалами – Превышение предельно допустимых значений напряжений прикосновения и токов – Работа с лазерами
3. Экологическая безопасность:	– В разделе приведены меры утилизации химических и наноматериалов, чтобы минимизировать воздействие.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– При проведении исследования наиболее возможный тип ЧС – возникновение пожара. Меры

	безопасности предложены в соответствующем разделе
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	15.03.21
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романова С.В.	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Фаткуллин М. И.		15.03.21

Реферат

Выпускная квалификационная работа: 99 с., 12 рис., 18 табл., 51 источник.

Ключевые слова: лазерно-индуцированный графен, металлические наночастицы, электрод, лазерное облучение, электрохимические свойства.

Объектом исследования является новый подход к получению лазерно-индуцированного графена путем облучения пленки металлических наночастиц на полимерной подложке и его структурные и электрохимические свойства.

Цель работы — исследование свойств материала, композитного получаемого посредством облучения пленки металлических наночастиц на полимерной подложке.

В процессе исследования был рассмотрен и проанализирован механизм формирования лазерно-индуцированного графена, получаемого предложенным нами способом. Также были исследованы некоторые его свойства: структурные, морфологические и электрохимические.

В результате исследования полученного материала был проведен сравнительный анализ свойств получаемого материала с литературными данными и сделан вывод о его конкурентоспособности и перспективных областях применения.

В будущем планируется более детальное изучение механизма для различных комбинаций металлических наночастиц и оптимизации процесса изготовления электродов, опираясь на конкретные требуемые для применения свойства.

Определения, сокращения, нормативные ссылки

ЛИГ - лазерно-индуцированный графен;

ПЭТ - полиэтилентерефталат;

ЛИМРС - лазерно-индуцированный композит между металлом и полимером (laser-induced metal polymer composite);

ГКРС - спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния света;

ПЭМ - просвечивающая электронная микроскопия;

РЭМ - растровая электронная микроскопия.

Оглавление

Введение	14
1. Обзор литературы	15
1.1. Получение проводящих графеноподобных материалов методом лазерной обработки	15
1.2. Свойства лазерно-индуцированного графена	18
1.2.1. Морфологические свойства.....	19
1.2.2. Смачиваемость поверхности.....	21
1.2.3. Электрические свойства	23
1.2.4. Электрохимические свойства	24
2. Объект и методы исследования	27
2.1. Подготовка образцов.....	27
2.2. Лазерное облучение пленок	27
2.3. Изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и элементный анализ методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX)	29
2.4. Спектроскопия комбинационного рассеяния света	29
2.5. Электрохимические измерения.....	29
3. Результаты проведенного исследования	31
3.1 Механизмы формирования материала и его характеристика	31
3.2 Особенности структуры лазерно-индуцированного композита металла с полимером.....	33
3.3 Морфология поверхности	36
3.4 Электрохимические свойства	37
3.4.1 Емкость и циклическая стабильность	38
3.4.2 Оценка электроактивной площади и электронного переноса	40
3.5 Применения	42
3.5.1 Электрохимический сенсор для детектирования ионов тяжелых металлов	42
3.5.2 Сенсор для бимодального детектирования пестицидов.....	43
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	46
4.1 Предпроектный анализ.....	46
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	46

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	47
4.2 SWOT-анализ	49
4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	51
4.4 Инициация проекта.....	53
4.4.1 Цели и результаты проекта	53
4.4.2 Организационная структура проекта	54
4.5 Бюджет научного исследования	56
4.5.1 Расчет затрат на оборудование для выполнения научно-экспериментальных работ	57
4.5.2 Основная заработная плата исполнителей проекта	58
4.5.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	60
4.5.4 Отчисления во внебюджетные фонды	60
4.5.5 Накладные расходы.....	61
4.5.6 Формирование бюджета научно-исследовательского проекта.....	61
4.6 Оценка сравнительной эффективности научно-технического проекта.....	62
Заключение по разделу финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	63
5. Социальная ответственность	64
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	65
5.1.1 Основные права и обязанности работника	65
5.2 Производственная безопасность.....	66
5.3 Анализ выявленных вредных и опасных факторов	67
5.3.1 Вредные факторы.....	67
5.3.1.1 Недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны	67
5.3.1.2 Повышенный уровень электромагнитного излучения	71
5.3.1.3 Повышенный уровень шума на рабочем месте.....	73
5.3.1.4 Отклонения показателей микроклимата	74
5.3.1.5 Выполнение работы с химическими веществами и наноматериалами	75
5.3.2 Опасные факторы.....	76

5.3.2.1 Повышенная напряженность электрического поля или повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.....	76
5.3.2.2 Работа с лазерами.....	77
5.4 Экологическая безопасность.....	78
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	79
Заключение по разделу социальная ответственность	82
Список использованной в разделе социальная ответственность литературы	83
Заключение.....	84
Список публикаций	85
Список использованной литературы	86
Приложение А.....	91

Введение

Стремительный рост индустрии производства электронных устройств в последние несколько десятилетий, без сомнений, откликнулся и в направлении научных исследований. Так, на данный момент публикуется множество работ публикуется в области исследования энергонакопителей, возобновляемых источников энергии, создания новых функциональных материалов с адаптированными под запросы индустрии свойствами и т. д.

Помимо этого, интенсивно ведутся исследования по созданию и изучению новых функциональных материалов, превосходящих по своим конкретным свойствам уже существующие. Производство электронных устройств заинтересовано в появлении высокопроводящих механически и химически стабильных материалов для создания гибких носимых устройств.

Углеродные материалы в данном контексте являются одними из наиболее перспективных из-за обилия их аллотропных модификаций, что позволяет варьировать свойства в широком диапазоне. Также варьирование свойств достигается путем модификации углеродных материалов различными способами.

В данной работе будут рассмотрены несколько подходов к модификации графена: химическая функционализация с различными заместителями и получение графена путем лазерной обработки полимеров, с детальным анализом свойств последнего и возможностей для их варьирования. Также будет предложен новый подход к получению подобного материала, с полной его характеристикой.

1. Обзор литературы

1.1. Получение проводящих графеноподобных материалов методом лазерной обработки

Большую исследовательскую нишу заняли работы, посвященные углеродным материалам, старт развития которым дало экспериментальное открытие уникальнейшего материала - графена [1].

Графен привлек внимание благодаря своим исключительным свойствам, а именно: высокой прочностью, теплопроводностью, и электрической проводимостью [2]. Но, в то же время графен имеет определенные недостатки, затрудняющие расширение его использования в производстве. К таким свойствам относятся гидрофобность, и несовершенство методов получения высокочистого графена [3]. В основном, невозможность масштабирования обусловлена именно гидрофобностью, которая не позволяет создавать стабильные суспензии, что значительно усложняет работу с материалом и делает невозможным получение листов большого размера.

Перечисленные особенности привели к росту количества работ по различной функционализации графена с целью изменения его свойств. Так, одним из самых широко распространенных графеноподобных материалов является оксид графена - графен содержащий кислородсодержащие группы (карбоксильные, гидроксильные, эпоксидные и др.) на базальной плоскости и по краям (Рис. 1а) [4,5]. Наличие кислородсодержащих групп делает материал гидрофильным [6] и удобным в использовании, но при этом нарушает электрическую проводимость, вследствие отсутствия делокализованных электронов. Для получения проводящих структур на основе данного материала, он подвергается восстановлению, путем подвода

внешней энергии различными способами [7–9]. Одним из таких способов является лазерная обработка [10]. Под воздействием лазерного излучения происходит локальный нагрев материала и, в зависимости от длины волны излучения, сопутствующая ионизации и другие фотохимические процессы - то есть происходит удаление кислородсодержащих групп и восстановление близкой к графену электропроводящей структуры [9]. При этом полное восстановление до графена невозможно, так как изначально при синтезе используются сильные окислители [11], и лазерная обработка вносит существенное количество дефектов в структуру.

Другим подходом к функционализации графена является использование диазониевых солей. Функционализация происходит путем присоединения арильных групп на поверхность и в межслойное пространство графитового электрода с последующим отшелушиванием его частей в процессе электрохимического синтеза (Рис. 16)[12]. Данный материал обладает рядом преимуществ над вышеупомянутыми, например, функционализация солями диазония с различными заместителями у бензольного кольца позволяет варьировать свойства получаемого функционализированного материала [13]. Так использование 4-карбокситетраазолия тозилата приводит к получению гидрофильного материала, в то время как 4-бутилбензолдиазоний тозилат наоборот придает материалу гидрофобность. Восстановление близкой к графену структуры производится такими же путями, как и для оксида графена, что тоже в конечном итоге приводит к восстановлению проводимости.

Стоит также отметить, что для обоих упомянутых материалов варьирование параметров лазерной обработки (плотность мощности, частота лазерных импульсов, длина волны излучения и т.д.) приводит к различной степени восстановления, то есть позволяет контролировать

свойства конечных проводящих структур [14–16]. Данная возможность несомненно является огромным преимуществом, так как путем несложных манипуляций можно достаточно точно изготовить структуры под каждую конкретную задачу.

Все же, как уже было упомянуто, полное восстановление функционализированного графена невозможно, что отражается в более низкой проводимости и изменении структурных свойств. Наиболее близкие к идеальной графеновой решетке структуры получаются путем лазерного облучения некоторых полимеров и других углеродсодержащих материалов (полиимид, фенольная смола, древесина и т.д.) [17]. Рассмотрим механизм формирования так называемого лазерно-индуцированного графена (ЛИГ) на примере полиимида. В данном случае будет рассмотрен фототермический механизм, так как механизм формирования описан в основном только для теплового взаимодействия лазера с полимером. Пренебрежение фотохимическим эффектом обосновывается тем, что в большинстве работ используется CO₂ лазер длина волны которого равна 10,6 мкм, то есть энергии кванта будет недостаточно для активации фотохимических процессов. *J. Lin et al.* в своей работе показали, что тепловое воздействие лазера приводит к быстрому локальному нагреву полимера (температура достигает значений более 2500°C), что приводит к разрушению присутствующих в структуре C-O, C=O и C-N связей, продукты разрушения которых удаляются в газообразном состоянии. В тоже время ароматические составляющие формируют графеноподобную решетку, причем интенсивное выделение газа препятствует ее окислению [18]. Все же ЛИГ имеет отличное от графена строение кристаллической решетки, а именно вместо гексагональной решетки ЛИГ имеет гибридную гексагональную и пентагональную-гептагональную кристаллическую

решетку, обусловленную недостаточным временем теплового воздействия для полной реконструкции бензольных колец (Рис. 1в)[17].

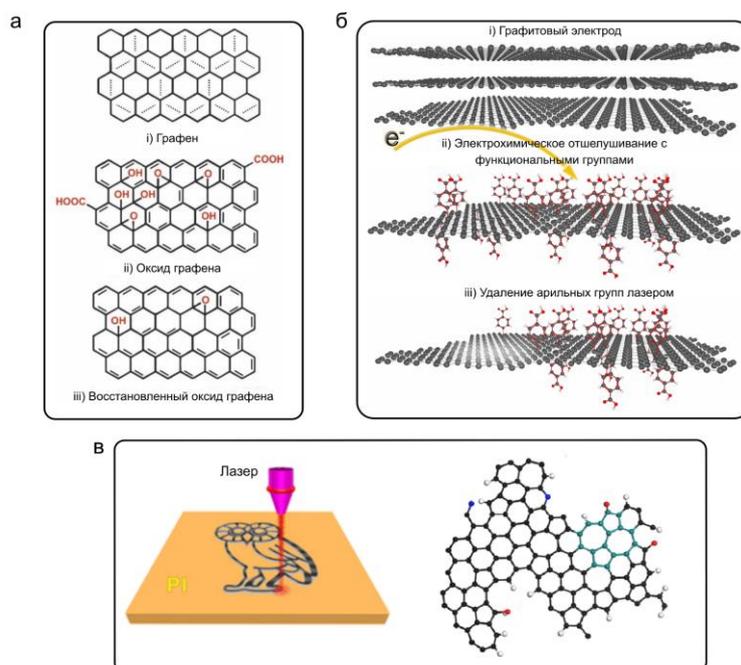


Рисунок 1. Структурные особенности и схемы получения различных графеноподобных материалов а) структура (i) графена; (ii) оксида графена; (iii) восстановленного оксида графена [19]; б) процесс функционализации графена арилдиазониевыми солями: (i) графитовый электрод, используемый как прекурсор графена; (ii) функционализация графена арильными группами; (iii) восстановления близкой к графену структуры лазерной обработкой [12]; в) схема получения ЛИГа из полиимида и его кристаллическая структура [17,20].

1.2. Свойства лазерно-индуцированного графена

Помимо структурных особенностей ЛИГ завоевал внимание исследователей благодаря своим свойствам, делающим данный материал перспективным для применения в различных областях. Так, например, высокая пористость и большая площадь поверхности обуславливают интерес к нему в сфере исследования энергонакопителей.

Так различные свойства материала и их комбинации являются критичными с точки зрения его востребованности, поэтому стоит подробнее остановиться на их рассмотрении.

1.2.1. Морфологические свойства

Как уже было упомянуто свойства поверхности играют критическую роль для углеродных материалов, поэтому существует огромное количество работ посвященных их исследованию.

В случае с ЛИГ поликристалличность оказывает положительное влияние на свойства поверхности. Так, появление в решетке пентагональных и гептагональных ячеек в совокупности с интенсивным выделением газа в процессе облучения позволяет получить высокоразвитую пористую поверхность (Рис. 2а) с удельной площадью поверхности $\sim 340 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ и размером пор менее 9 нм [18].

Учитывая то, что формирование ЛИГа, его поверхность, структура и т.д. зависят от параметров лазерной обработки полимера существует возможность их контроля. Так, например, *L. Duy et al.* показали как варьирование параметров лазерной обработки влияет на морфологию поверхности получаемого ЛИГа. Последовательно увеличивая плотность энергии излучения для обработки полиимида было выявлено три морфологических разновидности ЛИГа. Первоначально, превышая порог плотности энергии необходимой для запуска процесса графитизации получается чешуйчатая структура (Рис. 2б). Последующее увеличение данного параметра приводит к формированию каплеобразной структуры (Рис. 2в) или волокнистой вертикально-ориентированной (Рис. 2г), высота волокон достигает до 1 мм [21].

Также влияние на морфологию поверхности оказывает прекурсор используемый для получения ЛИГа. Все вышеупомянутые структуры были получены на полиимиде, но как не странно ЛИГ можно получать из большого количества органических материалов. Y. Chuan с соавторами продемонстрировали возможность образования ЛИГа на предметах человеческого быта - пробке, картофеле и бумаге [22]. Полученные ими морфологии поверхности показаны на рисунке 2д-ж соответственно.

Кроме того морфология поверхности также зависит от атмосферы в которой производится лазерное облучение. Y. Li с соавторами показали данную зависимость. В своей работе они продемонстрировали различие в морфологии поверхности ЛИГа получаемого в средах восстановителей, окислителей и инертных газов. Так в атмосфере окислителей (O_2) поверхность получается более шероховатой, в то время как в атмосфере водорода наблюдается формирование иерархических наноструктур, являющихся нетипичными для графеновых материалов. Формирование нетипичных структур также наблюдается в инертной атмосфере, различие лишь в том что данные структуры имеют размер в микрометровом диапазоне [23].

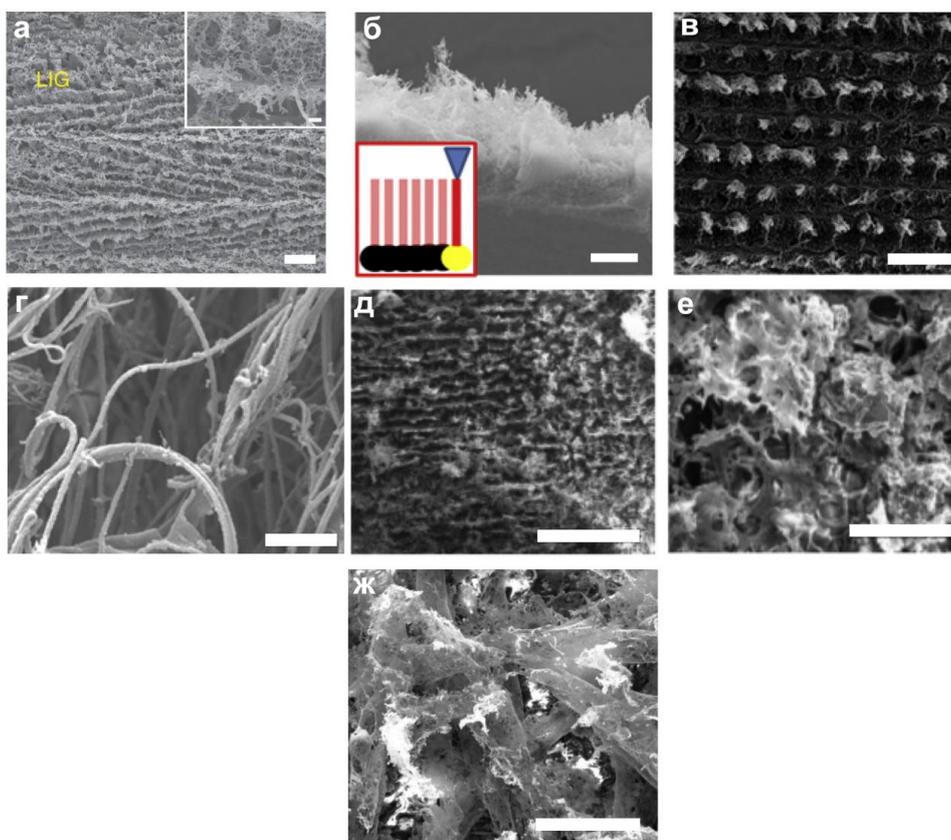


Рисунок 2. Морфология поверхностей ЛИГа, получаемых при различных условиях а) чешуйчатая структура поверхности, шкала 10 мкм. На вставке показано изображение с большим увеличением, шкала 1 мкм [18]; б) вид чешуйчатой структуры поверхности в поперечном сечении образца, шкала 10 мкм [21]; в) каплеобразная морфология поверхности, шкала 100 мкм [21]; г) волокнистая структура поверхности, показанная в поперечном сечении образца, шкала 2 мкм [21]; д) морфология поверхности ЛИГа полученного на пробковом дереве, шкала 500 мкм [22]; е) морфология поверхности ЛИГа полученного на картофеле, шкала 100 мкм [22]; ж) морфология поверхности ЛИГа полученного на бумаге, шкала 50 мкм [22].

1.2.2. Смачиваемость поверхности

Во многом применение того или иного материала определяется смачиваемостью его поверхности. Так, например, для носимой электроники, находящейся в прямом контакте с кожей человека, важно

иметь гидрофобную поверхность для предотвращения роста бактерий, в то время как для *in-vivo* устройств наоборот необходимо иметь гидрофильную поверхность.

С данной точки зрения ЛИГ имеет преимущество, так как уже неоднократно была показана возможность варьирования смачиваемости путем применения различных подходов [24,25].

Одним из таких подходов является пошаговая лазерная обработка, для получения иерархической периодической структуры. При первом проходе вся поверхность полиимида подвергается лазерной обработке, то есть вся его поверхность подвергается графитизации. Вторым же проходом создается периодическая структура (Рис. 3а). За счет перепада высот в периодической структуре изменяется контактный угол, в зависимости от параметров облучения, от 71° до 150° (Рис. 3в – д) [26].

Также изменения в смачиваемости, связанные с изменениями в морфологии и поверхностной химии, наблюдаются при варьировании плотности импульсов лазерного излучения. В данном случае смачиваемость меняется в еще большем диапазоне от супергидрофильной поверхности (контактный угол 0°) до супергидрофобной (контактный угол 150°) (Рис.3б) [27].

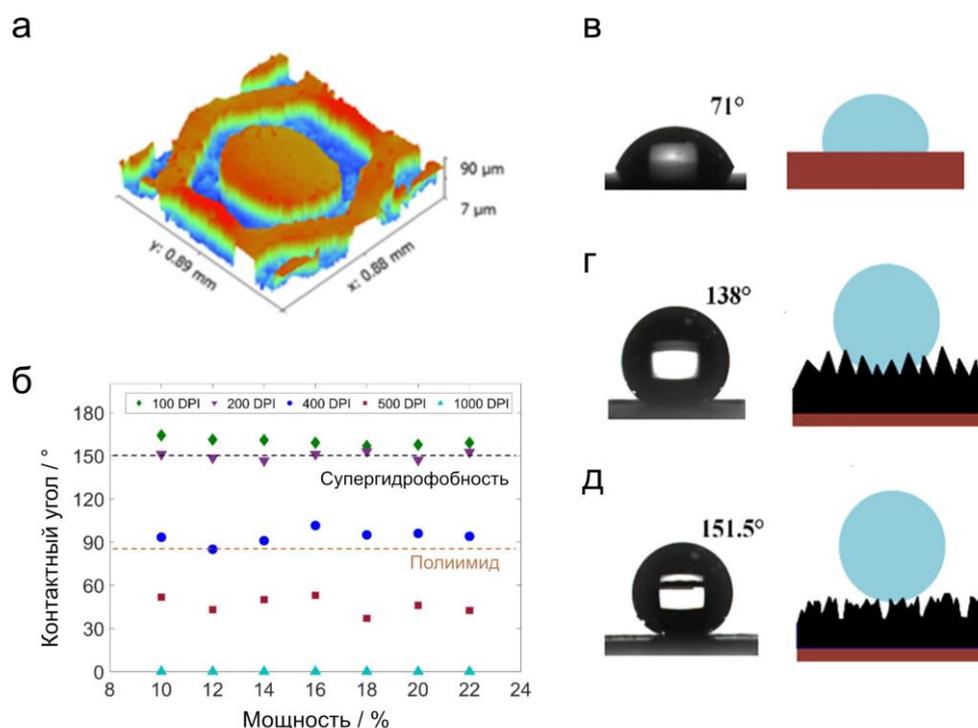


Рисунок 3. Подход к контролированию смачиваемости поверхности а) морфология периодической награвированной структуры, позволяющей варьировать смачиваемость поверхности [26] б) зависимость изменения контактного от мощности и количества импульсов [27]; в-д) изменения контактного угла при увеличении шероховатости поверхности [26]

1.2.3. Электрические свойства

Из проведенного выше анализа свойств ЛИГа видна их сильная зависимость от многих факторов (используемый прекурсор, параметры лазерного излучения, атмосфера и т.д.). Данная тенденция сохраняется и в изменение электрических свойств.

Используемые прекурсоры являются диэлектриками (поверхностное сопротивление полиимида >90 МОм/кв), в то время как получаемый на них ЛИГ имеет сопротивление на несколько порядков ниже (десятки-сотни Ом/кв). Высокая проводимость ЛИГа, также как и в графене, обуславливается делокализованными электронами.

Рассмотрим несколько конкретных примеров влияния различных факторов на электрическую проводимость. Зависимость поверхностного сопротивления от мощности лазерного излучения отражается во большом количестве работ [18,22,28–30]. Унифицировать данные получаемые разными группами довольно сложно, хоть и в большинстве своем все используют CO₂ лазеры, существует отличие в длине волны, размерах и равномерности пучка и т.д. Но все же среди всех работ наблюдается общий тренд в существовании некоего порогового значения мощности (плотности мощности) при котором значение поверхностного сопротивления прекращает уменьшаться, а наоборот начинает расти (Рис. 4). Связанно это с тем, что более высокие мощности стимулирует более интенсивное дефектообразование и более интенсивную абляцию материал.

1.2.4. Электрохимические свойства

В большинстве своем в работах, посвященных изучению ЛИГа, рассматриваются следующие электрохимические свойства:

- удельная емкость
- электроактивная площадь поверхности
- циклическая стабильность
- плотность энергии и мощности накапливаемой на материале

Изучение именно этих свойств тесно связано с основными применениями и перспективными направлениями исследований данного материала.

В связи с количеством опубликованных работ в данной области, провести сравнительный анализ электрохимических свойств практически не представляется возможным. Кроме того отсутствует унифицированная системы представления и нормирования результатов, так часть работ в

качестве удельной емкости использует ее нормирование на единицу массы, другая же часть нормирует значения на единицу площади.

Все же сравнительный анализ необходимо провести, для этого в таблице 1 представлен анализ небольшой выборки работ.

Таблица 1. Сравнительный анализ электрохимических свойств лазерно-индуцированного графена.

Описание	Удельная емкость	Комментарии	Источник
LIG-PANI	361 мФ/см ²	Полимерный электролит H ₂ SO ₄ /ПВС. Планарный конденсатор.	[31]
LIG-MnO ₂	934 мФ/см ²	Полимерный электролит H ₂ SO ₄ /ПВС. Планарный конденсатор.	[31]
LIG-PDMS	650 мкФ/см ²	Стандартный электролитический конденсатор. Гелевый электролит NaCl/ПВП	[32]
Листовой LIG	61,5 мкФ/см ²	Na ₂ SO ₄ . Планарный суперконденсатор.	[33]
Пористый LIG	134 мкФ/см ²	Na ₂ SO ₄ . Планарный суперконденсатор.	[33]
Игольчатый LIG	201 мкФ/см ²	Na ₂ SO ₄ . Планарный суперконденсатор.	[33]
LIG из фенольной смолы	0,78 мФ/см ²	Na ₂ SO ₄ . Планарный суперконденсатор.	[34]
LIG	22,9 мФ/см ²	КОН. Планарный	[29]

		суперконденсатор	
--	--	------------------	--

2. Объект и методы исследования

2.1. Подготовка образцов

В качестве фототермического преобразователя для формирования лазерно-индуцированного графена использовались алюминиевые наночастицы

Коммерческие наночастицы алюминия (размер 20-70 нм) диспергировались в этиловом спирте с концентрацией 10 мг/мл. Суспензия помещалась в ультразвуковую ванну на 10 минут для достижения равномерного распределения наночастиц в этаноле. Пленка наночастиц осаждалась капельным методом на предварительно обезжиренную поверхность полиэтилентерефталата и высушивалась в нормальных условиях.

Процедура подготовки образцов с наночастицами серебра идентична, за исключением концентрации наночастиц в суспензии - 40 мг/мл.

2.2. Лазерное облучение пленок

Облучение пленок проводилось с помощью установки, в основе которой находится лазерный диод с рабочей длиной волны 438 нм. Управление установкой производится с компьютера, используя специальное программное обеспечение. Регулирование параметров облучения через программное обеспечение производится путем варьирования двух параметров в относительных единицах:

- параметр “Р” - показывающий относительную мощность лазера, %.

- параметр “D” - данный параметр регулирует количество импульсов в последовательности импульсов, параметр изменяется в диапазоне от 1 до 100.

Оптимизация параметров для дальнейшего использования производилась опытным путем, критерием сравнения параметров было выбрано сопротивление получаемых структур. Как оптимальными были выбраны параметры P-50 и D-20, что соответствует мощности лазерного излучения ~437 мВ (Рис. лазер).

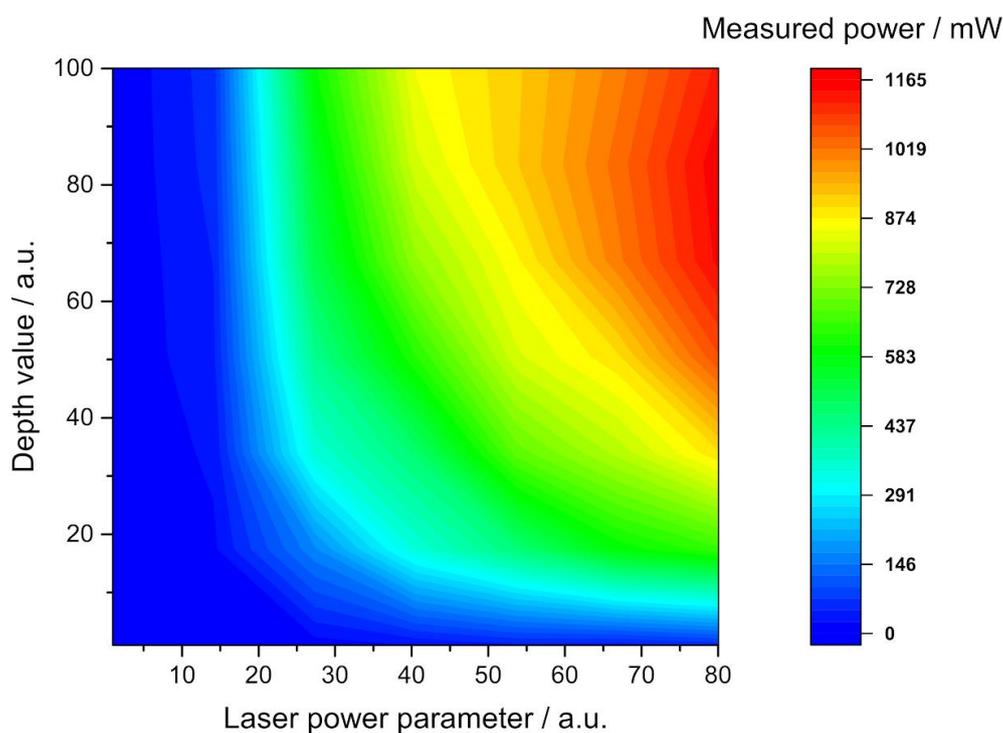


Рисунок 4. Соотношение параметров, задаваемых в программном обеспечении с выходной мощностью лазерного излучения

2.3. Изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и элементный анализ методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX)

Исследования морфологии поверхности производились на приборе Apreo S, Thermo Fisher Scientific SEM, на базе университета электронных наук и технологий Китая, Чэнду. Использовался детектор вторичных электронов, ускоряющее напряжение - 20 кВ. Для получения изображения с некоторых образцов использовалось золотое напыление.

2.4. Спектроскопия комбинационного рассеяния света

Для исследования структуры и химического состава получаемых образцов методом спектроскопии комбинационного рассеяния света проводились измерения на спектрометре DXR2xi Raman Imaging Microscope (Thermo Fisher Scientific U.S.A.) на базе ЦКП ТГУ. Длина волны возбуждающего излучения была 532 нм.

2.5. Электрохимические измерения

Электрохимические измерения проводились в стандартной трехэлектродной конфигурации на потенциостате-гальваностате Р-45Х с модулем измерения электрического импеданса FRA-24М производства компании Electrochemical instruments, г. Черноголовка, Россия. В качестве противоэлектрода использовалась платиновая спираль, хлорсеребряный электрод в качестве электрода сравнения и изготавливаемые электроды в качестве рабочего.

В работе использовались водные растворы следующих электролитов:

- 0,1М раствор гексацианоферрата калия $K_4[Fe(CN_6)]$.
- 1М раствор серной кислоты H_2SO_4

- Растворы CoSO_4 с различными концентрациями

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Анализ потенциальных потребителей результатов исследования дает представление о существующих на рынке решениях и конкурентоспособности продукта исследования в предполагаемых сферах его применения. С данной целью производится обзор целевого рынка и его сегментирование.

Цель данной работы состоит в исследовании электрохимических свойств углеродных электродов, получаемых по средствам технологии разработанной научной группой «TERS-team» в Томском политехническом университете. Данная технология представляет собой использование металлических наночастиц в качестве фототермического преобразователя для получения проводящих углеродных композитов с полимерными подложками с вкраплениями металлических наночастиц. Как таковая работа не направлена на получение готового продукта, а наоборот выполняется с целью изучения свойств нового материала и определения сфер его перспективного применения. Полученные результаты характеристики материала различными способами, показывают, что в перспективе материал может занять свою нишу в области энергонакопителей и сенсорики. Таким образом можно сказать, что

целевыми рынками для разработанного материала являются производители энергонакопителей (батарей, конденсаторов), производители электрохимических сенсоров и природоохранные учреждения, в которых используются упомянутые сенсоры.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Далее проведем анализ существующих конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Следует понимать, что исследования в области материаловедения, почти всегда несут за собой прикладной характер. Так создание нового материала или же улучшение тех или иных свойств существующего материала всегда будут интересны производителям и потребителям в определенных областях и исходя из этого необходимо периодически производить детальный анализ существующих на рынке конкурирующих решений. Проведение такого анализа позволит не только определять тренды развития рынка и вносить коррективы на всех этапах исследований, но и максимизировать выгоду от результата исследований. С позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения данный анализ удобно проводить с помощью оценочной карты (таблица 2).

Критерии оценки и сравнения подбираются с учетом выбранных объектов сравнения, особенностей их разработки и эксплуатации.

Конкурентоспособность разработки определяется исходя из следующей формулы:

$$K = \sum V_i B_i, \quad (3)$$

где K – конкурентоспособность продукта исследования; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -ого показателя.

В качестве конкурирующих технических решений взяты, лазерно-индуцированный композит металла с полимером (собственная разработка), лазерно-индуцированный графен (ближайший по свойствам и методам получения материал), наночастицы серебра мобилизованные на поверхности полиэтилентерефталата, соответственно.

Таблица 2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		БФ	БК1	БК2	КФ	КК1	КК2
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,04	5	4	4	0,2	0,16	0,16
2. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,07	4	3	4	0,28	0,21	0,28
3. Простота эксплуатации	0,18	5	5	4	0,9	0,9	0,72
4. Энергоэкономичность	0,05	4	4	3	0,2	0,2	0,15
5. Безопасность	0,15	3	4	3	0,45	0,6	0,45
6. Надежность	0,05	4	3	4	0,2	0,15	0,2
7. Массогабаритные параметры устройства	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,15	5	4	5	0,75	0,6	0,75
2. Цена	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
3. Уровень проникновения на рынок	0,1	3	3	3	0,3	0,3	0,3
Итого	1				4,33	4,02	3,76

Проведя анализ можно сделать заключение о конкурентоспособности разработки, находящейся на этапе лабораторных исследований. Полученные показатели объясняются простотой и дешевизной изготовления материала, а также его превосходными механическими и электрическими свойствами и универсальностью (возможность изменения химического состава наночастиц с целью получения желаемых свойств).

4.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ позволяет производить комплексный анализ внутренней и внешней среды научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ подразумевает под собой описание сильных и слабых сторон проекта, а также определение возможностей и угроз, как уже возникших, так и тех которые могут возникнуть (таблица 3).

Таблица 3. SWOT-анализ научно-исследовательского проекта.

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>C1. Сравнительно низкая стоимость по сравнению с другими разработками;</p> <p>C2. Простота эксплуатации;</p> <p>C3. Возможность варьирования используемых начальных компонентов, для оптимизации под каждую конкретную задачу;</p> <p>C4. Возможность использования в среде экологического контроля;</p> <p>C5. Наличие необходимого оборудования;</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Использование наночастиц, влияние которых на окружающую среду и человека на данный момент не до конца изучено;</p> <p>Сл3. Оборудование постоянно используется другими исследователями и инженерами;</p> <p>Сл4. Временная неисправность оборудования.</p> <p>Сл5. Длительность проведения некоторых анализов.</p> <p>Сл6. Низкая воспроизводимость</p>
--	--	---

	<p>С6. Квалифицированный персонал. С7. Низкая стоимость используемого оборудования.</p>	
<p>Возможности: В1. Использование инфраструктуры Научного парка ТПУ, Технологического университета г. Хемниц, Германия и ЦКП ТГУ; В2. Использование для детектирования различных видов загрязнителей, с применением методов машинного обучения; В3. Большой потенциал применения сенсоров в России и других странах.</p>	<p>Простота получения материала, а также в большинстве случаев (исключая наночастицы драгоценных металлов) низкая стоимость и доступность исходных компонентов, а так относительная дешевизна необходимого оборудования, открывает возможности для материала перехода из лаборатории в промышленное производство и даже домашнее изготовление. Теме же факторами может быть обусловлена заинтересованность</p>	<p>На начальном этапе разработки материала и его характеристики требуется дорогостоящее оборудование, не всегда находящееся в быстром доступе, что приводит к необходимости отправки образцов на анализ или же командированию человека для его проведения, что замедляет развитие проекта.</p>

	<p>потенциального пользователя для проведения быстрого анализа питьевой воды в домашних условиях.</p>	
<p>Угрозы: У1. Развитая конкуренция технологий в определенных перспективных областях применения; У2. Невозможность коммерциализации проекта из-за низкой воспроизводимости получаемых структур; У3. Потенциально возможные негативные последствия для окружающей среды</p>	<p>Получаемый материал, обладающих высокой пористостью поверхности и имеющий высокую электроактивную площадь, может заинтересовать людей, пользующих конкурирующими технологиями, что в свою очередь приведет к возникновению новых партнерских отношений.</p>	<p>Неизученность последствий воздействия наночастиц различного происхождения на окружающую среду и организм человека приводит к возникновению проблем с утилизацией и хранением получаемых отходов. Потенциальная невозможность полной оптимизации процесса изготовления материала, что не позволит решить проблему с воспроизводимостью.</p>

Таким образом SWOT-анализ показал, что сильными сторонами проекта являются низкая стоимость оборудования, необходимого для изготовления материала, а также низкие временные затраты. Кроме того, необходимость дорогостоящего оборудования на стадии характеристики материала могут обернуться приобретением новых партнеров.

4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

При разработке проекта на любой стадии жизненного цикла необходимо оценить степень готовности к коммерциализации, собственно на что и нацелена данная работа – изучение свойств материала с целью определения потенциальной области перспективного применения.

Для проведения оценки необходимо заполнить специальную форму оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации. В

таблице 4 представлен перечень вопросов, по которым необходимо произвести оценку.

Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (4)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Таблица 4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	2	2
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	1
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	2

11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	1
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	3
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
ИТОГО БАЛЛОВ		31	31

На основе данных, представленных в таблице 4, можно заметить, что большинство критериев не превышает трех баллов из пяти, что говорит о том, что проект находится на стадии реализации и пока не готов к коммерциализации, так как по сути находится на начальном этапе определения его перспективных областей применения.

4.4 Инициация проекта

4.4.1 Цели и результаты проекта

В таблице 5 представлена информация о заинтересованных сторонах проекта.

Таблица 5. Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Руководители проекта	Использование результатов исследования в дальнейших исследованиях и привлечение индустриальных партнеров
Исполнитель проекта	Повышение уровня квалификации благодаря работе в научной сфере
Спонсор проекта	Развитие российских научных исследований и программ. Повышение

	уровня качества научных исследований в стране
Научные центры и лаборатории	Использование полученного материала и данных о нем для более широкого спектра исследований в различных областях.

В таблице 6 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 6. Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Получение знания о электрохимических свойствах разработанного материала, с целью определения его перспективных областей применения и определения дальнейших направлений исследований
Ожидаемые результаты проекта:	Описание электрохимических свойств материала, в соответствии с запросами отраженными в литературе
Критерии приемки результата проекта:	Имеется описание и расчет эдектрохимических свойств материала, а также продемонстрировано его потенциальное применение за границами лаборатории
Требования к результату проекта:	Анализ поверхности
	Достоверность данных
	Имеются данные о воспроизводимости результата
	Использование сертифицированных методик при использовании материала в конкретном случае

Анализируя таблицы 5 и 6 можно сказать о том, что выполнение поставленных задач поможет не только определить направления развития проекта, но и позволит продемонстрировать готовое к использованию устройство.

4.4.2 Организационная структура проекта

В таблице 7 приведена информация о рабочей группе проекта, ролях, функциях и трудозатратах каждого.

Таблица 7. Рабочая группа проекта

Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, день
Научный руководитель – Родригес Р.Д.	Определение темы исследования, постановка задачи и целей проекта, консультирование исполнителей проекта, участие в обсуждениях по результатам работы, промежуточная проверка достигнутых результатов	22
Исполнитель по проекту – Фаткуллин М. И.	Подготовка литературного обзора для проведения сравнения с конкурирующими материалами и определения наиболее важных свойств материалов в области энергонакопителей и сенсорики. Проведение необходимых для достижения цели экспериментов и расчетов. Обработка полученных данных.	83
Итого:		105

Планирование этапов работ по выполнению НИР включает в себя составление тщательное планирование необходимых работ и составление календарного плана для их выполнения (таблица 8).

Таблица 8. Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Постановка задачи	5	1.02.2021	5.02.2021	Родригес Р.Д. Фаткуллин М. И.
2	Обзор литературы	54	6.02.2021	31.03.2021	Фаткуллин М. И.
3	Составление плана работ	6	5.02.2021	10.02.2021	Родригес Р.Д. Фаткуллин М. И.

4	Проведение серии экспериментов	42	1.04.2021	12.05.2021	Родригес Р.Д. Фаткуллин М. И.
5	Анализ результатов	42	1.04.2021	12.05.2021	Родригес Р.Д. Фаткуллин М. И.
6	Обсуждение результатов	12	1.05.2021	12.05.2021	Родригес Р.Д. Фаткуллин М. И.
7	Оформление расчетно-пояснительной записки	18	3.05.2021	20.05.2021	Фаткуллин М. И.
8	Сдача отчета о работе	4	21.05.2021	24.05.2021	Фаткуллин М. И.

4.5 Бюджет научного исследования

Немаловажным этапом при выполнении проекта является планирование бюджета, необходимого на его реализацию. Бюджет составляется путем определения необходимых материалов, средств и оборудования с учетом амортизации. Также следует учитывать заработную плату участников проекта и другие статьи расходов.

Сырье, материалы, специальное оборудование, покупные изделия

Данная статья расходов включает стоимость всех материалов, которые были использованы при разработке проекта. Расчет материальных затрат вычисляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи} , \quad (5)$$

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 (15-25% от стоимости материалов).

Таблица 9. Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
ПЭТ	шт.	1 шт.	94 3,0	943,0
Наночастицы серебра	кг.	0,05 кг.	24250,0	1212,5
Этанол	л.	0,1 л.	900,0	90,0
Предметные стекла	уп.	1 уп.	18 90,0	378,0
Эшпендорфы 1,5 мл	уп.	1 уп.	604,0	604,0
Наконечники для дозаторов (0,1-200 мкл)	уп.	1 уп.	7500,0	7500,0
Перчатки одноразовые латексные	уп.	1 уп.	1450,0	1450,0
ИТОГО:				12177,5

4.5.1 Расчет затрат на оборудование для выполнения научно-экспериментальных работ

В данную статью были включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, устройств и механизмов). При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного научного проекта и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в виде амортизационных отчислений.

Сумма амортизационных отчислений определяются по формуле:

$$E_{ам} = (\sum K_{об} \cdot N_{ам} \cdot T_{об}) / (365 \cdot 100), \quad (6)$$

где $K_{об}$ – стоимость единицы прибора или оборудования, руб.;

$N_{ам}$ – норма амортизации прибора или оборудования, %;

$T_{об}$ – время использования оборудования, дни.

Результаты расчетов амортизационных отчислений представлены в таблице 10.

Таблица 10. Расчет затрат на амортизационные расходы

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц обор. шт.	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Кол-во дней работы оборуд., дней	Норма амортиз. оборуд., %	Сумма амортиз. отчислений, руб.
1	Дозатор	1	7,850	42	10,0	90,33
2	Лазерный гравер	1	7,335	42	18,0	1,52
3	Потенциостат-гальваностат	1	479,000	15	18,0	55,12
5	УЗ ванна	1	3,500	42	18,0	0,72
6	Рамановский спектрометр NT-MDT SI	1	8592,000	10	18,0	42371,5
7	Аналитические весы (Adventure)	1	46,140	15	12,0	227,54
8	Персональный компьютер	1	127,000	83	10,0	2887,95
ИТОГО:						45634,68

4.5.2 Основная заработная плата исполнителей проекта

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

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (7)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20% от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (8)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (6);

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (9)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года, 10,4;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (примем для научного руководителя $F_d=95$, для инженера $F_d=87$).

Месячный оклад работника рассчитывается как:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p, \quad (10)$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент;

k_d – коэффициент доплат и надбавок;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в табл. 10.

Таблица 11. Расчет основной заработной платы1

Исполнители	Разряд	$Z_{\text{тс}}$, руб.	$k_{\text{пр}}$	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{\text{дн}}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	профессор	49141	0,1	0,05	1,3	73466	3372	22	74184

1 Данные взяты согласно «Положению об оплате труда» планового финансового отдела ТПУ.

Магистрант	инженер	17890	0,1	0,05	1,3	26746	1228	83	101924
Итого									176108

4.5.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде. Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении проекта:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (11)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (примем 0,15).

$$Z_{\text{доп.рук.}} = 0,15 \cdot 74184 = 11127,6$$

$$Z_{\text{инженера}} = 0,15 \cdot 101924 = 15288,6$$

4.5.4 Отчисления во внебюджетные фонды

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. Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 12.

Таблица 12. Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	74184	11127,6
Инженер (студент)	101924	15288,6
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302	
Итого:		61162,13

4.5.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, электроэнергии и др. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (13)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (примем равным 15%).

Таким образом, накладные расходы на данные НТИ составляют 30378,63 рубля.

4.5.6 Формирование бюджета научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблица 13.

Таблица 13. Бюджета научно-технического проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты НТИ	12177,5

Амортизация специального оборудования	45634,68
Затраты по основной заработной плате исполнителей проекта	176108
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	26416,2
Отчисления во внебюджетные фонды	61162,13
Накладные расходы	30378,63
Итого бюджет затрат НИИ:	351879,14

4.6 Оценка сравнительной эффективности научно-технического 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 финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} , \quad (14)$$

где I_{Φ}^p – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

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

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p , \quad (15)$$

где I_m^a – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведен в форме таблицы 14.

Таблица 14. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	5	4	4
2. Простота эксплуатации	0,15	4	5	4
3. Энергосбережение	0,05	4	4	4
4. Надежность	0,1	4	3	4
5. Безопасность	0,15	3	3	3
5. Конкурентоспособность продукта	0,2	5	4	4
6. Цена	0,2	4	3	3
ИТОГО	1	31	26	28

$$I_{m.n.} = 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,05 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 = 4,5;$$

$$I_{исп.2} = 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,05 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 = 3,7;$$

$$I_{исп.3} = 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,05 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 = 4$$

Из расчетов выявлено, что текущий проект по интегральному показателю ресурсоэффективности вариантов является выгодным и превосходит аналоги. Так как данный проект является только научной разработкой и началом исследования, то интегральный финансовый показатель разработки рассчитать не представляется возможным.

Заключение по разделу финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данном разделе бы проведен сравнительный анализ проекта с существующими конкурентами. Анализ показал полную конкурентоспособность исследуемого материала.

Что касается коммерциализации, то на данном этапе развития проекта сложно что-то говорить об этом, так материал все еще исследуется.

5. Социальная ответственность

В рамках данного раздела рассмотрены вопросы, связанные с охраной труда в аудиториях 306 и 207 Научного парка ТПУ, а также аудиторий Технического университета г. Хемниц, Германия и правила поведения при возникновении опасных ситуаций. Проведен анализ вредных и опасных факторов и их воздействие на студента, занимающегося исследованиями в вышеупомянутых помещениях, а также методы обеспечения безопасности на рабочем месте.

Научно-исследовательская работа представляет собой изучение электрохимических свойств полученных в лабораторных условиях новых углеродных материалов, с целью определения их наиболее перспективного применения. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью более детального изучения полученных материалов для подтверждения их значимости в той или иной области науки и техники, так как первые этапы характеристики показали потенциальную возможность применения материала в области энергонакопления и сенсорики.

Электрохимические исследования выполняются при помощи потенциостата-гальваностата Р-45Х с модулем измерения импеданса FRA-24V, контроль которого производится с компьютера. Получение исследуемых материалов производится на лазерном гравере Twowin 3000 mW Mini laser Machine. В соответствии с ГОСТ 12.1.005 – 88 данные работы относятся к разряду легких, но носят характер высокой умственной и нервнопсихологической нагрузки.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Основные права и обязанности работника

Согласно Трудовому Кодексу Российской Федерации N 197-ФЗ, работники лаборатории №306 имеют право на:

- рабочее место, соответствующее государственным нормативным требованиям охраны труда и условиям, предусмотренным коллективным договором;

- полную достоверную информацию об условиях труда и требованиях охраны труда на рабочем месте, включая реализацию прав, предоставленных законодательством о специальной оценке условий;

- подготовку и дополнительное профессиональное образование в порядке, установленном настоящим Кодексом, иными федеральными законами.

В свою очередь работник обязан выполнять следующие обязательства:

- добросовестно исполнять свои трудовые обязанности, возложенные на него трудовым договором;

- соблюдать правила внутреннего трудового распорядка и трудовую дисциплину

- выполнять установленные нормы труда;

- соблюдать требования по охране труда и обеспечению безопасности труда;

- незамедлительно сообщить работодателю либо непосредственному руководителю о возникновении ситуации, представляющей угрозу жизни и здоровью людей, сохранности имущества работодателя (в том числе имущества третьих лиц, находящегося у работодателя, если работодатель несет ответственность за сохранность этого имущества).

5.2 Производственная безопасность

Объектами исследования являются потенциостат-гальваностат Р-45Х с модулем измерения импеданса FRA-24V и лазерный гравер Twowin 3000 mW Mini laser Machine, а также химические вещества, используемые в процессе электрохимических исследований. Вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть в процессе работы с указанными приборами и веществами приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при выполнении работ.

	Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
		Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1)	Недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СНиП 23-05-95
2)	Повышенный уровень электромагнитных излучений	+	+	+	ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ
3)	Повышенный уровень шума на рабочем месте	+	+		ГОСТ 12.1.003-2014; СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32- 2002

4)	Отклонения показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96
5)	Выполнение работ с химическими веществами и наноматериалами		+	+	ГОСТ 12.1.007-76; ГОСТ 12.1.005-88; ГОСТ Р 54617.2-2011; ГОСТ Р 56748.1-2015.
6)	Повышенная напряженность электрического поля или повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека		+	+	ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ
7)	Работа с лазерами		+		СанПиН 5804-91

5.3 Анализ выявленных вредных и опасных факторов

5.3.1 Вредные факторы

5.3.1.1 Недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны

Рабочая зона представляет собой химическую лабораторию с источниками искусственного и естественного освещения, рабочими зонами в котором являются химические столы и вытяжные шкафы, но при этом вытяжные шкафы оборудованы дополнительными источниками света, поэтому далее они учитываться не будут

В помещениях должна быть обеспечена освещенность посредством искусственного освещения, позволяющая выполнять операции и наладку

оборудования без возникновения производственных дефектов и производственного травматизма, вызванных недостаточной освещенностью. Недостаточная освещенность отнесена к вредным факторам при выполнении работ высокой точности, в том числе исследовательская деятельность. Работа в таких условиях в первую очередь наносит ущерб зрению человека, за счет возникновения перенапряжения глаз. Для предотвращения возникновения пагубных последствий для зрения человека требуется использование дополнительных источников света, например настольных ламп.

Помимо перенапряжения глаз, недостаточная освещенность может привести к ослаблению внимания и преждевременной утомляемости. Стоит отметить, что, чрезмерно яркое освещение также может вызвать неприятные последствия, такие как ослепление, резь в глазах и раздражение. Также с использованием освещения на рабочем месте может быть связано появление теней или сильных отблесков, что может вызвать дезориентацию человека. Освещение в помещениях регламентируется документом СП 52.13330.2016. Нижний порог освещенности для лабораторного помещения, в котором происходит периодическое наблюдение за ходом эксперимента при постоянном нахождении людей, согласно СНиП 23-05-95, равен 150 лк.

Исходя из проведенного выше анализа возникновения возможных последствий, связанных с недостаточностью или же избыточной освещенностью при работе в лаборатории следует использовать совмещенное освещение. Использование исключительно естественного освещения не может обеспечить необходимую освещенность на рабочем месте и обеспечить безопасность проведения работ, но в то же время естественное освещение является для человека наиболее благоприятным и

физиологически необходимым. Недостаток освещенности от естественного света компенсируется искусственным освещением. Основываясь на необходимости достижения наибольшей равномерности освещения целесообразнее всего будет использование комбинированного искусственного освещения, которое по мимо всего прочего также позволит выделить отдельные объекты и зоны. Согласно СП 52.13330.2011 качестве источника света в лаборатории рекомендуется использовать газоразрядные лампы низкого давления белой цветности.

Проведем расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности аудитории 207 научного парка ТПУ выполняется методом коэффициента светового потока. Длина помещения $A = 7$ м, ширина $B = 6$ м, высота $H = 3.5$ м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1$ м.

Рассчитаем площадь помещения

$$S = A \cdot B = 7 \cdot 6 = 42 \text{ м}^2, \quad (16)$$

где S – площадь помещения, м^2 ; A – длина помещения, м; B – ширина помещения, м;

Коэффициент отражения побеленных стен с окнами без штор $\rho_c = 50\%$, побеленного потолка $\rho_{\text{п}} = 70\%$. Также необходимо учитывать загрязнение светильников в помещении с малым выделением пыли и заложить в расчет коэффициент запаса, который равен $K_3 = 1,5$. В помещении установлены люминесцентные лампы, для которых коэффициент неравномерности освещения равен $Z = 1,1$.

Для расчета выберем лампу ЛД-40 со световым потоком 2300 лм и мощностью 40 Вт. Также выберем светильник типа ОД – 2-40 с двумя лампами, размерами 1230*266 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , примем ее равной 1,2. Расстояние светильников от перекрытия $h_c = 0,3$ м.

Рассчитаем высоту светильников над рабочей поверхностью

$$h = h_n - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,3 = 2,2 \text{ м}, \quad (17)$$

где h – высота светильников над рабочей поверхностью, м; h_n – высота светильников над полом, для двухламповых светильников ОДОР не менее 3,5 м; h_p – высота рабочей поверхности, м.

В рассматриваемом помещении находятся 6 светильников.

Рассчитаем индекс помещения

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A+B)} = \frac{7 \cdot 6}{2,2 \cdot (7+6)} = \frac{42}{28,6} \approx 1,5; \quad (18)$$

Для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при $\rho_c = 50\%$ и $\rho_{\Pi} = 70\%$ коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп падает на рабочую поверхность, равен $\eta = 0,45$.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника

$$\Phi_{\Pi} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot Z \cdot K_3}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,45} = 1925, \quad (19)$$

Выполним проверку произведенных расчетов исходя из критерия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% \leq 20\%, \quad (20)$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{2300 - 1925}{2300} \cdot 100\% = 16,3\%, \quad (21)$$

Таким образом, проверка удовлетворяет условиям, из чего можно сделать вывод о соблюдении требования предъявляемы к освещению на рабочем месте.

5.3.1.2 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Воздействие электромагнитного излучения может оказать пагубное влияние на организм человека в целом, а также и на отдельные его системы и органы. Последствия такого воздействия зависят от внушительного количества внешних и внутренних факторов, таких, например, как интенсивность, длительность воздействия и частота действующего излучения.

Наиболее уязвимы для подобного рода воздействий нервная и сердечно-сосудистая системы человека. Первыми признаками воздействия электромагнитного излучения принято считать появление головной боли, головокружения, слабости и нарушения сна. Со стороны сердечно-сосудистой системы в первую очередь наблюдается изменение (повышение или понижение) артериального давления. Более длительное воздействие приводит к замедлению пульса, болям в сердце, выпадению волос и ломкости ногтевых пластин. Данные изменения являются обратимыми при своевременном прекращении негативного воздействия на организм человека и проведении необходимой терапии. Пренебрежение или же отсрочка терапии могут привести к необратимым для организма последствиям.

В процессе выполнения исследовательской работы, был задействован ряд устройств, являющихся источниками электромагнитного излучения. Данными устройствами являются лазерный гравер, установка Рамановской спектроскопии (необходимо наличие лазера), а также монитор компьютера. Мониторы компьютера имеют излучение в оптическом диапазоне (ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучение). Лазерные источники, используемые в данной работе, излучают только в видимом и инфракрасном диапазоне (450 нм для лазерного гравера, 633 и 780 для рамановского спектрометра). В таблице 2 представлены предельно допустимые нормы напряженности электромагнитного излучения и его компонент в соответствии с СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03.

Таблица 16. Предельно-допустимые нормы электромагнитного излучения

Напряженность электрического поля	
В диапазоне частот от 5 Гц до 20 кГц	25 В/м
В диапазоне частот от 20 кГц до 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	
В диапазоне частот от 5 Гц до 20 кГц	250 нТл
В диапазоне частот от 20 кГц до 400 кГц	25 нТл

К мерам защиты от электромагнитного излучения относят нахождение на безопасном расстоянии (в случае с монитором), отслеживание времени воздействия, экранирование источников излучения, а также использование индивидуальных средств защиты, таких как защитные очки, специализированная одежда и обувь.

5.3.1.3 Повышенный уровень шума на рабочем месте

Источниками шума в лабораторных условиях являются системы охлаждения приборов, роторные испарители, вакуумные насосы и компрессоры, сушильные шкафы, система вентиляции и т. д.?

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума - уровень вредного фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений.

Негативное воздействие повышенного уровня шума в первую очередь проявляется в появлении рассеянности внимания и замедление реакции, что приводит к совершению ошибок, которые в некоторых случаях могут вызвать непоправимые последствия. Реакция организма на повышенный уровень шума проявляется в различных системах, так повышенный уровень шума вызывает угнетение центральной нервной системы, с которой связаны вышеупомянутые последствия. Со стороны сердечно-сосудистой системы типичной реакцией является замедление пульса, при постоянном воздействии происходит развитие различных сердечно-сосудистых заболеваний, например гипертонии. Также повышенный уровень шума оказывает пагубное влияние на обмен веществ и может вызывать заболевания желудочно-кишечного тракта.

Регламентируется ПДУ документами ГОСТ 12.1.003-2014 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002, в соответствии с которыми максимальный уровень постоянного шума на рабочих местах не должен превышать 80 дБА.

Измеренные в лабораториях уровень шума не превышает отметки в 70 дБА, то есть соответствует установленной норме.

При отклонении от нормативного значения необходимо использование коллективных и индивидуальных средств защиты (СКЗ и СИЗ соответственно). Ниже приведены необходимые СКЗ и СИЗ.

Средства коллективной защиты: изоляция источников шума используя звуко- и виброизоляционные устройства и материала.

Средства индивидуальной защиты: применение спецодежды, спецобуви и специализированных защитных средств для органов слуха, таких как звукоизолирующие наушники, беруши, антифоны.

5.3.1.4 Отклонения показателей микроклимата

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих поверхностей.

Микроклимат в помещении оказывает влияние на системы организма человека, отвечающие за терморегуляцию – система кровообращения, нервная система и система потоотделения. Таким образом при нарушении микроклимата происходит пагубное влияние на вышеупомянутые системы, проявляющееся в нарушении работы сердечно-сосудистой системы, угнетения ЦНС и изменения водно-солевого баланса.

Обеспечение необходимых условий микроклимата достигается при помощи правильной организации проводимых работ исходя из времени года, а также использованием технических средств, таких как вентиляция, кондиционеры, радиаторы отопления.

Нормы оптимальных и допустимых метеорологических условий устанавливает СанПиН 2.2.4.548-96, данные нормы представлены в таблицах 17 и 18 соответственно.

Таблица 17. Оптимальные параметры микроклимата

Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздушных потоков, м/с
19-22	40-60	0,2

Таблица 18. Допустимые параметры микроклимата

Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздушных потоков, м/с
15-28	20-80	0,5

5.3.1.5 Выполнение работы с химическими веществами и наноматериалами

В ходе выполнения экспериментальной части магистерской диссертации использовались серебряные и алюминиевые наночастицы, растворы кислот и щелочей.

Согласно ГОСТ Р 56748.1-2015 и ГОСТ 12.1.007-76 при работе с упомянутыми материалами и веществами следует категорически избегать их контакта с кожей, глазами и другими частями тела. Также стоит понимать, что в случае с наночастицами опасным является образование пыли и ее попадание в дыхательную систему человека, то же самое и с химическими веществами, пары которых представляют опасность.

Работы необходимо проводить в вытяжном шкафу, учитывая, что шторка вытяжного шкафа должна быть закрыта ниже уровня головы и рабочая зона шкафа начинается с 15 см от его края. Все работы необходимо производить в специализированной одежде: халаты, перчатки, очки и средства защиты респираторных органов.

5.3.2 Опасные факторы

5.3.2.1 Повышенная напряженность электрического поля или повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Поражение электрическим током относится к опасным факторам, так как даже при незначительном времени воздействия может нанести тяжкий вред здоровью человека. Лаборатория, в которой проводилось выполнение экспериментальной части работы, оборудована большим количеством установок различного назначения, питающихся от однофазного электрического тока напряжением 220 В. При этом лаборатория относится к помещениям без повышенной опасности, связанной с поражением электрическим током, так как в лаборатории отсутствуют усугубляющие факторы, такие как повышенная влажность, токопроводящая пыль, металлические, земляные и другие проводящие напольные покрытия.

В зависимости от параметров воздействующего электрического тока (сила тока, напряжение) поражение электрическим током может вызвать различного рода последствия для организма человека вплоть до полной остановки сердца и угнетения работы дыхательной системы.

В связи с этим при работе с установками, на которых возможно поражение электрическим током соблюдение мер безопасности и использование средств защиты является обязательным.

Средства коллективной защиты: защитные ограждения, заземление, зануление и отключение корпусов электрооборудования, которые могут быть под напряжением, работа с безопасным выходным напряжением установок – до 36 В, предупредительные плакаты, автоматические выключатели, использование предохранителей защищающих от короткого замыкания.

К средствам индивидуальной защиты относят предметы одежды (халаты, перчатки, обувь) изготовленные из резины, фарфора, дерева с особой пропиткой.

5.3.2.2 Работа с лазерами

Лазеры – особый вид источников электромагнитного излучения, отличительными особенностями которых являются когерентность, монохроматичность, острая фокусировка пучка. С последним связана возможность достижения высоких плотностей энергий.

К опасным и вредным факторам связанным с работой на лазерных установках относят: прямое, отраженное и рассеянное лазерное излучение; шумы, возникающие при работе механических частей лазера и системы охлаждения; вредные вещества, выделяемые в результате взаимодействия лазерного излучения с материалами и веществами.

Все лазеры делят на четыре класса опасности, в зависимости от степени опасности для органов зрения и других систем прямого, отраженного и рассеянного излучения:

- класс I (безопасные) – выходное излучение не опасно для глаз и кожи;
- класс II (малоопасные) – для глаз опасно прямое или зеркально отраженное излучение;
- класс III (среднеопасные) – для глаз опасно прямое, зеркально отраженное, а также диффузно отраженное излучение на расстоянии 10 см от отражающей поверхности и (или) для кожи прямое и зеркально отраженное излучение;
- класс IV (высокоопасные) – для кожи опасно диффузно отраженное излучение на расстоянии 10 см от отражающей поверхности.

Используемые в работе лазеры относятся к классу среднеопасных (класс 3), так как являются маломощными лазерными источниками.

Соблюдение мер по обеспечению безопасности при работе с лазерами является необходимым и обязательным. Ниже приведены меры коллективной и индивидуальной защиты, при этом рассмотрена необходимость использования СИЗ

Размещение лазеров разрешается только в специально оборудованных помещениях. Стены, потолок должны иметь матовую поверхность, все предметы, за исключением специальной аппаратуры, не должны иметь зеркальных поверхностей. Экраны и ограждения должны изготавливаться из материалов с наименьшим коэффициентом отражения, быть огнестойкими и не выделять токсических веществ при воздействии на них лазерного излучения.

К средствам индивидуальной защиты, обеспечивающим безопасные условия труда при работе с лазерами, относятся специальные очки, щитки, маски, обеспечивающие снижение облучения глаз до предельно допустимых уровней. В зависимости от длины волны лазерного излучения в противолазерных очках используются оранжевые, сине-зеленые или бесцветные стекла.

5.4 Экологическая безопасность

Охрана окружающей среды – это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения – это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через как можно более полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства.

При написании данной выпускной квалификационной работы были использованы следующие токсичные материалы: металлические наночастицы, кислоты и щелочи. Данные продукты утилизировались в специально отведенную тару, а затем производился термохимический пиролиз отходов. При проведении экспериментов для квалификационной работы вредных выбросов в атмосферу, почву и водные источники не производилось, чрезвычайные ситуации не наблюдались, существенных воздействий на окружающую среду не производилось. Кроме того, стоит отметить, что применения, показанные в данной работе на прямую направлены на сохранение окружающей среды. Сенсор для обнаружения ионов тяжелых металлов и бимодальный сенсор для обнаружения пестицидов, подходит под описание одного из принципов зеленой химии, представленных Американским Химическим Обществом «мониторинг в режиме реального времени для предотвращения загрязнения».

Для освещения рабочей зоны используются люминесцентные лампы, которые могут повлечь причинение вреда здоровью, жизни рабочих, растениям и окружающей среде, так как в них имеются токсичные компоненты – пары ртути. Люминесцентные лампы могут загрязнить атмосферу. Люминесцентные лампы при выходе из строя необходимо упаковать в герметичную тару (целостный картонный пакет, тубус) и отправить на утилизацию в специализированную компанию ООО «НПП «Экотом».

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайные ситуации могут быть техногенного, природного, биологического, социального или экологического характера. При работе в данной лаборатории стоит исследовать ЧС техногенного характера.

Согласно классификации помещений по пожароопасности лаборатория относится к категории В4, так как в лаборатории находятся горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть. Согласно правилам противопожарного режима возможными причинами возникновения пожара в лаборатории являются неисправные электропроводка и нагревательные устройства, перегрузка и поврежденная изоляция электросети, оставленные включенными электроприборы, разряды молнии, а также нарушения правил работы с легковоспламеняющимися жидкостями (спиртами).

Для предотвращения возникновения пожара в лабораторных условиях разработаны специальные инструкции для каждого пожароопасного объекта, а также правила хранения легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ). В здании корпуса предусмотрены инженерно-технические решения, позволяющие при возникновении пожара беспрепятственно и безопасно обеспечить эвакуацию рабочего персонала (эвакуационные выходы, планы эвакуации), а также системы автоматического звукового оповещения о возникновении пожара (пожарная сигнализация) и средства для самостоятельной ликвидации небольших очагов возгорания (огнетушители).

С целью получения допуска к работе в лаборатории сотрудники и студенты обязаны пройти инструктаж по противопожарной безопасности. В каждом помещении вывешивается информация об ответственном за пожарную безопасность сотрудники и планы эвакуации, с обозначением расположения огнетушителей и эвакуационных выходов. Также в соответствии с федеральным законом курение в общественных местах,

коими являются корпуса образовательных учреждений, категорически запрещено.

При обнаружении пожара или признаков горения в здании, помещении (задымление, запах гари, повышение температуры воздуха) необходимо:

- немедленно сообщить об этом по телефону в пожарную охрану (при этом необходимо назвать адрес объекта, место возникновения пожара, а также сообщить свою фамилию);

- В случае загорания электроприбора необходимо обязательно отключить его от электросети, следует подождать несколько секунд, прежде чем начать тушить его

- Оповестить и вызвать к месту пожара руководителя и сотрудника ответственного за пожарную безопасность;

- Принять посильные меры по эвакуации людей и материальных ценностей и тушению пожара.

- Во время пожара не следует открывать окна и разбивать стекла – поток воздуха и избыточное количество кислорода только ускорит распространение возгорания.

- В случае задымления коридора стоит передвигаться на четвереньках, так как внизу задымление меньше, по возможности рекомендуется использовать респиратор или мокрую тряпку (или предмет одежды).

- Важно не поддаваться панике!

Ответственный за противопожарную безопасность обязан продублировать сообщение о пожаре в пожарную часть, поставить в известность администрацию объекта, отключить электроэнергию, устройства, прекратить все работы в помещении

Заключение по разделу социальная ответственность

Раздел ВКР Социальная ответственность является необходимым для подробного ознакомления специалиста с требованиями техники безопасности и необходимыми мерами предосторожности для предотвращения воздействия вредных и опасных факторов.

Кроме того, в разделе экологическая безопасность было рассмотрено влияние используемых материалов и самого результата исследования на окружающую среду.

Список использованной в разделе социальная ответственность литературы

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021)
2. СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение
3. ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля
4. ГОСТ 12.1.003-2014 ШУМ Общие требования безопасности
5. СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002 Шум на рабочих местах
6. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
7. ГОСТ 12.1.007-76 ВРЕДНЫЕ ВЕЩЕСТВА Классификация и общие требования безопасности
8. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические к воздуху рабочей зоны
9. ГОСТ Р 54617.2-2011 МЕНЕДЖМЕНТ РИСКА В НАНОИНДУСТРИИ Идентификация опасностей
10. ГОСТ Р 56748.1-2015 Наноматериалы. Менеджмент риска. Часть 1. Общие положения
11. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов
12. СанПиН 5804-91 Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров

Заключение

Таким образом нами был продемонстрирован конкурентоспособный подход к получению лазерно-индуцированного графена с возможностью варьирования его свойств в широком диапазоне.

Предложенный подход отличается от представленных в литературе использованием лазерного излучения с длиной волны в видимой части спектра и прозрачных полимеров в качестве углеродного прекурсора.

Получаемый материал обладает свойствами во многом превосходящими традиционный ЛИГ, что обусловлено присутствием металлических наночастиц в структуре. Присутствие наночастиц во многом обуславливает упомянутую возможность варьирования свойств начиная от их оптических параметров, заканчивая их влиянием на свойства получаемой структуры.

Используемые в данной работе наночастицы алюминия позволяют изготавливать электроды, обладающие высокой емкостью и электроактивной площадью, циклической стабильностью и чувствительностью к различным химическим соединениям. В тоже время в процессе исследования выявлена необходимость проведения оптимизации процесса изготовления электродов и исследования механизмов формирования ЛИГа в каждой конкретной системе, что является темами для проведения дальнейших работ с материалом.

За помощь в проведении экспериментов и предоставленный доступ к оборудованию автор выражает благодарность Липовке А. А., Иванову А. А., Петрову И. С., Щаденко С., Мурастову Г. и Вилле Н.

Список публикаций

- Rodriguez R.D. et al. Ultra-robust flexible electronics by laser-driven polymer-nanomaterials integration // Adv. Funct. Mater. Wiley, 2021. P. 2008818.
- Rodriguez R.D. et al. High-power laser-patterning graphene oxide: A new approach to making arbitrarily-shaped self-aligned electrodes // Carbon N. Y. Elsevier BV, 2019. Vol. 151. P. 148–155.

Список использованной литературы

1. Novoselov K.S. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science*. 2004. Vol. 306, № 5696. P. 666–669.
2. Soldano C., Mahmood A., Dujardin E. Production, properties and potential of graphene // *Carbon* N. Y. Elsevier BV, 2010. Vol. 48, № 8. P. 2127–2150.
3. Whitener K.E. Jr, Sheehan P.E. Graphene synthesis // *Diam. Relat. Mater.* Elsevier BV, 2014. Vol. 46. P. 25–34.
4. Lonkar S.P., Deshmukh Y.S., Abdala A.A. Recent advances in chemical modifications of graphene // *Nano Res.* Springer Science and Business Media LLC, 2015. Vol. 8, № 4. P. 1039–1074.
5. Shulga Y.M., Shulga N.Y., Parkhomenko Y.N. Carbon nanostructures reduced from graphite oxide as electrode materials for supercapacitors // *Izv. Vyss. Uchebnykh Zaved. Mater. Elektron. Tekhniki = Mater. Electron. Eng.* National University of Science and Technology MISiS, 2015. № 3. P. 157.
6. Lipovka A. et al. Time-stable wetting effect of plasma-treated biodegradable scaffolds functionalized with graphene oxide // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier BV, 2020. Vol. 388, № 125560. P. 125560.
7. Chua C.K., Pumera M. Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint // *Chem. Soc. Rev.* 2014. Vol. 43, № 1. P. 291–312.
8. Mural P.K.S. et al. A critical review on in situ reduction of graphene oxide during preparation of conducting polymeric nanocomposites // *RSC Adv.* Royal Society of Chemistry (RSC), 2015. Vol. 5, № 41. P. 32078–32087.
9. Wan Z. et al. Laser-reduced graphene: Synthesis, properties, and applications // *Adv. Mater. Technol.* Wiley, 2018. Vol. 3, № 4. P. 1700315.
10. Kymakis E. et al. Laser-assisted reduction of graphene oxide for flexible, large-area optoelectronics // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014. Vol. 20, № 1. P. 106–115.

11. Dimiev A.M., Tour J.M. Mechanism of graphene oxide formation // ACS Nano. 2014. Vol. 8, № 3. P. 3060–3068.
12. Rodriguez R.D. et al. Beyond graphene oxide: laser engineering functionalized graphene for flexible electronics // Mater. Horiz. Royal Society of Chemistry (RSC), 2020. Vol. 7, № 4. P. 1030–1041.
13. Ossoonon B.D., Bélanger D. Functionalization of graphene sheets by the diazonium chemistry during electrochemical exfoliation of graphite // Carbon N. Y. Elsevier BV, 2017. Vol. 111. P. 83–93.
14. Petridis C. et al. Post-fabrication, in situ laser reduction of graphene oxide devices // Appl. Phys. Lett. AIP Publishing, 2013. Vol. 102, № 9. P. 093115.
15. de Lima B.S., Bernardi M.I.B., Mastelaro V.R. Wavelength effect of ns-pulsed radiation on the reduction of graphene oxide // Appl. Surf. Sci. Elsevier BV, 2020. Vol. 506, № 144808. P. 144808.
16. Yung K.C. et al. Laser direct patterning of a reduced-graphene oxide transparent circuit on a graphene oxide thin film // J. Appl. Phys. AIP Publishing, 2013. Vol. 113, № 24. P. 244903.
17. Ye R., James D.K., Tour J.M. Laser-Induced Graphene // Acc. Chem. Res. 2018. Vol. 51, № 7. P. 1609–1620.
18. Lin J. et al. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers // Nat. Commun. 2014. Vol. 5. P. 5714.
19. Tadyszak K., Wychowaniec J.K., Litowczenko J. Biomedical Applications of Graphene-Based Structures // Nanomaterials (Basel). 2018. Vol. 8, № 11.
20. Dong Y., Rismiller S.C., Lin J. Molecular dynamic simulation of layered graphene clusters formation from polyimides under extreme conditions // Carbon N. Y. Elsevier BV, 2016. Vol. 104. P. 47–55.
21. Duy L.X. et al. Laser-induced graphene fibers // Carbon N. Y. Elsevier BV, 2018. Vol. 126. P. 472–479.
22. Chyan Y. et al. Laser-Induced Graphene by Multiple Lasing: Toward Electronics on Cloth, Paper, and Food // ACS Nano. 2018. Vol. 12, № 3. P.

- 2176–2183.
23. Li Y. et al. Laser-Induced Graphene in Controlled Atmospheres: From Superhydrophilic to Superhydrophobic Surfaces // *Adv. Mater.* 2017. Vol. 29, № 27.
 24. Wang W. et al. One-step laser induced conversion of a gelatin-coated polyimide film into graphene: Tunable morphology, surface wettability and microsupercapacitor applications // *Science China Technological Sciences.* 2021. Vol. 64, № 5. P. 1030–1040.
 25. Thakur A.K. et al. Laser-Induced Graphene-PVA Composites as Robust Electrically Conductive Water Treatment Membranes // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2019. Vol. 11, № 11. P. 10914–10921.
 26. Wu W. et al. Preparation of superhydrophobic laser-induced graphene using taro leaf structure as templates // *Surf. Coat. Technol.* Elsevier BV, 2020. Vol. 393, № 125744. P. 125744.
 27. Nasser J. et al. Laser induced graphene printing of spatially controlled superhydrophobic/hydrophilic surfaces // *Carbon N. Y.* Elsevier BV, 2020. Vol. 162. P. 570–578.
 28. Bergsman D.S. et al. Preserving nanoscale features in polymers during laser induced graphene formation using sequential infiltration synthesis // *Nat. Commun.* 2020. Vol. 11, № 1. P. 3636.
 29. Cao L. et al. Stable and durable laser-induced graphene patterns embedded in polymer substrates // *Carbon.* 2020. Vol. 163. P. 85–94.
 30. Jiao L. et al. Laser-Induced Graphene on Additive Manufacturing Parts // *Nanomaterials (Basel).* 2019. Vol. 9, № 1.
 31. Li L. et al. High-Performance Pseudocapacitive Microsupercapacitors from Laser-Induced Graphene // *Adv. Mater.* 2016. Vol. 28, № 5. P. 838–845.
 32. Lamberti A. et al. Supercapacitors: A Highly Stretchable Supercapacitor Using Laser-Induced Graphene Electrodes onto Elastomeric Substrate (*Adv. Energy Mater.* 10/2016) // *Advanced Energy Materials.* 2016. Vol. 6, № 10.

33. Lamberti A. et al. New insights on laser-induced graphene electrodes for flexible supercapacitors: tunable morphology and physical properties // *Nanotechnology*. 2017. Vol. 28, № 17. P. 174002.
34. Zhang Z. et al. Visible light laser-induced graphene from phenolic resin: A new approach for directly writing graphene-based electrochemical devices on various substrates // *Carbon* N. Y. Elsevier BV, 2018. Vol. 127. P. 287–296.
35. Rodriguez R.D. et al. Ultra-robust flexible electronics by laser-driven polymer-nanomaterials integration // *Adv. Funct. Mater.* Wiley, 2021. P. 2008818.
36. Stanford M.G. et al. High-Resolution Laser-Induced Graphene. Flexible Electronics beyond the Visible Limit // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2020. Vol. 12, № 9. P. 10902–10907.
37. Hidalgo-Manrique P. et al. Microstructure and mechanical behaviour of aluminium matrix composites reinforced with graphene oxide and carbon nanotubes // *Journal of Materials Science*. 2017. Vol. 52, № 23. P. 13466–13477.
38. Ma B. et al. The correlation between electrical conductivity and second-order Raman modes of laser-reduced graphene oxide // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2019. Vol. 21, № 19. P. 10125–10134.
39. El-Kady M.F. et al. Engineering three-dimensional hybrid supercapacitors and microsupercapacitors for high-performance integrated energy storage // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015. Vol. 112, № 14. P. 4233–4238.
40. Shumyantseva V.V. et al. Development of methods for functionalization of screen printed electrodes with biocompatible organic-inorganic hybrid nanocomposites for biosensing applications // *Biochemistry (Moscow) Supplement Series B: Biomedical Chemistry*. Springer, 2014. Vol. 8, № 3. P. 237–242.

41. Wang B., Zhang L., Zhou X. Synthesis of silver nanocubes as a SERS substrate for the determination of pesticide paraoxon and thiram // *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* 2014. Vol. 121. P. 63–69.

Приложение А

State of the art

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Фаткуллин Максим Ильгизович		15.03.21

Консультант ИШХБМТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШХБМТ	Рауль Д. Родригес	Ph. D		15.03.21

Консультант – лингвист отделения иностранных языков школы базовой инженерной подготовки:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Кобзева Надежда Александровна	к.п.н.		15.03.21

1. State of the art

1.1. Approaches to fabricate conductive graphene-like materials via laser treatment

A large research block is occupied by works devoted to carbon materials, the development of which was started by the experimental discovery of the most unique material - graphene [1].

Graphene has attracted attention due to its exceptional properties: high mechanical strength, thermal conductivity, and electrical conductivity [2]. But, at the same time, graphene has certain drawbacks that make it difficult to expand its use in manufacturing processes. These drawbacks are hydrophobicity and complexity of high-purity graphene fabrication methods [3]. Basically, the impossibility of scaling is mostly due to hydrophobicity, which does not allow the creation of stable suspensions, which significantly complicates the work with the material and makes it impossible to obtain sheets of large size.

Перечисленные особенности привели к росту количества работ по различной функционализации графена с целью изменения его свойств. Так, одним из самых широко распространенных графеноподобных материалов является оксид графена - графен содержащий кислородсодержащие группы (карбоксильные, гидроксильные, эпоксидные и др.) на базальной плоскости и по краям [4,5]. Наличие кислородсодержащих групп делает материал гидрофильным [6] и удобным в использовании, но при этом нарушает электрическую проводимость, вследствие отсутствия делокализованных электронов. Для получения проводящих структур на основе данного материала, он подвергается восстановлению путем подвода внешней энергии различными способами [7–9].

These drawbacks have led to an increase in the number of works on various functionalization of graphene in order to change its properties. Thus, one of the most widespread graphene-like materials is graphene oxide - graphene containing oxygen-containing groups (carboxyl, hydroxyl, epoxy, etc.) on the basal plane and at the edges [4, 5]. The presence of oxygen-containing groups makes the material hydrophilic [6] and convenient to use, but at the same time violates electrical conductivity due to the absence of delocalized electrons. To obtain conducting structures based on this material, it undergoes reduction by applying external energy in various ways [7–9]. One of such ways is laser processing [10]. Local heating of the material occurs under the influence of laser radiation and, depending on the wavelength, concomitant ionization and other photochemical processes results in remove oxygen-containing groups and restore electroconductive structures close to graphene [9]. In this case, complete reduction to graphene is impossible, since initially strong oxidants are used in the synthesis [11] and laser treatment introduces a significant number of defects into the structure.

Another approach to functionalize graphene is the use of diazonium salts. Functionalization occurs by attaching aryl groups to the surface and into the interlayer space of the graphite electrode, followed by exfoliation of its parts during the electrochemical synthesis [12]. This material has a number of advantages over the above mentioned. For example, functionalization with diazonium salts with various substituents on the benzene ring makes it possible to vary the properties of the resulting functionalized material [13]. Thus, the use of 4-carboxybenzenediazonium tosylate results in a hydrophilic material, while 4-butylbenzenediazonium tosylate, on the contrary, imparts hydrophobicity to the material. The restoration of a structure close to graphene is carried out in the same ways as for graphene oxide, which also ultimately leads to the restoration of conductivity.

Also it worth to be mentioned that for both materials, varying the laser processing parameters (power density, frequency of laser pulses, wavelength of irradiation, etc.) leads to different degrees of reduction, so it makes it possible to control the properties of the final conducting structures [14–16]. This possibility is undoubtedly a huge advantage, since by means of simple manipulations it is possible to precise manufacture structures for each specific task.

Yet, the complete reduction of functionalized graphene is impossible, which is reflected in a lower conductivity and a change in structural properties. The structures closest to the ideal graphene lattice are obtained by laser irradiation of some polymers and other carbon-containing materials (polyimide, phenolic resin, wood, etc.) [17].

Let us consider the formation mechanism of the so-called laser-induced graphene (LIG) using polyimide as an example. In this case, the photothermal mechanism will be considered, since the formation mechanism is described mainly only for the thermal light-matter interaction. The neglect of the photochemical effect is justified by the fact that in most works a CO₂ laser is used, the wavelength of which is 10.6 μm, so the quantum energy will not be enough to activate photochemical processes. *J. Lin et al.* in their work showed that the thermal effect of the laser leads to a rapid local heating of the polymer (the temperature reaches values more than 2500 °C), which leads to the destruction of the C-O, C = O and C-N bonds present in the structure, the destruction products of which are removed in the gaseous phase. At the same time, aromatic components form a graphene-like lattice, and the intense gas evolution prevents its oxidation [18]. Nevertheless, LIG has a crystal lattice structure different from graphene, namely, instead of a hexagonal lattice, LIG has a hybrid hexagonal and pentagonal-heptagonal crystal lattice due to insufficient heat exposure time for complete reconstruction of benzene rings [17].

1.2. Properties of laser-induced graphene

In addition to its structural features, LIG has won the attention of researchers due to its properties, which make this material promising for use in various fields. For example, high porosity and large surface area causes interest in it in the field of energy storage application.

So the various properties of the material and their combinations are critical from the point of view of its relevance, therefore, the properties of the material should be considered in more detail.

1.2.1. Surface morphology

As already mentioned, surface properties play a critical role for carbon materials, so there is a huge number of works devoted to their study.

In the case of LIG, polycrystallinity has a positive effect on surface properties. Thus, the appearance in lattice of pentagonal and heptagonal cells in conjunction with intensive gas evolution during the irradiation allows to obtain a highly porous surface (Fig. 2a) with a specific surface area of $\sim 340 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ and a pore size of less than 9 nm [18].

Considering that the formation of LIG, its surface, structure, etc. depend on the laser processing parameters of the polymer there is a possibility of their control. For example, *L. Duy et al.* showed how the variation of laser processing parameters affects the surface morphology of the resulting LIG. By successively increasing the irradiation energy density for processing polyimide, three morphological types of LIG were identified.

Initially, exceeding the threshold of the energy density required to start the graphitization process, a flaky structure is obtained (Fig. 2b). A subsequent increase in this parameter leads to the formation of a drop-like structure (Fig. 2c)

or a vertically aligned fibrous structure (Fig. 2d), the height of the fibers reaches up to 1 mm[21].

The precursor used to obtain LIG also affects the surface morphology. All of the above structures were obtained on polyimide, but strangely enough, LIG can be obtained from a large number of organic materials. *Y. Chuan et al.* Demonstrated the possibility of LIG formation on human household items - cork, potatoes, and paper [22]. The surface morphologies obtained by them are shown in Figure 2e-g, respectively.

In addition, the surface morphology also depends on the atmosphere in which the laser irradiation is performed. *Y. Li et al.* showed this relationship. In their work, they demonstrated the difference in the surface morphology of LIG obtained in the media of reducing agents, oxidizing agents and inert gases.

Thus, in the atmosphere of oxidants (O_2), the surface is rougher, while in a hydrogen atmosphere, the formation of hierarchical nanostructures, which are atypical for graphene materials, is observed. The formation of atypical structures is also observed in an inert atmosphere, the only difference is that these structures have a size in the micrometer range [23].

1.2.2. Surface wettability

In many ways, application of a particular material is determined by the wettability of its surface. So, for example, for wearable electronics which is in the direct contact with human skin, it is important to have a hydrophobic surface to prevent bacterial growth, while for *in-vivo* devices, on the contrary, it is necessary to have a hydrophilic surface.

From this point of view, LIG has an advantage, since the possibility of varying the wettability by using various approaches has been repeatedly shown [24, 25]

One of these approaches is step-by-step laser processing to obtain a hierarchical periodic structure. In the first pass, the entire surface of the polyimide is laser treated, means that entire surface is graphitized. The second pass creates a periodic structure (Fig. 3a). Due to the height difference in the periodic structure, the contact angle changes, depending on the irradiation parameters from 71° to 150° (Fig. 3c-e)[26] .

Also, changes in wettability associated with changes in morphology and surface chemistry are observed with varying laser pulse density. In this case, the wettability changes in an even wider range from superhydrophilic surface (contact angle 0°) to superhydrophobic (contact angle 150°) (Fig. 3b) [27].

1.2.3. Electrical properties

The above analysis of the properties of LIG shows their strong dependence on many factors (used precursor, parameters of laser radiation, atmosphere, etc.). This trend continues in electrical properties.

The precursors used are dielectrics (sheet resistance of polyimide $> 90 \text{ M}\Omega/\text{sq}$), while the LIG obtained on them has a sheet resistance several orders of magnitude lower (tens to hundreds of Ohm/sq). The high conductivity of LIG, as in graphene, is due to delocalized electrons.

Let's consider several specific examples of the influence of various factors on electrical conductivity. The dependence of sheet resistance on the power of laser radiation is reflected in a large number of works [18, 22, 28–30]. It is rather difficult to unify the data obtained by different groups, although most of them are using CO_2 lasers, there is a difference in wavelength, beam size and homogeneity, etc.

Nevertheless, among all works, there is a general trend in the existence of a certain threshold value of power (power density) at which the value of sheet

resistance stops decreasing, but on the contrary begins to grow (Fig. 4). This is due to the fact that higher powers stimulate more intense defect formation and more intense ablation of the material.

1.2.4. Electrochemical properties

For the most part in the works , devoted to the study of LIG , the following electrochemical properties are investigated:

- areal capacity
- electroactive surface area
- cyclic stability
- density of energy and power accumulated on the material

The study of these properties is closely related to the main applications and promising research areas of this material.

Due to the number of published works in this area, it is practically impossible to carry out a comparative analysis of the electrochemical properties. In addition, there is no unified system for the presentation and standardization of results, so part of the work uses its normalization per unit of mass as the specific capacity, while the other part normalizes the values per unit area.

Nevertheless, a comparative analysis must be carried out. Table 1 presents an analysis of a small sample of works.

Table 1. Comparative analysis of the electrochemical properties of laser-induced graphene.

Description	Areal capacity	Comments	Reference
LIG-PANI	361 mF/cm ²	Polymer electrolyte H ₂ SO ₄ /PVA. Planar supercapacitor.	[31]

LIG-MnO ₂	934 mF/cm ²	Polymer electrolyte H ₂ SO ₄ /PVA. Planar supercapacitor.	[31]
LIG-PDMS	650 μF/cm ²	Electric-double layer capacitor. Gel electrolyte NaCl/PVP	[32]
Sheet LIG	61,5 μF/cm ²	Na ₂ SO ₄ . Planar supercapacitor.	[33]
Porous LIG	134 μF/cm ²	Na ₂ SO ₄ . Planar supercapacitor.	[33]
Needle-like LIG	201 μF/cm ²	Na ₂ SO ₄ . Planar supercapacitor.	[33]
LIG from phenol resin	0,78 mF/cm ²	Na ₂ SO ₄ . Planar supercapacitor.	[34]
LIG	22,9 mF/cm ²	KOH. Planar supercapacitor.	[29]