

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
Сенсор на основе полимерного композита, полученного методом лазерной интеграции

УДК 543.07:678.5.02:544.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Ким Лариса		04.06.21

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Шеремет Евгения Сергеевна	PhD		04.06.21

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н.		15.03.21

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романова Светлана Владимировна	-		15.03.21

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП 18.04.01 Химическая технология	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Пестряков Алексей Николаевич	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, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая 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	Ким Ларисе

Тема работы:

Сенсор на основе полимерного композита, полученного методом лазерной интеграции

Утверждена приказом директора (дата, номер)	1/од, 11.01.2016
---	------------------

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>	Объект исследования – полимерный композит, полученный методом лазерной интеграции. Исследование посвящено изучению структуры полимера с нанесенными медными и серебряными наночастицами, облученного лазером и проектированию газового сенсора на основе полученного материала. Результаты данного исследования в будущем могут быть использованы в производстве газовых сенсоров для определения токсичных веществ, также для изучения атмосферы и объектов в космическом пространстве и др.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Для выполнения поставленной задачи необходимо исследуем ряд вопросов:

<p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Написание обзора литературы и анализа по теме; • Исследование существующих прототипов материала в этой области и их применений; • Проведение экспериментов по созданию и описанию характеристик материала; • Анализ полученных результатов и подведение заключения работы;
---	---

Перечень графического материала
(с точным указанием обязательных чертежей)

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы *(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Романова Светлана Владимировна, Старший преподаватель
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Якимова Татьяна Борисовна, Доцент ОСГН
Раздел ВКР на иностранном языке	Кобзева Надежда Александровна, Старший преподаватель

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

Объекты и методы исследования

Экспериментальная часть

Результаты и обсуждение

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 ИШФВП	Шеремет Евгения Сергеевна	PhD		15.03.2021 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Ким Лариса		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 «Экспериментальная часть»	10
10.05.2021 г.	Разработка разделов «Результаты и обсуждение».	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 ИШФВП	Шеремет Евгения Сергеевна	PhD		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 «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
9ДМ91	Ким Лариса

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

Тема ВКР:

Сенсор на основе полимерного композита, полученного методом лазерной интеграции	
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. Область применения – гибкая электроника, сенсоры</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	<ul style="list-style-type: none"> – Отклонение показателей микроклимата – Химические вещества – Работа с лазером
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.	-		15.03.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Ким Лариса		15.03.21

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

Студенту:

Группа	ФИО
9ДМ91	Ким Лариса

Школа	ИШХБМТ	Отделение Школа	
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	18.04.01 Химическая технология

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

<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ</i>
<i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование</i>
<i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30%</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	<i>Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ</i>
<i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования</i>
<i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	<i>Расчет бюджетной стоимости НИ</i>
<i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	<i>Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.</i>

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности ИП
2. Матрица SWOT
3. Оценка готовности проекта к коммерциализации
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н,		15.03.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Ким Лариса		15.03.21

Реферат

Данная магистерская диссертация содержит 93 с., 8 рисунков, 23 таблицы, 69 ссылок, 1 приложение.

Ключевые слова: полимерные композиты, наночастицы, газовые сенсоры, спектроскопия комбинационного рассеяния, четырехточечное измерение электрических свойств.

Объект исследования: полимерный композит, полученный методом лазерной интеграции

Цель исследования: показать принципиальную возможность создания газового сенсора на основе полимерного композита, полученного путем лазерной интеграции медных наночастиц.

Несмотря на огромное количество исследований, посвященным газовым сенсорам, эта область до сих пор активно развивается из-за появления новых материалов. В данной работе представляется сенсор на основе недавно разработанного полимерного композита, полученного методом лазерной интеграции (laser-induced metal-polymer composite, LIMPC) с активным слоем в виде rGO. Ранее показывалась возможность получить LIMPC с алюминиевыми наночастицами, в данной работе воспроизводится похожая методика, используя медные и серебряные наночастицы. С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) изучалась структура материала. На основе спектров КР видно, что лучшей площадью активной поверхности обладает LIMPC на основе медных наночастиц из-за наличия высокой плотности дефектов. Далее были определены электрические свойства материала с помощью четырехточечного метода измерения электрических свойств. Результаты показывают стабильность сопротивления, что очень важно при работе

газовых сенсоров, из чего можно сделать вывод о том, что лучшую стабильность показал композит на основе медных наночастиц. Таким образом был представлен концепт газового сенсора на основе CuLIMPs с активным слоем из rGO, показан отклик на этанол.

Обозначения и сокращения:

GO – graphene oxide/оксид графена

rGO – reduced graphene oxide/восстановленный оксид графена

IDE - interdigitated electrodes/встречно-штыревые электроды

LIG – laser-induced graphene/лазерно-индуцированный графен

LIMPC – laser-induced metal/polymer composite/лазерно-индуцированный металл/полимерный композит

LSPR – localized surface plasmon resonance/локализованный поверхностный плазмонный резонанс

PANI – polyaniline/полианилин

PEI – polyetherimide/полиэфиримид

PI – polyimide/полиимид

PP – polypyrrol/полипиррол

PS – polysulfone/полисульфон

PTs – polythiophenes/политиофены

ПЭТ – полиэтилен терефталат

SPEEK – sulfonated polyetheretherketone/сульфированный полиэфирэфиркетон

XRD - рентгенодифракция

ПЭМ – просвечивающий электронный микроскоп

СЭМ – сканирующий электронный микроскоп

Оглавление

Введение.....	15
1. Обзор литературы.....	16
1.1 Лазерно-индуцированный графен (LIG)	16
1.2 Наноматериалы и их свойства.....	18
1.2.1 Локализованный поверхностный плазмонный резонанс	19
1.2.2 Фототермические свойства.....	19
1.3 Лазерно-интегрированный металл-полимерный композит (LIMPC)..	20
1.4 Сенсоры газа.....	21
1.4.1 Сенсоры газа на основе LIG	23
1.4.2 Electrodes газового сенсора.....	26
1.4.3 Материалы активного слоя.....	27
2. Объекты и методы исследования.....	28
2.1 Используемые материалы	28
2.2 Оборудование.....	29
2.3 Методика подготовки подложек LIMPC.....	29
2.4 Оптимизация параметров лазерного излучения	30
2.5 Методика приготовления газового сенсора	31
2.6 Методика определения характеристик сенсора.....	32
3. Результаты и обсуждение	34
3.1 Спектроскопия комбинационного рассеяния	34
3.2 Четырехточечное измерение сопротивления.....	36
3.3 Описание характеристик газового сенсора.....	38

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	34
Введение	34
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .	35
4.1.1 Потенциальные потребители результатов проекта.....	35
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	35
4.1.3 SWOT-анализ	37
4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	38
4.2 Инициация проекта.....	41
4.2.1 Цели и результаты проекта.....	41
4.2.2 Организационная структура проекта.....	42
4.2.3 Бюджет проекта	44
4.2.4 Сырье, материалы, специальное оборудование, покупные изделия	44
4.2.5 Расчет затрат на оборудование для выполнения научно-экспериментальных работ.....	45
4.2.6 Основная заработная плата исполнителей темы	46
4.2.7 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	48
4.2.8 Отчисления во внебюджетные фонды.....	48
4.2.9 Накладные расходы	49
4.2.10 Бюджетная стоимость НИР	49

4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	50
4.3.1 Интегральный показатель финансовой эффективности	50
4.3.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов	50
Заключение по разделу	51
5. Социальная ответственность	52
Введение	52
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ..	53
5.1.1 Основные права и обязанности работника	53
5.1.2 Эргономические требования к рабочему мест	54
5.2.1 Производственная безопасность	55
5.2.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов	56
5.2.4 Обоснование мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов на исследователя	61
5.3 Экологическая безопасность	67
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	68
Заключение	69
Заключение	70
Список литературы:	71
Methods and materials	79
Materials used in experiments	79
Equipment	80
Experimental part.....	80

LIMPC substrate preparation methodology	80
Optimization of the parameters of laser radiation	80
Results and discussion	83
Raman spectroscopy	83
Four-point resistance measurement	85

Введение

Сегодня технологический прогресс, бесспорно, является одной из лидирующих тенденций, способствующих человеческому благополучию. XXI век - время, когда электроника и машины значительно упрощают жизнь и деятельность человека. Тем не менее, с течением времени появляются новые более функциональные материалы и технологии производства, а значит и новые более эффективные аналоги приборов. Одним из таких материалов является графен, который в короткие сроки завоевал внимание благодаря отличительным электрическим [1], механическим [2], химическим [3] и другим свойствам [4]. Графен также известен своими модификациями, одной из популярных является лазерно-индуцированный графен LIG. Этот материал известен своей пористостью, высокой проводимостью, простотой и дешевой изготовлением. LIG очень быстро приобрел популярность в области гибкой электроники, однако большим препятствием для прикладного применения является его низкая механическая стабильность. Недавно научным коллективом Rodriguez *et al.* [5] был опубликован более механически стабильный аналог LIG.

Целью данной работы является показать возможности модификации и применения лазерно-индуцированного металл-полимерного композита для использования в гибкой электронике.

1. Обзор литературы

1.1 Лазерно-индуцированный графен (LIG)

На данный момент существует несколько альтернативных способов производства материалов, подобных графену – термическое восстановление оксида графена [6], химическое восстановление и др [7]. Быстрый и высокоэффективный метод – облучение полимеров и полимерных композитов лазером, при этом получают так называемый лазерно-индуцированный графен (LIG) [8]. Ранее группой Rodriguez *et al.* [5] был получен аналог LIG - графен на основе металл-полимерных композитов. Такой материал обладает высокой проводимостью и механической стабильностью, а также является пористым, что увеличивает площадь поверхности, и очень полезно для различных применений в электронике. Такой тип материала получил название лазерно-индуцированный металл-полимерный композит. Свойства LIMPc делают его перспективным материалом для использования в качестве электродов газового сенсора.

Графен и его производные относятся к двумерным материалам, однако интерес ученых привлекла возможность изготовления объемных трехмерных структур графена без больших затрат на материалы и оборудование. Так, в 2014г. коллектив J. Lin [8] исследовал процесс облучения оксида графена на полиимиде (PI), однако в процессе эксперимента, случайно был облучен чистый PI. При этом было замечено, что обработанный лазером участок полимера внешне похож на графен. Догадка подтвердилась при исследовании свойств методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Полученный материал оказался пористым лазерно-индуцированным графеном (LIG), что было показано с помощью рентгенодифракции (XRD), изображение поперечного сечения и

изображение структуры с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

В ранних исследованиях получить LIG удалось только из ограниченного числа материалов, таких как PI и полиэфиримид (PEI) [8]. Однако сообщалось, что помимо вышеупомянутых полимеров, также использовались сульфированный полиэфирэфиркетон (SPEEK), полисульфон (PS) и полиэфирсульфон (PES), т.к. полимеры схожи по структуре с PI или PEI [9], [10]. По аналогии с предыдущими исследованиями, Zhang et al. сообщили об использовании фенольной смолы и ее композитов, как прекурсоров для образования LIG [11]. Позднее Yieu et al. разработал метод, позволяющий преобразовывать большинство углеродсодержащих материалов в LIG с помощью излучения инфракрасного CO₂ лазера [12].

Изначально для синтеза LIG использовался сфокусированный лазер с однократным облучением [8]. Y. Chang и его коллеги обнаружили, что использование многократного облучения, фокусируя лазерное пятно на подложке также приводит к образованию индуцированного графена, таким образом спектр методов преобразования, и, следовательно, материалов расширился. Методом многократного облучения такие полимеры как сшитый полистирол, эпоксидная смола, и фенольная смола были преобразованы в LIG [12]. В этом методе подложка сначала преобразуется в аморфный углерод при первом облучении, а второй проход преобразует аморфный углерод в графен [12]. В качестве альтернативы многократной генерации, тот же эффект может быть эквивалентно достигнут одиночной генерацией дефокусируя лазер, также описанный Y. Chang в той же работе [12]. Поскольку форма сфокусированного лазерного луча является конической, изменяя расстояние по оси z от фокальной плоскости, можно получить пятна разных размеров, что приводит к множественному

облучению из-за перекрывающихся пятен соседних положений. Предыдущая работа по переработке древесины показала, что лигнин более благоприятен для производства LIG, чем целлюлоза/гемицеллюлоза, однако эксперимент проводился в инертной атмосфере, чтобы предотвратить горение древесины [13]. Используя метод расфокусировки, материалы с высоким содержанием лигнина были преобразованы в LIG в комнатной атмосфере на поверхности кожуры кокоса и картофеля. Таким образом, различные материалы, такие как хлеб, дерево, хлопчатобумажная бумага и картон преобразуются в LIG в комнатной атмосфере.

Высокая проводимость, пористость и толщина LIG поддаются изменению в зависимости от параметров лазерного облучения, в среднем толщина может варьироваться от 20 до 100 мкм. Более того, используя различные лазерные паттерны, облученной структуре можно придать любую форму, даже трехмерную. Такие свойства являются неотъемлемой частью высокоэффективных микросуперконденсаторов [14], применении в электрокатализе [9], электродов микрофлюидных устройств [15], а также сенсоров [16].

1.2 Наноматериалы и их свойства

Наноструктуры из благородных металлов являются перспективным направлением изучения из-за их уникальных свойств, включая значительное усиление оптического поля, приводящее к сильному рассеянию и поглощению света. Наночастицы золота, серебра и меди представляют большой интерес научного сообщества т.к. имеют наиболее сильное усиление оптических и фототермических свойств, в связи с их проводимостью.

1.2.1 Локализованный поверхностный плазмонный резонанс

Усиленные оптические и фототермические свойства наночастиц благородных металлов является результатом резонансных колебаний их свободных электронов в присутствии электромагнитного поля. Данный эффект получил название локализованный поверхностный плазмонный резонанс или LSPR. Плазмонный резонанс может либо пропускать свет с последующим усилением интенсивности рассеянного излучения (рассеяние Ми), либо быстро преобразовывать его в тепло (поглощение).

1.2.2 Фототермические свойства

Тепло можно рассматривать как широкополосный некогерентный набор колебаний, и тогда предполагается, что в твердом теле оно в основном поддерживается фононами. Перенос тепла обеспечивается носителями, которые являются элементарными частицами, такими как электроны, фононы или даже фотоны. В первых двух случаях задействован механизм проводимости, тогда как во втором случае передача происходит за счет излучения. При воздействии падающего света в видимой области спектра (или поблизости от нее) золотая наночастица может набирать энергию, поглощая фотоны посредством электронных переходов. В этом случае основным релаксационным процессом является электрон-фононное рассеяние. По мере того, как начальная энергия, поступающая в наночастицу за счет поглощения фотонов, вводится в форме электронных возбуждений, последующая общая передача энергии прогрессирует от электронов к колебаниям решетки. Этот механизм является причиной фотоиндуцированного нагрева металлических наночастиц.

1.3 Лазерно-интегрированный металл-полимерный композит (LIMPC)

Недавно группой Rodriguez. *et al.* [5] было опубликовано исследование, которое является хорошей альтернативой LIG, полученный материал был назван лазерно-интегрированный металл-полимерный композит (LIMPC).

Согласно автору [5], на полиэтилентерефталат (ПЭТ) были нанесены наночастицы алюминия Al, облучены лазером с длиной волны $\lambda = 438$ нм. Таким образом, наночастицы алюминия играют роль фототермического прекурсора, передающих тепло полимеру через электрон-электронное и электрон-фононное рассеяние. Поглощенного тепла достаточно для того, чтобы расплавить облученный участок полимера и дальнейшей интеграции наночастиц в структуре. На рисунке 2 изображена последовательность формирования LIMPC и механизм.

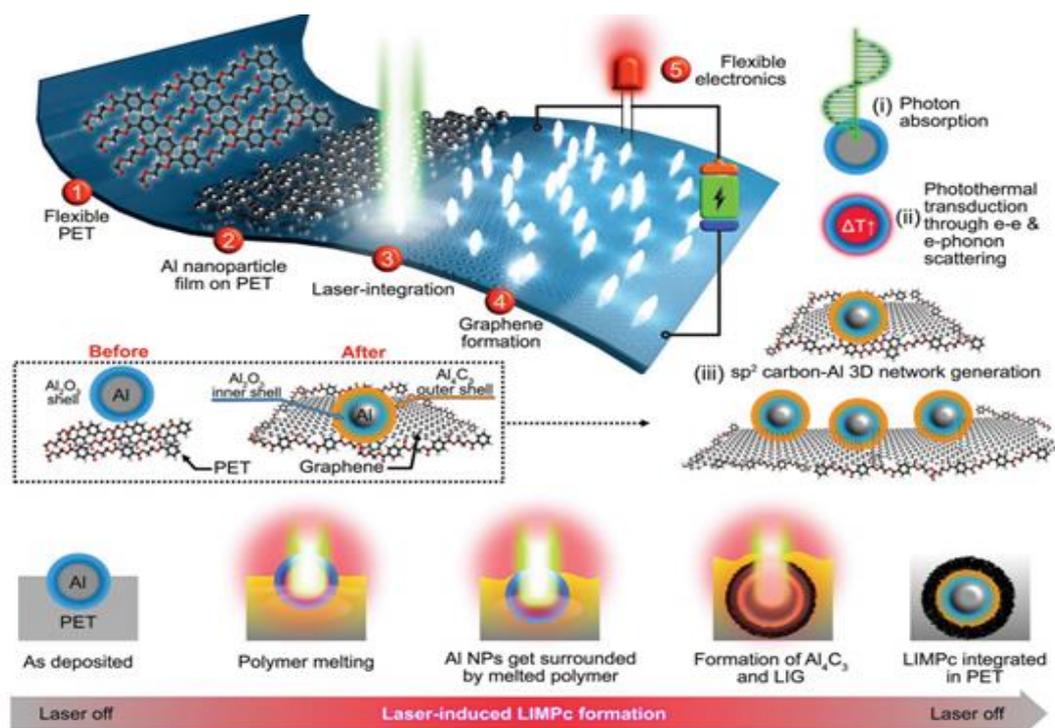


Рис. 2. Иллюстрация индуцированной лазером интеграции наноматериалов в ПЭТ [5].

Механизм образования включает i) поглощение фотонов наночастицами Al, ii) релаксацию фотовозбужденных носителей заряда посредством электрон-электронного и электронного фононного рассеяния, что приводит к локализованному повышению температуры. iii) Высокая температура вызывает утолщение оболочки Al_2O_3 , появление границы раздела Al_4C_3 , образование графена и присоединение к ПЭТу через кислородные группы на краю вновь образованного графена.

На основе LIMPc были описаны несколько применений в гибкой электронике, электрохимические сенсоры, а также в фотокатализе [5].

1.4 Сенсоры газа

Сенсоры газа являются хорошо изученной областью, но несмотря на имеющуюся информацию, с появлением новых материалов создаются новые - более выгодные, оптимизированные и высокотехнологичные аналоги. Существует несколько разновидностей газовых сенсоров, каждый вид включает несколько типов конструкций [17]. Для того, чтобы не отходить от темы в данном разделе описаны газовые сенсоры, работающие на органических соединениях химирезистивного типа. Типичная структура газового сенсора-химирезистора представлена на рисунке 3.

Преимуществами такого сенсора являются их способность оперировать при комнатной температуре, большинство газовых сенсоров требует наличие нагревательных элементов. Химирезистивные датчики обладает хорошей чувствительностью и коротким временем отклика в зависимости от материала активного слоя. Также большим плюсом является возможность создания матрицы из сенсоров, что позволит также улучшить чувствительность. Помимо прочего, создание таких сенсоров довольно дешевое и экономичное [18].

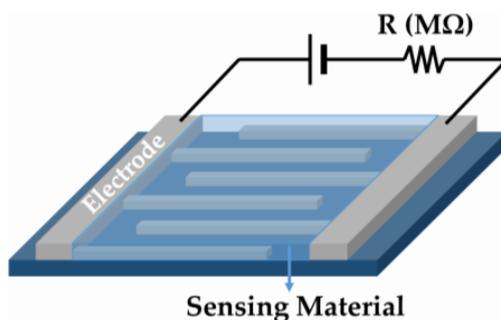


Рисунок 3 - Химирезистор, меняющий сопротивление из-за взаимодействия активного слоя с аналитом. Сопротивление измеряется между двумя электродами [19].

Недостатками химирезистивных датчиков являются зависимость от стабильности температуры [20] и очень короткая продолжительность работы. Также такие сенсоры претерпевают дрейф базовой линии при измерении сопротивления [19].

Спектр применений сенсоров довольно широк от мониторинга состояния пациента [21] до отслеживания загрязнений воздуха [22].

Ниже представлена таблица сравнительной характеристики различных сенсоров на основе органических соединений при отслеживании различных газов.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика газовых сенсоров (R - отклик, t_{res} - время отклика, t_{rec} - время восстановления ПД - пределы детектирования)

Полимер	R, %	t_{res} , с	t_{rec} , с	ПД, ppm	Газ	Источни к
PANI/Ti O ₂	1.67 (23 ppm), 5.55 (117 ppm)	18	58	23-141	NH ₃	[23]

графен– PEDOT: PSS	6.9 (1000ppm)	360	300	25-1000	NH ₃	[24]
CSA- допиров анный PANI- CdS	76 (100 ppm)	-	413	10-100	H ₂ S	[25]
Полиани лин (emeraldi ne)/TiO ₂ nanocom posite	1.63	83	130	-	H ₂	[26]
Углерод ные нанотру бки/PM MA	809	1	3	-	CH ₂ Cl ₂	[27]
PANI– WO ₃ гибрид	10.6 (10ppm)	-	-	5-80	SO ₂	[28]

1.4.1 Сенсоры газа на основе LIG

Первые сенсоры на основе LIG были разработаны для измерения окружающих газов основываясь на свойстве теплопроводности материала [29]. Данные сенсоры оперировали без использования дополнительных материалов, в качестве активного слоя выступал графен, полученный при лазерном облучении.

Принцип работы основывается наличием Джоулевского тепла, которое переходит в окружающую среду за счет конвективной потери тепла (закон охлаждения Ньютона):

$$q = hA(T_a - T_b)$$

Где q – потери тепла в окружающую среду, h – коэффициент тепловых потерь, A – площадь активного элемента, T_a , T_b – температуры молекул газа и активного элемента соответственно. Тепло в материале возникает за счет тока от приложенного напряжения, т.к. активный участок имеет высокое сопротивление, тепловая энергия, пропорциональная падению мощности $P=I^2R$, концентрируется на данном участке. Подводя газ, тепловая энергия перераспределяется между молекулами газа, взаимодействующего с элементом. Количество энергии, передаваемого газу, зависит от его теплопроводности. Описанные в литературе газовые сенсоры на основе LIG без использования иного материала в качестве активной области, работают по похожему принципу.

Гибкий газовый сенсор (Тип 1), который был синтезирован путем облучения подложки PI CO₂-лазером 10,6 мкм для генерации LIG. Устройство состоит из электродов LIG, ширина составляет приблизительно 200 мкм. Расположены электроды между двумя площадками, они используются в качестве контактов. Между электродами намеренно оставлен зазор размером около 20 мкм, однако небольшие нити LIG (обозначенные белой стрелкой на вставке) перекрывают зазор и обеспечивают транспортировку носителей заряда. СЭМ-изображение с высоким разрешением области перекрытия наноразмерных нитей показано на рисунке 2. LIG также очень пористый, что обеспечивает чрезвычайно большую площадь поверхности. Спектроскопия комбинационного рассеяния показывает 2D-пик с центром $\sim 2697 \text{ см}^{-1}$, который подтверждает, что LIG действительно состоит из графена. Пик отличается от пика графита, который состоит из пиков 2D₁ и 2D₂, которые обычно смещены вверх по сравнению с графеном ($\sim 2725 \text{ см}^{-1}$).

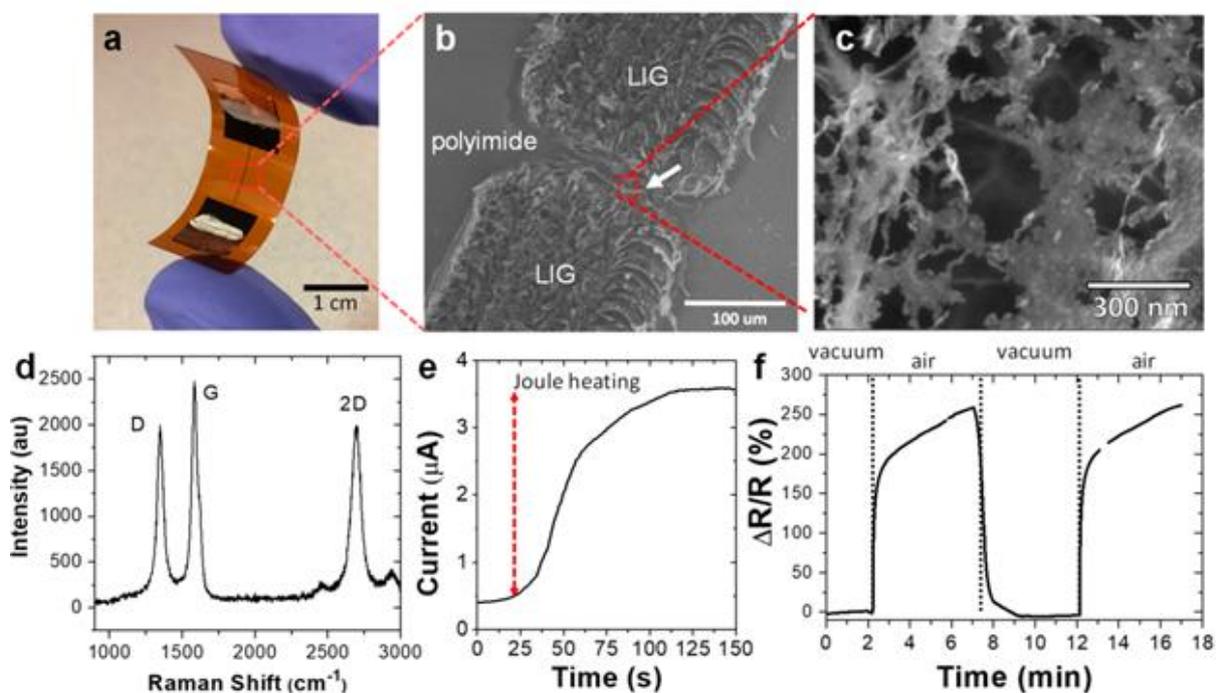


Рисунок 3. (а) Оптическое изображение газового сенсора типа 1 на основе LIG на подложке из PI. (б, в) СЭМ-изображение канала ~ 20 мкм в устройстве LIG. Нити LIG (белая стрелка) между электродами LIG. (д) Спектр комбинационного рассеяния LIG. (е) Ток устройства после приложения напряжения в 5 В. (ф) Реакция (изменение сопротивления) газового датчика при контакте с воздухом. Напряжение датчика $V_s = 5$ В.

[29]

Принцип работы сенсора типа 1 основывается на спонтанно-образованном канале между электродами. Тип 2 является более механически стабильной версией, за счет увеличения площади канала между электродами. Таким образом, увеличивая площадь активного элемента, достигаются другие пределы температур. Согласно автору, свойства газового сенсора зависят от температуры и геометрии активного слоя. За счет увеличения активной площади достигается не только механическая стабильность, но также улучшается повторяемость результатов от $\sim 20\%$ (тип 1) до 100% (тип 2). Однако, такой дизайн значительно теряет в чувствительности (ухудшение с 250% до $\sim 3.9\%$).

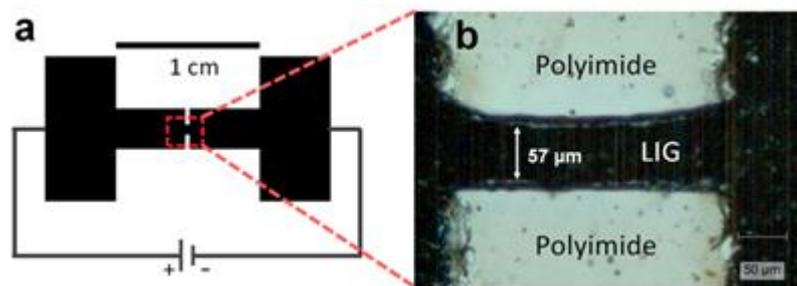


Рисунок 4. (а) Схема газового сенсора типа 2. Черные области представляют LIG. (б) Оптическое изображение нити LIG шириной 57 мкм. [29]

1.4.2 Электроды газового сенсора

Электроды входят в конструкцию газового сенсора и являются его неотъемлемой частью. В зависимости от типа сенсора, электроды могут выполнять различную роль, некоторые работы описывают конструкцию сенсора, в которой один материал выполняет функцию электродов и активного слоя [29].

На данный момент существует несколько способов улучшения производительности газовых сенсоров за счет модифицирования электродов: оптимизация формы электродов, что связано с увеличением активной площади [30], допирование материалов [31], создание p-n перехода между электродами и активным слоем [32]. Помимо всевозможных модификаций некоторые материалы природно обладают хорошим потенциалом для применения в качестве электрода за счет каталитической активности, термической и химической активностей, а также за счет морфологии [33], [34]. Наиболее простым и доступным методом является оптимизация формы электродов, по этой причине данный способ использовался в настоящей работе.

Сенсоры, принцип работы которых базируется на изменении сопротивления, называются импедансными. Зарекомендовавшая себя форма электродов, подходящая для сенсоров на основе изменения импеданса и емкости имеет название встречно-штыревые, в иностранной литературе упоминаются как interdigitated electrodes (IDE) [35]. Такая форма успешно используется в большом многообразии детектирующей электроники, хорошими примерами являются химические [36] и биосенсоры [37], [38].

1.4.3 Материалы активного слоя

Наиболее используемыми материалами активного слоя обычно являются токопроводящие полимеры, такие как полипиррол (PP), полианилин (PANI), политиофены (PTs) и др [39], [40].

Помимо полимеров также используются различные углеродные соединения, современным и одним из наиболее функциональных материалов считается восстановленный оксид графена (rGO). rGO является очень популярным материалом в области изучения газовых сенсоров, т.к. прост в изготовлении, имеет хорошие электрические и механические свойства [41], а также имеет возможность модификации различными функциональными группами, что дает возможность улучшить селективность таким способом [42].

Недостатки применения rGO в качестве активного слоя вытекают из его структуры, т.к. отдельные хлопья, из которых состоит материал, могут быть разных габаритов, форм, толщин и др. Такая структура приносит нестабильность отклика активного слоя, т.к. влияет на электрические свойства [43]. Помимо того, rGO обладает очень низкой селективностью [44].

Некоторые исследования газовых сенсоров на основе rGO обсуждаются в недавних обзорных статьях [45, 46]. В статьях сообщается о сенсорах rGO, способных обнаруживать химически агрессивные газы, такие как NO₂, NH₃ [47], Cl₂ и NO [48] с типичным временем отклика и восстановления порядка нескольких десятков минут. Недавние исследования по обнаружению газа с помощью rGO также включают различные модификации как материала сенсора (например, модификация rGO наночастицами палладия [49]), так и конструкции (например, обнаружение газа с помощью полевых транзисторов на основе rGO [50]).

2. Объекты и методы исследования

2.1 Используемые материалы

Во время проведения экспериментов использовались материалы, представленные в таблице 1.

В данной работе необходимо было проверить влияние наноматериалов на свойства LIMPc. Медь была выбрана из-за хороших каталитических свойств. Благодаря этим свойствам медь часто используется в производстве графена методом химического осаждения из газовой фазы. По выдвинутой гипотезе медные наночастицы имеют хороший потенциал для максимизации конвертации ПЭТа в LIMPc. Серебряные наночастицы обладают хорошими фотокаталитическими свойствами, в частности обладают свойством плазмонного резонанса. В первоначальном источнике описывалось, что помимо фототермического эффекта, возможно присутствует влияние плазмонного резонанса алюминиевых наночастиц. Размер наночастиц составляет 60-80 нм.

Таблица 1 - Материалы, используемые для подготовки сенсора

Наименование	Химическая формула	CAS	Внешний вид
Медные наночастицы	Cu	7440-50-8	Бордовый порошок
Серебряные наночастицы	Ag	7440-22-4	Темно-серый порошок
Этанол	C ₂ H ₆ O	64-17-5	Бесцветная жидкость
ПЭТ	(C ₁₀ H ₈ O ₄) _n	25038-59-9	Прозрачный
GO	C _x O _y H _z	7782-42-5 (graphite)	Черная жидкость

2.2 Оборудование

Для проведения исследования были использованы следующие приборы: дозаторы переменного объема 2-20 и 100-1000 мкл, аналитические весы, ультразвуковая ванна, лазерный гравер TwoWin-3000 с длиной волны 450 нм.

Для исследования структуры и свойств LIMPc были проведены спектроскопия комбинационного рассеяния и четырехточечное измерение электрических свойств при содействии Технического Университета г. Хемниц.

2.3 Методика подготовки подложек LIMPc

Первым шагом были подготовлены растворы медных и серебряных наночастиц с соотношением 30 мг, 40 мг, 50 мг на 1,6 мл этанола. Далее растворы были помещены в ультразвуковую ванну на 10 минут, чтобы

избежать агрегирования наночастиц и получения более равномерного слоя. Подложки ПЭТа и очищены с помощью этанола и высушены. На очищенные подложки были нанесены растворы наночастиц в объеме 1 мкл, такого объема достаточно, чтобы полностью покрыть подложку раствором. Образцы были высушены и облучены лазерным излучением с длиной волны 450 нм с разным процентом мощности (30-70%).

2.4 Оптимизация параметров лазерного излучения

Для оптимизации структуры образца (получение большей проводимости) необходимо подобрать параметры лазерного облучения. В таблице ниже приведены используемые параметры.

Таблица 2 - Параметры лазерного излучения

№	Контратность	Мощность лазера	Регулировка глубины
1	128	30	20
2	128	40	20
3	128	50	20
4	128	60	20
5	128	70	20

Оптимизация параметров осуществлялась изменением процентного соотношения мощности от 30% до 70%. Данный параметр был выбран из-за прямой зависимости с фототермическим эффектом, согласно литературе [5] является доминирующим.

Конечным результатом оптимизации должно являться наименьшее и стабильное сопротивление, наилучшая плотность дефектов материала.

Качество материала проверялось двумя способами - четырехэлектродным измерением сопротивления и спектроскопией комбинационного рассеяния.

2.5 Методика приготовления газового сенсора

После исследований структуры с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния и четырехточечного измерения сопротивления было решено использовать подложки, сделанные на основе медных наночастиц, облученные с 50%-ной мощностью лазера. С помощью облучения необходимо получить определенную форму электродов (встречно-штыревые электроды или IDE). Паттерн облучения представлен на рисунке 5.

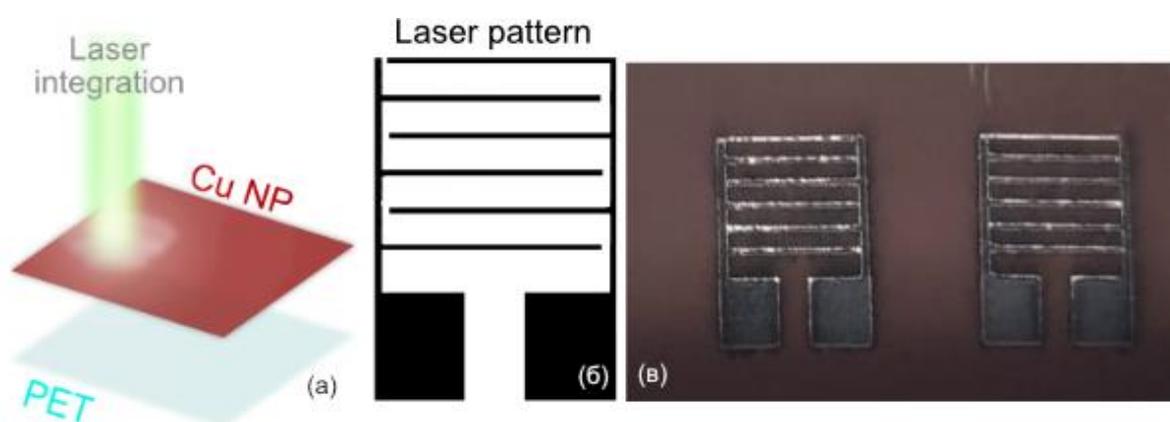


Рисунок 5 - Приготовление электродов: (а) Методика приготовления электродов, (б) используемый паттерн облучения, (в) готовые электроды.

После подготовки электродов необходимо нанести оксид графена (GO) в качестве активного слоя в объеме 110 мкл на поверхность электродов. Предварительно перед нанесением GO подложки были промыты от медных наночастиц, чтобы избежать формирования LIMPs при восстановлении оксида графена. Далее, после того как раствор GO высох, было произведено облучение с помощью 30% мощности лазера для восстановления оксида графена до rGO.

2.6 Методика определения характеристик сенсора

Для описания параметров сенсора было решено построить калибровочный график. Данная зависимость несет в себе такую информацию, как: предел обнаружения; рабочий диапазон, в котором сенсор может оперировать; диапазон линейности зависимости выходного сигнала от концентрации вещества.

Емкость с сенсором, подключенным к потенциостату и закрывалась септой. Емкость ставилась на плитку, нагретой до температуры 45°C. После ёмкость продувается и заполняется аргоном, излишки выводились через вторую иглу. Таким образом была реализована система очистки колбы от инородных газов.

Для того, чтобы проверить отклик сенсора на инертный газ, в емкость с сенсором подводился аргон через микрошприц, отклик сенсора фиксировался через потенциостат, который подавал напряжение на образец в размере 2В. Для экспериментов с двумя газами было решено сделать два одинаковых сенсора по одинаковой методике.

Похожим образом проводился эксперимент с газом-аналитом. С помощью микрошприца в колбу вводили аналит (этанол) 3 раза в объеме 20 мкл каждое введение, который мгновенно испарялся. На основании отклика при различных концентрациях аналита строился калибровочный график. После каждого измерения емкость продувалась и наполнялась аргоном снова. Отклик регистрировался в виде падения тока, протекающего через образец. Падение сопротивления рассчитывается по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I}$$

Так как сопротивление сенсоров варьируется в большом диапазоне (до единиц МОм), и является всегда индивидуальной, т.к. зависит от материалов активного слоя и электродов, принято сравнивать отклик сопротивления через чувствительность [51]:

$$S = \left(\frac{R_{\text{газ}} - R_{\text{нач}}}{R_{\text{нач}}} \right) \times 100\%$$

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Объектом исследования является газовый сенсор на основе композита облученного полимера и наночастиц оксида железа. Целью исследования является создание газового сенсора методом лазерного облучения нанесенных на полиэтилен терефталат (ПЭТ) пленок оксида железа, обладающего оптимальными характеристиками чувствительности, селективности, стабильности и времени отклика. Разработка газового сенсора особенно важна для промышленных предприятий, работающих с химическими веществами, т.к. концентрация вредоносных носителей в воздухе не должна превышать стандартных описанных норм, а также одним из важных применений данной технология является изучение объектов в космической атмосфере.

Характеризация материала активного слоя происходила при помощи спектроскопии комбинационного рассеяния, механических испытаний на изгиб и измерения сопротивления. Конструкция сенсора состоит из лазерно-индуцированного графена с вплавленными наночастицами оксида железа, выступающих в роли активного слоя; платиновых электродов для измерения сопротивления активного слоя и регистрирующего сопротивление прибора.

Данный раздел выпускной квалификационной работы предназначен для оценки коммерческого потенциала и перспектив реализации проектов, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения, планирования, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования. Целью раздела «Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент» является оценка

эффективности и возможности проведения данного исследования, оценки рисков и затрат.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов проекта

Газовые сенсоры широко востребованы и по сей день, т.к. комплексность производства и используемые технологии постоянно улучшаются. Используются новые материалы, соответственно меняется состав веществ, загрязняющих воздух. Таким образом потенциальными потребителями такой технологии могут быть производственные предприятия, заводы и фабрики. Помимо прочего, высокопрочные газовые сенсоры очень востребованы в изучении космоса и космических объектов, в том числе космической пыли и атмосферы.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Тема данной ВКР предполагает разработку сенсора на основе полимерного композита. Анализ конкурентных решений в области проектирования освещения производился путем сравнения критерий оценок со смежным научно-техническим аналогом – сенсором на основе лазерно-индуцированного графена.

Таблица 6 - Анализ конкурентных решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}

1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	3	4	0,3	0,4
2. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,2	5	4	1	0,8
3. Простота эксплуатации	0,0 5	5	5	0,2 5	0,25
4. Энергоэкономичность	0,1 5	4	3	0,6	0,45
5. Безопасность	0,0 3	3	4	0,0 9	0,12
6. Надежность	0,1 5	5	3	0,7 5	0,45
7. Массогабаритные параметры устройства	0,0 2	5	5	0,1	0,1
Экономические критерии оценки эффективности					
Конкурентоспособность продукта	0,1	5	4	0,5	0,4
Уровень проникновения на рынок	0,1	4	4	0,4	0,4
Цена	0,1	3	4	0,3	0,4
Итого:	1			4,3 4	3,77

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Полученный анализ показывает, что сенсор на основе разрабатываемого материала обладает большим функционалом и хорошей надежностью, по сравнению с аналогом. Помимо этого, материал обладает большей энергоэкономичностью, т.к. имеет обладает хорошими

электрическими свойствами. Таким образом, разработанный сенсор имеет достаточную конкурентоспособность на рынке, по сравнению с электроникой на основе лазерно-индуцированного графена.

4.1.3 SWOT-анализ

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

Таблица 7 – SWOT–анализ

	<p>Сильные стороны проекта (С):</p> <p>С1. Низкая стоимость по сравнению с схожими версиями;</p> <p>С2. Долгий срок службы;</p> <p>С3. Простота и быстрота производственного процесса;</p> <p>С4. Возможность модификаций и оптимизации под различные условия эксплуатации;</p> <p>С5. Простота использования.</p>	<p>Слабые стороны проекта (СЛ):</p> <p>СЛ1. Производственный процесс негативно влияет на окружающую среду;</p> <p>СЛ2. Необходимость высокой квалификации персонала для производства;</p> <p>СЛ3. Необходимость дальнейшей оптимизации концепта.</p>
<p>Возможности (В):</p> <p>В1. Возможность Партнерства и обмена опытом с компаниями и научно-исследовательскими группами, работающими в смежной сфере;</p> <p>В2. Возможность создания новой</p>	<p>Низкая стоимость материалов дает возможность глубокой модернизации технологии.</p> <p>Т.к. новый материал имеет хорошие электрические свойства и стабильность, данный материал имеет возможность применения не только в сфере сенсоров. Более того,</p>	<p>Т.к. материал и концепт сенсора на основе этого материала находится на стадии разработки, для коммерциализации проекта необходимо затратить количество ресурсов для модификации и улучшений. Работа подразумевает использование наноматериалов и лазерного</p>

методики производства электроники на основе полученного материала; В3. Расширение перечня оказываемых услуг.	постоянное развитие на рынке способствует неугасающей заинтересованности различных организаций в более эффективном материале, особенно в дешевом и высокофункциональном.	излучения, что говорит о необходимости в высококвалифицированном персонале
Угрозы (У): У1. Наличие большой конкуренции на рынке; У2. Технология имеет узконаправленный спектр применений; У3. Негативно влияет на окружающую среду.	В связи с кризисной ситуацией в экономике, возникновение пандемии, существует определенная угроза, связанная со снижением спроса на технологию. Долгий срок службы светодиодных элементов может привести к «переполнению» рынка.	Влияние на окружающую среду понижает спрос на продукт, в связи с необходимостью принятия мер по необходимой переработке использованных материалов.

По итогам проведенного SWOT–анализа можно сделать следующие выводы: сильными сторонами являются дешевизна и многофункциональность сенсора за счет стоимости материалов и возможности модификаций. Для достижения оптимальных результатов работ по реализации коммерческого производства, необходимым является проведение исследований по оптимизации продукта до конечного этапа, а также оптимальное решение проблемы влияния на окружающую среду.

4.1.4 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 8 представлен перечень вопросов, по которым необходимо произвести оценку.

Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации определяется по формуле:

$$B_{\text{СУМ}} = \sum B_i, \quad (2)$$

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

B_i – балл по i -му показателю.

Таблица 8 – 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	1	1
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	2
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	3
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	3	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	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
ИТОГО БАЛЛОВ		32	29

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.

4.2 Инициация проекта

4.2.1 Цели и результаты проекта

В таблице 9 представлена информация о заинтересованных сторонах проекта.

Таблица 9 - 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 10 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 10 - Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Показать принципиальную возможность использования нового материала в сфере гибкой электроники
Ожидаемые результаты проекта:	Получение рабочего прототипа газового сенсора и описание его характеристик
Критерии приемки результата проекта:	Имеется описание и расчет электрохимических свойств материала, а также продемонстрировано его потенциальное применение за пределами 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 4 и 5 можно сказать о том, что выполнение поставленных задач поможет не только определить направления развития проекта, но и позволит продемонстрировать готовое к использованию устройство.

4.2.2 Организационная структура проекта

В таблице 11 приведена информация о рабочей группе проекта, ролях, функциях и трудозатратах каждого.

Таблица 11 - Рабочая группа проекта

Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, день
Научный руководитель – Шеремет Е.С.	Определение темы исследования, постановка задачи и целей проекта, консультирование исполнителей проекта, участие в обсуждениях по результатам работы, промежуточная проверка достигнутых результатов	30
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	90

	необходимых для достижения цели экспериментов и расчетов. Обработка полученных данных.	
Итого:		120

Планирование этапов работ по выполнению НИР включает в себя составление тщательное планирование необходимых работ и составление календарного плана для их выполнения (Таблица 12).

Таблица 12 - 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	Шерemet E.C. Ким Л.
2	Обзор литературы	55	6.02.2021	1.04.2021	Ким Л.
3	Составление плана работ	5	5.02.2021	10.02.2021	Шерemet E.C. Ким Л.
4	Проведение серии экспериментов	42	1.04.2021	12.05.2021	Ким Л.
5	Анализ результатов	42	1.04.2021	12.05.2021	Шерemet E.C. Ким Л.
6	Обсуждение результатов	12	1.05.2021	12.05.2021	Шерemet E.C. Ким Л.
7	Оформление расчетно-пояснительной записки	18	3.05.2021	20.05.2021	Ким Л.

8	Сдача отчета о работе	5	21.05.2021	24.05.2021	Ким Л..
---	-----------------------	---	------------	------------	---------

4.2.3 Бюджет проекта

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

4.2.4 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:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{расxi} , \quad (8)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расxi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

Π_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 13 - Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
ПЭТ	шт.	1	943,0	943,0
Наночастицы меди	г.	50	7590,0	379,5
Наночастицы серебра	г.	50	24250,0	1212,5
Этанол	л.	0,1	900,0	90,0
Предметные стекла	уп.	1	1890,0	378,0
Эпипендорфы 1,5 мл	уп.	1	604,0	181,0
Наконечники для дозаторов (0,1-200 мкл)	уп.	1	7500,0	3750
Перчатки одноразовые латексные	уп.	1	1450,0	725,0
ИТОГО:				7659,0

4.2.5 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:

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

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 14.

Таблица 14 - 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 аморти. оборуд., %	Сумма аморти. 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	Ультразвуковая ванна	1	3,500	42	18,0	0,72
6	Рамановский спектрометр NT-MDT SI	1	8592,000	10	18,0	42371,5
7	Мультиметр Voltcraft	1	6,017	20	18,0	59,35
7	Аналитические весы (Adventure)	1	46,140	15	12,0	227,54
8	Персональный компьютер	1	127,000	83	10,0	2887,95
ИТОГО:						45694,03

4.2.6 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 28 раб. дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;

– при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.}.$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_m = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_m = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.},$$

где $Z_{\text{мс}}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; $k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равен 0,3; $k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 15 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52/14	104/14
- выходные дни		

- праздничные дни		
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{мс}, руб$	$k_{пр}$	k_{δ}	k_p	$Z_m, руб$	$Z_{дн}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	4.4	9448,12
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	33.6	58568,16
Итого:								68016,28

4.2.7 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} * Z_{осн} = 0,15 * 9448,12 = 1417,2 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} * Z_{осн} = 0,15 * 58568,16 = 8785,2 \text{ руб.}$$

(4.13)

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования равный - 0,15).

4.2.8 Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 * (9448,12 + 1417,2) = 6738 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}}(Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0.3 * (58568,16 + 8785,2) = 20206 \text{ руб}$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2021 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

4.2.9 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Величина накладных расходов:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{пр}},$$

где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,16.

4.2.10 Бюджетная стоимость НИР

Таблица 17 – Группировка затрат по статьям

Наименование статьи						
1	2	3	4	5	7	8
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Накладные расходы	Стоимость бюджета
45694,03	7659,0	68016,28	10202,4	26944	25362,51	183878,22

4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

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

Определим значения показателя для разрабатываемой технологии и аналогов, приведенных в пункте 4.1.1 данной работы.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

4.3.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 4.17).

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведен в форме таблицы 18.

Таблица 18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	5	5
2. Простота эксплуатации	0,15	4	4
3. Энергосбережение	0,05	4	4
4. Надежность	0,1	4	3
5. Безопасность	0,15	3	3
5. Конкурентоспособность продукта	0,2	5	4
6. Цена	0,2	4	4
ИТОГО	1	29	27

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

$$I_{исп.2} = 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,05 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 = 3,9;$$

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

В данном разделе бы проведен сравнительный анализ проекта с существующими конкурентами. Анализ показал хорошую конкурентоспособность исследуемого материала, по сравнению с подобными вариантами.

5. Социальная ответственность

Введение

Объектом исследования является газовый сенсор на основе композита облученного полимера и наночастиц оксида железа. Целью исследования является создание газового сенсора методом лазерного облучения нанесенных на полиэтилен терефталат (ПЭТ) пленок оксида железа, обладающего оптимальными характеристиками чувствительности, селективности, стабильности и времени отклика. Разработка газового сенсора особенно важна для промышленных предприятий, работающих с химическими веществами, т.к. концентрация вредоносных носителей в воздухе не должна превышать стандартных описанных норм, а также одним из важных применений данной технология является изучение объектов в космической атмосфере.

Характеризация материала активного слоя происходила при помощи спектроскопии комбинационного рассеяния, механических испытаний на изгиб и измерения сопротивления. Конструкция сенсора состоит из лазерно-индуцированного графена с вплавленными наночастицами оксида железа, выступающих в роли активного слоя; платиновых электродов для измерения сопротивления активного слоя и регистрирующего сопротивление прибора.

В ходе подготовки и анализа образца используются такое оборудование как лазерный гравировщик и спектрометр комбинационного рассеяния, содержащие в конструкции электромагнитное излучение, способное вызвать частичную или полную слепоту, повреждения кожи. В связи с предотвращением опасного влияния электромагнитного излучения должны быть предложены меры безопасности.

Целью данного раздела является изучение предложенного объекта исследования с точки зрения социальной ответственности, выявление

вредоносных факторов в ходе выполнения выпускной квалификационной работы, а также определение мер предотвращения опасного воздействия.

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 труда (в ред. Федерального закона от 28.12.2013 N 421-ФЗ);

- подготовку и дополнительное профессиональное образование в порядке, установленном настоящим Кодексом, иными федеральными законами (в ред. Федерального закона от 02.07.2013 N 185-ФЗ).

В свою очередь от работника требуется:

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

- соблюдать правила внутреннего трудового распорядка (в ред. Федерального закона от 30.06.2006 N 90-ФЗ);

- соблюдать трудовую дисциплину;

- выполнять установленные нормы труда;

- соблюдать требования по охране труда и обеспечению безопасности труда;

- бережно относиться к имуществу работодателя (в том числе к имуществу третьих лиц, находящемуся у работодателя, если работодатель

несет ответственность за сохранность этого имущества) и других работников (в ред. Федерального закона от 30.06.2006 N 90-ФЗ);

- 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) (в ред. Федерального закона от 30.06.2006 N 90-ФЗ).

5.1.2 Эргономические требования к рабочему месту

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 - конструкцией рабочего места должно быть обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля, учитывая антропометрические показатели работающего в зависимости от пола.

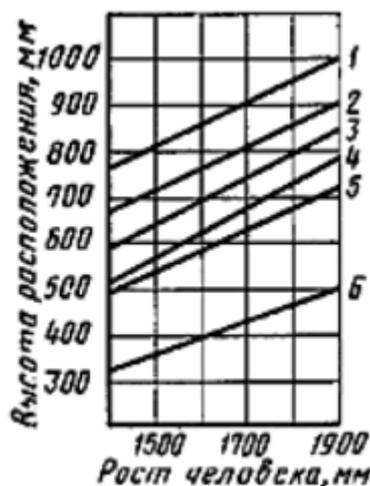


Рисунок 6 - Номограмма зависимости высоты рабочей поверхности для разных видов работ (1-4), пространства для ног (5) и высоты рабочего сиденья (6) от роста человека

Высоту рабочей поверхности, а также пространство для ног и сиденья выбирают по номограмме (Рис. 6). Относительно роста работника (1580 мм) высота рабочей поверхности (1), пространства для ног (2) и рабочего сиденья (3) составляет – (1) 680 мм; (2) 610; (3) 410 мм. Соответствующие

высоты рабочего места – (1) 650 мм; (2) 640 мм; (3) 410 мм, что приблизительно соответствует нормам.

Другим не менее важным фактором эргономического требования к рабочему месту является оптимальное расположение средств отображения информации. Следуя требованиям ГОСТ 22269-76 необходимые требования:

1. Средства отображения информации необходимо группировать и располагать группы относительно друг друга в соответствии с последовательностью их использования или с функциональными связями элементов систем, которые они представляют. При этом средства отображения информации необходимо размещать в пределах групп так, чтобы последовательность их использования осуществлялась слева направо или сверху вниз.

2. Лицевые поверхности индикаторов следует располагать в оптимальной зоне информационного поля в плоскости, перпендикулярной нормальной линии взора оператора, находящегося в рабочей позе. Допускаемое отклонение от этой плоскости - не более 45°; допускаемый угол отклонения линии взора от нормальной - не более 25° для стрелочных индикаторов и 30° для индикаторов с плоским изображением.

Средствами отображения являются экраны монитора, угол наклона которых регулируется в соответствии со спецификацией – от 0 до 30°, что входит в предел допускаемого отклонения.

5.2.1 Производственная безопасность

Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 перечень опасных и вредных факторов при проведении работы в соответствии с нормативными документами представлены в таблице 19.

Таблица 19 - Возможные опасные и вредные факторы

	Факторы	Этапы работ	
--	---------	-------------	--

	(ГОСТ 12.0.003-2015)	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	Нормативные документы
1)	Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4-548-96
2)	Химические вещества		+		ГОСТ 12.1.007-76; ГОСТ 12.1.005-88; СанПиН 2.2.4.3359-16; СП 60.13330.2016; СП 52.13330.2016; СП 2.1.8.566-96; ГОСТ Р 54617.2-2011; ГОСТ Р 56748.1-2015.
3)	Работа с лазером		+		ГОСТ 12.1.030-81; ГОСТ 12.1.038-82; ГОСТ 12.1.045-84; ГОСТ 12.1.006-84; ГОСТ 30494-2011; Р 2.2.2006-05.

5.2.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Отклонение показателей микроклимата

Оптимальными параметрами микроклимата являются (ГОСТ 30494-2011) сочетание значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нормальное тепловое состояние организма при минимальном напряжении механизмов терморегуляции и ощущение комфорта не менее чем у 80% людей, находящихся в помещении. Нормы для помещения общественного

и административного характера описаны в таблице ниже. Согласно категоризации помещений (ГОСТ 30494-2011) лаборатории 207 и 306 относятся к классу 2 - помещения, в которых люди заняты умственным трудом, учебой.

Таблица 20 - Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в обслуживаемой зоне общественных и административных зданий

Период года	Наименование помещения или категория	Температура воздуха, °С		Результирующая температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		оптимальная	допустимая	оптимальная	допустимая	оптимальная	допустимая, не более	оптимальная, не более	допустимая, не более
Холодный	2	19-21	18-23	18-20	17-22	45-30	60	0,2	0,3
Теплый	Помещения с постоянным пребыванием людей	23-25	18-28	22-24	19-27	60-30	65	0,15	0,25

При обеспечении показателей микроклимата в различных точках обслуживаемой зоны допускается:

- перепад температуры воздуха не более 2°С для оптимальных показателей и 3°С – для допустимых;
- перепад результирующей температур помещения по высоте обслуживаемой зоны – не более 2°С;
- изменение скорости движения воздуха – не более 0,07 м/с для оптимальных показателей и 0,1м/с – для допустимых;
- изменение относительной влажности воздуха – не более 7% для оптимальных показателей и 15% - для допустимых.

Химические вещества

По степени воздействия на организм вредные вещества подразделяют на четыре класса опасности:

1-й - вещества чрезвычайно опасные;

2-й - вещества высокоопасные;

3-й - вещества умеренно опасные;

4-й - вещества малоопасные.

Класс опасности вредных веществ устанавливают в зависимости от норм и показателей, указанных в таблице 21.

Таблица 21 – нормы показателей для классов опасности вредных веществ

Наименования показателя	Нормы для класса опасности			
	1-го	2-го	3-го	4-го
Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Менее 0,1	0,1-1,0	1,1-10,0	Более 10,0
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	Менее 15	15-150	151-5000	Более 5000
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	Менее 100	100-500	501-2500	Более 2500
Средняя смертельная концентрация в воздухе мг/м ³	Менее 500	500-5000	5001-50000	Более 50000
Коэффициент возможности ингаляционного отравления (КВИО)	Более 300	300-30	29-3	Менее 3
Зона острого действия	Менее 6,0	6,0-18,0	18,1-54,0	Более 54,0
Зона хронического действия	Более 10,0	10,0-5,0	4,9-2,5	Менее 2,5

Самым опасным фактором при работе в химической лаборатории является наличие химикатов, не используемых в исследовании поскольку химические вещества, с которыми мы работаем, практически безвредны.

В ГОСТ 12.1.007-76 указано, какие требования предъявляются к рабочему месту с возможной химической опасностью:

1. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны являются обязательными санитарными нормами для использования при проектировании производственных зданий, технологических процессов, оборудования и вентиляции, а также для профилактического и текущего санитарного надзора.

2. Содержание в организме вредных веществ, поступающих в него различными путями (при вдыхании, через кожу, через рот), не должно превышать биологических предельно допустимых концентраций (ПДК).

3. Для периода, предшествующего проектированию производства, следует временно установить приблизительные уровни безопасного воздействия (SLE) путем расчета по физико-химическим свойствам или путем интерполяции и экстраполяции в ряды, сходные по составу соединений или по индикаторам острой опасности.

4. В отдельных случаях, по согласованию с органами государственного санитарного надзора, при проектировании производства допускается использование СЭСН не менее 1 мг/м ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (с изм. N 1,2) в воздухе рабочей зоны (умеренно и малоопасные вещества).

5. SLE должны быть пересмотрены через два года после их утверждения или заменены ПДК с учетом накопленных данных о соотношении здоровья работников и условий труда.

Подготовка образцов предполагала лазерное облучение ($\lambda = 450$ нм) железных наночастиц (50-70 нм), а также кремниевых наностержней

(диаметром 50-70 нм) и алюминиевых наночастиц (50-70 нм). Нанопорошки имеют свойство летучести, что приводит к запыленности воздуха рабочей зоны. В данном случае используются нанопорошки в химических растворах, это удерживает наноматериалы в жидкой фазе, что предотвращает их воздействие атмосферу. Таким образом, меры безопасности для наночастиц схожи с мерами безопасности для выполнения работ с химическими веществами.

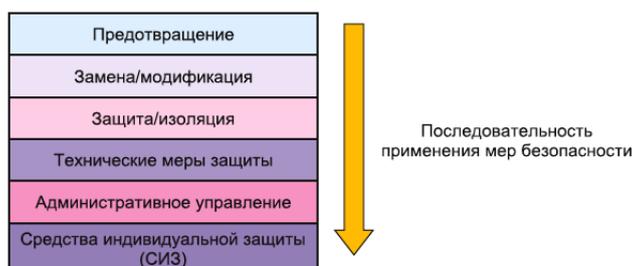


Рисунок 7 - Порядок приоритетности мер безопасности

При работе с наноматериалами (ГОСТ Р 56748.1-2015) выделяются несколько уровней в последовательности применения мер безопасности. Приоритетной (1) использования наноматериала в исследовании, либо (2) его замена на более безопасный аналог. Защита и изоляция (3) необходимы для исследователей, занимающихся синтезом и разработкой новых наноматериалов, таким образом уровни с 1 по 3 неприменимы для данного исследования. Соответственно, применялись техническая защита, административное управление и средства индивидуальной защиты. Четвертой по важности мерой является техническая защита, таким образом все эксперименты проводились под вытяжкой, необходимой для минимизации выброса летучих наночастиц в атмосферу. Важно не допустить контакт с кожей и дыхательными путями, что контролируется использованием рабочей одежды и защитных средств (резиновых перчаток, средств защиты респираторных путей и специальных очков).

Работа с лазерным излучением

Подготовка образца и последующий анализ предполагает использование лазерного облучения, видимого и инфракрасного спектров.

При использовании лазерного облучения (ГОСТ 12.1.040-83) необходимо защитить зрительные органы от прямого и непрямого (отраженного и рассеянного) попадания излучения. Для этого конструкция помещается в закрытый, непрозрачный колпак. Дополнительным средством безопасности являются защитные очки-фильтры для видимого и инфракрасного диапазона длин волн.

Электромагнитное излучение спектроскопа комбинационного рассеяния помещается в механическую несущую систему и закрыта от глаз оператора. Образец на предметном столике, подвергающийся воздействию облучения накрывается специальным герметичным колпаком.

Помимо специальных средств защиты, также используются предупреждающие знаки, защитные предохранители, вентиляция рабочего помещения, экзамены по технике безопасности и контроль средств индивидуальной защиты.

5.2.4 Обоснование мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов на исследователя

Отклонение показателей микроклимата

Результирующую температуру помещения следует принимать при скорости движения воздуха до 0,2 м/с, равной температуре шарового термометра при диаметре сферы 150 мм.

Результирующую температуру помещения t_{su} , °С, при скорости движения воздуха до 0,2 м/с следует определять по формуле

$$t_{su} = \frac{t_p + t_r}{2}$$

Где t_p - температура воздуха в помещении, °С;

t_r - радиационная температура помещения, °С.

Радиационную температуру t_r , °С, следует вычислять по температуре шарового термометра по формуле:

$$t_r = t_b + m \sqrt{V(t_b - t_p)}$$

где t_b - температура по шаровому термометру, °С;

m - константа, равная 2,2 при диаметре сферы до 150 мм,

V - скорость движения воздуха, м/с;

Согласно показателям шарового термометра $t_b = 18,6^\circ\text{C}$, $t_p = 17,8^\circ\text{C}$
(Холодный период).

$$t_r = 18,6 + 2,2 \sqrt{0,2(|18,6 - 17,8|)} = 19,3^\circ\text{C}$$

Следовательно, результирующая температуры помещения:

$$t_{su} = \frac{18,6 + 19,3}{2} = 19^\circ\text{C}$$

Согласно показателям шарового термометра $t_b = 24,1^\circ\text{C}$, $t_p = 24,3^\circ\text{C}$
(Теплый период)

$$t_r = 24,1 + 2,2 \sqrt{0,2(|24,1 - 24,3|)} = 24,2^\circ\text{C}$$

Следовательно, результирующая температуры помещения:

$$t_{su} = \frac{24,1 + 24,2}{2} = 24,2^\circ\text{C}$$

Соотнеся значения расчетной результирующей температуры с данными из таблицы делается вывод о соответствии условий микроклимата на рабочем месте с требуемыми.

В последствии необходимо поддерживать оптимальную температуру в теплое и холодное время года: проводить проверки вентиляционных систем, системы отопления, соблюдать меры безопасности при работе с высоковольтными установками, влияющими на микроклимат и др.

Безопасность при работе с химическими субстанциями

Сопоставляя данные с таблицей 14, класс опасности химического вещества, участвующего в экспериментах, относится к 4 – наименее опасным. Самым опасным фактором при работе в химической лаборатории является наличие химикатов, не используемых в исследовании поскольку химические вещества, с которыми мы работаем, практически безвредны. Таким образом необходимо следовать указаниям по ГОСТу для предотвращения воздействия на организм и окружающую среду.

В ГОСТ 12.1.007-76 указано, какие требования предъявляются к рабочему месту с возможной химической опасностью:

1. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны являются обязательными санитарными нормами для использования при проектировании производственных зданий, технологических процессов, оборудования и вентиляции, а также для профилактического и текущего санитарного надзора.

2. Содержание в организме вредных веществ, поступающих в него различными путями (при вдыхании, через кожу, через рот), не должно превышать биологических предельно допустимых концентраций (ПДК).

3. Для периода, предшествующего проектированию производства, следует временно установить приблизительные уровни безопасного воздействия (SLE) путем расчета по физико-химическим свойствам или путем интерполяции и экстраполяции в ряды, сходные по составу соединений или по индикаторам острой опасности.

4. SLE должны быть пересмотрены через два года после их утверждения или заменены ПДК с учетом накопленных данных о соотношении здоровья работников и условий труда.

Чтобы снизить/избежать вредного воздействия необходимо работать в защитной одежде – перчатках, защитных очках, халатах, защитных масках. Эксперименты необходимо проводить в вытяжке, предварительно

согласовать рабочий план с научным руководителем и предварительно пройти инструктаж по работе с веществами и оборудованием.

Безопасность при работе с лазером

Основными источниками электромагнитного поля на рабочем месте являются электропроводка и оборудование со встроенным лазером.

Нормированным параметром электрического поля является электрическое поле (E) в кВ/м, магнитное поле - это магнитное поле (H) в А/м или магнитное поле (B) в мкТл в соответствии с требованиями ГОСТ. 12.1.006-84 «ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности» и СанПиН 2.2.1340-03.

Напряженность электрического поля должна быть:

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

Плотность магнитного потока должна быть:

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

Для уменьшения воздействия электромагнитных полей соблюдается оптимальная конструкция заземляющего контура; оптимальная разводка; грамотная планировка лаборатории и рабочего помещения; по возможности избегать наличия неиспользуемого оборудования, создающего сильное электромагнитное поле в рабочем помещении.

Электробезопасность - это система организационно-технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и

опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества (ГОСТ 12.1.009-76).

Предельно допустимые нормы напряжения и токи прикосновения в аварийном и неаварийном случаях для электроустановок до 1000 В с глухозаземленной и изолированной нейтралью для людей весом более 15 кг не должны превышать значений описанных в таблицах 22 и 23.

Таблица 22 – Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки

Род тока	U, В	I, mA
	Не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Таблица 23 – предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме бытовых электроустановок

Продолжительность воздействия t, с	Нормируемая величина	
	U, В	I, mA
0,01 – 0,08	220	220
0,1	200	200
0,2	100	100
0,3	70	70
0,4	55	55
0,5	50	50
Св. 1,0	12	3

Лабораторные помещения 207 и 306 научного парка ТПУ относятся к помещениям без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность, поскольку номинальное напряжение рабочих установок - 220 В, отсутствует высоковольтное оборудование. Все токоведущие части комплекса изолированы и заземлены.

Наиболее частая причина - приближение на определенное расстояние или прямой контакт человека с открытыми токоведущими частями.

Это может произойти из-за нескольких факторов:

- неисправность приборов или проводки;
- недостаточная квалификация пользователей, незнание элементарных норм безопасности;
- несоблюдение и несогласованность мероприятий по временному включению и отключению контактных групп и токопроводящих элементов при эксплуатации, профилактике или ремонте оборудования/электростанций;
- повреждение изоляции или отсутствие заземления.

Чтобы этого не произошло, необходимо строго соблюдать основные требования электробезопасности на заводе при работе с электрооборудованием (эксплуатация инструкция к электроприборам). Существует специальная классификация электрооборудования и персонала по степени поражения электрическим током. В большей степени класс опасности от 1 до 5 зависит от напряжения (до 1000 вольт и более) и вида выполняемых работ.

5.3 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность (ЭБ) - допустимый уровень негативного воздействия природных и техногенных опасностей окружающей среды на окружающую среду и человека. При работе с нанопорошками не происходит испарения и эмиссии в атмосферу. При работе с лазерным излучением и спектроскопией комбинационного рассеяния со встроенным лазером и ПК также отсутствует негативное воздействие на окружающую среду.

Однако, для максимальной минимизации влияния на окружающую среду и в целях собственной безопасности, необходимо четко понимать физико-химические свойства материала, используемого в исследовании. При работе материалами необходимо четко разделять к какому агрегатному состоянию принадлежат материалы. Жидкие органические и неорганические субстанции в химических лабораториях утилизируются в специальные емкости предназначенную для дальнейшей очистки/обработки и утилизации.

На данный момент производители наноматериалов с точностью не могут указать все характеристики наноматериалов. Т.к. с наноразмерные материалы – довольно молодая область в научном мире, с точностью нельзя предсказать их влияние ни на человеческий организм, ни на большие системы – гидросфера/литосфера и др. На данный момент ведутся углубленные исследования в данной области, известны только свойства наноматериалов в узконаправленных областях.

В ходе деятельности организация также создает бытовой мусор (канцелярские, пищевые отходы, искусственные источники освещения), который должен быть утилизирован в соответствии с определенным

классом опасности или переработан, чтобы не оказывать негативное влияние на состояние литосферы.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной ЧС в результате проведения исследования является опасность возникновения пожара, т.к. работа подразумевает использование лазерного излучения и электроники.

Причинами возгорания могут являться короткое замыкание электроники, неправильный расчет концентраций материалов и их лазерное облучение, небрежность оператора по отношению к оборудованию и др.

В случае возникновения возгорания на рабочем месте необходимо незамедлительно предпринять ряд действий для предотвращения дальнейшего распространения:

- Позвонить по номеру «01» («101» для звонков с мобильных телефонов) в пожарную службу и сообщить о возникновении возгорания.
- В случае, если возгорание можно предотвратить, затушив водой, огнетушителем, землей или песком. Однако, если очагом возгорания оказались электронные приборы или токоведущие сети, использование воды для пожаротушения опасно для жизни.
- Если очаг возгорания потушить невозможно необходимо информировать руководителя или замещающего работника.
- Следуя плану эвакуации, покинуть здание. При эвакуации не использовать лифт, спускаться к выходу только по лестнице.

Лаборатории здания научного парка оснащены датчиками пожаротушения, в случае возникновения пожара датчики срабатывают автоматически. Пожарная сигнализация сопровождается звуковым

сообщением об эвакуации персонала. На каждом этаже имеется план эвакуации, а также расположение огнетушителей и лестниц.

Заключение

Раздел ВКР «Социальная ответственность» является необходимым в целях обеспечения безопасности лиц, проводящих исследование, а также для социума, взаимодействующего с результатами исследования.

В данном разделе были описаны опасные и вредные производственные факторы, причины их возникновения, меры предотвращения и борьбы с ними. Также были описаны влияние используемых материалов на природу и экологию. В заключение, были предложены меры при возникновении чрезвычайных ситуаций на производстве.

Заключение

В данной работе был показан процесс создания газового сенсора на основе полимерного композита LIMPc, полученного путем лазерной интеграции медных наночастиц, с активным слоем из rGO.

Также было показано влияние медных наночастиц на структуру материала с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния. Были показаны электрические свойства CuLIMPc, а именно стабильность сопротивления, с помощью четырехточечного метода измерения сопротивления. Было показано, что композит показывает высокую плотность дефектов и стабильное сопротивление (дисперсия равна 1,5%) на промежутке напряжения $U = 0; 0,5; 1 \dots 10$ В.

Результаты показывают принципиальную возможность использования материала в качестве основы сенсора газа, и при дальнейшем развитии могут иметь прикладное применение в промышленной безопасности, медицине и изучении космоса.

Продолжение исследования будет посвящено оптимизации характеристик газового сенсора.

Список литературы:

1. Sandhya P.K. et al. Viscoelastic and electrical properties of RGO reinforced phenol formaldehyde nanocomposites // Journal of Applied Polymer Science. 2020. Vol. 137, № 40. P. 49211.
2. Xiang Z. et al. Reduced Graphene Oxide-Reinforced Polymeric Films with Excellent Mechanical Robustness and Rapid and Highly Efficient Healing Properties // ACS Nano. 2017. Vol. 11, № 7. P. 7134–7141.
3. Gnanamoorthy G. et al. New construction of Fe₃O₄/rGO/ZnSnO₃ nanocomposites enhanced photoelectro chemical properties // Optical Materials. 2020. Vol. 109. P. 110353.
4. Gonçalves J.M. et al. Synergic effects enhance the catalytic properties of alpha-Ni(OH)₂-FeOCPc@rGO composite for oxygen evolution reaction // Electrochimica Acta. 2018. Vol. 267. P. 161–169.
5. Rodriguez R.D. et al. Ultra-Robust Flexible Electronics by Laser-Driven Polymer-Nanomaterials Integration // Advanced Functional Materials. 2021. Vol. 31, № 17. P. 2008818.
6. Alam S.N., Sharma N., Kumar L. Synthesis of Graphene Oxide (GO) by Modified Hummers Method and Its Thermal Reduction to Obtain Reduced Graphene Oxide (rGO)* // Graphene. 2017. Vol. 06, № 01. P. 1–18.
7. Guex L.G. et al. Experimental review: chemical reduction of graphene oxide (GO) to reduced graphene oxide (rGO) by aqueous chemistry // Nanoscale. 2017. Vol. 9, № 27. P. 9562–9571.
8. Lin J. et al. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers // Nature Communications. 2014. Vol. 5, № 1.
9. Singh S.P. et al. Sulfur-Doped Laser-Induced Porous Graphene Derived from Polysulfone-Class Polymers and Membranes // ACS Nano. 2018. Vol. 12, № 1. P. 289–297.

10. Lamberti A. et al. All-SPEEK flexible supercapacitor exploiting laser-induced graphenization // *2D Materials*. 2017. Vol. 4, № 3. P. 035012.
11. 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*. 2018. Vol. 127. P. 287–296.
12. 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.
13. Ye R. et al. Laser-Induced Graphene Formation on Wood // *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29, № 37. P. 1702211.
14. El-Kady M.F., Kaner R.B. Scalable fabrication of high-power graphene micro-supercapacitors for flexible and on-chip energy storage // *Nature Communications*. 2013. Vol. 4, № 1.
15. Tan K.W. et al. Transient laser heating induced hierarchical porous structures from block copolymer-directed self-assembly // *Science*. 2015. Vol. 349, № 6243. P. 54–58.
16. Tao L.-Q. et al. An intelligent artificial throat with sound-sensing ability based on laser induced graphene // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8, № 1.
17. Korotcenkov G. *Handbook of Gas Sensor Materials: Properties, Advantages and Shortcomings for Applications Volume 1: Conventional Approaches*. Springer Science & Business Media, 2013. 442 p.
18. Liu X. et al. A survey on gas sensing technology // *Sensors* . 2012. Vol. 12, № 7. P. 9635–9665.
19. Nazemi H. et al. Advanced Micro- and Nano-Gas Sensor Technology: A Review // *Sensors* . 2019. Vol. 19, № 6.
20. Emadi T.A. et al. Polymer-based gas sensor on a thermally stable micro-cantilever // *Procedia Engineering*. 2010. Vol. 5. P. 21–24.
21. Zhao W. et al. Detection of mixed volatile organic compounds and lung

- cancer breaths using chemiresistor arrays with crosslinked nanoparticle thin films // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. Vol. 232. P. 292–299.
22. Carvalho W.S.P. et al. Polymer-Based Technologies for Sensing Applications // *Analytical Chemistry*. 2018. Vol. 90, № 1. P. 459–479.
 23. Tai H. et al. Fabrication and gas sensitivity of polyaniline–titanium dioxide nanocomposite thin film // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. Vol. 125, № 2. P. 644–650.
 24. Seekaew Y. et al. Low-cost and flexible printed graphene–PEDOT:PSS gas sensor for ammonia detection // *Organic Electronics*. 2014. Vol. 15, № 11. P. 2971–2981.
 25. Raut B.T. et al. CSA doped polyaniline/CdS organic–inorganic nanohybrid: Physical and gas sensing properties // *Ceramics International*. 2012. Vol. 38, № 7. P. 5501–5506.
 26. Nasirian S., Moghaddam H.M. Hydrogen gas sensing based on polyaniline/anatase titania nanocomposite // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39, № 1. P. 630–642.
 27. Abraham J.K. et al. A compact wireless gas sensor using a carbon nanotube/PMMA thin film chemiresistor // *Smart Materials and Structures*. 2004. Vol. 13, № 5. P. 1045–1049.
 28. Chaudhary V., Kaur A. Enhanced room temperature sulfur dioxide sensing behaviour of in situ polymerized polyaniline–tungsten oxide nanocomposite possessing honeycomb morphology // *RSC Advances*. 2015. Vol. 5, № 90. P. 73535–73544.
 29. Stanford M.G. et al. Laser-Induced Graphene for Flexible and Embeddable Gas Sensors // *ACS Nano*. 2019. Vol. 13, № 3. P. 3474–3482.
 30. Wienecke M. et al. PTFE membrane electrodes with increased sensitivity for gas sensor applications // *Synthetic Metals*. 2003. Vol. 138, № 1-2. P.

- 165–171.
31. Zanjani S.M.M. et al. Enhanced sensitivity of graphene ammonia gas sensors using molecular doping // *Applied Physics Letters*. 2016. Vol. 108, № 3. P. 033106.
 32. Suehiro J. et al. Schottky-type response of carbon nanotube NO₂ gas sensor fabricated onto aluminum electrodes by dielectrophoresis // *Sens. Actuators B Chem.* 2006. Vol. 114, № 2. P. 943–949.
 33. Brosha E.L. et al. Mixed potential sensors using lanthanum manganate and terbium yttrium zirconium oxide electrodes // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2002. Vol. 87, № 1. P. 47–57.
 34. Li X., Xiong W., Kale G.M. Novel Nanosized ITO Electrode for Mixed Potential Gas Sensor // *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2005. Vol. 8, № 3. P. H27.
 35. Mazlan N.S. et al. Interdigitated electrodes as impedance and capacitance biosensors: A review. 2017.
 36. Filippidou M.K., Chatzichristidi M., Chatzandroulis S. A fabrication process of flexible IDE capacitive chemical sensors using a two step lift-off method based on PVA patterning // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019. Vol. 284. P. 7–12.
 37. Mamouni J., Yang L. Interdigitated microelectrode-based microchip for electrical impedance spectroscopic study of oral cancer cells // *Biomed. Microdevices*. 2011. Vol. 13, № 6. P. 1075–1088.
 38. Anh-Nguyen T. et al. An impedance biosensor for monitoring cancer cell attachment, spreading and drug-induced apoptosis // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016. Vol. 241. P. 231–237.
 39. MacDiarmid A.G. “Synthetic Metals”: A Novel Role for Organic Polymers (Nobel Lecture) // *Angew. Chem. Int. Ed Engl.* 2001. Vol. 40, № 14. P. 2581–2590.
 40. Liu T., Burger C., Chu B. Nanofabrication in polymer matrices //

- Progress in Polymer Science. 2003. Vol. 28, № 1. P. 5–26.
41. Mathkar A. et al. Controlled, Stepwise Reduction and Band Gap Manipulation of Graphene Oxide // *J. Phys. Chem. Lett.* 2012. Vol. 3, № 8. P. 986–991.
 42. Gao W. The Chemistry of Graphene Oxide // *Graphene Oxide*. 2015. P. 61–95.
 43. Lipatov A. et al. Highly selective gas sensor arrays based on thermally reduced graphene oxide // *Nanoscale*. 2013. Vol. 5, № 12. P. 5426–5434.
 44. Gómez-Navarro C. et al. Electronic transport properties of individual chemically reduced graphene oxide sheets // *Nano Lett.* 2007. Vol. 7, № 11. P. 3499–3503.
 45. Basu S., Bhattacharyya P. Recent developments on graphene and graphene oxide based solid state gas sensors // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2012. Vol. 173. P. 1–21.
 46. Lee G., Jung Y., Kim J. Graphene-based Chemical Sensors // *Semiconductor-Based Sensors*. 2016. P. 221–243.
 47. Lu G., Ocola L.E., Chen J. Reduced graphene oxide for room-temperature gas sensors // *Nanotechnology*. 2009. Vol. 20, № 44. P. 445502.
 48. Dua V. et al. All-organic vapor sensor using inkjet-printed reduced graphene oxide // *Angew. Chem. Int. Ed Engl.* 2010. Vol. 49, № 12. P. 2154–2157.
 49. Li W. et al. Reduced graphene oxide electrically contacted graphene sensor for highly sensitive nitric oxide detection // *ACS Nano*. 2011. Vol. 5, № 9. P. 6955–6961.
 50. Lu G. et al. Toward practical gas sensing with highly reduced graphene oxide: a new signal processing method to circumvent run-to-run and device-to-device variations // *ACS Nano*. 2011. Vol. 5, № 2. P. 1154–1164.

51. Alrammouz R. et al. A review on flexible gas sensors: From materials to devices // Sensors and Actuators A: Physical. 2018. Vol. 284. P. 209–231.
52. Kaushal A., Dhawan S.K., Singh V. Determination of crystallite size, number of graphene layers and defect density of graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (RGO) // DAE SOLID STATE PHYSICS SYMPOSIUM 2018. 2019.
52. Smits F.M. Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe // Semiconductor Devices: Pioneering Papers. 1991. P. 183–190.
53. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021)
54. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
55. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования
56. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
57. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
58. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
59. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
60. СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.
61. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*.

62. ГОСТ Р 54617.2-2011. Менеджмент риска в наноиндустрии. Идентификация опасностей
63. ГОСТ Р 56748.1-2015. Нанотехнологии. Наноматериалы. Менеджмент риска. Часть 1. Общие положения
64. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
65. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
66. ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
67. ГОСТ 12.1.006-84 Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля
68. ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях
69. Р 2.2.2006-05 Гигиена труда. Руководство, по гигиенической оценке, факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда

Приложение А

Materials and methods Experimental part Results and discussion

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Ким Лариса		15.03.21

Консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Шеремет Евгения Сергеевна	PhD		15.03.21

Консультант – лингвист отделения иностранных языков школы базовой инженерной подготовки:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кобзева Надежда Александровна	К.п.н.		15.03.21

Methods and materials

Materials used in experiments

The materials presented in Table 1 were used during the experiments.

In this work, it was necessary to check the effect of nanomaterials on the properties of LIMPc. Copper was chosen for its good catalytic properties. Due to these properties, copper is often used in the production of graphene by chemical vapor deposition. It is our hypothesis that copper nanoparticles have a good potential to maximize PET to LIMPc conversion. Silver nanoparticles have good photocatalytic properties, in particular, they have the property of plasmon resonance. The original source described that in addition to the photothermal effect, there may be an influence of plasmon resonance of aluminum nanoparticles.

Table 1 - Materials used for sensor preparation

Name	Chemical formula	CAS	Appearance
Copper nanoparticles	Cu	7440-50-8	Bordeaux powder
Silver nanoparticles	Ag	7440-22-4	Dark gray powder
Ethanol	C ₂ H ₆ O	64-17-5	Colorless liquid
PET	(C ₁₀ H ₈ O ₄) _n	25038-59-9	Transparent
GO	-	155090-83-8	Dark black liquid

Equipment

For the study, the following devices were used: dispensers of size 2-20 and 100-1000 μl , analytical balance, ultrasonic bath, laser engraver TwoWin-3000 with a wavelength of 450 nm.

To investigate the structure and properties of the LIMPc, Raman spectroscopy and a four-point measurement of electrical properties were carried out using the Technical University of Chemnitz.

Experimental part

LIMPc substrate preparation methodology

The first step was to prepare solutions of copper and silver nanoparticles with a ratio of 30 mg, 40 mg, 50 mg nanoparticles to 1.6 ml of ethanol. Then the solutions were placed in an ultrasonic bath for 10 minutes to avoid aggregation of nanoparticles and obtain a more uniform layer. PET substrates cleaned with ethanol and dried. The cleaned substrates were coated with nanoparticle solutions in a volume of 1 μL , this volume is sufficient to completely cover the substrate with the solution. Samples then were dried and irradiated with laser treatment of a wavelength equal to 450 nm with various power percentages (30-70%).

Optimization of the parameters of laser radiation

To optimize the structure of the sample (obtaining a higher conductivity), it is necessary to select the parameters of the laser radiation. The table below shows the parameters used.

Table 2 - Parameters of laser irradiation

No.	Contrast ratio	Laser power	Depth adjustment
1	128	30	20

2	128	40	20
3	128	50	20
4	128	60	20
5	128	70	20

Optimization of parameters was carried out by changing the percentage of power from 30% to 70%. This parameter was chosen because of the direct relationship with the photothermal effect, according to the literature [1] is dominant.

The end result of optimization should be the smallest and most stable resistance, the best porosity of the material. The quality of the material was checked in two ways - a four-electrode resistance measurement and Raman spectroscopy.

After investigating the structure using Raman spectroscopy and four-point resistance measurement, it was decided to use substrates based on copper nanoparticles irradiated with 50% laser power. During irradiation it is necessary to obtain a certain shape of the electrodes (interdigital electrodes). The irradiation pattern is shown in Figure 5.

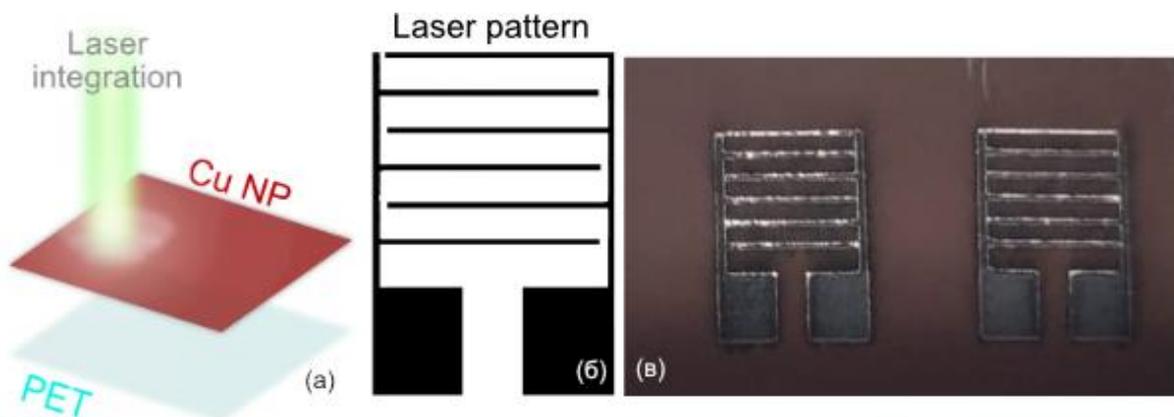


Figure 5 - Preparation of electrodes: (a) methodology of preparation, (b) used irradiation pattern, (c) finished electrodes.

After preparing the electrodes, it is necessary to apply graphene oxide (GO) as an active layer in a volume of 110 μL onto the surface of the electrodes. Prior to GO deposition, the substrates were rinsed from copper nanoparticles to avoid the formation of LIMPC upon reduction of graphene oxide. Then, after the GO volume had dried, irradiation was performed with 30% laser power to reduce graphene oxide to rGO.

Results and discussion

Raman spectroscopy

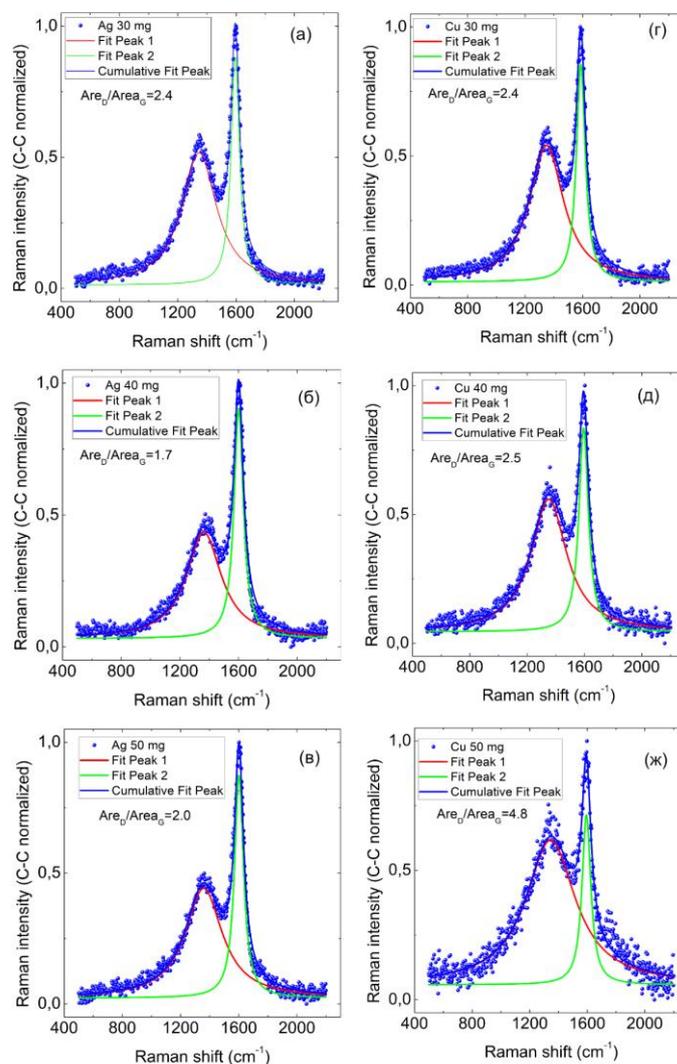


Figure 5 - Raman spectra of AgLIMPC: (a) 30mg, (b) 40mg, (c) 50mg;
CuLIMPC: (g) 30mg, (e) 40mg, (g) 50mg.

In order to study the composition and crystallinity of LIMPC obtained during optimization of parameters, Raman spectroscopy of samples of AgLIMPC and CuLIMPC solutions with a ratio of 50 mg of nanoparticles per 1.6 ml of ethanol was carried out.

Raman spectroscopy was used to check the ratio of the peaks D (~ 1350-1355 cm⁻¹), G (~ 1580-1600 cm⁻¹). The D-mode is caused by the disordered structure of graphene-like material. The presence of disorder in sp₂-hybridized carbon systems leads to resonance Raman spectra. The G-mode arises from the stretching of the C-C bond in graphene-like materials and is common to all sp₂ carbon systems. The ratio of modes $\frac{I_G}{I_D}$ - shows the change in the degree of crystallinity in the LIMPC structure. While the dimensions (L_D) and density (n_D) of such defects are calculated by the formula [41]:

$$L_D^2 = 2.4 \times 10^{-9} \times \lambda_L^4 \frac{I_G}{I_D}$$

$$n_D = \frac{2.4 \times 10^{22}}{\lambda_L^4} \times \frac{I_D}{I_G}$$

Table 3 - calculated data of Raman spectroscopy

Material	Concentration mg / 1.6 ml	$\frac{I_D}{I_G}$	L_D , nm	n_D , cm ⁻²
Ag	30	2.4	26.9	8.9×10 ¹¹
Ag	40	1.7	38	6.3×10 ¹¹
Ag	50	2.0	32.3	7.4×10 ¹¹
Cu	30	2.4	26.9	8.9×10 ¹¹
Cu	40	2.5	25.8	9.3×10 ¹¹
Cu	50	4.8	13.5	17.8×10 ¹¹

According to the results of Raman spectroscopy, we see that the presence of peaks D and G indicates carbonization of PET, since these peaks correspond to graphene-like materials. The second important conclusion is that the defect

density is higher for copper LIMPC samples. Thus, CuLIMPC has the largest active area, which is one of the most important indicators for a gas sensor.

Four-point resistance measurement

A four-point resistance measurement is necessary to determine the stability of the resistance. During the measurement, an increasing voltage was applied to the sample through two electrodes in an amount of 20 steps up to 10 V. The resulting current was measured between the remaining two electrodes, and the resistance was calculated according to Ohm's law [42]. Resistance measurement graphs can be seen in Figure 6.

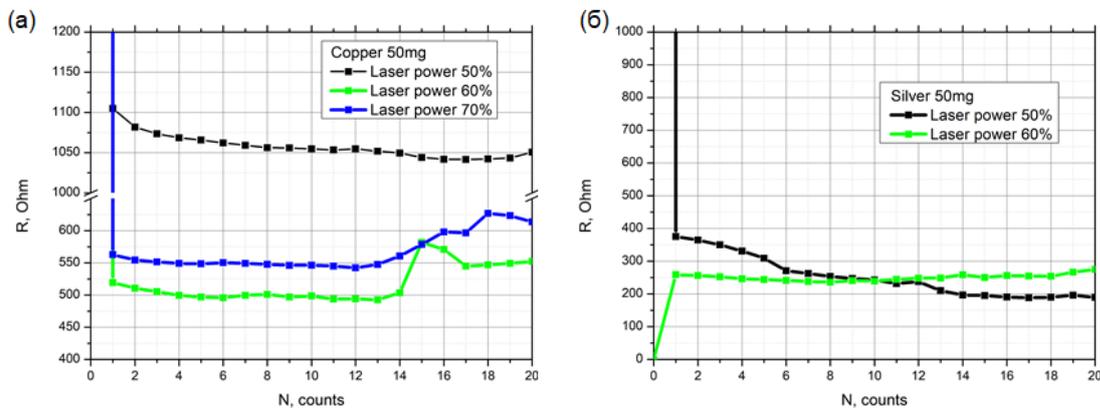


Figure 6 - Resistance of samples (a) CuLIMPC and (b) AgLIMPC obtained by the method of four-point resistance measurement

In order to calculate the resistance stability, it was decided to calculate the sample variance, mean value and coefficient of variation using the following formulas :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})^2}{n}}}{\underline{x}} \times 100\%$$

These calculations were performed in Microsoft Excel. Since the first value corresponds to a jump in resistance when voltage is applied to the sample, for a more accurate calculation of the variance and mean value, the first point was not taken into account. The calculated data are shown in Table 4, the initial data are illustrated in Appendix 1.

Table 4 - Calculation of the dispersion and average value of the samples

Nanoparticles material	Power percentage, %	\underline{x} , Ohm	s^2 , Ohm	CV, %
Ag	50	264,8	66	25
Ag	60	263,6	17,2	4
Ag	70	224,6	57,6	24,9
Cu	50	1113,5	60,9	1,5
Cu	60	545	41,1	5,5
Cu	70	596,8	42,9	5

These results show the magnitude and stability of the resistance of the samples. Resistance stability is an important criterion for an impedance sensor. According to the initial data (appendix 1), it becomes clear that the smallest resistance is observed for LIMPC with silver nanoparticles with laser irradiation of 60%. Good stability is observed for samples of both types of nanoparticles, the best is observed for LIMPC with copper nanoparticles irradiated with 50% power. According to the literature, the change in impedance for gas detection for various materials varies from 1% or even more. Therefore, it's better to use sample with best stability, which is CuLIMPC.

Thus, based on Raman spectroscopy and four-point resistance measurement, a conclusion is made about the choice of material for the future gas sensor. Porosity values are higher for LIMPC based on copper nanoparticles. Resistance stability is observed for both samples; the resistance value is higher for LIMPC based on silver nanoparticles. Therefore, the most advantageous material based on the given criteria is CuLIMPC since it has greater porosity and resistance stability.