

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Студент Абрамян Арман Артурович

Институт прикладной математики, физики и информатики

Направление 12.03.05 – лазерная техника и лазерные технологии

Тема выпускной квалификационной работы:

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННО- ЭРОЗИОННОГО ФАКЕЛА НА ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ Часть 1. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Руководитель ВКР: _____ Жирнова С.В.

Студент: _____ Абрамян А.А.

**Допустить выпускную квалификационную работу к защите
в государственной экзаменационной комиссии**

Заведующий кафедрой: _____ Аракелян С.М.

« 9 » июня 2020 г.

ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ: _____

Зав. кафедрой _____

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Студенту Абрамяну Арману Артуровичу

1. Тема работы Исследование характеристик плазменно-эрозионного факела на поверхности углеродосодержащих материалов. Часть 1. Исследование спектральных характеристик

утверждена приказом по университету № 22/4 от 25.03.2020 года.

2. Срок сдачи студентом законченной работы 09.06.2020 года.

3. Исходные данные к работе Лазерная система CLW-50, спектрометр ASP-75, образец стеклоуглерод.

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

1) Изучение основ вакуумно-плазменных технологий.

2) Изучение методов спектрального анализа.

3) Изучение основных характеристик устройств.

4) Проведение экспериментов.

5) Анализ полученных данных.

6) Выводы по полученным результатам.

5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей):

1) Название работы.

2) Постановка задачи.

3) Плазма.

4) Спектральные приборы.

5) Схема эксперимента.

6) Результаты экспериментов.

7) Выводы.

6. Консультанты Жирнова С.В. (нормоконтроль)

Дата выдачи задания 06.12.2019 года

Руководитель _____
(подпись)

Задание принял к исполнению _____
(подпись студента)

АННОТАЦИЯ

Целью выпускной квалификационной работы являлось определение спектрального состава плазменного-эрозионного факела на поверхности стеклоуглерода, при воздействии лазерного излучения.

В ходе работы был изучен принцип работы спектрометра, метод анализа полученных спектрометрических данных, определен спектральный состав плазменно-эрозионного факела, выявлены спектральные линии ионизируемого углерода.

Практическая значимость работы заключается в определении количества ионизированных и возбужденных атомов в плазме, необходимых для получения качественных пленок нанометровых толщин методом лазерно-плазменного напыления.

Пояснительная записка содержит 37 с., 17 рис., 3 табл., 10 источников.

SUMMARY

The purpose of the final qualification work was to determine the spectral composition of a plasma-erosion torch on the surface of glass carbon when exposed to laser radiation.

In the course of the work, the principle of operation of the spectrometer, the method of analyzing the obtained spectrometric data, the spectral composition of the plasma-erosion torch, and the spectral lines of the ionized carbon were studied.

The practical significance of the work is to determine the number of ionized and excited atoms in the plasma required to obtain high-quality films of nanometer thickness by laser-plasma deposition.

The explanatory note contains 37 pages, 17 figures, 3 tables, 10 sources.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	7
1.1 Плазма.....	7
1.2 Образование плазмы	8
1.3 Плазменное напыление покрытий	9
2 СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ	11
2.1 Методы спектрального анализа	12
2.1.1 Эмиссионные методы	12
2.1.2 Абсорбционные методы	13
2.1.3 Комбинационные методы.....	14
2.2 Спектральное оборудование	15
2.2.1 Компоненты спектрометра.....	15
3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ	21
3.1 Экспериментальный стенд	21
3.2 Лазерная установка CLW-50.....	22
3.3 Спектрометр ASP-75.....	27
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	29
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	36
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	37

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	Исследование спектральных характеристик. Пояснительная записка	<i>Литера</i>		<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
Разраб.		Абрамян А.А.		09.06.20		У		4	37
Проверил		Жирнова С.В.		09.06.20					
Н. контр.		Жирнова С.В.		09.06.20					
Утв.		Аракелян С.М.		09.06.20		группа ЛТ-116			

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует обширный круг задач, решением которых является плазма, образующаяся при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом мишени. При этом, в зависимости от конкретной прикладной задачи, для возбуждения плазменного факела могут использоваться лазерные импульсы с различной длиной волны, энергией, длительностью и формой импульса. Регистрация эмиссионных спектров лазерной плазмы осуществляется в условиях нормальной атмосферы без предварительной подготовки мишеней. В процессе возбуждения плазмы на поверхности мишени, находящейся в газовой атмосфере, в эмиссионном спектре лазерной плазмы возникает ряд особенностей, по сравнению с плазмой, получаемой в условиях вакуума. Данные особенности могут существенно повлиять на результаты эксперимента при использовании лазерной искровой спектроскопии в натуральных условиях. В связи с этим исследование спектральных характеристик плазменного факела, генерируемого лазерным излучением на поверхности твердого тела при различных давлениях окружающего газа и лазерными импульсами различных параметров представляется актуальным. Для определения параметров лабораторной лазерной плазмы возможно использование различных контактных и дистанционных методов диагностики плазмы, однако предпочтение отдается бесконтактным спектральным методам диагностики. Наряду с неоспоримыми достоинствами метода диагностики плазмы с использованием эмиссионных спектров существуют несколько факторов, ограничивающих в ряде случаев его информативность. В настоящее время плазма используется не только как объект научных исследований, но и как рабочее тело при решении различных производственных задач. [1] Спектр применений весьма широк - от воздействия на биологическую ткань потоком плазмы до переработки токсичных и радиоактивных отходов. Благодаря плазменным технологиям можно существенно

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

повысить производительность плавильных и термических агрегатов, наносить новые типы покрытий, синтезировать новые вещества, получать ультрадисперсные порошки, резать любые типы материалов.

Целью работы является изучение состава плазменно-эрозионного факела стеклоуглеродной мишени при лазерной абляции в воздухе с помощью спектроскопии лазерно-индуцированной плазмы при вариации параметров излучения.

Задачи, которые необходимо решить для достижения данной цели:

- 1) Изучить основы вакуумно-плазменных технологий.
- 2) Рассмотреть возможность использования спектрального анализа в исследовании плазменно-эрозионного факела.
- 3) Провести эксперименты по определению спектрального состава плазменно-эрозионного факела на поверхности стеклоуглерода.

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

1 ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1.1 Плазма

Плазму принято называть четвертым агрегатным состоянием вещества. Это понятие ввел английский химик и физик У. Крукс в 1879 г. для описания ионизированной среды газового разряда. Твердое вещество при нагревании переходит в новое состояние, обычно в жидкое. В свою очередь жидкость при нагревании превращается в газ. Последующий его нагрев ведет к ионизации атомов. Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизирована, называется плазмой. Термин плазма для совокупности заряженных частиц был впервые употреблен Тонксом и Ленгмюром в 1929 г., изучавшими колебания в электрических разрядах. Такое состояние вещества, распространенное в космосе, обладает очень интересными свойствами, которые находят все более широкое применение в современных технологиях.

В верхних слоях атмосферы (в ионосфере) существует плазма, возникающая за счет фотоионизации разреженного воздуха. Еще выше – очень разреженная плазма, захваченная магнитным полем Земли. Она движется к Земле от Солнца (солнечный ветер), а также заполняет многие области межзвездного пространства, образуя среду, через которую мы наблюдаем космос. Хотя 99,9 % видимой Вселенной находится в плазменном состоянии, на Земле из-за низкой температуры и высокой плотности вещества в нижних слоях атмосферы естественной плазмы почти нет. Поэтому для изучения свойств плазмы необходимо создавать ее в лабораторных условиях. [2]

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		7

1.2 Образование плазмы

Как уже упоминалось выше, плазма – частично или полностью ионизованный газ. Термин «ионизованный» означает, что от значительной части атомов или молекул отделен, по крайней мере, один электрон. Ионизация может происходить под действием электромагнитного излучения (например, ультрафиолетового излучения, рентгеновских лучей, космического излучения), такой процесс получил название фотоионизация. Образование ионов возможно при нагревании газа – термическая ионизация, которая обусловлена значительной кинетической энергией сталкивающихся частиц. При столкновении атома или молекулы с быстро движущейся заряженной частицей один из электронов может покинуть атом и образовать положительно заряженный ион. Такой ионизации является наиболее характерным при образовании плазмы и получил название ударной ионизации. Часто для того, чтобы подойти к понятию плазмы, используют простую идею о нагревании вещества в некотором идеальном сосуде. Уже при нагревании вещества до 3000–5000 К заметны первые признаки ионизации (термическая ионизация). С ростом температуры относительное количество ионов и электронов в этой смеси стремительно возрастает. Если нагретое вещество находится в тепловом равновесии с окружающей средой (например, со стенками идеального сосуда), то при увеличении температуры до нескольких десятков тысяч градусов большинство атомов будут ионизированы и при этом практически отсутствуют нейтральные атомы. [2]

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

1.3 Плазменное напыление покрытий

Плазменные технологии – группа технологий получения и обработки материалов с использованием нагрева исходных продуктов в плазменной струе или перевода их в плазменное состояние. Плазменная обработка материалов уже заняла достаточно прочные позиции в промышленности. Наибольшее распространение получили следующие технологические операции:

- 1) Плазменное напыление покрытий.
- 2) Плазменно-дуговая резка металлов и сплавов.
- 3) Плазменно-дуговая сварка.
- 4) Наплавка слоев со специальными свойствами.
- 5) Поверхностная закалка.
- 6) Финишное упрочнение поверхностей.

Одним из наиболее распространенных способов модификации поверхности с помощью плазменных технологий является нанесение тонкопленочных покрытий. Под термином тонкопленочное покрытие обычно понимают относительно тонкий слой вещества, наносимый на поверхность материалов или изделий с целью улучшения их физикохимических свойств. На рисунке 1.1 представлено нанесение тонкой пленки на массивный материал (подложку). В результате получившаяся система обладает характеристиками, которые не могут быть получены при использовании одного материала. С помощью тонкопленочных покрытий можно значительно изменить электрические, механические, тепловые, магнитные, оптические и химические свойства исходного материала, получая изделия с необходимыми свойствами. [2] В таблице 1.1 представлена классификация тонкопленочных покрытий и даны примеры их применения.

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

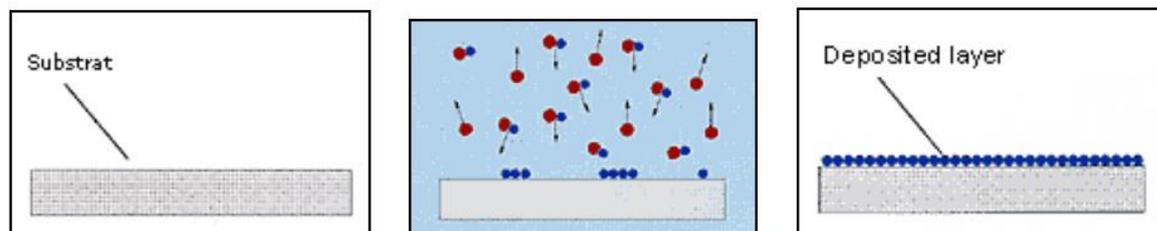


Рисунок 1.1 – Нанесение слоя покрытия на подложку

Таблица 1.1 – Классификация тонкопленочных покрытий и их применение

Свойства тонкопленочных покрытий	Использование
Оптические	Просветляющие покрытия Интерференционные зеркала и фильтры Низкоэмиссионные покрытия Декоративные покрытия
Механические	Износостойкие покрытия Упрочняющие покрытия
Химические	Коррозионностойкие покрытия Биосовместимые покрытия
Тепловые	Терморегулирующие покрытия Термостойкие покрытия

2 СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В современной науке и технике, для того чтобы определить химический состав веществ, используют множество различных методов. Минералы, найденные геологами, и новые вещества, полученные химиками, характеризуются, прежде всего, по составу. Для правильного ведения технологических процессов в разных отраслях необходимо точное знание химического состава данного сырья. Химические методы анализа не всегда соответствуют требованиям техники и науки. В связи с этим на практику внедряются физико-химические и физические методы исследования, которые являются более точными. Среди этих методов одно из значимых мест занимает спектральный анализ, имеющий множество ценностей и преимуществ. Данный анализ был открыт, более пятидесяти лет назад, в 1960 году Бунзеном и Кирхгофом. Открытие произвело огромное впечатление на современников и имело большое значение для развития знаний об окружающем мире. С первых дней своего существования спектральный анализ помог сделать ряд важнейших открытий.

Спектральный анализ – это физический метод определения состава вещества, основанный на изучении спектров испускания, поглощения, отражения и люминесценции. Атомы каждого элемента испускают излучение определенных длин волн, это позволяет определить, какие элементы входят в состав данного вещества. Спектры определяются свойствами электронных оболочек атомов и молекул, и воздействием структуры и массы атомных ядер на положение энергетических уровней. Спектральный анализ способен обнаружить элементы в сложном веществе, даже если их масса не превышает 10 граммов. [3]

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

2.1 Методы спектрального анализа

2.1.1 Эмиссионные методы

Эмиссионные методы – используют спектры поглощения атомов и является одним из наиболее распространенных методов элементарного анализа вещества, основанный на регистрации атомных спектров с помощью специального прибора – спектрографа. Целью практического эмиссионного анализа является качественное выявление элементов конкретного вещества. Пробу изучаемого вещества вводят в источник излучения, где происходит ее испарение, молекулы диссоциируются и происходит возбуждение образовавшихся ионов (атомов). Последние испускают излучение, которое поступает в регистрирующее устройство спектрального прибора. При качественном атомном эмиссионном спектральном анализе спектры проб сравнивают со спектрами уже известных элементов, и потом устанавливают элементарный состав анализируемого вещества. Точность и чувствительность атомного эмиссионного спектрального анализа зависят, прежде всего, от физических характеристик – температуры, концентрации электронов, времени пребывания атомов в зоне возбуждения. [3]

Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия (ЛИЭС) – один из методов атомно-эмиссионного спектрального анализа, в котором используют спектры плазмы лазерного пробоя (лазерной искры) для анализа твердых образцов, жидкостей, газовых сред, взвешенной пыли и аэрозолей. В англоязычной литературе данный метод имеет следующее название: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy или Laser-Induced Plasma Spectroscopy (LIBS или LIPS).

При определенных плотностях мощности лазерного излучения в среде, где происходит его распространение, наблюдается явление оптического пробоя. При

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

этом в полости пробоя возникает плазма, источником которой является лазерное излучение. Для того, чтобы получить оптический пробой на поверхности твердого тела, расположенного в газовой атмосфере при нормальном давлении, необходимо создать плотность мощности лазерного излучения порядка 10^{10} Вт/см². [4]

Лазерная плазма является источником эмиссионного спектра атомов и ионов, находящихся в области развития оптического пробоя. Регистрация спектрального состава излучения лазерной плазмы и измерение интенсивностей эмиссионных линий позволяет идентифицировать выявленные элементы и определять их концентрацию. В середине 70-х годов появились первые работы по определению элементного состава твердых тел и с того времени метод лазерной искровой спектроскопии активно используется для проведения элементного анализа твердых тел. В дальнейшем, предложено использовать данный метод для определения элементного состава морской воды и впоследствии фитопланктона. Этот метод также используют для анализа газовых сред, взвешенной пыли и аэрозолей.

2.1.2 Абсорбционные методы

Абсорбционный анализ – аналитический метод определения содержащихся в пробе элементов, основанный на поглощении света свободными атомами. Через слой атомных паров пробы, которые мы получаем с помощью атомизатора (оборудование для распыления жидких дымов), пропускают излучение в диапазоне 190-850 нм. В результате атомы переходят в возбужденные энергетические состояния. Этот способ наиболее простой, надежный и недорогой. Данный анализ отличается высокой абсолютной и относительной чувствительностью. Чувствительность большинства элементов лежит в пределах от 0,005 до 10^{-10} мкг/мл. До разработки беспламенных способов атомизации

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		13

область применения атомных спектров поглощения ограничивалась анализом растворов. Приемы беспламенной атомизации позволяют анализировать твердые и порошковые пробы очень малых размеров. Метрологические характеристики позволяют широко использовать атомно-абсорбционный метод спектрального анализа для решения большого числа аналитических задач. Анализ используется для исследования микроколичеств объектов. Его точность находится в пределах от сотых до стомиллионных долей микрограмма. Вещество также уничтожается в процессе исследования. По спектрам поглощения исследуют лаки и краски. При этом устанавливают связующее вещество, а также пигменты и наполнители. Также есть еще методы, которые широко используются при проведении спектрального анализа, входящие в состав этих двух групп методов. [3]

2.1.3 Комбинационные методы

Комбинационные методы – используют спектры комбинационного рассеяния жидких, твердых и газообразных проб. При проведении данного анализа исследуемое вещество в жидком виде или в виде раствора помещается в специальную стеклянную чашку и освещается светом ртутных ламп. Спектр комбинационного рассеяния наблюдается от голубой иногда зеленой, и редко от желтых линий ртутного спектра. Зеленая и желтая линия используются для анализа мутных жидкостей и твердых порошков. При комбинационном рассеянии свет и вещество обмениваются энергией. Рассеяние можно рассматривать как очень быстрый процесс поглощения и испускания фотона. При таком поглощении фотона молекула не может перейти в устойчиво возбужденное состояние. Она переходит в нестабильное состояние, из которого излучает фотон через короткий промежуток времени. [3]

2.2 Спектральное оборудование

Основная функция спектрометра заключается в регистрации и накоплении спектра света, оцифровка полученного сигнала в зависимости от длины волны и последующий анализ с помощью персонального компьютера. На первом этапе свет попадает в спектрометр через узкую апертуру, известную как входная щель. Линза виньетирует свет на входе в спектрометр. В большинстве спектрометров рассеянный свет коллимируется с помощью вогнутого зеркала и направляется в дифракционную решетку. Решетка рассеивает компоненты спектра под разными углами, которые затем фокусируются вторым вогнутым зеркалом на детекторе.

Как только свет попадает на детектор, фотоны света преобразуются в электроны, которые затем поступают в компьютер. Программа производит интерполяцию сигнала в зависимости от количества пикселей в детекторе и линейной дисперсии дифракционной решетки для реализации калибровки, которая позволяет начертить график распределения по длинам волн в спектре.

2.2.1 Компоненты спектрометра

Спектрометр состоит из 5 основных компонентов:

- 1) Входная щель.
- 2) Дифракционная решетка.
- 3) Детектор.
- 4) Оптическая схема.
- 5) Спектральное разрешение.

Каждую из компонент рассмотрим по отдельности ниже.

					<i>ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		15

1) Входная щель.

Спектрометр представляет собой систему визуализации, распределяющую множество монохроматических изображений в плоскости детектора (через входную щель), на рисунке 2.1 представлена схема спектрометра с обозначением входной щели. От входной щели зависят рабочие характеристики спектрометра, поскольку она задает размер светового потока, попадающего на оптическую часть. От этого зависит спектральное разрешение, другими важными факторами также являются частота штрихов дифракционной решетки и размер пикселей детектора.

Оптическое разрешение и пропускная способность спектрометра полностью зависят от параметров щели. Свет попадает внутрь спектрометра через оптическое волокно или линзу, сфокусированную с учетом настройки щели. От щели зависит угол расходимости попадающего внутрь света.

Щели могут иметь разную ширину – от 5мкм до 800мкм и более, высота щели составляет 1 мм (стандартно) – 2мм.

В основном в спектрометрах применяются щели шириной 10, 25, 50, 100, 200 мкм и т.д. В системах, в которых применяются оптические волокна для подачи светового пучка, размер пакета волокон совпадает с размером входной щели.



Рисунок 2.1 – Схема спектрометра с обозначением входной щели

2) Дифракционная решетка.

Дифракционная решетка формирует спектр длин волн света и частично влияет на оптическое разрешение спектрометра. Грамотный выбор дифракционной решетки является важным фактором для получения требуемых характеристик спектра при решении задач. От решетки зависит оптическое разрешение и эффективность распределения в спектре. На рисунке 2.2 представлена схема спектрометра с обозначением дифракционной решетки.

Существуют дифракционные решетки двух типов: нарезные и голографические решетки. Нарезные решетки состоят из большого количества параллельных штрихов, выполненных на поверхности, на которую наносится зеркальное покрытие. Голографические решетки создаются в результате интерференции двух УФ лазерных пучков (параллельных или непараллельных) на светочувствительном слое. Они отличаются стабильными спектральными характеристиками, но имеют более низкую эффективность.

Нарезные решетки – наиболее простые и недорогие материалы в производстве, но они довольно сильно рассеивают свет. Это происходит из-за неточности изготовления штрихов и частоты их нанесения. Поэтому в спектроскопии (например, УФ спектроскопии) детектор работает хуже и оптические характеристики получаются ниже. В подобном случае голографические решетки позволяют снизить эффект рассеяния света и повысить выходные характеристики спектрометра. Другим преимуществом голографической решетки является возможность простого ее создания на криволинейных поверхностях, это позволяет одновременно использовать решетку в качестве рассеивающего и фокусирующего элемента.



Рисунок 2.2 – Схема спектрометра с обозначением дифракционной решетки

3) Детектор.

В современных спектрометрах детекторы на линейных и ПЗС-матрицах являются следующим шагом развития спектрометров со штриховой решеткой. Поскольку случайный свет попадает на пиксели через ПЗС-матрицу, то каждый пиксель берет на себя часть спектра, который электронная система прибора может преобразовать и отобразить с помощью программного обеспечения. Это преимущество позволяет конструировать спектрометры без подвижных компонентов, что приводит к сокращению размеров и энергопотребления. На рисунке 2.3 представлена схема спектрометра с обозначением детектора.



Рисунок 2.3 – Схема спектрометра с обозначением детектора

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

4) Оптическая схема.

Вариативность оптических схем довольно много, наибольшее распространение получила кросс-корреляционная схема Черни-Тернера. На рисунке 2.4 представлена схема спектрометра с обозначением оптической системы.



Рисунок 2.4 – Схема спектрометра с обозначением оптической системы

Данная схема состоит из двух вогнутых зеркал и одной дифракционной решетки, как показано на рисунке 2.5. Фокусное расстояние зеркала 1 выбирается таким образом, что оно концентрирует пучок света из входной щели и направляет его на дифракционную решетку. После того, как свет разложен на отдельные компоненты, зеркало 2 фокусирует рассеянный свет дифракционной решеткой в плоскость детектора.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

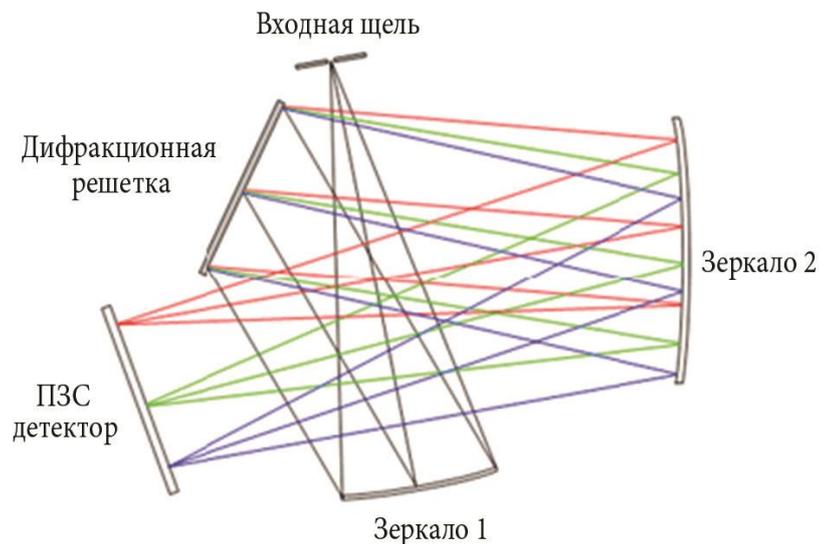


Рисунок 2.5 – Кросс-корреляционная схема Черни-Тернера

5) Спектральное разрешение.

Одной из важнейших характеристик спектрометра является спектральное (оптическое) разрешение. Спектральное разрешение системы определяет максимальное количество спектральных пиков, которые спектрометр может определить. Например, если спектрометр имеет диапазон 200 нм и спектральное разрешение 1 нм, система способна определить до 200 длин волн (пиков) в спектре.

В дисперсионных спектрометрах существует три ключевых фактора, которые определяют спектральный диапазон устройства: входная щель, дифракционная решетка, детектор. От щели зависит минимальный размер изображения, который оптический стол может сформировать в плоскости детектора. Дифракционная решетка определяет суммарный спектральный диапазон. Детектор определяет максимальное количество и размер неярких точек, которые можно оцифровать в виде спектра.

3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ

3.1 Экспериментальный стенд

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.

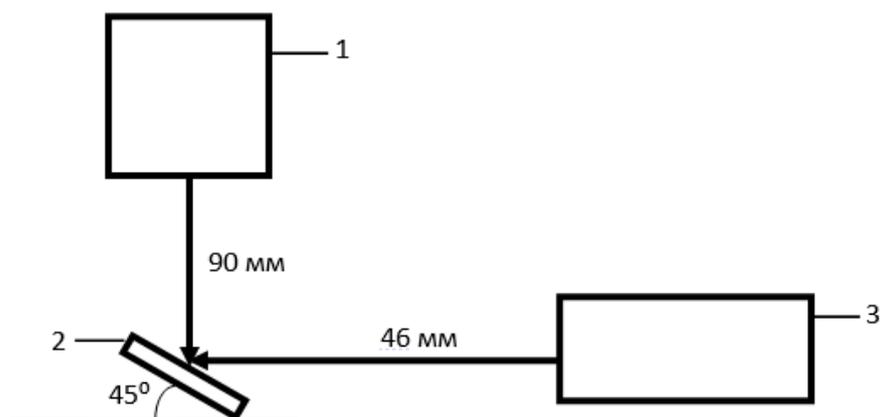


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки

- 1) Импульсно-периодический лазер CLW50;
- 2) Образец стеклоуглерод;
- 3) Спектрометр ASP-75;

В качестве силового лазера использовался импульсно-периодический лазер CLW-50. Излучение Nd:YAG лазера с рабочей длиной волны 1064 нм, выходящее из лазерного излучателя по волоконно-оптическому кабелю, подается в оптико-механическую систему для формирования пятна нужного диаметра в зоне воздействия. Для определения состава плазменно-эрозионного факела использовался спектрометр ASP-75. Характеристики приборов приведены ниже.

3.2 Лазерная установка CLW-50.

На рисунке 3.2 можно увидеть саму лазерную установку точечной сварки CLW-50. Основные характеристики лазерной установки приведены в таблице 3.1.



Рисунок 3.2 – Лазерная установка точечной сварки CLW-50

Таблица 3.1 – Основные характеристики импульсного лазера CLW-50

Электропитание	220-240 VAC, 10A, 50/60 Hz (CLW-50) 220-240 VAC, 20A, 50/60 Hz (CLW-50) подается поворотом ключа, расположенным на передней панели, в положение “ON” (“I”).
Потребляемая мощность	Не более 1500 W (CLW-50) 2500 W (CLW-120C)
Габаритные размеры (длина/ширина/высота)	660x235x650 mm (CLW-50)
Вес	43kg (CLW-50C)
Параметры лазерного излучения	<p>Длина волны: 1064 nm;</p> <p>Максимальная энергия излучения в импульсе длительностью 2 ms: > 20 – 2 ms;</p> <p>Абсолютная максимальная энергия излучения в импульсе: 50 – 20 ms;</p> <p>Импульсная мощность излучения: ms</p> <p>Максимальная средняя мощность: 60 W – (CLW-50)</p> <p>Частота повторения импульсов: от одиночных до 20 Hz;</p> <p>Длительность импульса: 0,5 – 40ms, возможность генерации пачек импульсов с регулируемой скважностью;</p> <p>Диаметр пятна в фокусе: 0,4 mm – 1,2 mm</p>

Продолжение Таблицы 3.1

	<p>Для волокна 600 μm и объектива 75 mm. 0,3 mm – 2,5 mm для других значений оптического диаметра волокна и фокусного расстояния объектива; Пилотный лазер: 3 mW & 650 nm.</p>
Система охлаждения	Одноконтурная воздушная-водяная
Средства обеспечения безопасности	<p>Автоматический выключатель: расположен под левой боковой крышкой внутри прибора; Аварийный выключатель: красная кнопка на передней панели, должна находиться в отжатом положении для включения установки; Индикатор готовности: красная лампочка на передней панели; Защитный фильтр: абсорбционный фильтр расположен в узле доставки излучения перед окулярами микроскопа. Обеспечивает поглощение инфракрасного излучения в момент сварки; LC-затвор: жидкокристаллический затвор расположен узле доставки излучения перед окулярами микроскопа. Обеспечивает поглощение видимого излучения вспышки в момент сварки; Затвор лазерного излучателя: электромеханический затвор-шторка расположен внутри лазерного излучателя. Обеспечивает блокировку излучения лазера при возникновении любой неисправности в приборе;</p>

Продолжение Таблицы 3.1

Система безопасности	Интерлок: разъем DB-9M на задней стенке прибора обеспечивает блокировку излучения при открытой двери лазерной комнаты. Работа с прибором должна производиться в защитных очках и при наличии предупреждающих знаков лазерной опасности.
----------------------	---

На рисунке 3.3 представлено схематическое изображение лазерной установки CLW-50.

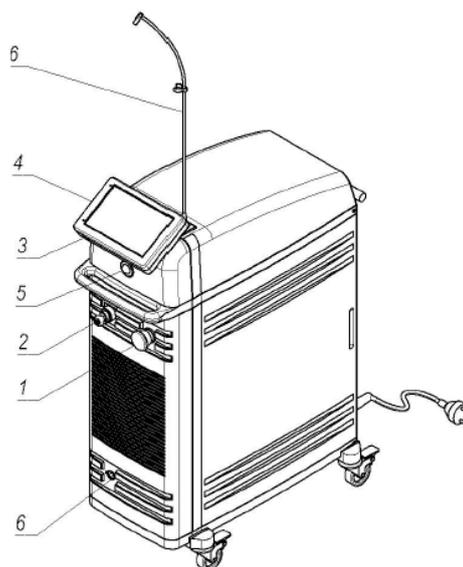


Рисунок 3.3 – Схематическое изображение лазерной установки CLW-50

1) Красная кнопка.

Красная кнопка на передней панели, должна находиться в отжатом положении для включения установки. При возникновении любой нештатной ситуации при работе, которая угрожает безопасности окружающего персонала и сохранности оборудования, пользователь может прервать работу прибора путем

быстрого нажатия или удара по красной кнопке. При этом электропитание прибора и его работа немедленно и полностью прекращаются.

2) Автоматический выключатель.

Автоматический выключатель электропитания расположен внутри корпуса прибора между задней стенкой и радиатором. При возникновении неисправности в электронных блоках прибора отключает электропитание прибора при превышении потребления тока свыше 16А.

3) Индикатор готовности.

Красный индикатор на передней панели устройства. Он включается после активации полной устройства (состояние готовности), и это горит постоянно во время нормального режима работы. Если вы заметили, что красная лампочка выключается или мигает, необходимо остановить работу устройства как можно скорее, чтобы выяснить причину.

4) Затвор блокировки лазерного излучения.

Узел блокировки лазерного излучения расположен в корпусе лазерного излучателя между активным элементом и задним зеркалом резонатора. Он состоит из соленоида, сердечника и шторки. В нормально закрытом (без питания) положении затвор блокирует лазерный резонатор и возможность случайного появления лазерного излучения. Положение затвора непосредственно зависит от статуса системы (READY или STBY) и он остается открытым только при нахождении системы в режиме READY. При возникновении любой неисправности в приборе или отключении питания, затвор автоматически закрывается, исключая появление лазерного излучения.

5) Защитный оптический фильтр.

Микроскоп с двумя окулярами 14 кратного увеличения позволяет контролировать процесс сварки изделия *in situ*, т.е. в режиме реального времени. Перед окулярами установлен специальный сертифицированный защитный фильтр который полностью поглощает рассеянное излучение рабочей длины волны лазера 1064нм, попадающее в окуляры от оптических поверхностей и от объекта сварки.

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		26

б) Жидкокристаллический затвор.

Перед окулярами микроскопа также установлен сертифицированный LC-затвор, который практически полностью блокирует видимое и невидимое рассеянное излучение от вспышки, образующейся при сварке. [5]

3.3 Спектрометр ASP-75

Обладая миниатюрными размерами и маленьким весом в сочетании с волоконным входом, спектрометр ASP-75 является идеальным прибором для оперативного и точного анализа различных источников света. Прибор имеет волоконный вход SMA со щелью, размеры которой согласованы с детектором. Это позволяет проводить эксперименты как с помощью оптоволокна, так и без. [6]

На рисунке 3.4 представлены габаритные размеры спектрометра.

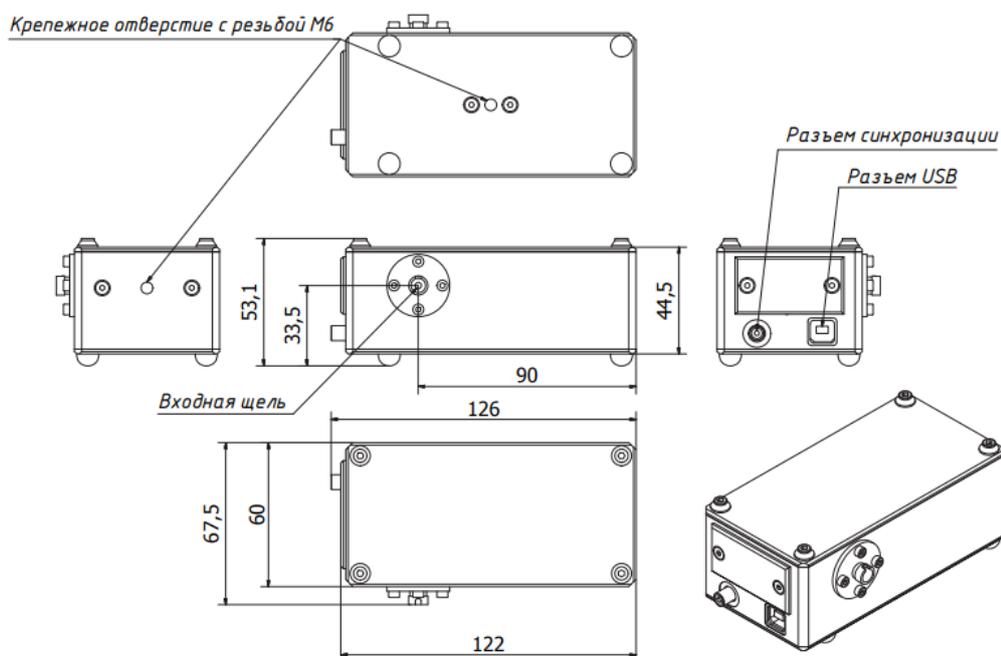


Рисунок 3.4 – Габаритные размеры спектрометра (в мм)

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

Характеристики оптической части спектрометра представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики оптической части спектрометра

Оптическая схема	Черни-Тернера
Спектральный диапазон	190–1100 нм
Решетка, штр./мм	800
Ширина области регистрации сигнала, нм	500
Спектральное разрешение, нм	0.5
Входная щель, мкм	10
Фокусное расстояние коллиматора, мм	46

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований эмиссионных спектров плазменно-эрозионного факела, генерируемого лазерными импульсами различных параметров на поверхности стеклоглеродной мишени в воздухе.

Образец стеклоглерода нагревался сфокусированным лучом *Nd:YAG* волоконного лазера. Энергия в импульсе (E) менялась от 1 Дж до 2.2 Дж, частота повторения импульсов (f) изменялась от 25 Гц до 45 Гц, длительность импульсов (τ) настраивалась от 1 мс до 2 мс. Диаметр пучка лазерного излучения составлял 0.8 мм.

На рисунке 4.1 приведено изображение плазменно-эрозионного мишени стеклоглерода в воздухе. Под цифрами обозначены: 1 – свечение вблизи поверхности мишени, 2 – свечение на расстоянии ~ 3 см от поверхности мишени, 3 – образец стеклоглерод. Параметры лазерного излучения: $E = 2$ Дж; $f = 45$ Гц; $\tau = 2$ мс.

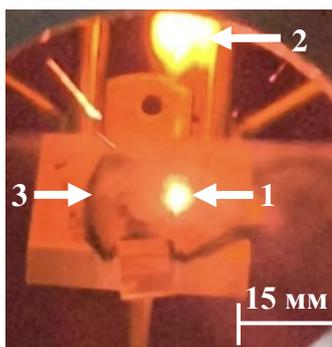


Рисунок 4.1 – Пространственное свечение эрозионного лазерного факела мишени стеклоглерода

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

В ходе эксперимента подбирались такие параметры лазерного излучения, при которых достигалась максимально эффективная ионизация углеродных линий в плазменно-эрозионном факеле.

Эксперименты подразделяются на группы:

- 1) Изменение энергии импульса (E), при постоянных частоте следования импульса (f) и длительности импульса (τ).
- 2) Изменение частоты повторения импульса (f), при постоянных энергии импульса (E) и длительности импульса (τ).
- 3) Изменение длительности импульсов (τ), при постоянных энергии импульса (E) и частоте следования импульса (f).

1) Первая группа экспериментов при изменении энергии импульса.

На рисунке 4.2 приведен спектр излучения плазменно-эрозионного факела, полученный при следующих параметрах лазерного излучения: $E = 1.6$ Дж, $f = 45$ Гц, $\tau = 2$ мс.

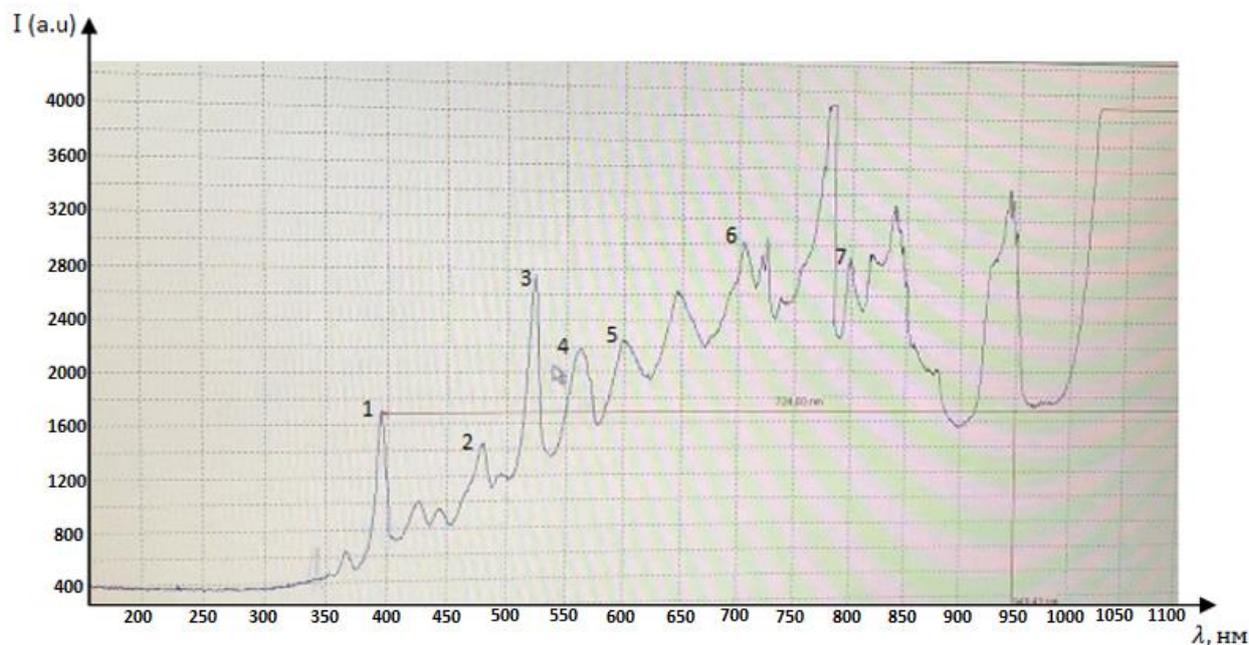


Рисунок 4.2 – Спектр плазменно-эрозионного факела

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

На графике видны характерные максимумы, соответствующие интенсивности излучения отдельных частиц, входящих в состав плазменно-эрозионного факела. Цифрами обозначены максимумы длин волн, которые соответствуют излучению следующих возбужденных ионов: **1** – C^{2+} ($\lambda = 395$ нм); **2** – C^{1+} ($\lambda = 477$ нм); **3** – Ar^{1+} ($\lambda = 523,6$ нм); **4** – N^{1+} ($\lambda = 561$ нм); **5** – Ar^{1+} ($\lambda = 598,7$ нм); **6** – C^{2+} ($\lambda = 706,3$ нм); **7** – O^{1+} ($\lambda = 799,5$ нм). Данная нумерация спектральных линий используется на всех рисунках.

На рисунке 4.3 приведен спектр излучения плазменно-эрозионного факела, при увеличении энергии в импульсе. Параметры излучения: $E = 2.2$ Дж; $f = 45$ Гц; $\tau = 2$ мс.

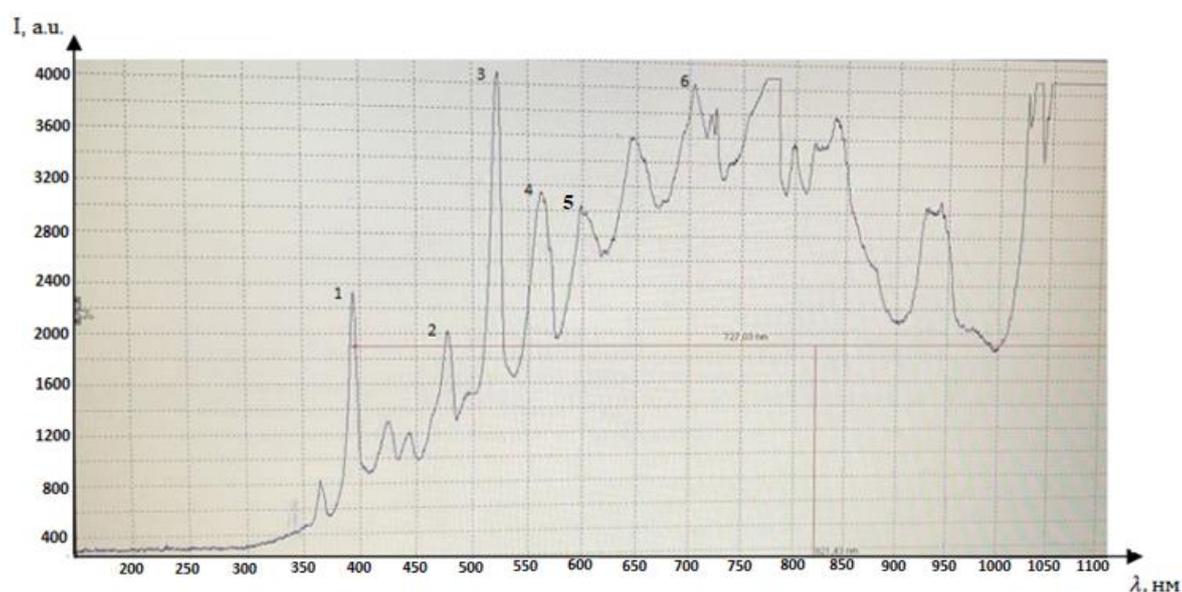


Рисунок 4.3 – Спектр излучения плазменно-эрозионного факела

Состав плазменно-эрозионного факела остается неизменным, однако, увеличивается концентрация ионов углерода. О чем свидетельствует увеличение относительной интенсивности этих спектральных линий (1, 2, 6). В предыдущем эксперименте относительная интенсивность линий ионизированного углерода составляла: 1 ~ 1700 относительных единиц, 2 ~ 1550 относительных единиц, 6 ~ 3000 относительных единиц.

С увеличением энергии в импульсе, относительная интенсивность этих же линий увеличилась: 1 ~ 2350 относительных единиц, 2 ~ 2000 относительных единиц, 6 ~ 4000 относительных единиц.

2) Вторая группа экспериментов при изменении частоты следования импульсов.

На рисунке 4.4 представлен спектр излучения плазменно-эрозионного факела, полученного при следующих параметрах лазерного излучения:

$$E = 2.2 \text{ Дж}; f = 35 \text{ Гц}; \tau = 2 \text{ мс.}$$

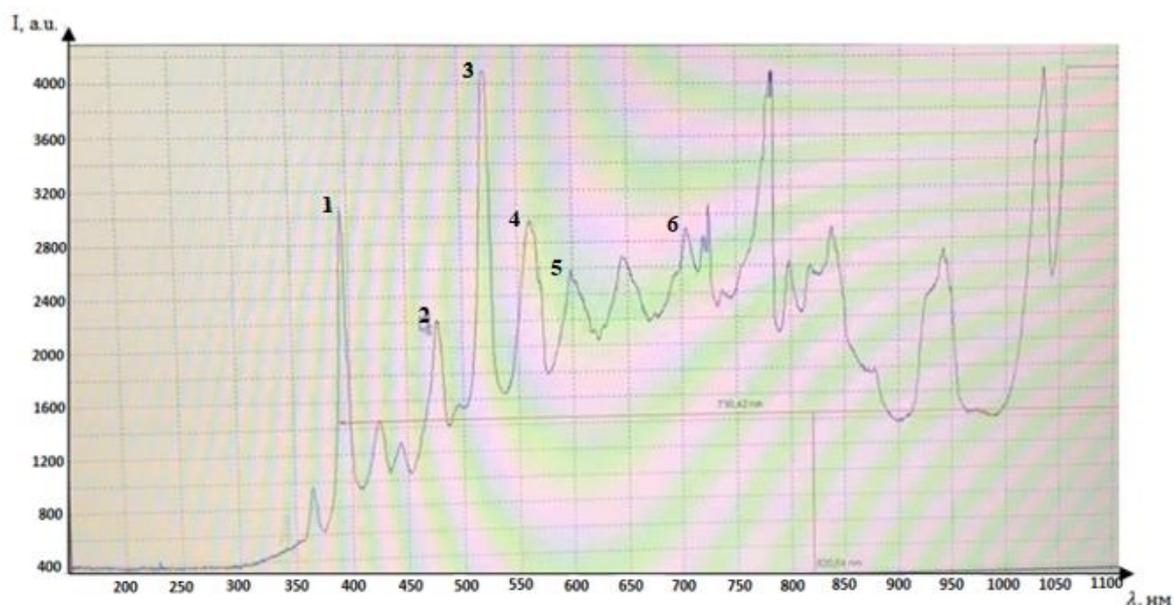


Рисунок 4.4 – Спектр излучения плазменно-эрозионного факела

Частицы в составе плазменно-эрозионного факела, такие же, как и в предыдущих случаях, но меняется относительная интенсивность линий ионизированного углерода 1 – $C^{2+}(\lambda = 395 \text{ нм})$, 2 – $C^{1+}(\lambda = 477 \text{ нм})$, что свидетельствует увеличению количества частиц.

На рисунке 4.5, представлен спектр излучения плазменно-эрозионного факела, при наименьшей частоте следования импульсов (f). Параметры лазерного излучения: $E = 2.2 \text{ Дж}, f = 25 \text{ Гц}, \tau = 2 \text{ мс.}$

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

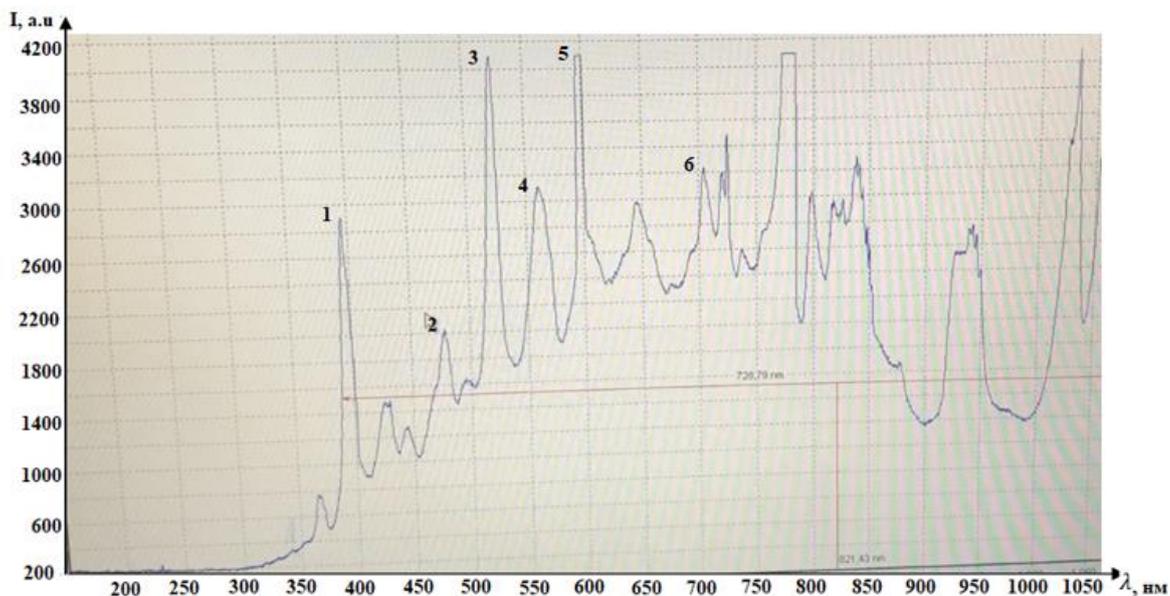


Рисунок 4.5 – Спектр излучения плазменно-эрозионного факела

Уменьшение частоты следования импульсов до 25 Гц приводит к снижению относительной интенсивности углеродных линий 1 – C^{2+} ($\lambda = 395$ нм) и 2 – C^{1+} ($\lambda = 477$ нм) и к увеличению относительной интенсивности углеродной линии 6 – C^{2+} ($\lambda = 706,3$ нм), в сравнении с рисунком 4.4. При 35 Гц относительная интенсивность линий углерода составляла: 1 ~ 3100 относительных единиц, 2 ~ 2250 относительных единиц, 6 ~ 2950 относительных единиц. При уменьшении частоты следования импульсов до 25 Гц, относительная интенсивность линий углерода составила: 1 ~ 2900 относительных единиц, 2 ~ 2000 относительных единиц, 6 ~ 3200 относительных единиц.

3) Третья группа экспериментов при изменении длительности импульса.

На рисунке 4.6 представлен спектр излучения плазменно-эрозионного факела, полученного при следующих параметрах лазерного излучения: $E = 1$ Дж; $f = 45$ Гц; $\tau = 1$ мс.

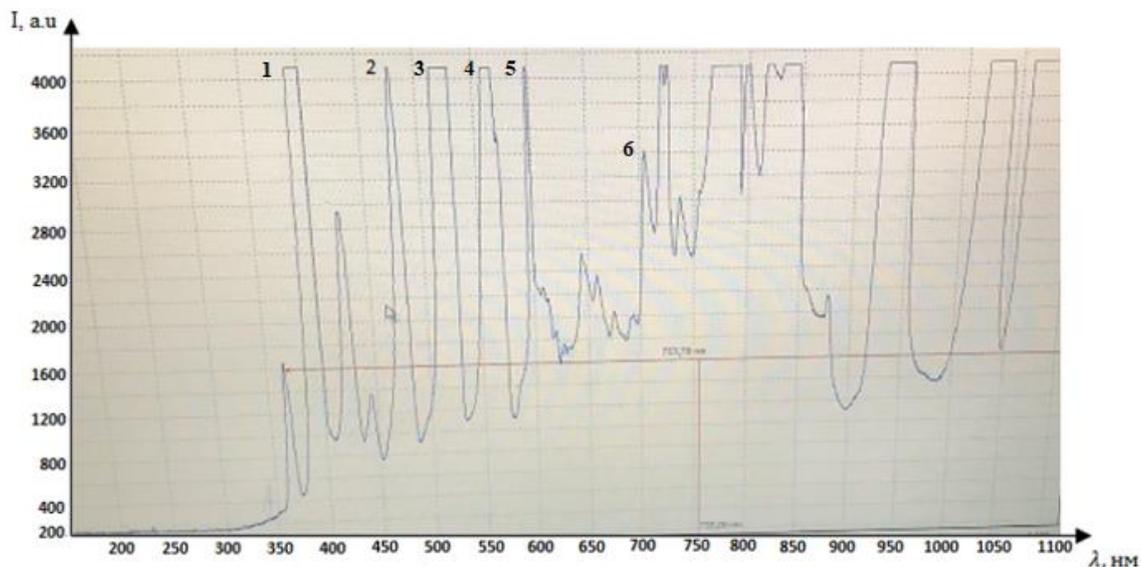


Рисунок 4.6 – Спектр излучения плазменно-эрозионного факела

При уменьшении энергии в импульсе и длительности импульса, линия ионизированного углерода 2 – $C^{1+}(\lambda = 477 \text{ нм})$ достигает максимума интенсивности, по сравнению с остальными экспериментами, однако, углеродная линия 1 – $C^{2+}(\lambda = 395 \text{ нм})$ уширяется из-за наличия излучения других частиц – примесей.

На рис. 4.7 представлен спектр излучения плазменно-эрозионного факела, полученного при изменении длительность импульса (τ), по сравнению с предыдущим экспериментом. Параметры лазерного излучения: $E = 1 \text{ Дж}$; $f = 45 \text{ Гц}$; $\tau = 1.5 \text{ мс}$.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

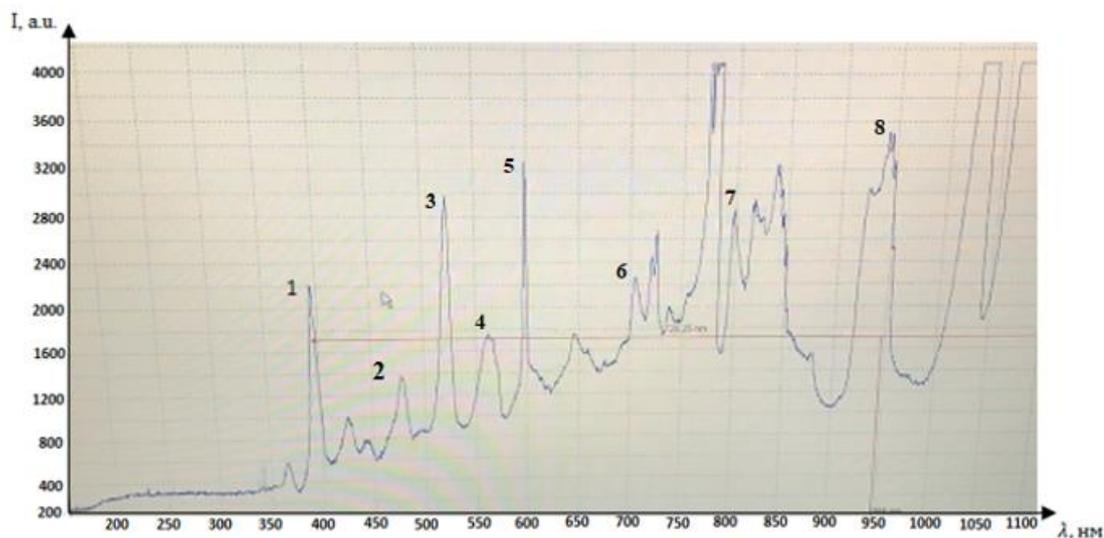


Рисунок 4.7 – Спектр излучения плазменно-эрозионного факела

Увеличение длительности импульса излучения приводит к значительному уменьшению относительной интенсивности спектральных линий углерода.

Значения относительных интенсивностей спектральных линий в предыдущем эксперименте: 2 ~ 4100 относительных единиц, 6 ~ 3400 относительных единиц. Относительная интенсивность тех же линий, при увеличенной длительности импульса: 2 ~ 1400 относительных единиц, 6 ~ 2250 относительных единиц.

При увеличении длительности импульса, на графике появляется новая спектральная линия излучения иона углерода 8 – C^{1+} ($\lambda = 940,5$ нм).

Наибольшее количество частиц углерода по относительной интенсивности спектральных линий получается при следующих параметрах лазерного излучения: $E = 2.2$ Дж; $f = 35$ Гц; $\tau = 2$ мс.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные тенденции в микроэлектронике требуют создания качественных пленок нанометровых толщин, постоянно повышаются требования к однородности и гладкости поверхности получаемых структур. Для выращивания пленок требуемого качества перспективен метод лазерно-плазменного напыления, так как в процессе роста участвуют высокоэнергетические частицы плазмы, что позволяет получать сплошные пленки с высокой эпитаксией и кристаллическим совершенством.

В ходе работы были изучены основы вакуумно-плазменных технологий, изучены понятия плазмы, методы ее образования, сферы ее использования.

Рассмотрены способы изучения плазменно-эрозионного факела методами спектроскопического анализа.

Проведены эксперименты по созданию плазменно-эрозионного факела стеклоуглеродной мишени в лабораторных условиях, при различных параметрах лазерного излучения. Определен состав данного плазменно-эрозионного факела, выявлены возбужденные линии углерода C^{1+} , C^{2+} и примеси Ar^{1+} , N^{2+} , O^{1+} , O^{5+} , Ne^{1+} , Kr^{2+} , с помощью таблиц Зайделя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Базаров И.В. Эмиссионная спектроскопия в задачах диагностики лазерной плазмы: Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук. – М., 2000. – 22 с.
- 2) Юрьева А.В., Ковальчук А.Н. Введение в плазменные технологии и водородную энергетику // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 90 с.
- 3) Агаркова Е.И. Спектральный анализ и его применение при проведении экспертных исследований // Материалы VII Международной студенческой научной конференции “Студенческий научный форум – 2015”. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2015/article/2015010860>
- 4) Лазерная-искровая спектроскопия [Электронный ресурс] / Научно-образовательный проект “Лазерный портал”; ред. Ефремова Е.Н. – Режим доступа: http://laser-portal.ru/content_722
- 5) Лазерная установка точечной сварки CLW-50: Руководство пользователя, 2010 – 69 с.
- 6) Спектрометр ASP-75. Техническое описание. – Троицк / ООО “Авеста-Проект”, 2014 – 2 с.
- 7) Зайдель А.Н., Прокофьев В.К. Таблицы спектральных линий: энциклопедия. – М.: Наука, 1969 – 782 с.
- 8) Мендельштам С.Л., Райский С.М. Таблицы спектральных линий: энциклопедия. – М.: Наука, 1938 – 290 с.
- 9) Физические величины: Справочник/А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.– М.; Энергоатомиздат, 1991.-1232 с.-ISBN 5-283-04013-5
- 10) Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом // М.: Наука. – 1989. – 277 с.

					ВлГУ.12.03.05.ЛТ-116.01.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		37