

Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 537.52; 621.316.5; 629.7.03
ГРНТИ 29.27.49; 44.29.31; 45.53.43
Инв. № 266.10.01

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: Учреждение Российской академии наук Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
От имени Руководителя организации _____/Ратахин Н.А./ М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 1 этапа Государственного контракта
№ 14.740.11.0317 от 17 сентября 2010 г.

Исполнитель: Учреждение Российской академии наук Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.
Проект: Развитие диагностического комплекса на базе НОЦ «Сильноточная электроника» в ИСЭ СО РАН и проведение исследований по диагностике плазмы дуги в вакуумных сетевых выключателях и плазмы лазерной абляции жидкометаллической мишени в лазерно-плазменных двигателях малых космических аппаратов
Руководитель проекта: _____/Батраков Александр Владимирович (подпись)

Томск
2010 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

по Государственному контракту 14.740.11.0317 от 17 сентября 2010 на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: Учреждение Российской академии наук Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

Руководитель темы:

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

_____ Батраков А. В.
подпись, дата

Исполнители темы:

кандидат физико-математических наук, без ученого звания

_____ Попов С. А.
подпись, дата

кандидат физико-математических наук, доцент

_____ Нефёдцев Е. В.
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания

_____ Прядко Е. Л.
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания

_____ Зюлькова Л. А.
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания

_____ Шнайдер А. В.
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания

_____ Петров В. И.
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания

_____ Разин А. В.
подпись, дата

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

_____ Панченко А. Н.
подпись, дата

кандидат физико-математических наук, без ученого звания

_____ Тельминов А. Е.
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания

_____ Шулепов М. А.
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания

_____ Сорокин Д. А.
подпись, дата

Реферат

Отчет 52 с., 1 ч., 21 рис., 2 табл., 16 источн., 0 прил.

ДИАГНОСТИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ, ВАКУУМНАЯ ДУГА, ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ, ВАКУУМНЫЕ СЕТЕВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ, КОСМИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 1 этапу Государственного контракта № 14.740.11.0317 "Развитие диагностического комплекса на базе НОЦ «Сильноточная электроника» в ИСЭ СО РАН и проведение исследований по диагностике плазмы дуги в вакуумных сетевых выключателях и плазмы лазерной абляции жидкометаллической мишени в лазерно-плазменных двигателях малых космических аппаратов" (шифр "2010-1.2.2-230-009") от 17 сентября 2010 по направлению "Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии" в рамках мероприятия 1.2.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - Цель данного этапа работы состоит в проведении анализа методов диагностики низкотемпературной плазмы, выбор оптимальных методов, приемлемых как в случае плазмы сильноточной дуги в вакуумных

дугогасительных камерах, так и в случае плазменного факела, генерируемого при лазерной абляции с поверхности жидкого металла, ограниченной капилляром. В связи с предстоящей разработкой лабораторного макета мишенно-соплового узла лазерно-плазменного двигателя и подготовкой заявки на патент данного устройства в работе ставятся выполнения патентных исследований. Третьей задачей этапа является подключение экспериментальной аппаратуры, имеющейся в распоряжении НОЦ «Сильноточная электроника» ИСЭ СО РАН.

В качестве методов исследования по первому этапу проекта использовались:

1. Анализ литературных данных в электронных базах научной-технической литературы E-LIBRARY и SCIRUS.

2. Анализ патентной и технической информации с использованием патентных научно-технических баз данных ФГУ ФИПС, United States Patent and Trademark Office», Canadian Intellectual Property Office, European Patent Office, E-LIBRARY и SCIRUS.

3. Диагностика плазмы с использованием электростатического зонда Ленгмюра.

4. Энерго-масс-анализ ионной компоненты плазмы.

5. Скоростная видеорегистрация свечения плазмы.

При выполнении работы используются следующие инструменты:

1. Высоковакуумная установка вакуумного сетевого выключателя с возможностью подключения дополнительных узлов.

2. Синтетическая схема, имитирующая режим тока короткого замыкания сети промышленной частоты. Амплитуда тока - до 15 кА, амплитуда переходного восстанавливающегося напряжения - до 41 кВ.

3. Энерго-масс-анализатор HIDEN EQP.

4. Скоростная 4-х канальная камера регистрации изображений HSFC Pro.

5. Источники питания, генераторы импульсных напряжений и токов, современные цифровые осциллографы Tektronics и Actacom, др. стандартное лабораторное оборудование.

1. Выполнен анализ методов диагностики низкотемпературной плазмы с учетом специфики исследования плазмы вакуумной дуги и лазерной абляции. Показано, что наиболее информативным и доступным методом диагностики плазмы является электростатический зонд Ленгмюра.

Предложено использование многозондовых измерений с целью достижения высокого пространственного и временного разрешения, а также восстановление динамики движения границы плазмы. В качестве передовых методов диагностики плазмы предложено использование высокоскоростной регистрации изображений плазмы с высоким пространственным и временным разрешением и энерго–масс–анализ ионной компонентны плазмы с высоким разрешением по энергии.

2. Проведено патентное исследование на предмет возможности подачи заявки на патент на мишенно–сопловый узел лазерно-плазменного микродвигателя на основе жидкого металла, используемого в качестве рабочего тела. В результате проведения исследований сделано заключение о патентной чистоте заявляемого устройства.

3. Осуществлено подключение скоростной 4-х канальной камеры регистрации изображений HSFC Pro и энерго–масс–анализатора HIDEN EQP к экспериментальной установке вакуумного сетевого выключателя и выполнены пробные измерения.

В качестве дополнения к научно-техническому отчету выполнен отчет о патентных исследованиях.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
Основная часть. Выбор направления исследований и подготовка экспериментальной установки к проведению исследований	11
1.1. Анализ состояния исследуемой проблемы; сравнительная оценка методов диагностики плазмы; выбор методов, оптимальных для диагностики плазмы сильноточной вакуумной дуги и лазерного абляционного факела	11
1.1.1. Анализ научно-технической литературы по теме: «Сравнительные характеристики методов диагностики плазмы и анализ их эффективности и границ применимости».....	11
<i>1.1.1.1. Диагностика параметров и динамики плазмы оптическими методами</i>	11
<i>1.1.1.2. Диагностика параметров плазмы зондовыми методами</i>	20
1.1.2. Выбор методов, оптимальных для диагностики плазмы сильноточной вакуумной дуги и лазерного абляционного факела	24
1.1.3. Выводы к Разделу 1.1	26
1.2. Проведение патентных исследований по ГОСТ Р 15.011-96	26
1.2.1. Общие данные об объекте исследования	26
1.2.2. Патентно-лицензионная ситуация	28
1.2.3. Регламент патентного поиска	30
1.2.4. Отчет о поиске	31
1.2.5. Выводы к главе 2	34
1.3. Подключение высокоскоростной камеры регистрации изображений HSFC-Pro и энергомассанализатора EQP HIDEN Analytical к экспериментальной высоковакуумной установке	34

1.3.1. Техническое описание модернизированной экспериментальной установки	34
1.3.1.1. Электрическая часть установки	34
1.3.1.2. Вакуумная и пневматическая система экспериментальной установки.....	39
1.3.1.3. Электроды, экраны и зонды.....	42
1.3.1.4. Аппаратура для формирования факела лазерной абляции.....	46
1.3.2. Подключение и тестирование аналитического оборудования к экспериментальной установке.....	47
1.3.2.1. Подключение скоростной камеры HSFC Pro.....	47
1.3.2.2. Подключение энерго–масс–анализатора HIDEN EQP.....	49
Заключение	50
Список использованных источников	51

ВВЕДЕНИЕ

Низкотемпературная плазма вакуумных разрядов широко используется во многих передовых технологиях в различных отраслях экономики. В частности, процессы, происходящие в плазме вакуумной дуги, позволили создать и довести до стандартного оборудования вакуумную коммутационную технику. В отличие от масляных и газонаполненных изолирующих промежутков, вакуумные промежутки не содержат вещества, способного проводить электрический ток, и для существования разряда происходит генерация плазмы лишь за счет испарения материала электродов, тогда как в коммутаторах других типов изолирующая среда сама способна ионизоваться. Это отличие создало предпосылки для успешного выключения переменных аварийных токов промышленной частоты в вакуумной дугогасительной камере при переходе тока через ноль. История вакуумных сетевых выключателей началась в 30-х годах прошлого столетия [1]. Однако наиболее интенсивное развитие вакуумные выключатели получили в последние 20 лет благодаря успехам в вакуумных технологиях и, соответственно, существенному снижению их цены. В настоящее время в области напряжений сети до 35 кВ вакуумные выключатели занимают лидирующее положение благодаря экологической чистоте данных коммутаторов, низкими затратами на обслуживание, высокой надежностью и большим сроком службы (до 30 лет). Дальнейший прогресс в развитии данной отрасли промышленности может быть связан только с повышением рабочих напряжений выключателей. Однако это требует решение главной проблемы в вакуумной дугогасительной камере – пробоя межконтактного промежутка переходным восстанавливающимся напряжением. Электрическая прочность вакуумного выключателя после успешного прерывания тока определяется процессами восстановления вакуумного промежутка за счет отхода плазменной границы и расширения катодного слоя. Динамика данного процесса сложна и многогранна и требует своего детального изучения [2]. В настоящий момент процесс восстановления катодного слоя после перехода ток через ноль успешно смоделирован [3], однако оценить действительную успешность данного моделирования не представляется возможным, поскольку

экспериментальное восстановление динамики плазменной границы с достаточно высоким временным и пространственным разрешением является трудноразрешимой задачей. Данная работа (экспериментальное исследование динамики катодного слоя в вакуумном сетевом выключателе) является задачей данной работы.

Задача диагностики плазмы вакуумной дуги пересекается с другой, не менее значимой задачей диагностики плазмы абляционного факела при воздействии сфокусированного лазерного излучения на металлическую мишень. Данная задача поставлена в связи с необходимостью разработки микродвигателей для малых космических аппаратов, способных сообщать телу малые импульсы тяги, отличающиеся высокой воспроизводимостью от импульса к импульсу. Электроэрозионные двигатели, используемые для разгона и маневрирования больших и средних космических аппаратов непригодны в случае наноспутников (вес от 1 до 10 кг) из-за нестабильности электрического разряда при малых токах. Задача стабильного воспроизведения малого (вплоть до 10^{-9} Н·с) импульса тяги может быть решена с использованием лазерной абляции. Устойчивую работу на малых уровнях тяги может обеспечить двигатель, основанный на испарении твердотельного материала лазерным излучением в импульсно-периодическом режиме. Диапазон возникающего при этом импульса отдачи зависит от параметров лазерного излучения (плотности мощности на поверхности мишени, длительности импульса лазера) и материала мишени и может составлять $10^{-9} \div 10^{-3}$ Н·с. Достигнутый уровень развития лазерной техники и физики лазерного воздействия на поглощающие материалы делают такую задачу вполне реальной. Для создания лазерно-плазменного микродвигателя эрозионного типа наиболее перспективно использование твердотельных или полупроводниковых лазеров, имеющих высокий к.п.д., достигающий 40÷60%, и чрезвычайно малый вес ~ 100 г при мощности 2 ÷ 20 Вт. При этом конструкция лазерно-плазменного микродвигателя может содержать один лазер с разводкой лазерного излучения к мишенно-сопловым частям с помощью элементов волоконной оптики. Такая компоновка позволит существенно снизить весогабаритные и энергетические характеристики двигательной установки. Для успешной реализации данной концепции требуется

детальное исследование параметров плазмы в факеле лазерной абляции с целью проверки стабильности процесса плазмообразования и эффективности передачи энергии лазерного излучения в мишень. Несмотря на относительно малую энергию лазерного излучения в импульсе (порядка 250 мкДж) удается достичь плотности мощности до 10^9 Вт/см², что, во-первых, достаточно для высокой степени ионизации испаренного вещества мишени, и, во-вторых, по порядку величины соизмеримо с плотность мощности, выделяемой при взрывоэмиссионных процессах в вакуумной дуге [4]. В результате ожидаемые параметры плазмы в обоих исследуемых процессах оказываются идентичными, что делает обоснованным использование одних и тех же методов диагностики плазмы при исследовании обоих объектов.

Основные методы диагностики плазмы описываются в **разделе 1.1** отчета. Обосновывается целесообразность использования зондового метода для измерения концентрации и температуры плазмы. С целью получения данных по пространственной динамике плазмы планируется одновременное использование 5-ти зондов в комплексе с многоканальными цифровыми осциллографами и источниками питания. В качестве дополнительных, но при этом чрезвычайно информативных методов планируется использование высокоскоростной камеры видеорегистрации изображений свечения плазмы HSFC Pro и энерго–масс–анализатора HIDEN EQP, способного измерять массовые спектры тяжелой компоненты плазмы, зарядовые состояния для каждой массы и распределения частиц по энергиям для каждого массового и зарядового состояния. Собранный и готовый к исследованиям экспериментальный стенд детально описан в **разделе 1.3** отчета. **Раздел 1.2** отчета посвящена патентному исследованию лазерно-плазменных космических двигателей на предмет патентной чистоты планируемого к разработке лабораторного макета мишенно-соплового узла на основе металлического капилляра, заполненного жидким металлом в качестве рабочего тела двигателя.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ К ПРОВЕДЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Анализ состояния исследуемой проблемы; сравнительная оценка методов диагностики плазмы; выбор методов, оптимальных для диагностики плазмы сильноточной вакуумной дуги и лазерного абляционного факела.

1.1.1. Анализ научно-технической литературы по теме: «Сравнительные характеристики методов диагностики плазмы и анализ их эффективности и границ применимости»

1.1.1.1. Диагностика параметров и динамики плазмы оптическими методами

Яркое свечение является основным свойством вакуумной дуги, благодаря которому она была открыта [5], поэтому эмиссионная спектроскопия может рассматриваться как один из приоритетных методов для диагностики дуги. Тем более что спектроскопия электрической дуги, горящей в парах металла или в газе, является в настоящее время хорошо разработанным инструментом. Однако, несмотря на доступность метода, следует учитывать принципиальные ограничения на использование спектроскопических методов. Все количественные характеристики плазмы дуги флуктуируют в процессе ее эволюции. Элементный состав электродов как правило сложен, что приводит к сложности спектра и трудностям в его интерпретации с точки зрения получения информации о фундаментальных характеристиках плазмы – концентрации и температуры ее электронной компоненты. Поэтому спектроскопия дуги должна обеспечиваться высоким пространственным и временным разрешением. Для локализации параметров плазмы исходные данные должны пройти обратное преобразование, причем, не для одной линии. Для такой диагностики требуется регистрация данных по многим каналам. Безусловно, оптическая спектроскопия может быть использована и используется для интегрированного по времени и пространству

анализа. Такой анализ имеет широкое применение в практике для определения состава тяжелой компоненты и усредненных параметров плазмы дуги. При использовании достаточно чистых материалов электродов, когда линии могут быть явно идентифицированы по элементам, широко используемым инструментом для определения температуры плазмы является анализ соотношений интенсивностей двух спектральных линий фиксированной тяжелой компоненты в предположении локального термодинамического равновесия:

$$\ln \left(\frac{I_1 g_2 A_2 \nu_2}{I_2 g_1 A_1 \nu_1} \right) = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{k T_e}, \quad (1.1)$$

где I , g , A , ν , ε , T_e – соответственно интенсивность линии, статистический вес, вероятность перехода, частота излучения, энергия возбуждения и электронная температура. Значения T_e , вычисляемые из (1.1), как правило, близки к 1 эВ [6], что значительно ниже значений T_e , измеряемых электрическими методами и лежащих в диапазоне 3÷5 эВ [6]. Столь низкая температура свидетельствует о том, что излучение может происходить из области катодных пятен, в то время как наиболее важной информацией с точки зрения исследуемых в данной работе процессов, является температура плазмы во всем дуговом промежутке.

С точки зрения информативности при исследовании процессов в дуге представляет большой интерес использование скоростной фото (видео) регистрации изображений. Данный метод может использоваться как независимо от других методов исследования, так и в качестве вспомогательного средства. Известны два подхода для скоростной регистрации изображений: покадровая съемка и хронография (рис. 1.1). Хронография (рис. 1,а) основана на вырезании проекции изображения с использованием щелевой диафрагмы и ее разворачивании во времени с использованием отклоняющих пластин прибора, хронографа (временпреобразующего электронно-оптического преобразователя). Достоинством данного метода исследования является высокое временное разрешение при получении изображений, недостатком – отсутствие полного изображения объекта, что может приводить к потере более важной информации, чем зарегистрированная. Тем не менее, в сочетании с оптической спектроскопией хронография дает уникальную возможность диагностики процессов в плазме вакуумного разряда [7].

Недостатка хронографа лишена покадровая съемка при условии, что экспозиция кадра может быть уменьшена настолько, чтобы получить «замороженное» изображение, неразмытое быстроизменяющимся объектом. Этому условию удовлетворяют камеры, в которых используется электронно-оптический преобразователь в качестве электронного затвора. Современные электронно-оптические преобразователи основываются, как правило, на микроканальных пластинах, что обеспечивает высокое пространственное разрешение с большим (сотни) коэффициентом усиления яркости изображения. Минимальные экспозиции кадров в последовательности изображений находятся в области единиц наносекунд.

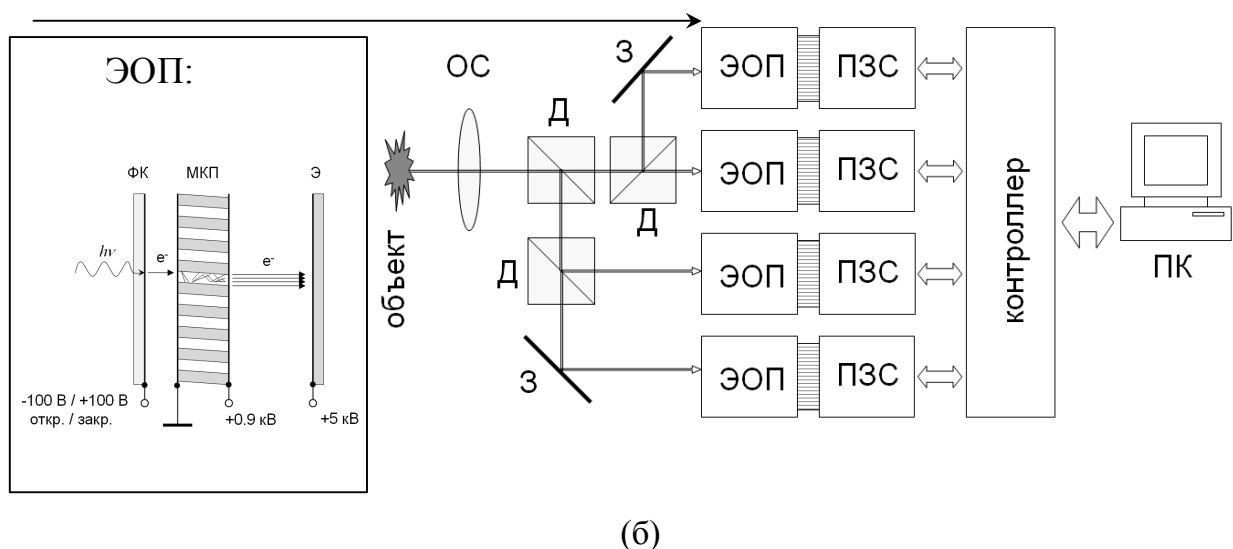
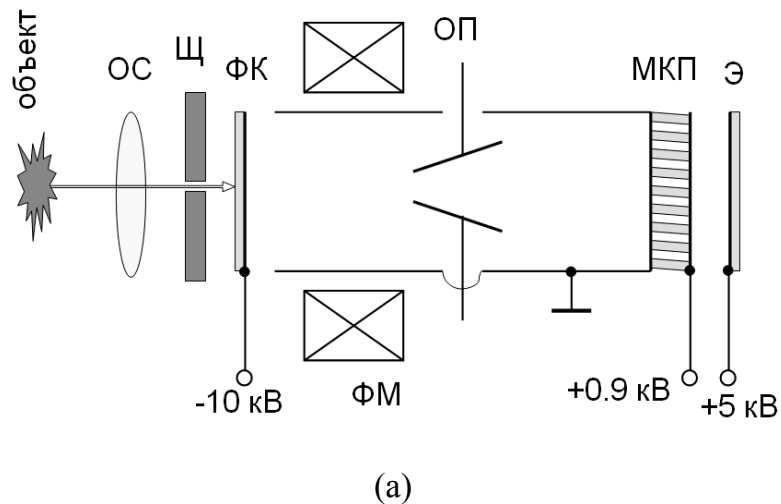


Рис. 1.1. Схематическое представление хронографа (а) и 4-х кадровой скоростной камеры

(б). Условные обозначения: ОС – оптическая система, Д – делитель луча, З – зеркало, ПЗС – прибор с зарядовой связью, ПК – персональный компьютер, Щ – щелевая диафрагма, ФК – фотокатод, ОП – отклоняющие пластины, ФМ – фокусирующие электромагниты, МКП – микроканальная пластина, Э – люминесцентный экран.

Инструментом, обеспечивающим измерение параметров плазмы вакуумной дуги и факела лазерной абляции с высоким пространственным разрешением, может служить лазерная диагностика с визуализацией поля [8]. В сочетании со скоростной фоторегистратией лазерная диагностика с визуализацией поля дает уникальную возможность одновременной регистрации движения плазмы и динамики ее параметров. Практически все существующие методы данной диагностики применимы для исследования плазмы вакуумной дуги и факела абляции, но реализованы в эксперименте только лазерная интерферометрия с визуализацией поля и лазерная теневая фоторегистратия [9].

При прохождении через плазму в световую волну вносятся фазовые искажения за счет рефракции света. При прохождении световой волны через фазовый объект сдвиг фазы $\Delta\varphi$ определяется пространственным распределением показателя преломления среды n :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{x_1}^{x_2} [n - 1] dx \quad (1.2)$$

Вклад каждой частицы плазмы в рефракцию является аддитивным. Вклад электронов в рефракцию фазового объекта определяется соотношением

$$n_e = \sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}}, \quad (1.3)$$

где n_e – электронная составляющая показателя преломления, $\omega = 2\pi c/\lambda$ – круговая частота зондирующего излучения (ЗИ), c – скорость света, λ – длина волны, $\omega_{pe} = (4\pi e^2 N_e / m_e)^{1/2}$ – электронная плазменная частота, e – заряд электрона, N_e – электронная концентрация, m_e – масса покоя электрона. Формула (1.3) определяет верхний предел электронной концентрации плазмы, доступной для лазерной диагностики, из условия $\omega_{pe} \ll \omega$. Для видимого диапазона зондирующего

излучения измерения концентраций выше 10^{20} см^{-3} следует рассматривать как недостоверные. В присутствии магнитного поля (случай вакуумной дуги) накладывается дополнительное условие $\omega_{ce} \ll \omega$, где $\omega_{ce} = eB/m_e c$ – электронная циклотронная частота, B – индукция магнитного поля. Для оптического диапазона зондирующего излучения в вакуумной дуге это условие выполняется всегда. Минимальные концентрации, доступные для регистрации, определяются качеством исполнения интерферометра и могут быть оценены с использованием формулы (1.3) и $\Delta n_{\min} = \Delta\varphi_{\min} \lambda / 2\pi L$, где L – размер плазменного объекта, как

$$N_e^{\min} \approx \frac{m_e c^2}{e^2} \frac{\Delta\varphi_{\min}}{\lambda L} \quad (1.4)$$

при условии, что размер фазового объекта много больше длины волны зондирующего излучения, что в нашем случае выполняется всегда. Если полагать, что минимальный сдвиг фазы, доступный для регистрации, составляет 0.1 периода, а размер фазового объекта порядка 1 см, то в видимом диапазоне ЗИ минимальная электронная концентрация, доступная для лазерной интерферометрии с визуализацией поля, составляет 10^{15} см^{-3} .

Вдали от резонансных линий поглощения тяжелых частиц плазмы рефракция на атомах и ионах обусловлена их поляризацией в поле световой волны. Поскольку в рефракцию вносят вклад атомы, находящиеся в основном состоянии с относительно низкой поляризуемостью ($10^{-24} \div 10^{-23} \text{ см}^3$), можно полагать их вклад малым по отношению к рефракции на свободных электронах.

В РЛП атома (иона) с длиной волны λ_0 и шириной на полувысоте $\Delta\lambda$ рефракция плазмы описывается соотношением:

$$n_a = 1 + \frac{e^2}{4\pi m_e c^2} \lambda_0^3 N_a f \frac{\lambda - \lambda_0}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda_0}{2}\right)^2}, \quad (1.5)$$

где f – сила осциллятора РЛП и N_a – концентрация соответствующей тяжелой компоненты плазмы в невозбужденном состоянии. По абсолютной величине показатель преломления n_a в резонансной линии поглощения на несколько порядков величины превосходит n_e , что дает возможность регистрировать интерференционную картину фазового объекта, состоящего из определенных

атомов (ионов) в невозбужденном состоянии и восстанавливать пространственное распределение их концентрации. Минимальные доступные для регистрации значения N_a определяются по аналогии с процедурой для N_e с учетом (8) как

$$N_a^{\min} \approx \frac{2m_e c^2}{e^2} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} \frac{\Delta\varphi_{\min}}{f L} \quad (1.6)$$

Это означает, что порог чувствительности метода зависит от ширины $\Delta\lambda$ резонансной линии поглощения λ_0 , т.е., главным образом, от штарковского уширения, определяемого концентрацией заряженных частиц в плазме. Из (1.6) следует, что максимальные регистрируемые значения N_a также зависят от $\Delta\lambda$, и без знания N_e и N_i , где N_i – концентрация ионов плазмы, невозможно корректное определение N_a . Таким образом, лазерную интерферометрию с визуализацией поля следует использовать в сочетании с дополнительными методами диагностики плазмы.

Сильная зависимость верхнего предела измеряемых значений n_a от концентрации заряженных частиц плазмы вследствие уширения спектральных линий дает возможность оценить степень ионизации K_i .

Успешное использование лазерной интерферометрии с визуализацией поля требует, чтобы оптическая толщина фазового объекта была заметно меньше 1, поэтому поглощение зондирующего излучения имеет принципиальное значение при реализации метода. Кроме того, поглощение света является источником дополнительной информации при лазерной теневой фоторегистрации. Поглощение зондирующего излучения плазмой определяется свободно-свободными и свободно-связанными переходами (непрерывное поглощение) и дискретными переходами на РЛП [8]. При высоких температурах ($kT_e \gg h\nu$) вдали от резонансной линии поглощения основной вклад в коэффициент поглощения вносит слагаемое κ_{ff} , описывающее свободно-свободные переходы:

$$\kappa_{ff} = C_1 \frac{z^2 G N_e N_i}{T_e^{1/2} \nu^3} \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) \right], \quad (1.7)$$

где $C_1 = \frac{8}{3} \left(\frac{\pi}{6} \right)^{1/2} \frac{e^6}{chm^2} \left(\frac{m}{k} \right)^{1/2}$, G – фактор Гаунта, z – средний заряд ионов. При более низких температурах суммарный коэффициент поглощения определяется суммой κ_{ff} и κ_{fb} , описывающего свободносвязанные переходы. При условии локального термодинамического равновесия κ_{fb} может быть оценено как

$$\kappa_{bf} \approx \kappa_{ff} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT_e}\right) - 1 \right]. \quad (1.8)$$

Оценив концентрацию плазмы при лазерной интерферометрии с визуализацией поля, можно оценить значение T_e в пределах фазового объекта при использовании лазерной теневой фоторегистрации в едином эксперименте с лазерной интерферометрией с визуализацией поля.

В пределах резонансной линии коэффициент поглощения определяется соответствующим переходом в атомах и описывается выражением:

$$\kappa_{bb} = \frac{e^2}{2m_e c^2} \lambda_0^2 N_a f \frac{\Delta\lambda_0}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda_0}{2}\right)^2}. \quad (1.9)$$

Поскольку коэффициент поглощения зависит, как и показатель преломления, только от концентрации соответствующей тяжелой компоненты в невозбужденном состоянии, лазерная теневая фоторегистрация в резонансной линии поглощения не дает дополнительной к интерферометрии количественной информации о параметрах плазмы, и может рассматриваться преимущественно как способ регистрации изменения размеров и положения плазменного объекта.

Поглощение зондирующего излучения может приводить к нагреву плазмы и искажению получаемых данных [8]. При условии, что длительность импульса зондирующего излучения больше времени электрон-электронной релаксации, но меньше времени электрон-ионной релаксации, и длина волны зондирующего излучения далека от резонансной линии поглощения, энергия W , необходимая для нагрева плазмы на ΔT , может быть оценена из выражения:

$$W \approx 7 \times 10^{-26} \frac{\Delta T}{T} \frac{(kT_e)^{3/2} \nu^3}{\tau N_i z^2 g_{ff} \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) \right]}. \quad (1.10)$$

При диагностике плазмы вакуумной дуги критическими интенсивностями зондирующего излучения следует считать 10^7 Вт/см² вдали от резонансных линий поглощения и 10^5 Вт/см² в резонансных линиях поглощения.

Для получения интерференционных изображений любая двулучевая схема является приемлемой. Интерференционную схему можно легко модифицировать в теньевую абсорбционную схему, закрыв опорный луч. При получении интерференционного изображения необходимо использовать делительный кубик вместо полупрозрачной пластины, поскольку отражения от второй поверхности пластины вносит существенные искажения в изображения. В качестве источника зондирующего излучения должен быть использован лазер, длительность которого не превышает нескольких наносекунд, поскольку характерный временной масштаб элементарных процессов при лазерной абляции лежит в наносекундной области. Наиболее удобным инструментом является лазер с перестраиваемой частотой на органических красителях, что обеспечивает возможность диагностики электронной и тяжелой компонент плазмы в одном эксперименте. Максимально полную информацию о динамике плазмы можно получить, совмещая лазерную интерференцию и скоростную лазерную теньевую фоторегистрацию путем использования циклической линии задержки светового луча (рис. 1.2).

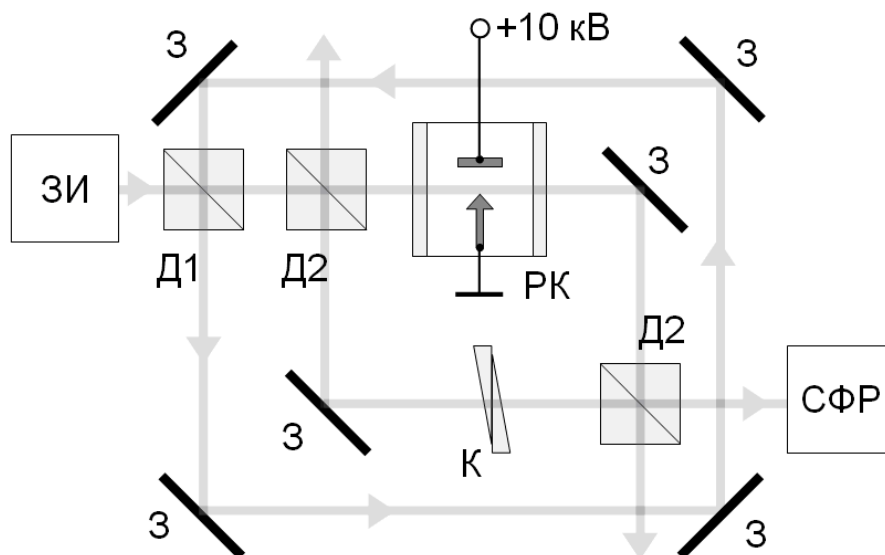


Рис. 1.2. Схема эксперимента по лазерной интерферометрии и теньевой абсорбции с возможностью получения последовательных интерференционных (абсорбционных)

изображений плазменного объекта. Условные обозначения: З – зеркала, Д1 – делитель луча в отношении прохождения к отражению 0.7/0.3, Д2 – делитель луча в отношении 0.5/0.5, РК – разрядная камера, ЗИ – лазер с наносекундной (субнаносекундной) длительностью импульса излучения, СФР – система скоростной регистрации изображений, включающая оптическую систему.

Принципиальное значение для получения количественных характеристик исследуемых плазменных объектов оптическими методами имеет процедура восстановления данных. Каждая точка интерференционного или абсорбционного изображения является интегралом по некоторому оптическому пути, т.е.

$$f(y) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x, y) dx, \quad (1.11)$$

где $f(y)$ – проекция объекта (изображение), $s(x, y)$ – исходная (образующая) функция. Размерность исходной функции выше, чем проекции, и ее однозначное восстановление возможно лишь при голографической интерферометрии. Если в распоряжении имеется лишь одна проекция, исходная функция восстанавливается в предположении аксиальной симметрии фазового объекта (рис. 1.3).

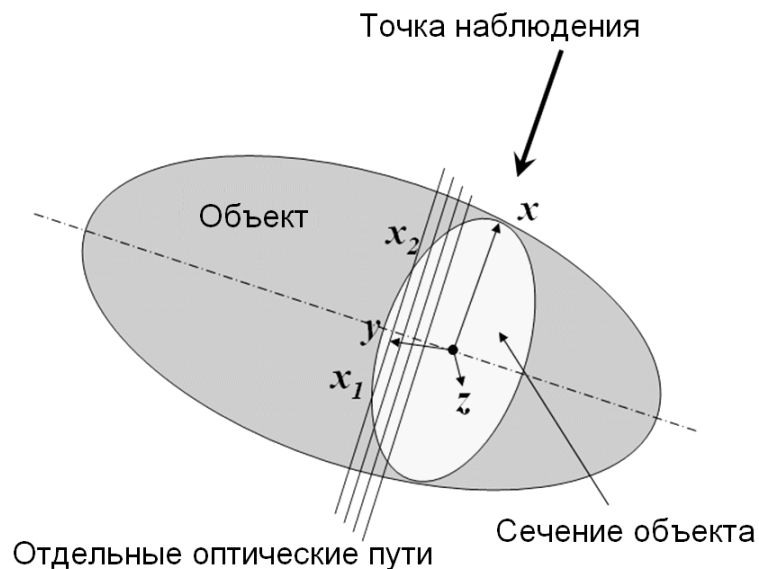


Рис. 1.3. Графическое представление математической задачи по восстановлению данных при визуализации объекта.

При восстановлении $s(x,y)$, как правило, применяется алгоритм обратного преобразования Абеля [10]. Поскольку $r^2 = x^2 + y^2$, и $s(x,y)$ становится зависящей только от одной радиуса, то исходная функция восстанавливается как

$$s(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{\infty} \frac{df(y)/dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \quad (1.12)$$

В случае лазерной интерферометрии с визуализацией поля проекцией является распределение по $\{y, z\}$ сдвига полос в единицах 2π , а исходная функция – распределение по $\{r, z\}$ показателя преломления среды, которое в дальнейшем преобразуется в распределение концентрации соответствующей компоненты плазмы согласно формулам (1.3) или (1.5). В случае отклонения фазового объекта от правильной осесимметричной формы интегрирование следует осуществлять с разных сторон изображения навстречу друг другу, а положение оси определять точками на сечениях, где левостороннее и правостороннее интегрирование сходятся в общем значении показателя преломления.

1.1.1.2. Диагностика параметров плазмы зондовыми методами

Одним из первых и в настоящее время основных методов диагностики плазмы является электростатический зонд Ленгмюра (1924). Со времени публикации первого обзора по электрическим зондам [11] прошло более 80-ти лет, но основная теория метода практически не претерпела изменений. По данному вопросу написано большое число монографий (например [12,13]).

Наиболее простым и доступным для исследования является одиночный зонд. Его вольтамперная характеристика схематически представлена на рис. 1.4. У характеристики есть две асимптотические ветви, ток в которых ограничен эмиссионной способностью плазмы. В зависимости от полярности потенциала зонда выделяют ионный I_{Si} и электронный I_{Se} токи насыщения. Зондовая характеристика имеет также две характеристические точки – начало электронной ветви насыщения ϕ_p , интерпретируемое как потенциал плазмы (иногда, потенциал пространства [14]), и ϕ_f как плавающий потенциал в плазме.

Принципиальное значение для диагностики плазмы зондовым методом имеет поведение кривой между ветвями насыщения вольтамперной характеристики. В

координатах $\ln I$, ϕ_B . переходная характеристика имеет вид прямой линии, из наклона которой определяют электронную температуру T_e

$$\frac{\partial \ln I}{\partial \phi_B} = \frac{e}{k T_e}, \quad (1.13)$$

где k и e – постоянная Больцмана и элементарный заряд соответственно. Далее, измерив I_{Se} , концентрация электронов n_e определяется из выражения

$$I_{Se} = \frac{1}{4} A_p e n_e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}, \quad (1.14)$$

где A_p – собирающая площадь зонда и m_e – масса покоя электрона.

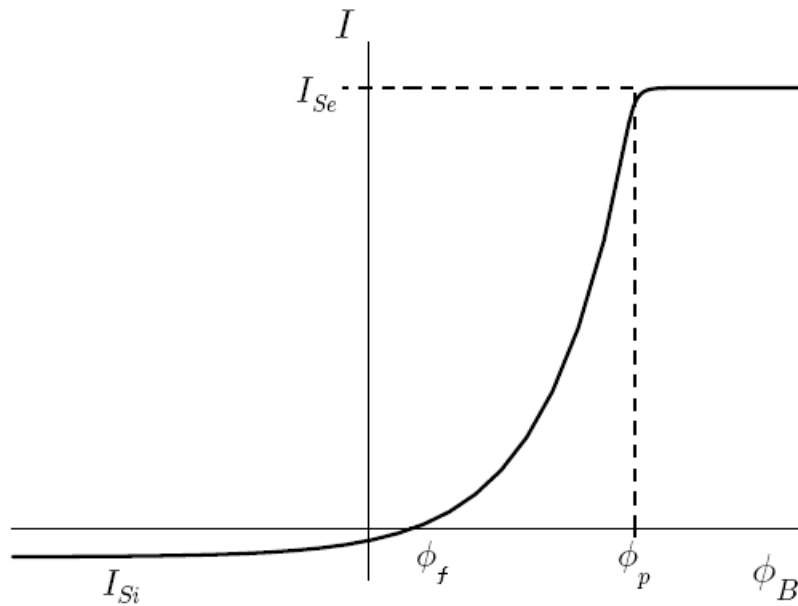


Рис. 1.4. Типичная вольтамперная характеристика одиночного зонда, где I – ток на зонд и ϕ_B – потенциал зонда.

При практическом использовании зондового метода следует учитывать временные и пространственные ограничения метода. Так, минимальное достоверное время измерения параметров плазмы ограничено плазменными частотами и временем формирования, что дает для минимального времени измерения τ_m

$$\tau_m \approx 2\pi \sqrt{\frac{m_i \varepsilon_0}{n Z^2 e^2}}, \quad (1.15)$$

В случае плазмы вакуумной дуги эти времена лежат в области долей микросекунды. Пространственное разрешение метода определяется размерами зонда, и чем они меньше, тем выше пространственное разрешение. С другой стороны, уменьшение A_p ведет к уменьшению I_{se} . Соответственно, уменьшается нижний предел концентраций плазмы, доступных для исследования. Важным моментом в оценке пространственного разрешения является выполнение условий, связанных с токопрохождением в слое, окружающем зонд, который, для выполнения условия (1.14), должен быть тоньше характерного размера зонда. Реализация зондовых измерений в данной работе рассмотрена в разделе 1.2 и в главе 3.

Развитием зондовых методов диагностики плазмы являются коллекторные измерения, позволяющие реализовать масс-спектрометрические измерения в простейшем виде путем разделения ионов по массам и зарядовым состояниям в пространстве дрейфа. Схема измерений представлена на рис. 1.5,а. Плазма исследуемого объекта инжектируется в пространство между анодной и заземленной сеткой, где и происходит разделение ионного потока по отношению массы к заряду иона. Общий ансамбль частиц разделяется тем самым на несколько групп, каждая из которых имеет собственную скорость и проходит расстояние L за собственное время. Приход групп частиц регистрируется осциллографом в виде всплесков коллекторного тока (рис. 1.5,б).

Времяпролетный метод разделения ионов имеет ряд недостатков, связанных с трудностями в накоплении данных по многим актам горения разряда или лазерной абляции. Это существенно снижает чувствительность метода, которая может быть существенно улучшена за счет использования стандартного оборудования, основанного на квадрупольной электродинамической системе. Кроме того, совмещение квадрупольного масс-спектрометра с электростатическим сепаратором частиц по энергии дает уникальную возможность разделения частиц не только по отношению массы к заряду, но и по отношению заряда к кинетической энергии частицы. Такой подход реализован в современных энерго–масс–анализаторах, в частности, в приборе HIDEN EQP. Принцип организации прибора представлен на рис. 1.6.

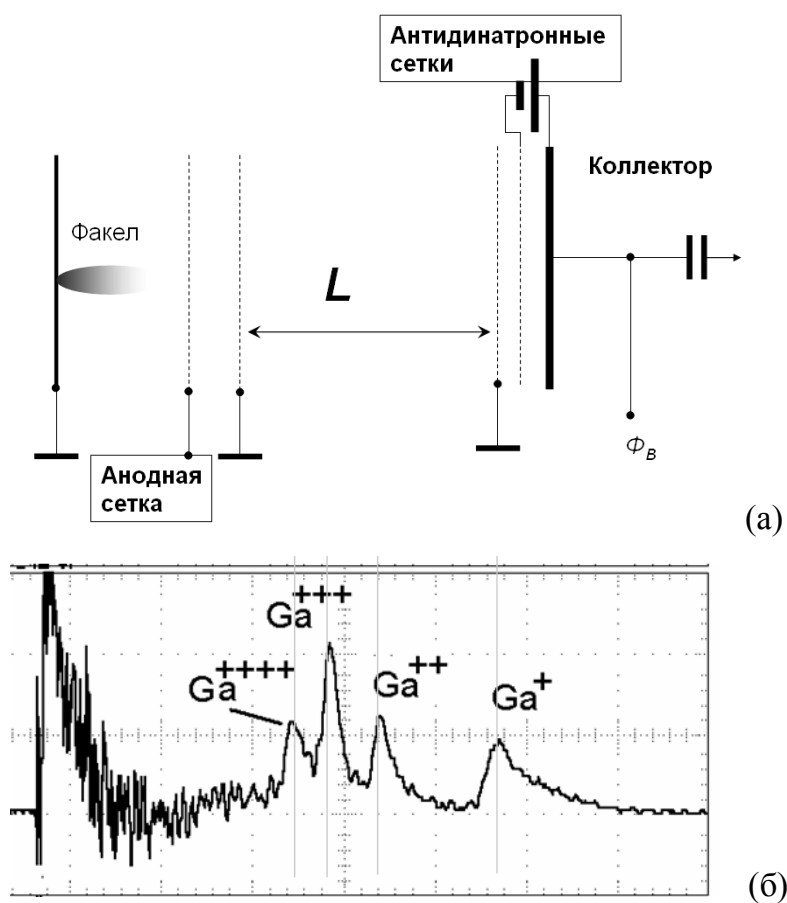


Рис. 1.5. Принцип действия времяпролетного масс-спектрометра (а) и пример масс-спектра, полученного при горении вакуумной дуги на галлиевом катоде [15].

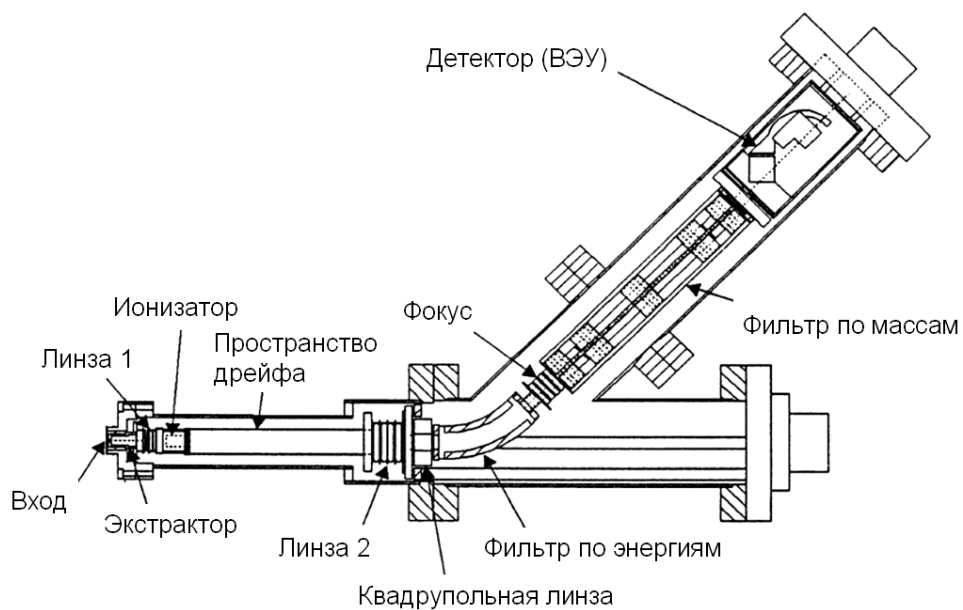


Рис. 1.6. Принцип работы энерго-масс-анализатора HIDEN EQP.

1.1.2. Выбор методов, оптимальных для диагностики плазмы сильноточной вакуумной дуги и лазерного абляционного факела

Программа исследования плазменных объектов, рассматриваемых в данной работе, подразумевает выбор методов и разработку на их основе методик, удовлетворяющих следующим требованиям:

- 1.2.1. Способность регистрировать концентрацию и температуру плазмы при ожидаемых концентрациях до 10^{16} см⁻³ и ниже без пространственного но с временным разрешением не хуже 2 мкс. Такие измерения предполагаются к выполнению в период горения сильноточной вакуумной дуги. Конечная цель таких измерений состоит в оценке концентрации и температуры плазмы в максимуме тока дуги и по мере его уменьшения.
- 1.2.2. Способность регистрировать концентрацию разреженной плазмы при ожидаемых концентрациях до 10^{11} см⁻³ и выше с пространственным разрешением не хуже 2 мм и с временным разрешением не хуже 2 мкс. Такие измерения предполагаются к выполнению в период после перехода тока дуги через ноль. При этом нет необходимости измерения температуры плазмы поскольку, как ожидается, она не изменяется в этот период.
- 1.2.3. Способность контролировать положение электродов и горячего пятна на аноде в процессе зондовых измерений с пространственным разрешением не хуже 0.2 мм и временным не хуже 0.1 мкс. Наблюдения связаны с необходимостью измерения истинных расстояний между источником плазмы и зондами.
- 1.2.4. Способность измерения элементного и зарядового состава ионной компоненты плазмы для получения общей характеристики тяжелой компоненты плазмы.
- 1.2.5. Способность измерения средней скорости ионов без разделения по зарядовым состояниям с целью оценки механического импульса, передаваемого в мишень при лазерной абляции.
- 1.2.6. Способность измерения распределения ионов каждого из зарядовых состояний по энергиям с целью оценки эффективности преобразования энергии лазерного излучения в кинетическую энергию плазменной струи.

С целью удовлетворения требований, предъявляемых к методам исследования, а также с учетом приборного парка, имеющегося в распоряжении коллектива исполнителей работы, были отобраны следующие методы:

- 1.2.7. Для измерений по пункту 1.2.2 в данной работе предполагается использование линейки из 5-ти одиночных цилиндрических зондов, работающих в режиме электронного тока насыщения для повышения чувствительности измерений. Для получения временного разрешения предполагается использование скоростных цифровых осциллографов с полосой пропускания сигнала не хуже 100 МГц. Пространственное разрешение определяется диаметром собирающей части зонда, который не должен превышать 1 мм.
- 1.2.8. Для измерений по пункту 1.2.1 в данной работе предполагается использование двойного зонда, образованного парой соседних одиночных зондов из 5-ти, при этом берутся зонды, расположенные максимально близко к средней плоскости дугового промежутка.
- 1.2.9. Для видеорегистрации изображений при исследовании плазменных объектов по пункту 1.2.3 предполагается использование высокоскоростной камеры HSFC Pro со встроенной оптической системой высокого разрешения. Камера снабжена электронным затвором с минимальным временем экспозиции 3 нс и максимальным усилением по яркости не ниже 2^6 . Камера имеет 4 независимых и управляемых от компьютера канала.
- 1.2.10. Для диагностики ионной компоненты плазмы по пунктам 1.2.4 и 1.2.6 предполагается использование энерго–масс–анализатора HIDEN EQP, позволяющим разрешать массы в диапазоне от 1 до 300 а.е.м. и энергии по каждому массово-зарядовому состоянию от 0 до 1000 эВ с точностью 0.25 эВ. Прибор имеет внутреннюю систему калибровки ускоряющих и отклоняющих напряжений и управляется от компьютера.
- 1.2.11. Для измерения средней скорости распространения плазменных ступок по пункту 1.2.5 предполагается использование коллекторов в сочетании со скоростными осциллографами по пункту 1.2.7.

1.1.3. Выводы к Разделу 1.1

- 1.1.1. Выполнен анализ основных методов диагностики плазмы, используемых в исследованиях вакуумной дуги и лазерной абляции. Показано, что наиболее универсальными, доступными и при этом максимально информативными являются зондовые методы диагностики плазмы.
- 1.1.2. Показано, что использование оптических методов диагностики плазмы в данной работе является необходимым условием в части регистрации положения электродов и источника плазмы с целью измерения расстояний от зондов до исследуемых объектов.
- 1.1.3. Сформулирован комплекс требований, предъявляемых к методам и аппаратуре исследований.
- 1.1.4. Сделан выбор частных решений известных методов с учетом сформулированных требований и приборных возможностей исполнителей.
- 1.1.5. Отобранные методы исследования и аппаратура для их реализации соответствуют требованиям Технического задания данной НИР.

1.2. Проведение патентных исследований по ГОСТ Р 15.011-96

Отчет о патентных исследований по теме проекта выполнялся в соответствии с ГОСТ Р. 15.011-96. Отчёт о патентных исследованиях № 2010.10.25 по настоящей работе выполнен в виде отдельного документа. В данном разделе приводится содержательная часть отчёта о патентных исследованиях.

1.2.1. Общие данные об объекте исследования

В последнее десятилетие в космической индустрии проявляется большой интерес к созданию и использованию малых космических аппаратов (МКА) в основном из-за относительно малой стоимости, существенного сокращения сроков разработки и изготовления, а также удешевления вывода на орбиту таких аппаратов и их эксплуатации. Круг задач, решаемых с помощью малых КА,

достаточно широк. В частности, система дистанционного зондирования Земли с использованием низкоорбитальных МКА по своим тактико-техническим характеристикам может превосходить широко известные аналоги и использовать для запуска аппаратов относительно недорогие, высокоточные, конверсионные ракеты-носители. Запуск таких микро-спутников с орбитальной станции, либо с какого-нибудь другого управляемого космического аппарата является наиболее целесообразным и дешевым. Вследствие малой массы такие микроспутники требуют небольших движущих импульсов, выверенных с большой точностью. Однако существующие типы ракетных двигателей при малых уровнях тяги работают очень неустойчиво, что может привести к непредсказуемым последствиям.

Устойчивую работу на малых уровнях тяги может обеспечить двигатель, основанный на испарении твердотельного материала лазерным излучением в импульсно-периодическом режиме – лазерно-плазменный двигатель (ЛПД). Диапазон возникающего при этом импульса отдачи зависит от параметров лазерного излучения (плотности мощности на поверхности мишени, длительности импульса лазера) и материала мишени и может составлять $10^{-9} \div 10^{-3}$ Н·с. Достигнутый уровень развития лазерной техники и физики лазерного воздействия на поглощающие материалы делают такую задачу вполне реальной.

Наиболее важной составной частью ЛПД лазер. Для создания ЛПД эрозионного типа наиболее перспективно использование твердотельных или полупроводниковых лазеров, имеющих высокий к.п.д., достигающий 40÷60%, и чрезвычайно малый вес ~100 г при мощности 2÷20 Вт. При этом конструкция ЛПД может содержать один лазер с разводкой лазерного излучения к мишенно-сопловым частям с помощью элементов волоконной оптики. Такая компоновка позволит существенно снизить весогабаритные и энергетические характеристики двигательной установки.

Второй по значимости частью ЛПД является мишенно-сопловый узел (МСУ). МСУ должен обеспечивать восстановление поверхности мишени после уноса вещества за счет абляции лазерным излучением, а также иметь возможность управления вектором тяги за счет регулируемого изменения направления потока

испаренного рабочего тела мишени. Очевидно, что стабильность вектора тяги и реактивного импульса отдачи определяется стабильностью импульса лазерного излучения и степенью воспроизводства формы мишени в области абляции.

1.2.2. Патентно-лицензионная ситуация

Патентный поиск осуществлялся по вопросам принципов построения и принципов действия МСУ ЛПД, а также по вопросам рабочего тела лазерной абляции. По фонду охранных документов СССР и России в процессе поиска отобрано для дальнейшего анализа 2 патента Российской Федерации. Авторских свидетельств СССР по тематике поиска найдено не было, возможно, в силу засекреченности тематики. Кроме того, для анализа были отобраны также 9 патентов США, 1 заявка на патент США, 1 заявка на международный патент, 4 патента Японии, 1 патент Китая и 1 патент Австрии, касающихся объектов патентного поиска. Список отобранных для анализа патентов с указанием наиболее существенных технических особенностей приведен в Приложении В Отчета о патентных исследованиях.

Объектом данного патентного исследования является МСУ ЛПД.

Из анализа отобранной информации видно, что идея использования лазерной абляции для создания реактивной тяги в космосе родилась достаточно давно (US 3392527, 1968 г.) и связана с созданием твердотельных лазеров, обладающих достаточной мощностью для абляции конденсированного вещества. Причем, первый патент был посвящен именно ЛПД для установки на космическом аппарате с целью его ускорения и изменения траектории. В данной конструкции ЛПД конструкция МСУ была предельно проста, т.к. факел лазерной абляции достаточно узок и не требует специального сопла. Однако практического применения данный патент в то время не нашел из-за слишком больших габаритов лазерных установок. В результате дальнейшее развитие ЛПД было сосредоточено на вопросах использования стационарного лазера, базирующегося на крупных станциях в космосе, служащих стартовыми площадками для запуска МКА. В этом случае МСУ представляет собой параболическое зеркало, в фокусе которого находится непосредственно рабочее тело, испаряемое лазером. В силу разлета продуктов

испарения рабочего тела во всех направлениях МСУ таких ЛПД требовали использования сопла. Параболическая конструкция МСУ присутствует также в патентах на лазерно-реактивных двигателях (ЛРД), базирующихся на аэрокосмических аппаратах, предназначенных для высотных и суборбитальных полетов.

Интерес к ЛПД, непосредственно базирующимся на МКА, возник с новой силой благодаря прогрессу в развитии твердотельных лазеров с накачкой полупроводниковым лазерным диодом. Такие лазеры компактны, имеют малый вес и высокий к.п.д. В результате были разработаны и запатентованы конструкции ЛПД в развитие идей, изложенных в US 3392527, как в США (US 6530212, 2003 г.), так и в Российской Федерации (RU 2338918, 2006 г.). В обоих случаях используется твердотельное рабочее тело в виде ленты (US 6530212) или в виде стержня (RU 2338918). В такой конструкции МСУ приходится использовать систему подачи рабочего тела в зону лазерной абляции, что усложняет конструкцию ЛПД и снижает его надежность при длительном (более 5 лет) использовании в космосе. Проблема могла бы быть решена путем использования рабочего тела с самовосстанавливающейся поверхностью, как на это указывается в заявках на патент WO 2005/003557 и US 2007/0056262. Однако в этих публикациях не указывается, из чего должно быть сделано рабочее тело, и как заставить его поверхность восстанавливаться самостоятельно. Кроме того, данные заявки не получили поддержку в виде зарегистрированных патентов. Жидкое рабочее тело ЛПД упоминается также в патенте US 3825211, 1974 г., однако в патенте не конкретизируется тип жидкости и принцип ее подачи в область абляции. В патенте JP 2008038638, 2008 г., предлагается система подачи жидкости в область абляции за счет использования части энергии лазера на создание избыточного давления в резервуаре, открывающего клапан и позволяющего части жидкости поступать в область абляции. Потеря части энергии на перемещение жидкости снижает энергоэффективность ЛПД. Тип жидкости в патенте не указан.

Проблема самовосстанавливающейся поверхности может быть решена путем использования жидкого металла, удерживаемого внутри твердотельного капилляра силами поверхностного натяжения. При этом торец капилляра является зоной

абляции и находится в фокусе оптической системы. По мере уноса рабочего тела жидкость самостоятельно подтекает за счет капиллярных сил, что не требует использования части энергии лазерного импульса.

Данная идея является новой, поскольку аналогов среди патентов СССР, России и иностранных государств, непосредственно относящихся к объекту поиска, обнаружить не удалось. Кроме того, МСУ на основе жидкометаллического рабочего тела не были обнаружены и в открытой печати. Исходя из анализа собранной информации, исследуемый объект обладает патентной чистотой в отношении России и иностранных государств.

1.2.3. Регламент патентного поиска

Наименование работы (темы): «Развитие диагностического комплекса на базе НОЦ «Сильноточная электроника» в ИСЭ СО РАН и проведение исследований по диагностике плазмы дуги в вакуумных сетевых выключателях и плазмы лазерной абляции жидкометаллической мишени в лазерно-плазменных двигателях малых космических аппаратов».

Шифр работы (темы) «2010-1.2.2-230-009-015»

Номер и дата утверждения задания: № 01.266.10 от 20 сентября 2010 г.

Этап работы первый.

Цель поиска информации: Исследование патентной чистоты разрабатываемого мишенно–соплового узла лазерно–плазменного двигателя.

Обоснование регламента поиска: требования к патентной чистоте разрабатываемого устройства согласно Государственному контракту от 17 сентября 2010 г. № 14.740.11.0317 на выполнение научно-исследовательских работ.

Ретроспективность поиска – с 1965 г.

Предмет поиска		Источники информации, по которым будет производиться поиск	
		Патентные	
Объект исследования	Страна поиска	Наименование	Классификационные рубрики МПК
Способы	Россия	Электронная база	B01J, B64C, B64G

повышения электрической прочности вакуумной изоляции. Способы и аппаратура для обработки поверхности металлических электродов, потенциально применимые для подавления вакуумного пробоя.	СНГ СССР	данных ФГУ ФИПС, электронная библиотека e-library	C06B E02B, E02F, E21D F02K, F03H, F16L, F24J G01C H01J, H01S, H05H
	США	Электронная библиотека «United States Patent and Trademark Office»	
	Канада	Электронная библиотека «Canadian Intellectual Property Office»	
	Страны Евросоюза, Япония, Китай, США	Электронная библиотека «European Patent Office», электронная библиотека e-library, база данных SCIRUS	

1.2.4. Отчет о поиске

Предмет поиска: (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа, классификационный индекс МПК	Заявитель, страна. Номер заявки, дата подачи заявки	Название изобретения, полезной модели.
лазерно–плазменные двигателя, базируемые на малом космическом аппарате и не имеющие сопла	US 3392527, патент	A.S. Gilmour, F.A. Giori, Cornell Aeronautical Laboratory Inc., USA, 16.07.1968	Method of ionic propulsion utilizing a laser-stimulated ionic emission
	US 3825211, B64G 1/00 патент	M.A. Minovitch, Phaser Telepropulsion Inc., USA, 23.07.1974	Laser rocket

	US 6530212, F02K 11/00, H05H 1/24 патент	C.R. Phipps, J. Luke, Photonic Associates, USA, 11.03.2003	Laser plasma thruster
	WO 2005/0035 57, F03H 1/00 заявка на патент	R. Leach, G.B. Murphy, T.S. Adams, Design Engineering LLC, 13.01.2005	Laser propulsion thruster
	US 2007/00562 62, B64G 1/40, F02K 9/68 заявка на патент	R. Leach, G.B. Murphy, T.S. Adams, Design Engineering LLC, 15.03.2007	Laser propulsion thruster
	RU 2338918, F02K 11/00, патент	А.Н. Чумаков, Н.А. Босак, А.М. Петренко и др., Государственное научное учреждение «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Белоруссии», 14.02.2007	Лазерно–плазменный двигатель
	CN 200812255 19 20081104, F02K 9/08, F02K 9/95, F02K 9/00 патент	Xin Lu, Jie Zhang, Yi Zhang, Institute for Physics of Chinese Academy of Science, 16.06.2010	Laser propulsion device
Лазерно– плазменные и лазерно– реактивные двигатели с соплом для запуска с пусковых	AU 8795575, патент	G.M. Pergolis, 30.12.1975	Propulsion of spaceship by laser
	US 4036012, H05H 1/24 патент	M.J. Momsler, Secretary of the Army, USA, 19.07.1977	Laser powered rocket engine using a gasdynamic window
	US 5542247, F02K 7/00,	B.B. Bushman, Lockheed	Apparatus powered using laser supplied energy

площадок и суборбитальных полетов	патент	Corporation, USA, 06.08.1996	
	US 6459205, H01J 7/24, B64G 1/00 патент	W. Schall, E. Zeyfang, W. Riede, W. Mayerhofer, Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V., Germany, 01.10.2002	Propulsion device and method of generating shock waves
	US 6488233, B64C 39/00, патент	L.N. Myrabo, Secretary of the Air Force, USA, 03.12.2002	Laser Propelled Vehicle
	RU 2266420, F02K 7/00, F24J 2/06, B64G 1/26, патент	А.А. Агейчик, М.С. Егоров, Ю.А. Резунков, ФГУП НИИКИ ОЭП, 08.10.2003	Аэрокосмический лазерный реактивный двигатель
Рабочее тело лазерно-плазменного двигателя и способы его подачи	US 4426843, F02K 9/95 патент	M.C. Fowler, D.C. Smith, United Technologies Corporation, USA, 24.01.1984	CO ₂ coupling material
	JP 8049493, E02B 9/06, E02F 5/10, E21D 9/06, F16L 1/038 патент	H. Mitsutoshi, N. Shingo, K. Minoru, et. al., Tokyo Gas Co. Ltd., ISEKI TORY Technology Inc., Japan, 20.02.1996	Propulsion construction method of pipe and radiation device of laser beam
	JP 10300468, E21D 9/06, G01C 15/00, E21D 9/06, патент	M. Kaoru, Copuros K&K, Japan 13.11.1998	Laser irradiation device for use in propulsion method and propulsion machine having the same
	JP 2008038638 , F03H 99/00, H01S 3/00 патент	O. Masahiko, National Institute of Advanced Industry and Technologies, Japan 21.02.2008	Liquid injection type laser beam propulsion device
Системы подачи и распределения лазерного	US 5152135, F02K 11/00 патент	J.T. Kare, US DOE, USA 06.10.1992	Deflector for efficient coupling of a laser beam to air other fluids

излучения в лазерно–плазменных двигателях	JP 2003148247 , B64G 1/00, F02K 9/08, F03H 1/00, H01S 3/00 патент	S. Masayuki, K. Katsuhito, M. Akio, et. al., National Aerospace Laboratory, Japan Science and technology Corporation, Japan 21.05.2003	Laser thruster system by wire transmission system
---	---	---	---

1.2.5. Выводы к главе 2

- 1.2.1. Проведен ретроспективный патентный анализ лазерно-плазменных двигателей малых космических аппаратов.
- 1.2.2. Основной объем патентной информации приходится на США.
- 1.2.3. Установлено, что конструкция мишенно–соплового узла на основе капилляра с жидким металлом внутри в качестве рабочего тела обладает патентной чистотой и может быть оформлена в виде заявки на патент.

1.3. Подключение высокоскоростной камеры регистрации изображений HSFC-Pro и энергомассанализатора EQP HIDEN Analytical к экспериментальной высоковакуумной установке

1.3.1. Техническое описание модернизированной экспериментальной установки

1.3.1.1. Электрическая часть установки

В основе электрической схемы установки лежит синтетическая схема Вейл–Добке [2], имитирующая режим короткого замыкания в промышленных сетях среднего класса напряжений без сдвига фаз. Из-за невозможности воспроизведения параметров реальных сетей в компактных лабораторных условиях синтетическая схема состоит из двух контуров, первый из которых определяет форму и амплитуду импульса тока вакуумной дуги. Параметры импульса тока следующие: амплитуда тока – до 15 кА, длительность тока – 10 ± 1 мс, форма тока – полупериод синуса, напряжение зарядки контура – до 1 кВ. После перехода тока через ноль при

наличии вакуумного промежутка, включенного последовательно с контуром, дуга гаснет в силу неустойчивости при пороговых токах дуги [6]. За импульсом тока в реальных электрических цепях следует импульс переходного восстанавливающегося напряжения [16] амплитудой свыше 20 кВ. Сильноточный контур, заряжаемый напряжением до 1 кВ, не способен обеспечить импульс переходного напряжения столь большой амплитуды. С целью формирования импульса переходного напряжения используется второй контур, заряжаемый до 25 кВ и обеспечивающий спад тока при переходе через ноль подобный тому, что имеет место в сильноточном контуре. Высоковольтный контур инжектируется в цепь за время порядка 1 мс до нуля тока. После инжекции импульса высоковольтного контура сильноточный контур отключается от дугового промежутка с использованием промышленного вакуумного выключателя на класс напряжения 35 кВ, что обеспечивает защиту сильноточного контура от перенапряжения. Синтетическая электрическая схема представлена на рис. 3.1.

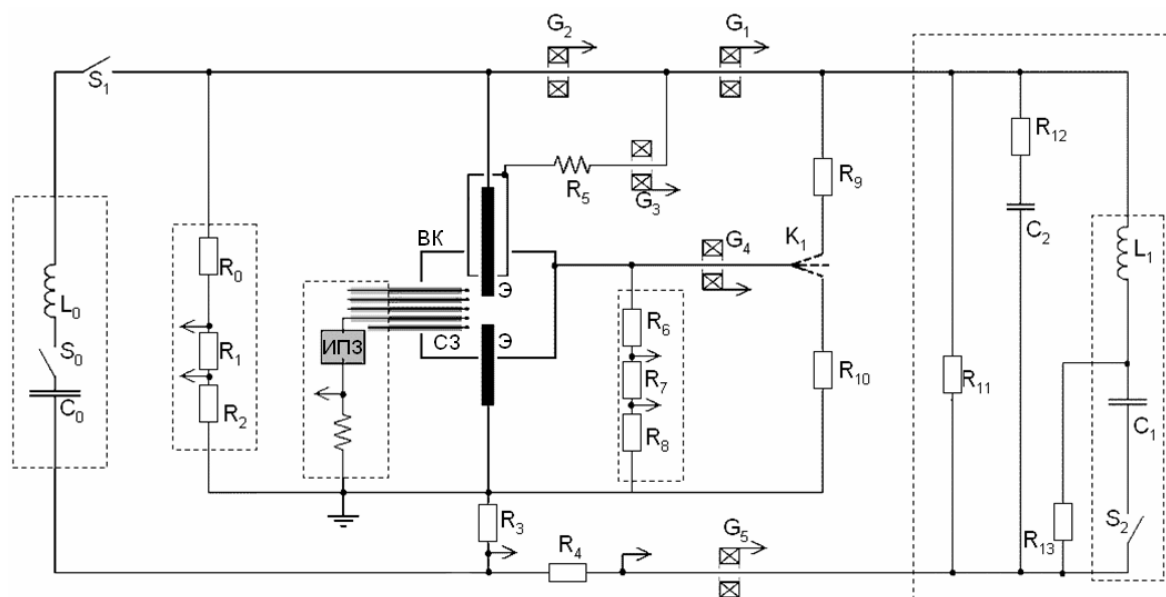


Рис. 3.1. L_0, C_0 – сильноточный контур тока дуги, L_1, C_1 – высоковольтный контур переходного восстанавливающегося напряжения, $R_{11}, R_{12}, R_{13}, C_2$ – цепь формирования формы фронта переходного восстанавливающегося напряжения, R_3 и R_4 – токовые шунты, G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – трансформаторы тока (пояса Роговского), R_0, R_1, R_9 – делитель напряжения на вакуумном промежутке, R_6, R_7, R_8 – делитель напряжения на экране, R_5, R_9, R_{10} – ограничители тока в цепях экранов, S_0 – тиристор, S_1 – защитный

вакуумный выключатель, S_2 – управляемый газонаполненный разрядник, K_1 – переключатель потенциала экрана, $ВК$ – вакуумная камера, \mathcal{E} – электрод, $СЗ$ – система зондов Ленгмюра, ИПЗ – источник питания зондов.

Конструктивное исполнение силовоточного контура синтетической схемы представлено на рис. 3.2.

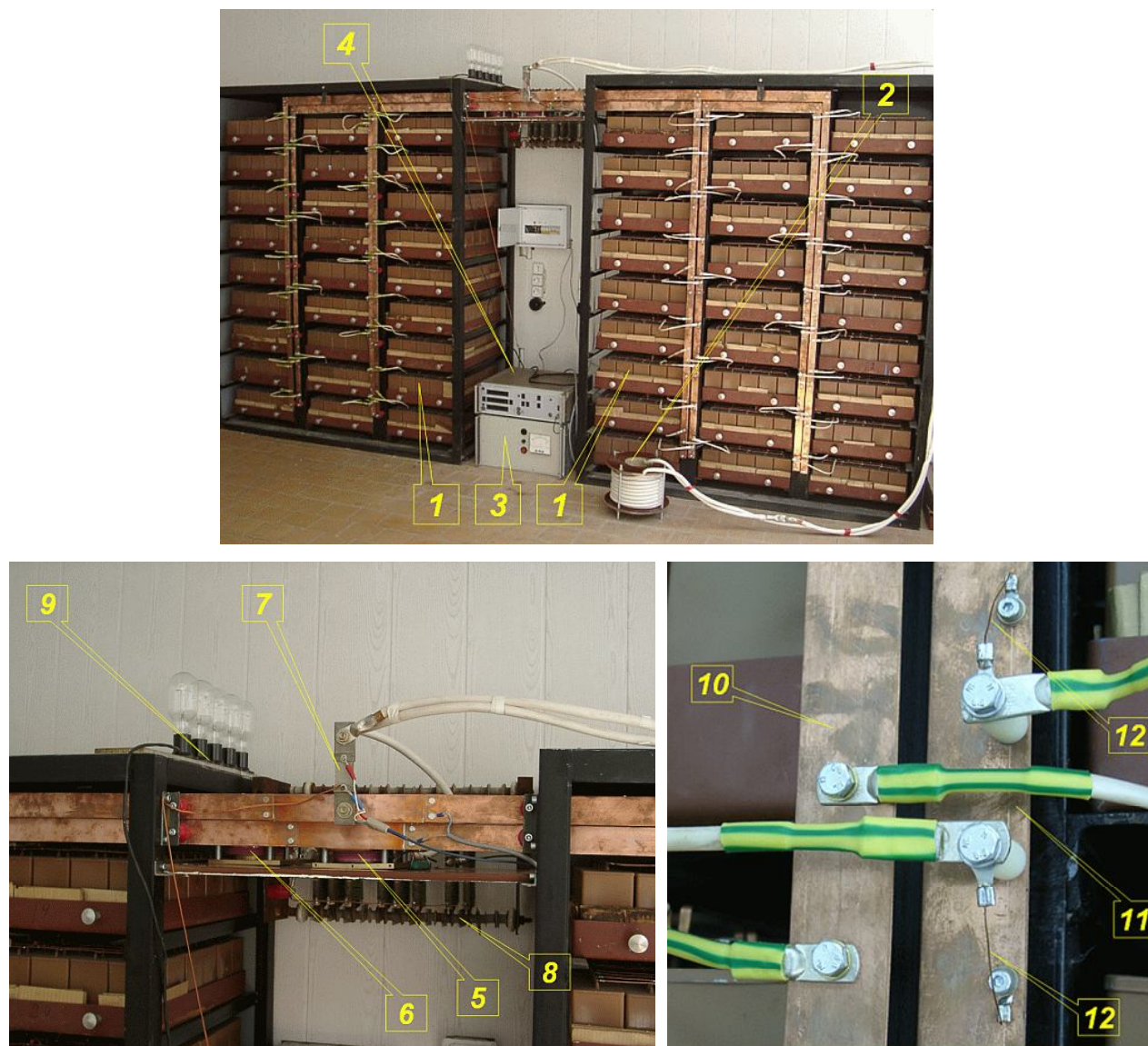


Рис. 3.2. Конструктивное исполнение силовоточного контура синтетической схемы. *1* – емкостной накопитель, *2* – соленоид, *3* – источник питания, *4* – контроллер, *5* – тиристор включения контура Т173–1250, *6* – тиристор сброса остаточного заряда Т173–1250, *7* – шунт, *8* – балластное сопротивление разряда, *9* – балластное сопротивление заряда, *10* – шина отрицательной полярности, *11* – шина положительной полярности, *12* – плавкий предохранитель.

Конструктивное исполнение высоковольтного контура синтетической схемы представлено на рис. 3.3. Типичный набор осциллограмм, иллюстрирующих работу синтетической схемы, представлен на рис. 3.4.

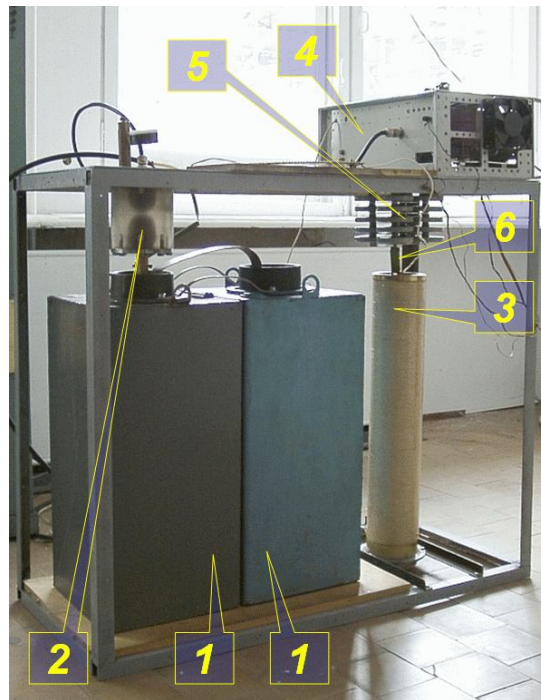


Рис. 3.3. Конструктивное исполнение высоковольтного контура синтетической схемы. 1 – емкостной накопитель, 2 – управляемый газонаполненный разрядник, 3 – соленоид, 4 – блок запуска разрядника, 5, 6 – емкость и резисторы для управления формой фронта импульса переходного восстанавливающегося напряжения.

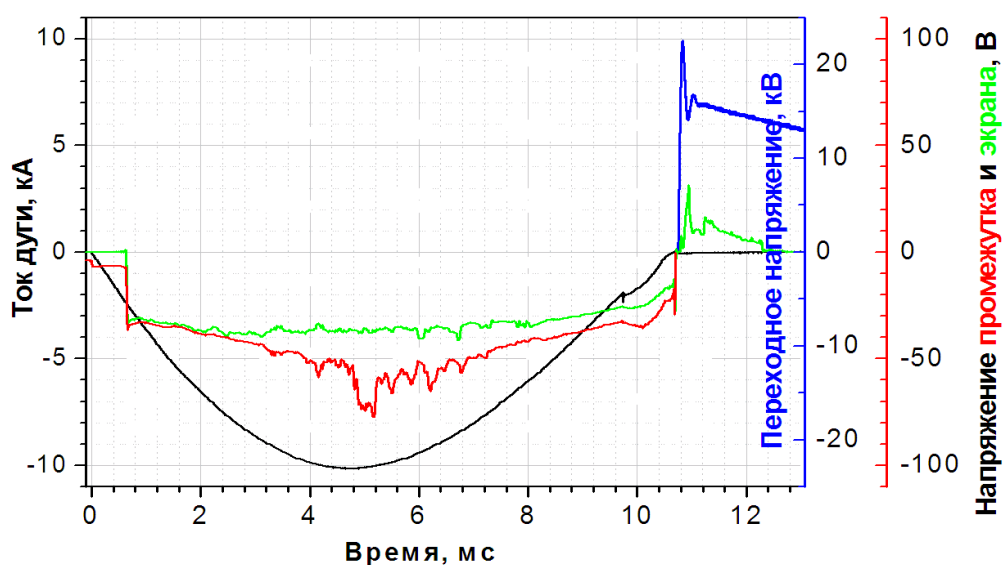


Рис. 3.4. Типичный набор осциллограмм при работе синтетической схемы.

Для питания зондов использовались схемы, представленные на рис. 3.5. На одиночные зонды подаются одновременно одинаковые прямоугольные импульсы напряжения положительной полярности амплитудой до 60 В и длительностью 200 мкс. Питание зондов включается за 100 мкс до перехода тока дуги через ноль. Питание двойного зонда осуществляется переменным напряжением амплитудой до 60 В и частотой, регулируемой в пределах от 100 до 400 кГц. Использование переменного напряжения позволяет получать данные о параметрах плазмы в динамике.

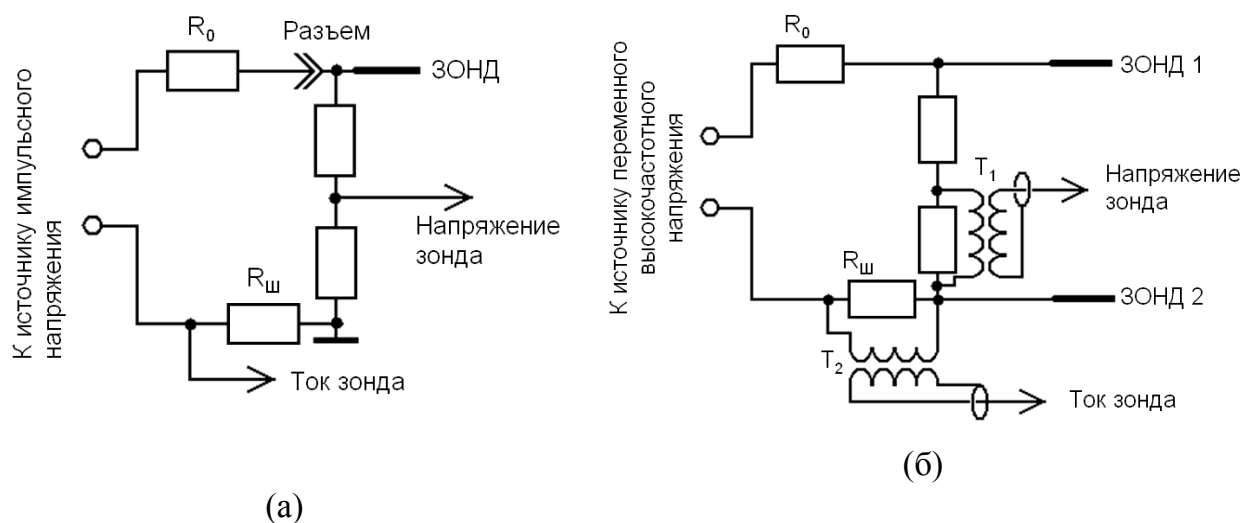


Рис. 3.5. Принципиальные электрические схемы питания одиночного (а) и двойного (б) зондов. R_0 – ограничивающий ток резистор, $R_{ш}$ – шунт, T_1 , T_2 – трансформаторы напряжения.

Типичный набор осциллограмм двойного зонда представлен на рис. 3.6.

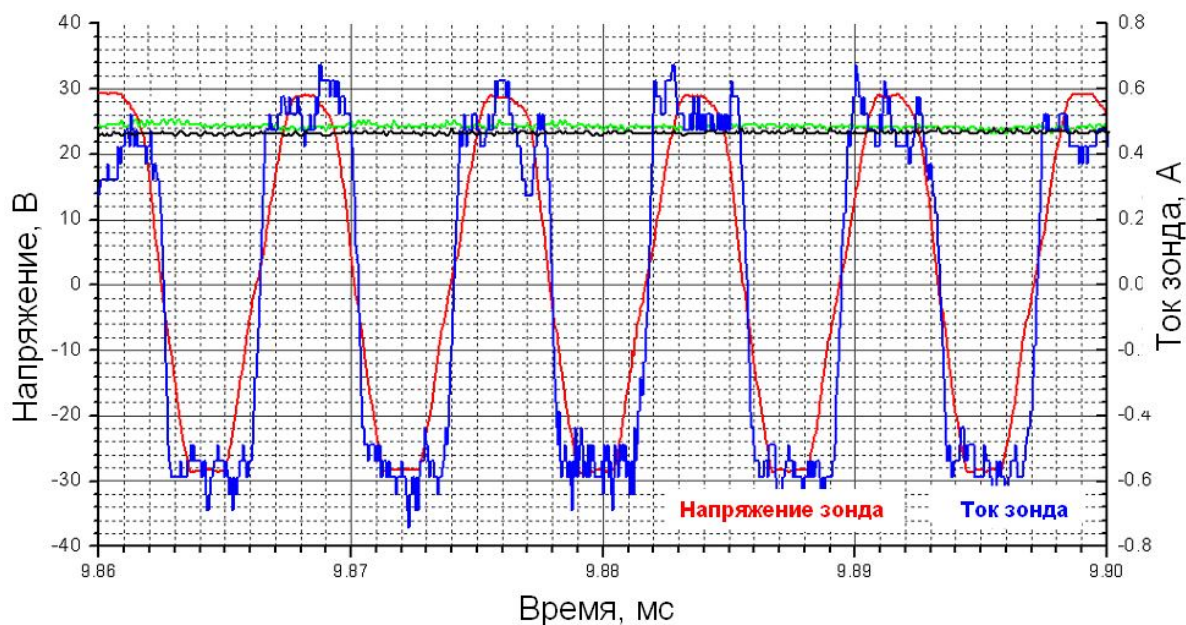


Рис. 3.6. Типичный набор осциллограмм напряжения и тока двойного зонда.

1.3.1.2. Вакуумная и пневматическая система экспериментальной установки

В состав экспериментальной установки входят:

- I. Экспериментальный выключатель, представляющий собой экспериментальный вакуумный прерыватель.
- II. Блок управления. Механика, электричество и пневматика.
- III. Вспомогательное оборудование, включающее вакуумный насос с высоковакуумным затвором, галогеновой лампой, пультом управления и высоковакуумным вакуумметром.
- IV. Комплект ЗИП.

Общий вид «Экспериментальной установки» приведен на рис. 3.7. Принцип работы «Экспериментальной установки» заключается в следующем:

Замыкание контактной группы:

Электрический сигнал на замыкание подается на реле 1 и 2 (см. рисунок 3.8). Реле 1 открывает клапан 1, и реле 2 переключает клапан 2 в позицию «закрыто». Это приводит к подаче сжатого воздуха, замыкающего контакты вакуумного

прерывателя. Пружины сжимается, и фиксатор блокирует вал в этой позиции. Выключатель замкнут.

В завершение, концевой выключатель 1 выключает реле 1 и 2, закрывает клапан 1 и переключает клапан 2 в позицию «открыто». Сжатый воздух в систему не подан, но выключатель удерживается в позиции «замкнуто» блокирующим механизмом.

Размыкании контактной группы:

Электрический сигнал на размыкание прикладывается к реле 3. Это приводит в действие соленоид, который снимает блокировку пружины и позволяет быстрое размыкание контактов выключателя. Концевой выключатель 2 включает индикацию открытого состояния и разрешает последующее замыкание контактов. Скорость размыкания контактов должна быть порядка 1 м/с.

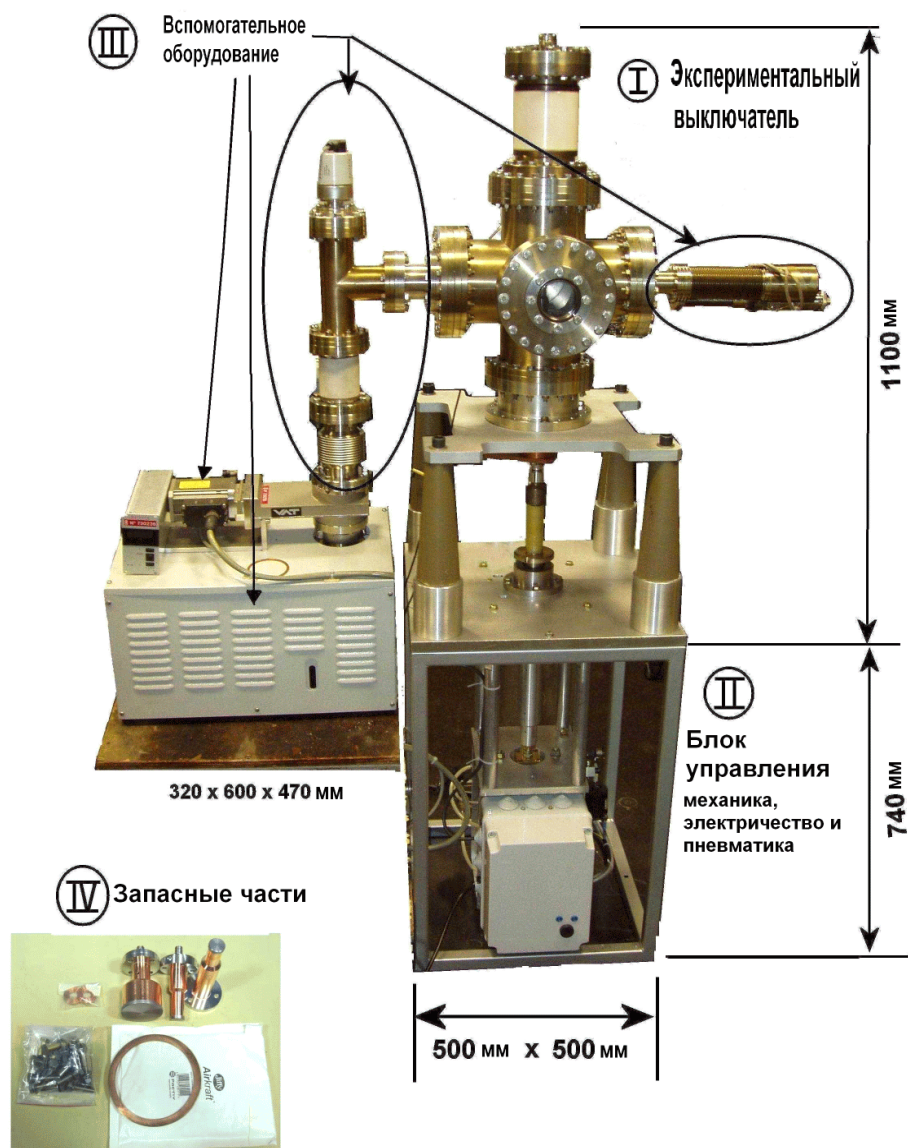


Рис. 3.7. Общий вид и составные части экспериментальной установки.

Для обеспечения вакуума при работе экспериментальной установки используется вакуумный насос НМДО–0.1Д. Предельное остаточное давление в вакуумной камере ниже 10^{-7} торр. Для визуализации и диагностики процессов, происходящих при размыкании контактов и гашении вакуумной дуги, дугогасительная камера выполнена в виде офланцованной вакуумной камеры с двумя окнами.

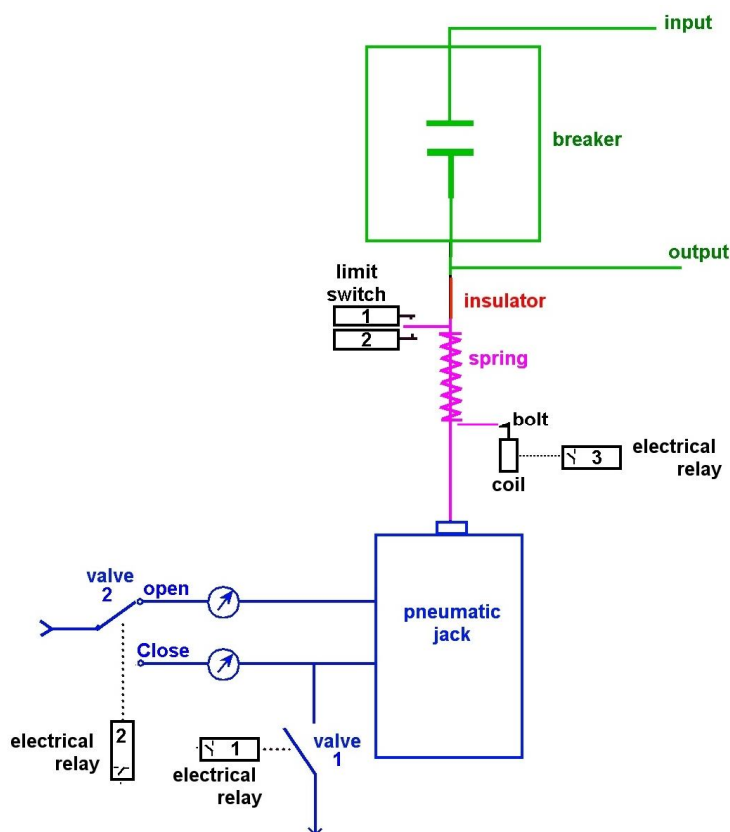


Рис. 3.8. Блок-диаграмма экспериментальной установки. Обозначения: “input” – вход, “output” – выход, “breaker” – экспериментальный выключатель, “limit switch” – концевой контакт, “insulator” – изолятор, “spring” – пружина, “bolt” – фиксатор, “coil” – соленоид, “electrical relay” – реле, “valve” – клапан, “pneumatic jack” – подача сжатого воздуха, “open” – положение «открыто», “close” – положение «закрыто».

1.3.1.3. Электроды, экраны и зонды

Для исследования динамики прикатодного слоя при прикладывании к разрядному промежутку переходного восстанавливающего напряжения использовались системы одиночных цилиндрических зондов. Фотографии такой системы и ее позиционирование относительно разрядного промежутка приведены на рис. 3.9. пять зондов образуют гребенку, перемещаемую относительно дугового промежутка в радиальном направлении. Контактный промежуток окружен экраном, имитирующим экран в реальном вакуумном выключателе. Для независимого измерения тока после обрыва дуги верхний электрод, являющийся анодом при горении дуги и катодом в условиях переходного

восстанавливающегося напряжения, окружен экраном. Ток в цепи экрана электрода измеряется датчиком G_3 рис. 3.1.



Рис. 3.9. Конфигурация электродов, зондов и экранов. Вид справа – увеличенный вид через окно внешнего экрана.

Конструкция одиночного зонда приведена на рис. 3.10. Для усиления чувствительности зонд выполнен в виде изогнутого проволочного конца, ориентированного в азимутальном направлении. Такой подход увеличивает чувствительность не снижая пространственное разрешение измерений.

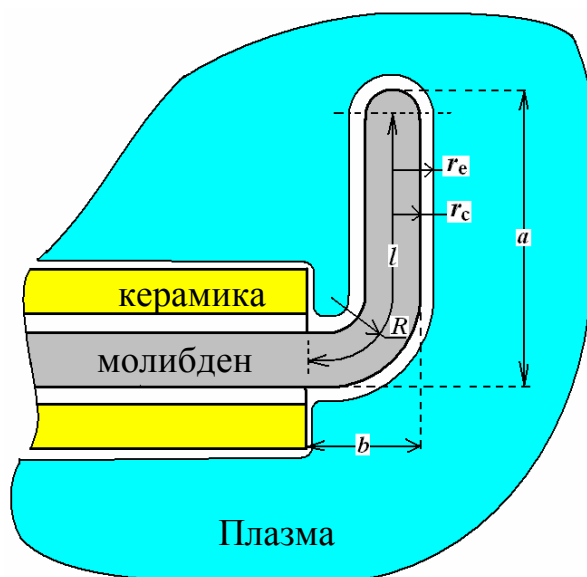


Рис. 3.10. Конструкция одиночного зонда. Вид сверху. $a = 5.5 \div 5.6$ мм, $b = 2.12 \div 2.4$ мм, $R = 1$ мм, $r_c = 0.6$ мм, $A_p = 21 \div 25$ мм².

Помимо исследования закономерностей движения границы слоя по измерениям времени оголения зондов, регистрация электронного тока насыщения на зонд позволяет восстановить динамику изменения концентрации плазмы в окрестности зонда вблизи нуля тока. Электронная концентрация плазмы в окрестности зонда

$$n_e(t) = \frac{4j_e(t)}{ev_{eT}} \quad , \quad (3.1)$$

где

$$v_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad (3.2)$$

– тепловая скорость электронов,

$$j_e(t) = i_p(t) / S_e(t) \quad (3.3)$$

– плотность эмиссионного электронного тока из плазмы ($i_p(t)$ -тока на зонд, S_e -площадь эмиссионной границы квазинейтральной плазмы вокруг зонда).

Для упрощенной верхней оценки концентрации можно пренебречь толщиной слоя объемного заряда вокруг зонда и положить эмиссионную площадь равной площади зонда (коллектора)

$$S_e(t) = \text{const} = S_c = 2\pi r_c(l + r_c) \quad (3.4)$$

где $l = a + b - 3r_c - R(2 - \pi/2)$ (a, b, R - измеряемые геометрические параметры зондов, см. рис. 3.10). Однако в реальности слой объемного электронного заряда, меняется во времени и при высоком положительном потенциале зонда может иметь существенную протяженность. Поэтому для более корректного восстановления концентрации плазмы, оценки границ применимости упрощения (3.4) и оценки пространственного разрешения метода в целом было бы полезно восстановить толщину слоя объемного электронного заряда вокруг зонда $r_e - r_c$ и площадь эмиссионной границы квазинейтральной плазмы

$$S_e(t) = 2\pi r_e(t)(l + r_e(t)) \quad (3.5)$$

для каждого момента времени. Положение границы плазмы r_e вокруг зонда восстанавливалось из следующих соображений. Если пренебречь концентрацией ионов в слое, то можно рассматривать его как вакуумный диод, в котором

эмиттером электронов является поверхность квазинейтральной плазмы, а коллектором – поверхность зонда. Для цилиндрического диода плотность тока на коллекторе (зонде)

$$j_c = 2.334 \cdot 10^{-6} \frac{V_0^{3/2}}{r_e r_c \beta^2 \left(\frac{r_e}{r_c} \right)}, \quad (3.6)$$

где r_e и r_c – радиусы эмиттера и коллектора, соответственно, V_0 – падение потенциала в слое, $\beta^2(r_e/r_c)$ – известная табулированная функция. Зная $j_c(t)=i_p(t)/S_c$ и $V_0(t)$, можно решением уравнения (8) для каждого момента времени найти радиус эмиссионной поверхности плазмы $r_e(t)$, а далее по формулам восстановить: площадь эмиссионной поверхности плазмы $S_e(t)$ по (3.5), плотность эмиссионного электронного тока насыщения из плазмы $j_e(t)$ по (3.3) и $n_e(t)$ по (3.1). Такая процедура была реализована. Заметим, что, поскольку уравнение (3.6) трансцендентное, к тому же в нем присутствует табулированная функция $\beta^2(r_e/r_c)$, оно решалось численно итерационным методом (именно- методом деления отрезка пополам). При нахождении разницы потенциалов между зондом и плазмой

$$V_0(t) = V_p(t) - V_{pl} \quad (3.7)$$

потенциал зонда $V_p(t)$ восстанавливался с использованием осциллограммы тока по выражению $V_p(t) = V_C(t) / (R_p i_p(t))$, в котором напряжение на конденсаторе V_C принималось постоянным и равным оставшемуся после протекания тока за время $t_0 - t_s$ (см рис. 6, а.) как $V_C = V_{C0} - \langle i_p \rangle (t_0 - t_s)$ (точность такого восстановления была не хуже 5%). Потенциал плазмы с целью упрощения процедуры обработки принимался

$$V_{pl} = \text{const} = 10 \text{ V} \quad (3.8)$$

принимался постоянным и равным +10 V (таких значений можно ожидать для потенциала плавления плазмы относительно земли). Последнее упрощение было сделано как из-за невозможности измерить реальный потенциал плазмы вокруг положительного зонда, так и с учетом измерений динамики потенциала плавления «соседних» изолированных зондов.

1.3.1.4. Аппаратура для формирования факела лазерной абляции

В ходе выполнения работ предполагается использование импульсного твердотельного лазера с полупроводниковой накачкой RL-1,0Q. Его основные параметры представлены в Таблице.

Наименование параметра	Норма	Данные испытаний
Длина волны лазерного излучения, нм	1064	-
Режим работы	Импульсный,	Соответствует
Частота следования импульсов накачки, Гц	Не более 500	10 - 500
Энергия импульса лазерного излучения (каждого в пачке), мкДж, не менее	250	280

На рис. 3.11 приведена осциллограмма импульса излучения данного лазера. Длительность импульса излучения лазера RL-1,0Q по основанию оставляет около $t = 5.5$ нс при длительности на полувывсоте примерно $t_{1/2} = 2.75$ нс. Лазер способен работать с частотой следования импульсов от до 200 Гц при энергии излучения в отдельном импульсе $Q = 0,28$ мДж. Лазерное излучение фокусируется на мишень кварцевой линзой с фокусным расстоянием $f = 5$ см. При этом параметры излучения на поверхности мишени ожидаются следующие. Фокальное пятно в фокусе линзы имело диаметр $d = 0,1$ мм. Отсюда легко рассчитать полную расходимость лазерного излучения $\alpha = d/f = 0,01/5 = 2 \times 10^{-3}$ Рад. Удельная энергия составляет $Q_{y0} = Q/S = 2,8 \times 10^{-4} / 7,8 \times 10^{-5} = 3,6$ Дж/см², где $S = \pi d^2/4 = 3,14 \times 0,01/4 = 7,8 \times 10^{-5}$ см² площадь фокального пятна. Пиковая мощность излучения на поверхности мишени для $t_{1/2} = 2,5$ нс $P_{пик} = 3,6/2,5 \times 10^{-9} = 1,45$ ГВт/см². Следует отметить, расходимость излучения лазера достаточно велика, и даже при использовании линзы с минимальным фокусным расстоянием получение фокального пятна менее 0,1 мм является проблематичным. Это накладывает условие на фокусное расстояние линзы, которое не должно превышать 5 см.

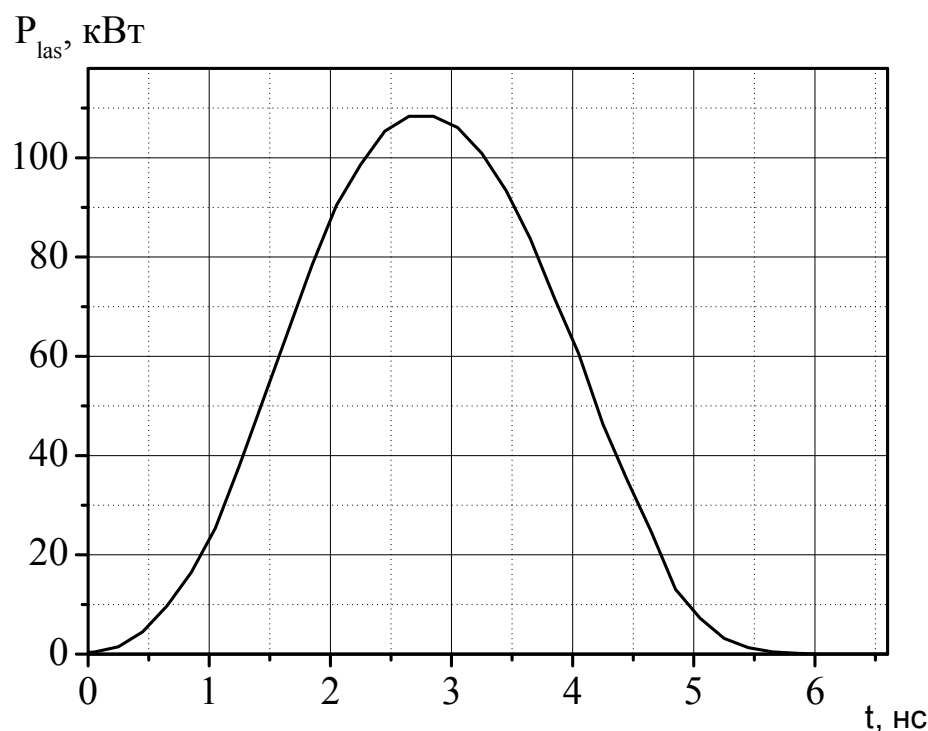


Рис. 3.11. Форма импульса излучения Nd - лазера RL-1,0Q

1.3.2. Подключение и тестирование аналитического оборудования к экспериментальной установке

1.3.2.1. Подключение скоростной камеры HSFC Pro

Камера HSFC Pro и энерго–масс–анализатор HIDEN EQP были установлены в рабочие положения и подключены к персональному компьютеру, обслуживающему экспериментальную установку вакуумного сетевого выключателя. Для защиты от электромагнитных наводок компьютер находится в экран–комнате. Кроме того, связь между компьютером и аналитическим оборудованием осуществляется с использованием оптоволоконных линий связи. Общий вид модифицированной установки приведен на рис. 3.12. Камера основана на архитектуре, представленной на рис. 1.1,б. Архитектура камеры позволяет осуществлять независимое использование каждого из 4-х каналов, включая установку оптических элементов по каждому из каналов. В частности, исполнители имеют в распоряжении набор интерференционных фильтров (рис. 3.13) в диапазоне

длин волн от 350 нм до 1100 нм при типичной полуширине пропускания фильтра порядка 10 нм, что дает уникальную возможность одновременной регистрации изображений объекта на разных длинах волн.

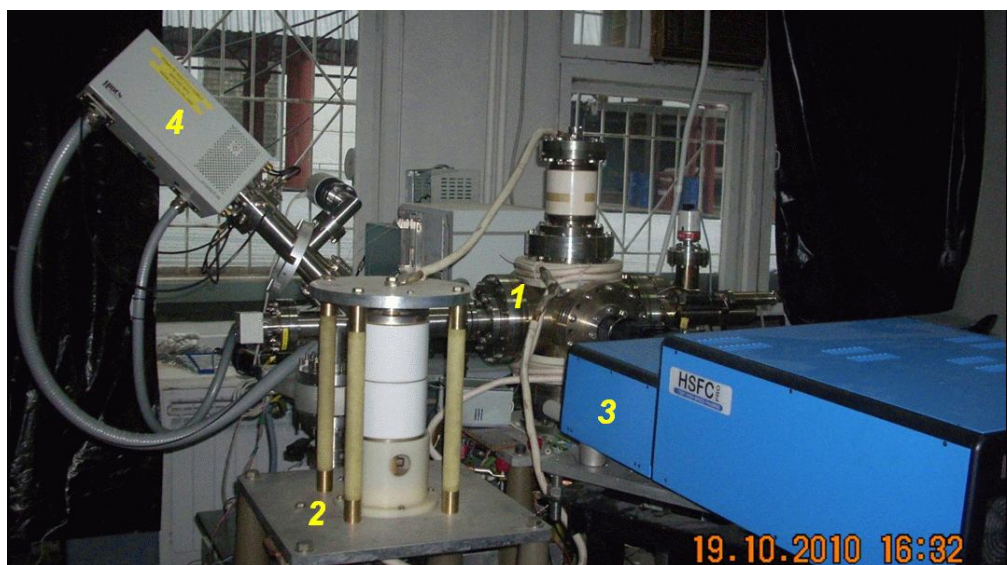


Рис. 3.12. Модифицированная экспериментальная установка. 1 – вакуумная камера, 2 – защитный выключатель, 3 – высокоскоростная камера HSFC Pro (новая позиция), 4 – энерго–масс–анализатор HIDEN EQP.



Рис. 3.13. Камера HSFC Pro с открытым делителем луча и набор интерференционных светофильтров, устанавливаемых в оптические тракты каналов камеры.

В качестве калибровочных измерений с использованием камеры была выполнена задача восстановления температуры накаливаемой молибденовой спирали с известной температурой поверхности. Калибровочные коэффициенты по

каждому из каналов были подогнаны под планковский спектр абсолютно черного тела. С использованием калибровочных коэффициентов была определена температура спирали, не известная заранее и отличающаяся от той, которая использовалась при калибровке. Измерения, выполненные пирометром, дали различие в пределах 50 К, что является удовлетворительным результатом. Более тонкая калибровка и разработка методик входит в задание этапа 2 настоящей работы.

1.3.2.2. Подключение энерго–масс–анализатора HIDDEN EQP

Общий вид модифицированной экспериментальной установки с подключенным к ней энерго–масс–анализатором HIDDEN EQP представлен на рис. 3.12. Прибор имеет собственную систему получения сверхвысокого вакуума, основанную на турбомолекулярном насосе. Система полностью автоматизирована и имеет внутренние средства диагностики. Специфические методики измерений параметров плазмы вакуумной дуги и абляционного факела является задачей этапа 2 настоящей работы. На этапе 1 выполнена лишь проверка работоспособности прибора на новом рабочем месте путем измерения параметров остаточной атмосферы в рабочей вакуумной камере и масс-спектра плазмы плазменного факела при лазерной абляции с поверхности капли жидкого галлий–индиевого сплава в вакууме.

Масс–спектрограмма остаточной атмосферы приведена на рис. 3.14. На спектре присутствуют пики воды, атмосферных газов и углекислого газа. Также присутствуют следы водорода. Пиков, соответствующих углеводородам, не обнаружено. Это факт говорит о том, что вакуумные условия в рабочей вакуумной камере соответствуют высокому безмасляному вакууму.

На рис. 3.15 приведен масс–зарядовый спектр ионной компоненты плазмы факела лазерной абляции. Наблюдаются пики, соответствующие ионам галлия и индия, причем, изотопы также различимы. Присутствуют ионы вплоть до 5-й зарядности, что свидетельствует о высокой температуре плазмы в факеле.

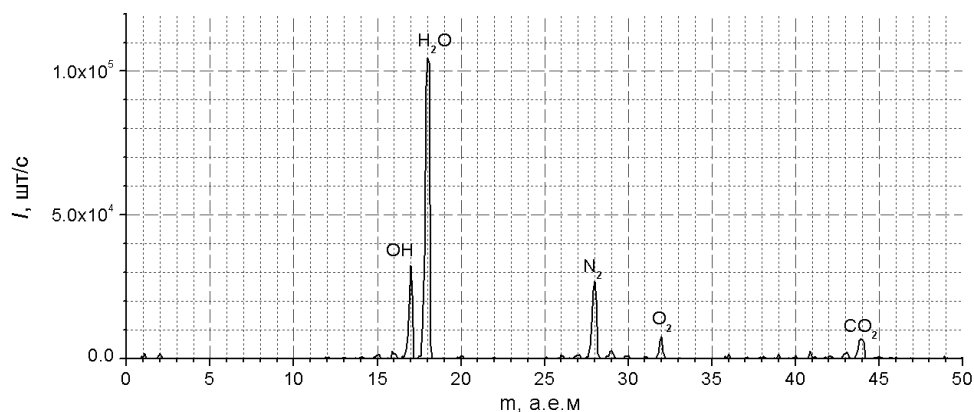


Рис. 3.14. Масс–спектрограмма остаточной атмосферы в рабочей вакуумной камере после ее вакуумирования до давления ниже 10^{-7} Торр.

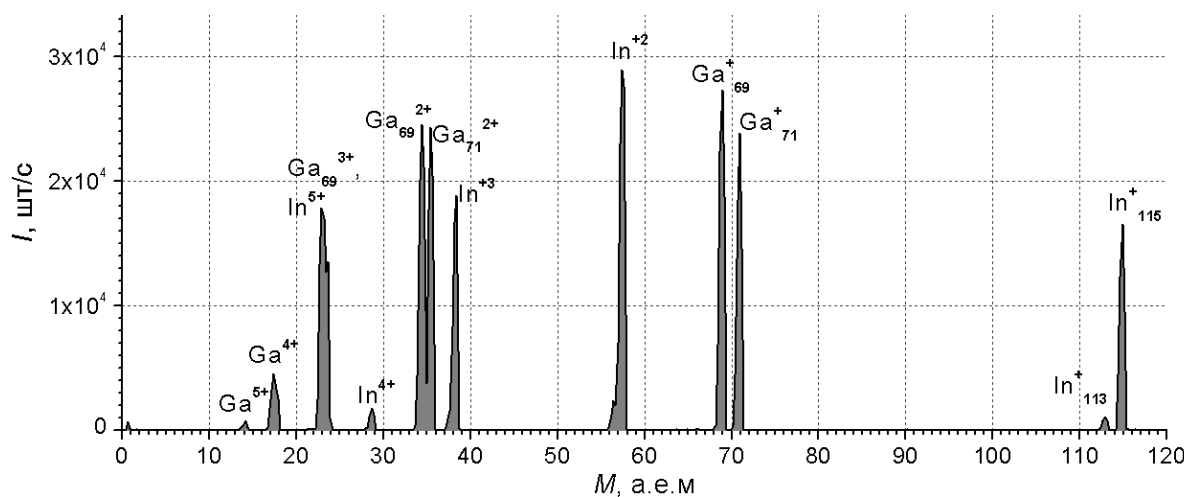


Рис. 1.15. Состав ионной компоненты абляционной плазмы при фиксированной энергии ионов на единичный заряд $E/Z=280$ эВ. Частота следования лазерных импульсов 100 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения первого этапа работы были получены результаты:

1. Выполнен анализ методов диагностики низкотемпературной плазмы с учетом специфики исследования плазмы вакуумной дуги и лазерной абляции. Показано, что наиболее информативным и доступным методом диагностики плазмы является электростатический зонд Ленгмюра. Предложено использование многозондовых измерений с целью достижения высокого пространственного и временного разрешения, а также

восстановление динамики движения границы плазмы. В качестве передовых методов диагностики плазмы предложено использование высокоскоростной регистрации изображений плазмы с высоким пространственным и временным разрешением и энерго–масс–анализ ионной компонентны плазмы с высоким разрешением по энергии.

2. Проведено патентное исследование на предмет возможности подачи заявки на патент на мишенно–сопловый узел лазерно-плазменного микродвигателя на основе жидкого металла, используемого в качестве рабочего тела. В результате проведения исследований сделано заключение о патентной чистоте заявляемого устройства.
3. Осуществлено подключение скоростной 4-х канальной камеры регистрации изображений HSFC Pro и энерго–масс–анализатора HIDEN EQP к экспериментальной установке вакуумного сетевого выключателя и выполнены пробные измерения.

Выполненные работы соответствуют требованиям Технического задания и Календарного плана государственного контракта от 17 сентября 2010 г. № 14.740.11.0317.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Солянкин А. Г., Павлов М. В., Павлов И. В., Желтов И. Г. Теория и конструкции выключателей. – П.: Энергоиздат, 1982. –350 с.
2. P. G. Slade. The Vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application.–NY: CRC Press, 2008.–510 p.
3. P. Sarrailh et al. Expanding sheath in a bounded plasma in the context of the post-arc phase of a vacuum arc// J. Phys. D: Appl. Phys.– 2008.– vol. 41.–p. 015203 (11 pp).
4. Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский, Импульсный электрический разряд в вакууме// Новосибирск: Наука, 1984. 248 с.
5. В. В. Петров. Известие о гальвани–вольтовских опытах.– СПб: Типография Гос. Мед. Коллегии.– 1803, 195 с.

6. В. И. Раховский. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.– 1970. – 536 с.
7. S. Popov, A.V. Batrakov, R. Methling, D. Uhrlandt, and K.-D. Weltmann. Spectroscopic Study of a Single Vacuum-Arc Cathode Spot // IEEE Trans. Plasma Science.– V. 37.– No. 8, Part 1.– pp. 1419–1425.
8. А. Н. Зайдель, Г. В. Островская. Лазерные методы исследования плазмы.– Л.: Наука.– 1977.–221 с.
9. A. Batrakov, B. Jüttner, S. Popov, D. Proskurovsky, and N. Vogel. Resonant Atomic Interfero– and Shadowgraphy of Vacuum Arc with Gallium Cathode // IEEE Trans. on Plasma Sci. – 2003, v. 31, No. 5., pp. 864 – 868.
10. R. N. Bracewell, The Fourier Transform and Its Applications, McGraw-Hill, New York, 2000.
11. H. M. Mott-Smith and Irving Langmuir , The Theory of Collectors in Gaseous Discharges, Phys. Rev. 28, 727–763 (1926)
12. О. В. Козлов. Электрический зонд в плазме. – М: Атомиздат.– 1969.– 292 с.
13. В. Лохте-Хольтгревен. Метода исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды.– М; Мир.– 1971.– 552 с.
14. F. F. Chen. ch. 4 at Plasma Diagnostics Technique.– NY: Academic Press.– 1965.– pp. 113–200.
15. Batrakov A.V., Plasma properties of arc cathode spots at liquid-metal cathodes // Proc. XX-th Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Tours, France, 2002. – pp. 123–130.
16. Болотин И.Б., Эйдель Л.Э. Измерения в переходных режимах короткого замыкания.-Л: Энергия, 1981.- 192 с.