

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. № 266.10.05

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)
От имени Руководителя организации _____/Ратахин Н.А./ М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЁТ

о выполнении 5 этапа Государственного контракта
№ 14.740.11.0317 от 17 сентября 2010 г. и Дополнению от 13 марта 2012 г. № 1

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО 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
2012 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, 26.10.2012
старший научный сотрудник _____
подпись, дата Батраков А. В.

Исполнители темы:

кандидат физико-математических наук, 26.10.2012 Попов С. А.
без ученого звания _____
подпись, дата

кандидат физико-математических наук, 26.10.2012 Нефёдцев Е. В.
доцент _____
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания 26.10.2012 Дубровская (Прядко) Е. Л.

подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания 26.10.2012 Шнайдер А. В.

подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания 26.10.2012 Петров В. И.

подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания 26.10.2012 Яковлев Е.В.

подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания 26.10.2012 Кизириди П.П.

подпись, дата

кандидат физико-математических наук, 26.10.2012 Панченко А. Н.
старший научный сотрудник _____
подпись, дата

кандидат физико-математических наук, 26.10.2012 Тельминов А. Е.
без ученого звания _____
подпись, дата

Реферат

Отчет 90 с., 1 ч., 24 рис., 5 табл., 30 источн., 0 прил.

Диагностика низкотемпературной плазмы , вакуумная дуга , вакуумные сетевые выключатели , лазерная абляция , лазерно-плазменные двигатели

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 5 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 - Исследование динамики плазмы сильноточной вакуумной дуги после перехода переменного тока промышленной частоты через ноль и восстановления электрической изоляции разомкнутого контактного промежутка в вакуумных сетевых выключателях, работающих в режиме отключения токов короткого замыкания до 15 кА промышленных сетей среднего класса напряжения до 25 кВ, а также для исследования лазерной абляции поверхности жидкометаллической мишени лазерно-плазменных двигателей малых космических аппаратов с целью проведение диагностики

плазменного факела, анализа его стабильности от импульса к импульсу, измерения диапазона регулировки механического импульса тяги, передаваемого мишени при воздействии 5-нс, 250-мкДж импульсов излучения неодимового лазера с накачкой полупроводниковым лазерным светодиодом.

Для исследования использовались многоканальные зондовые измерения на основе одинарных и двойных зондов Ленгмюра, анализ тяжелой компоненты плазмы по зарядовым состояниям и энергии с использованием энергоанализатора, оптические методы диагностики плазмы.

При выполнении работы использовались следующие инструменты:

1. Универсальная сверхвысоковакуумная установка, оснащённая кварцевыми оптическим окнами, электрическими вводами и манипуляторами.

2. Импульсный твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой RL-1,0Q.

3. Масс-энергоанализатор HIDEN EQP (произведено в Великобритании).

4. Скоростная 4-х канальная камера регистрации изображений HSFC Pro (произведено в Германии).

Выполнено комплексное исследование динамики плазмы в области контактного промежутка вакуумной дугогасительной камеры после перехода тока дуги через ноль. Показано, что движение плазменной границы определяется не только параметрами тока разряда, но и в значительной степени конфигурацией и полярностью окружающего контакты экрана. Измеренные значения скорости движения в совокупности с темпом роста переходного восстанавливающегося напряжения приводят к появлению электрических полей, способных вызвать пробой по механизму газового разряда с большей вероятностью, чем пробой вследствие взрывоэмиссионных процессов на катоде.

Выполнено комплексное исследование динамики плазмы лазерного

абляционного факела и показано, что плотность мощности 10 ГВт/см^2 высока для формирования малого, но прецизионного импульса тяги, и при этом недостаточно высока для разгона космического аппарата. В качестве развития данных исследований планируется постановка НИОКР на разработку принципов построения и создание экспериментального образца гибридного двигателя, совмещающего в себе лазерно-плазменный двигатель и электрореактивный двигатель, в котором объединяющим началом является жидкометаллическое рабочее тело.

После завершения работы созданный диагностический комплекс будет использоваться как для научных, так и учебных целей для подготовки магистрантов по программе «Физическая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете. НИР выполнена на мировом уровне. Результаты НИР докладывались на Международных симпозиумах по электрической изоляции и разрядам в вакууме (ISDEIV) и были опубликованы в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах. Выполнение НИР обеспечило подготовку и закрепление в сфере науки научных и научно-педагогических кадров, а также сохранение эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Сокращения и обозначения	8
Введение.....	8
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ОБОБЩЕНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫПУСК ОТЧЕТНОЙ НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ.....	16
5.1. Проведение технико-экономической оценки полученных результатов.....	16
<i>5.1.1. Оценка перспективности разработок гибридных сетевых выключателей новых типов с использованием вакуумной дугогасительной камеры</i>	<i>16</i>
<i>5.1.2. Оценка уровня техники плазменных двигателей и сопоставление лазерно-плазменных и электрореактивных двигателей</i>	<i>22</i>
<i>5.1.3. Выводы по разделу 5.1</i>	<i>42</i>
5.2. Разработка Технического задания на НИОКР по разработке и созданию экспериментального образца мишенно-соплового узла лазерно-плазменного микродвигателя малых космических аппаратов.....	43
5.3. Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс	49
4.4. Разработка методических указания к лабораторной работе по теме «Многозондовая диагностика низкотемпературной плазмы в вакууме» для подготовки магистрантов по программе «Физическая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования	

Национальном исследовательском Томском политехническом университете	52
4.5. Проведение дополнительных патентных исследований по ГОСТ Р 15.011-96	72
Заключение	86
Список использованных источников.....	87

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

В отчёте использованы следующие сокращения:

ВКВ – вакуумный комбинированный выключатель.

ВАХ – вольтамперная характеристика.

ДГК – вакуумная дугогасительная камера.

КА – космический аппарат.

КБ – конденсаторная батарея.

КЗ – короткое замыкание.

ЛПД – лазерно-плазменный двигатель.

МСУ – мишенно-сопловый узел.

ПБ – полупроводниковый блок.

СКО – среднеквадратическое отклонение.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчёт содержит результаты выполнения пятого, заключительного, этапа проекта: 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», выполняемого в рамках Федеральной целевой программы «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». Целью данного этапа является обобщение результатов исследований, полученных в рамках данной НИР, а также оценка возможных направлений исследований.

В работе получили развитие диагностические методы, использованные при исследованиях систем, непосредственно связанных с генерацией низкотемпературной плазмы близких параметров, а именно, плазмы сильнооточного вакуумного разряда, горящего в ВДК вакуумного сетевого выключателя, и плазмы лазерного абляционного факела МСУ ЛПД.

Отчёт по первому этапу НИР состоит из трёх разделов и содержит описание основных методов диагностики плазмы, которые представлены в первом разделе 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 третьем разделе отчета. Второй раздел отчета посвящен 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.

Отчёт по второму этапу НИР состоит из шести разделов и содержит описание модернизированного экспериментального стенда по диагностике плазмы, представленное в первом разделе отчета. В этом же разделе приводится разработанная методика многозондовой диагностики плазмы с возможностью регистрации динамики границы плазмы в условиях переходного восстанавливающегося напряжения при погасании дуги в вакуумных сетевых выключателях. В качестве дополнительных методов

используется высокоскоростная камеры видеорегистрации изображений свечения плазмы HSFC Pro и энерго–масс–анализатора HIDEN EQP, способный измерять массовые спектры тяжелой компоненты плазмы, зарядовые состояния для каждой массы и распределения частиц по энергиям для каждого массового и зарядового состояния.

Для осуществления синхронных скоростных видеонаблюдений и осциллографирования сигналов был собран и проверен на предмет работоспособности оптический тракт регистрации изображений, согласованный с импульсными источниками питания разряда и осциллографами. Данный сегмент работы представлен во втором разделе отчёта по второму этапу НИР.

Для практической реализации диагностики разработана методика, основанная на регистрации спектрально-дифференцированных изображений и изложенная в третьем разделе отчёта. Эта методика была проверена в предварительных экспериментах по визуализации анодного факела на трёх различных длинах волн, соответствующих эмиссионным линиям плазмы дуги. Были получены новые научные данные и подготовлена к печати одна дополнительная статья для научной периодики.

Четвёртый раздел посвящён разработанной методике по исследованию лазерной абляции жидкого металла. Кроме вопросов, связанных непосредственно с исследованием физического явления лазерной абляции, методика подробно описывает подготовительный этап работы, а именно, изготовление жидкометаллической мишени, поскольку качество исполнения мишени имеет принципиальное значение для воспроизводимости процесса абляции при частотном режиме работы лазера, необходимом для проведения эксперимента с большим объёмом статистических данных. Кроме того, в методике описаны меры, необходимые для предотвращения запыления оптических компонентов (линзы и вакуумные окна) продуктами эрозии мишени при абляции.

Основным направлением использования лазерной абляции жидкометаллической мишени являются лазерно-плазменные двигатели малогабаритных космических аппаратов. Главной характеристикой двигателя является импульс отдачи, причем, как его величина, так и стабильность значения от импульса к импульсу. Для измерения импульса отдачи была разработана методика, представленная в пятом разделе и основанная на баллистическом маятнике и учитывающая экспериментальные возможности лабораторного оборудования, доступного для выполнения задач проекта. Показано, что созданный в работе маятник при использовании скоростной камеры HSFC-Pro обеспечивает точность измерения малых значений импульс на уровне 1 нН·с, что является приемлемой величиной для потенциального технического использования жидкометаллической мишени.

Шестой раздел отчёта содержит рукописи статей, одна из которых посвящена регистрации ионизационно-рекомбинационного фронта в области анодного пятна вакуумной дуги, направленную и принятую к печати в журнале «IEEE Transactions on Plasma Science», а другая, подготовленная к печати в «Журнал технической физике», рассматривает данное явление с привлечением модельных представлений. Обе статьи содержат ссылки на настоящий проект.

Отчёт по третьему этапу НИР состоит из трёх разделов. Первый раздел посвящён диагностике плазмы вакуумной дуги в процессе её горения, как в максимуме тока, так и вблизи нуля тока. Исследуемыми параметрами являлись концентрация плазмы и электронная температура плазмы. Данные измерения не являются оригинальными и проводились с целью использования результатов измерений при анализе оригинальных экспериментальных данных, полученных во второй части данного этапа выполнения проекта.

Второй раздел отчёта по выполнению третьего этапа проекта посвящён описанию результатов измерений положения плазменной границы после нуля

тока в различные моменты времени при различных параметрах разрядной цепи. Поскольку поведение плазмы подвержено многим случайным процессам, все измеряемые величины имеют большой разброс, носящий случайный характер. В этой связи все величины, а именно, электронная температура, электронная концентрация, положение плазменной границы в различные моменты времени, измерялись путём проведения статистических экспериментов с большим числом однотипных измерений и последующей обработки результатов измерений в соответствии с ГОСТ 8.207-76. В качестве метода измерений на предыдущем этапе выполнения проекта был выбран метод двойного зонда Ленгмюра, способного измерять электронную температуру и концентрацию плазмы, и одиночного зонда Ленгмюра в режиме электронной ветви тока насыщения для измерения концентрации разреженной плазмы, ожидаемой в условиях перехода тока дуги через ноль. Для снижения разброса измеряемых величин зондовые эксперименты сопровождалось наблюдением за промежутком с использованием скоростной камеры HSFC-Pro, что позволяло определять положение источников плазмы и исключать те измерения, которые соответствовали зажиганию дуги вдали от оси разрядного промежутка. В результате выполнения экспериментов были построены двумерные диаграммы положения плазменной границы во времени, а также диаграммы распределения концентрации плазмы в окрестности разрядного промежутка в момент перехода тока дуги через ноль и проведён анализ полученных данных на предмет выявления возможных механизмов пробоя.

Третий раздел отчёта посвящён описанию учебного пособия «Физические основы электрической изоляции и разряда в вакууме», подготовленного к изданию в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете в качестве учебно-методического сопровождения дисциплины «Электрическая изоляция и разряд в вакууме»,

читаемого магистрантам ТПУ по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника».

Отчёт по четвёртому этапу НИР состоит из семи разделов. Первый раздел посвящён измерению зарядового и энергетического состава ионной компоненты лазерной абляционной плазмы с использованием масс-энергетического анализатора HIDEN EQP, современного научного прибора последнего поколения, позволяющего получать полную картину распределений ионов плазмы различного зарядового состояния по энергиям. Обработка данных измерения позволяет вычислять средние скорости истечения ионной компоненты плазмы, а путём сравнения с результатами прямых измерений импульса отдачи, оценивать эффективность преобразования энергии лазерного излучения в кинетическую энергию мишени.

Второй раздел отчёта посвящён описанию результатов спектроскопических измерений собственного излучения плазмы абляционного факела и обработки спектров с целью определения температуры электронной компоненты плазмы. Результаты спектроскопических измерений сравниваются с параметрами плазмы катодного пятна, наиболее близкой по физике процессов системы.

Третий раздел отчёта посвящён результатам математической обработки (интегрированию) распределений ионов по энергиям, полученным в ходе масс-энергетических измерений.

В четвёртом разделе отчёта описываются результаты прямых измерений механического импульса отдачи с использованием сверхскоростной камеры HSFC Pro, синхронизированной с источником лазерного излучения, воздействующего на мишень. Результаты измерений сравниваются с данными по обработке масс-энергетических спектров и делается вывод о потерях энергии лазерного излучения на эмиссию капель.

При выполнении этапа проекта сформулировано техническое решение, позволяющее существенно сократить долю капельной фракции в эрозии

мишени, повысив тем самым эффективность МСУ ЛПД на основе жидкого металла, используемого в качестве рабочего тела. Для проверки патентоспособности данной технической решения выполнен патентный поиск, результаты которого приведены в пятом разделе отчёта.

В шестом разделе отчёта приведён текст заявки на патент на полезную модель «мишеный узел лазерно-плазменного двигателя».

Результаты выполнения этапа обобщены в виде рукописи статьи, подготовленной для публикации в журнале «Известия вузов. Физика». Текст рукописи статьи приведён в седьмом разделе отчёта.

Заключительный отчёт НИР состоит из пяти разделов. Первый раздел посвящён технико-экономической оценке полученных результатов. Основное направление анализа сосредоточено на обосновании перспективности создания в продолжение данной НИР принципов построения и экспериментальных образцов техники, объединяющих два различных принципа работы и являющихся, по сути, гибридными.

С точки зрения процессов, связанных с сильноточным вакуумным разрядом, рассмотрена перспективность построения гибридного выключателя, совмещающего в себе ВДК и сильноточный тиристор. Основное ожидаемое преимущество гибридного вакуумного выключателя состоит в повышении надёжности выключателя и снижения вероятности повторных пробоев после выключения токов короткого замыкания.

В качестве возможного гибридного плазменного двигателя для малых КА рассматривается двигатель, сочетающий в себе функции ЛПД и электрореактивного двигателя на основе вакуумной дуги. При этом объединяющим началом является использование жидкометаллического рабочего тела, являющегося рабочим веществом МСУ ЛПД, и, при переключении режима работы, анодом электроразрядной ячейки. В обоих режимах создание тяги осуществляется за счёт абляции жидкого металла. Ожидается, что гибридный двигатель будет иметь значительно более

широкий диапазон значений тяги за счёт бóльших значений тяги, обеспечиваемых электроразрядным режимом абляции.

Второй раздел отчёта содержит текст Технического задания на НИОКР по разработке и созданию экспериментального образца мишенно-соплового узла лазерно-плазменного микродвигателя малых космических аппаратов.

Третий раздел отчёта посвящён разработке программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс. Текст программы рассмотрен и одобрен на научно-техническом совете Института физики высоких технологий НИ ТПУ.

В четвёртом разделе отчёта приведён текст методических указаний к лабораторной работе по теме «Многозондовая диагностика низкотемпературной плазмы в вакууме» для подготовки магистрантов по программе «Физическая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

В пятом разделе приведены результаты дополнительных патентных исследований по ГОСТ Р 15.011-96. Целью исследования является определение уровня техники гибридных электрореактивных двигателей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ОБОБЩЕНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫПУСК ОТЧЕТНОЙ НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

5.1. Проведение технико-экономической оценки полученных результатов

5.1.1. Оценка перспективности разработок гибридных сетевых выключателей новых типов с использованием вакуумной дугогасительной камеры

Вакуумные выключатели переменного тока на основе дугогасительных камер имеют неоспоримые преимущества в электрических сетях среднего класса напряжений по ГОСТ Р 52565-2006 благодаря способности вакуумной дуги погасать в силу естественных причин при переходе тока короткого замыкания через ноль. С использованием конфигурации электродов, создающих определённое магнитное поле при протекании тока, удаётся добиваться равномерного распределения катодных пятен и, соответственно, равномерной удельной эрозии по всей поверхности электродов. Это обстоятельство обеспечивает надёжное выключение тока короткого замыкания, но ценой значительной эрозии электродов, что сокращает срок службы выключателя. В среднем ВДК выдерживает 50–100 актов выключения токов, что, собственно, и определяет **эксплуатационные затраты** при использовании вакуумных выключателей. Следует указать, что эксплуатационные затраты вакуумных выключателей являются самыми низкими, по сравнению с выключателями других типов на данный класс напряжений. Если сравнивать вакуумные выключатели с масляными выключателями, то стартовые затраты на создание распределительных сетей для вакуумных выключателей выше, но они окупаются в течение срока

эксплуатации, поскольку их обслуживание значительно дешевле, чем масляных выключателей. Не выключатели имеют также неоспоримые преимущества перед элегазовыми (SF_6) выключателями, поскольку их утилизация, в отличие от элегазовых выключателей, не требует затрат благодаря отсутствию токсических элементов в их составе. Действительно, какой вред можно ожидать от вакуумного баллона, сделанного из алюминиевой керамики, содержащего конструктивные элементы из меди и хрома? Никакой. Таким образом, оснований для разработки гибридных выключателей на основе ВДК с точки зрения снижения затрат на настоящем этапе развития техники не просматривается.

Тем не менее, проблема усовершенствования вакуумного выключателя путём создания его гибридных конфигураций является актуальной [1,2]. Принцип работы такого устройства состоит в использовании дополнительных полупроводниковых диодов, включенных последовательно-параллельно с ВДК. Одной из главных мотиваций для разработки устройств данного типа является сильно пониженное плазмообразование в стадии дугогашения. Данный эффект достигается за счёт перехватывания тока полупроводниковым элементом. В стадии же номинальной работы, когда контакты ВДК замкнуты, ток через полупроводниковые диоды не идёт, предотвращая потери, связанные с большим значением падения напряжения на элементе. Конечным итогом использования гибридного выключателя на основе ВДК и диодов является **высокая надёжность** выключения и **высокий уровень защиты** от повторных пробоев.

Другим ожидаемым эффектом внедрения гибридных выключателей является расширение диапазона возможных применений ВДК. К таким возможностям можно отнести, во-первых, инициирование вакуумными выключателями при определенных условиях высокочастотных перенапряжений, воздействующих на главную и продольную изоляцию электротехнического оборудования (трансформаторы, электродвигатели,

генераторы, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена и т.д.), и, во-вторых, отключение токов короткого замыкания (КЗ) значительных величин, превышающих максимальные значения выключаемых токов без использования дополнительных элементов, лишь одной ВДК. Первая из открывающихся возможностей связана с решением проблемы в соотношении скорости восстановления электрической прочности между расходящимися контактами выключателя и скорости собственного переходного восстанавливающегося напряжения между расходящимися контактами выключателя. Вторая проблема (способность вакуумного выключателя отключать токи КЗ значительных величин) связана с конструкцией вакуумной дугогасительной камеры (КДВ): площади электродов-контактов, состава комбинированного материала контактов и др.

В качестве одного из вариантов повышения величин отключаемых токов КЗ вакуумными выключателями рассматривается применение вакуумного комбинированного выключателя, в котором параллельно контактам выключателя подключается полупроводниковый (тиристорной) блок (ПБ), принимающий на себя основную функцию по отключению токов КЗ. При этом следует отметить косвенно появляющийся положительный момент – комбинированный выключатель автоматически снимает проблему высокочастотных перенапряжений, возникающих при определенных условиях за счет повторных зажиганий дуги в вакуумной дугогасительной камере и, в этом случае, не потребуются применение каких-либо дополнительных мер (например, RC-цепочек) по устранению высокочастотных перенапряжений. Такой режим горения сильноточной вакуумной дуги до настоящего времени не исследовался, несмотря на его практическую привлекательность. **Причина этого состоит в высокой рыночной стоимости силовой полупроводниковой электроники.** Однако в последние годы наблюдается тенденция в удешевлении полупроводниковой элементной базы, что делает предлагаемые исследования

актуальными для практического использования в силовой коммутирующей аппаратуре распределительных сетей среднего класса напряжений.

Комбинированный выключатель с полупроводниковым блоком, по сути, является аппаратом с управляемой коммутацией. Использование же управляемой коммутации высоковольтных выключателей может оказаться эффективным как при включении, так и при отключении сильно нагруженных цепей. В рабочих режимах при управляемом включении существенно уменьшаются броски тока, а при управляемом отключении снижается вероятность повторных пробоев и, как следствие, снижается уровень перенапряжений.

Помимо коммутации больших токов, характерных, например, для генераторных потребителей, управляемая коммутация представляет большой интерес и для коммутации конденсаторных батарей. В последнем случае оптимальным моментом для включения является момент, когда разность между напряжением на КБ и напряжением сети, т.е. на разрыве коммутатора, равна нулю. Чем дальше момент включения от нулевого значения напряжения на разрыве, тем выше броски тока. Поэтому аппараты с управляемой коммутацией должны иметь очень стабильные времена включения и времена отключения. Разработка для этих целей электромеханических выключателей с точностью включения-отключения не хуже, чем ± 1 мс, и повышенной электрической прочностью сталкивается с рядом существенных трудностей.

Значительно уменьшить абсолютное время коммутации, а также разброс времени включения и отключения относительно нуля тока, можно путем использования комбинированных коммутационных устройств управляемой коммутации, содержащих мощные полупроводники (диоды, тиристоры и т.п.) и механические коммутационные аппараты (например, вакуумные выключатели). В таком устройстве операции включения и отключения осуществляются в полупроводниковом блоке при смене полярности.

Механические аппараты обеспечивают длительное пропускание тока после включения устройства без существенных энергетических потерь и требуемую электрическую прочность после отключения тока. При этом требования к разбросу времени замыкания и размыкания контактов механических аппаратов становятся менее жесткими. Однако в настоящее время практически отсутствуют данные для адекватного описания совместной работы полупроводникового блока и механических коммутационных аппаратов во время переходных процессов, особенно при восстановлении их электрической прочности, что препятствует выбору эффективной схемы устройства и оптимизации параметров его основных элементов.

Стоит отметить, что практическая реализация создания и внедрения в эксплуатацию вакуумного комбинированного выключателя (ВКВ) связана (с нашей точки зрения) с определенными трудностями, основные из которых следующие:

- обеспечение надежной эксплуатации сложного комбинированного коммутационного механизма в целом и сопряжение работы отдельных его узлов (управление ПБ, контактов КДВ, механического привода и т.д.);
- экономическая целесообразность (эффективность) создания ВКВ, определяемая соотношением стоимости изготовления традиционного вакуумного выключателя с КДВ, способной отключать большие токи КЗ, и стоимости изготовления ВКВ, включающей ПБ и КДВ на меньшие токи КЗ;
- конструктивные габаритные размеры ВКВ должны вписываться в объем существующих и разрабатываемых ячеек подстанций сетей различного назначения;
- принципиальная возможность создания ПБ, способного отключать токи КЗ с реальными скоростями отключаемого тока (с учетом апериодической составляющей), протекающей через тиристоры и выдерживающего в

запертом состоянии приложенное обратное напряжение, а если быть точнее, то скорости собственного переходного восстанавливающегося напряжения (СПВН).

Выпускаемые в настоящее время тиристоры выдерживают: скорость нарастания тока в диапазоне 0,2...0,5 кА/мкс и скорость нарастания напряжения на тиристоре в запертом состоянии 0.5... 1.0 кВ/мкс.

Кратко принцип работы предлагаемого комбинированного выключателя при отключении токов КЗ (или номинальных токов) состоит в следующем:

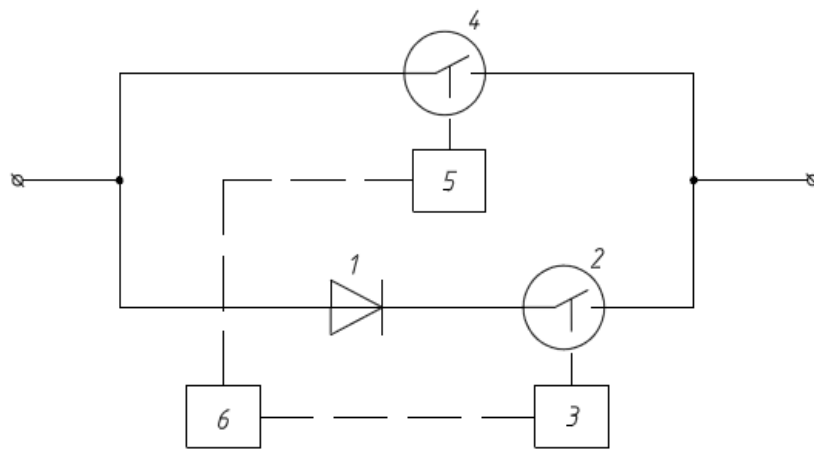


Рис 1. Принципиальная схема комбинированного выключателя. 1 – полупроводниковый блок, 2 – контакты полупроводникового блока, 4 – контакты ВДК, 3 и 5 – приводы контактов полупроводникового блока и ВДК, 6 – блок управления.

Условно считаем, что слева от комбинированного выключателя расположен источник питания (генератор, трансформатор, сборные шины и т.д.), справа - отключаемая сеть различного назначения.

В нормальном режиме работы сети состояние комбинированного выключателя следующее: контакты 4 – замкнуты, а контакты 2 разомкнуты. При возникновении в сети КЗ с блока управления подается сигнал на полупроводниковый блок, который с помощью контакта 2 подключается

параллельно контактам 4 ВДК. Полагая в первом приближении, что сопротивления ПБ и ВДК приблизительно равны друг другу, по каждой из двух параллельных цепей, образованных ПБ и ВДК, протекает по 50 % отключаемого тока, т.е. подключением ПБ снизили величину отключаемого тока КЗ на контактах 4 ВДК в два раза. Далее подаем сигнал на отключение контактов 4 ВДК, контакты начинают расходиться - образуется дуга (дуги) между контактами, что приводит к росту сопротивления в этой цепи протекания тока и, как следствие, к перераспределению отключаемого тока: в цепи контактов 4 ток уменьшается, а в цепи контактов 2 отключаемый ток увеличивается. При достижении определенного расстояния между расходящимися контактами 4 дуга между ними гаснет, и весь отключаемый ток переходит в цепь полупроводникового блока. В этом случае падение напряжения между расходящимися контактами 4 очень мало (практически равно нулю) и предпосылок для возникновения повторных зажиганий на контактах ВДК нет (высокочастотные перенапряжения не инициируются). Далее при подаче сигнала на ПБ (смене полярности отключаемого тока через половину периода промышленной частоты) полупроводниковый блок запирается и отключает «полный» ток КЗ (или номинальный ток).

5.1.2. Оценка уровня техники плазменных двигателей и сопоставление лазерно-плазменных и электрореактивных двигателей

5.1.2.1. Предыстория электрических ракетных двигателей

Развитие науки и техники электрического ускорения тел в свободном пространстве можно условно разделить на пять этапов [3]: 1) эпоха мечтателей: 1906–1945 гг.; 2) эпоха пионеров: 1946–1956 гг.; 3) эпоха диверсификации идей и развития: 1957–1979 гг.; 4) эпоха внедрения в область практического использования: 1980–1992 гг.; 5) эпоха масштабного применения: 1993 г. – настоящее время.

Идея использования заряженных частиц для ускорения аппаратов в космосе была впервые опубликована Циолковским в 1911 (переиздано в [4]). При этом, как и многое из трудов Циолковского, идея касалась перспективы, весьма далёкой даже для нашего времени, поскольку речь шла об использовании электронов в качестве рабочего тела благодаря возможности их ускорения до субсветовых скоростей. Более актуальными для нашего времени явились работы Годдарда. Прежде всего, им запатентован источник газоразрядной плазмы [5] и, главное, способ и устройство (рис. 2) для ускорения «электрифицированного газа» (плазмы) [6], одним из применением которого, согласно патенту, является обеспечение тяги для ускорения аппарата в свободном пространстве. По принципу действия предложенный Годдардом двигатель представлял собой электростатический ускоритель ионов.

Идея электростатического двигателя была развита Кондратюком [7], предложившим в 20-х годах прошлого столетия принцип космического двигателя, основанный на электростатическом ускорении заряженных капель, что явилось, по сути, рождением коллоидного двигателя. Кроме того, ему принадлежит идея использования солнечной энергии для питания электрических ракетных двигателей (ЭРД) в космосе.

Никто из мыслителей и инженеров эпохи мечтателей не рассматривали ЭРД всерьёз, поскольку для того времени проблема производства электрической энергии в космосе стояла намного более серьёзно, чем её утилизация для создания тяги. Эта проблема была впервые поставлена и концептуально решена Глушко [8], предложившим использовать термоэлементы для преобразования солнечной энергии в электрическую. Кроме того, анализируя работы Годдарда в области создания тяги электрическими методами, Глушко пришёл к выводу о низкой эффективности электростатического ускорения ионов, извлекаемых из слабоионизированной плазмы. Им было показано, что решающим условием для

одновременного формирования и большой скорости, и большой массы плазменной струи следует увеличивать энергозатраты в вещество. Работая в данном направлении, Глушко пришёл в конце 20-х годов к прототипу электровзрывного двигателя, выполненного конструктивно подобно стандартному химическому ракетному двигателю (рис. 3). Вместо

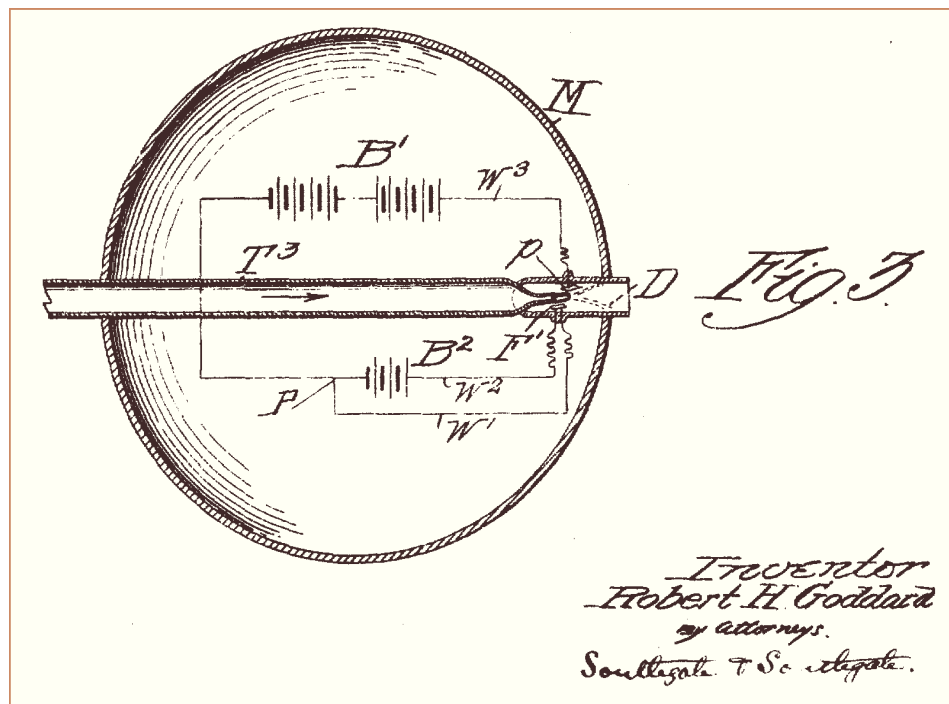


Рис. 2. Конструкция первого плазменного двигателя, основанного на электростатическом ускорении ионов плазмы (1920 г.).

двухкомпонентного химического топлива предполагалось использовать плазму взрывающихся металлических проводников, подаваемых в камеру сгорания либо в виде проволоки, либо в виде тонкой жидкой струи. Согласно расчётам, такой двигатель мог обеспечивать большие скорости истечения плазмы (до 100 км/с), но при этом требовалось громоздкое электропитание двигателя, несовместимое в то время с испытанием двигателя на орбите в космосе. С другой стороны, этот принцип не лишён смысла, если рассматривать достаточно большие космические аппараты, оснащённые солнечными элементами большой площади.

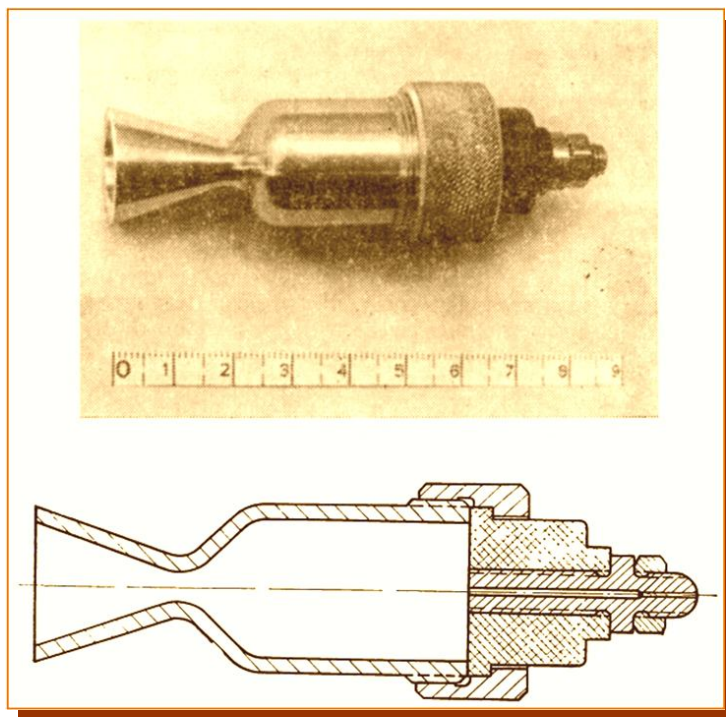


Рис. 3. Экспериментальный образец электрореактивного двигателя В.П. Глушко, 1933 г.

Прогресс в разработке эффективных и компактных источников электроэнергии позволил в 50-е годы по-новому взглянуть на ЭРД как на перспективный источник движения в космосе. Этому способствовал также успех в исследованиях плазмы и создании плазменных ускорителей, в том числе и для целей управляемого термоядерного синтеза. С конца 50-х и начала 60-х годов начинается интенсивный прогресс в исследованиях ускорения плазмы и разработке ЭРД, основанных на электромагнитном ускорении плазмы, достигаемом с использованием различных способов.

5.1.2.2. Ионно-плазменные ракетные двигатели

Простейший ионный двигатель, предложенный Годдардом [6], был реализован и исследован в лабораторных условиях в 1958 г. [9]. С использованием горячей (900°C) вольфрамовой пластины ионизовались пары цезия, что при ускоряющем напряжении порядка 3 кВ обеспечивало ионный ток 70 мА. Макет двигателя обеспечивал тягу 5 мН при скорости истечения ионов 70 км/с.

Позднее, в 60-х годах, в результате исследований был разработан и испытан (1966 г.) в суборбитальном полёте опытный образец ионного двигателя [10], работающий при ускоряющем напряжении 2.8 кВ, в котором плазма генерировалась за счёт газового разряда низкого давления. На этом образце была реализована также эффективная нейтрализация ионного пучка с использованием газоразрядного источника электронов, что также было инновационным решением по сравнению с нейтрализатором на основе раскалённой спирали.

Развитие плазменных двигателей в СССР и в США шло параллельно, и не всегда возможно определить, какая из сторон имела преимущество, за исключением холловских двигателей, в разработке и использовании которых СССР имел очевидное преимущество до начала 90-х годов. Принцип действия холловского двигателя основан на ускорении ионов в скрещенных электрических и магнитных полях. За счёт радиальной конфигурации магнитного поля (рис. 4) электроны оказываются замагниченными, что обеспечивает эффективную ионизацию рабочего вещества (как правило, тяжёлого газа) и электростатическое ускорение ионов. Тяга электростатического двигателя F_T зависит от извлекаемого из ускорителя ионного тока I_{ib} и ускоряющего напряжения V_a следующим образом [11]:

$$F_T[\text{H}] = \left(\frac{2M_i}{Ze} \right)^{1/2} I_{ib} V_a^{1/2}, \quad (1.1)$$

где M_i – масса ионов, Ze – заряд ионов. Таким образом, в условиях фиксированной мощности источника $P = I_{ib}V_a = \text{const}$ представляется более выгодным увеличивать ток, чем напряжение. Тем более что высокое напряжение может привести к проблемам, связанным с нарушением электрической изоляции, а высокая энергия ионов увеличивает эрозию электродов и снижает ресурс двигателя. Но, с другой стороны, работа двигателя на низких напряжениях снижает предельную скорость, до которой можно ускорить аппарат, а также снижает эффективность двигателя

вследствие уширения плазменного факела и потери тяги за счёт радиальной составляющей импульса ионов. В используемых на практике холловских двигателях энергии ионов составляют единицы кВ и ионные токи единицы А.

Кроме электростатического в ЭРД используется также магнитное ускорение плазмы, реализованное в рельсотронах и коаксиально-торцевых ускорителях плазмы. В двигателях такого типа ускорение плазмы осуществляется за счёт давления магнитного поля в контуре с током разряда. Работа торцевого ускорителя схематически показана на рис. 5. В стадии пробоя (а) формируется плазменный канал, разгоняемый впоследствии (б) магнитным полем за счёт протекания тока разряда. При этом создаётся тяга [10]:

$$F_T[\text{Н}] = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{3}{4} \right), \quad (1.2)$$

где I – ток разряда, r_2 , r_1 – радиусы проводников коаксиальной линии. В качестве рабочего тела в ЭРД данного типа могут быть использованы как тяжёлые газы, так и твёрдые диэлектрики.

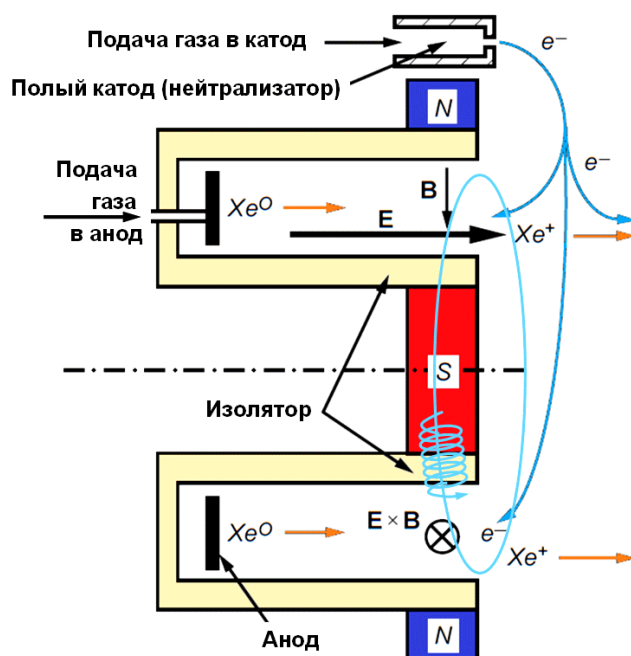


Рис. 4. Принцип действия холловского плазменного ускорителя с азимутальным дрейфом электронов.

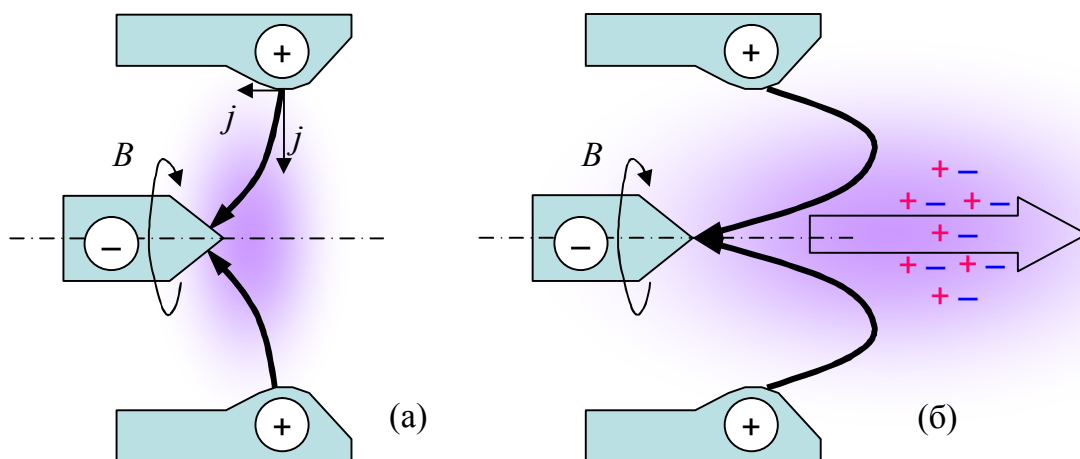


Рис. 5. Принцип действия коаксиально-торцевого плазменного ускорителя в стадии иницирования разряда (а) и ускорения плазмы (б).

Двигатели на основе плазменных ускорителей обладают высокой эффективностью и способны развивать большую тягу просто за счёт увеличения электрической мощности двигателя. Однако при попытке миниатюризации двигателя с целью создания малой тяги, что особенно актуально для ориентации малых и сверхмалых космических аппаратов, возникают непреодолимые проблемы из-за существования пороговых значений токов и напряжений, необходимых для горения разряда. Это обстоятельство накладывает ограничение на минимальный импульс отдачи двигателя и, кроме того, делает нестабильной работу двигателя при приближении к пороговым режимам. Для ЭРД не удаётся достичь значений минимального импульса отдачи ниже 10 мкН с [11]. В этой связи представляет интерес рассмотреть жидкометаллический источник ионов, используемый для формирования прецизионного ЭРД [12]. Функционирование источников данного типа основано на автоионной эмиссии с вершины конуса Тейлора (рис. 6). Параметры источника [12] приведены в таблице 1.1. В качестве рабочего вещества использовался жидкий индий. Ионный источник работал при ускоряющем напряжении от 5 до 10 кВ, при этом ток изменялся в пределах 10 ÷ 600 мкА. С учётом формулы (1) можно ожидать, что тяга такого двигателя лежит в пределах

1 ÷ 90 мкН. В действительности, тяга двигателя ниже потенциальной способности эмиттера, особенно при больших токах ионной эмиссии. Основной причиной потерь является рост расходимости ионного пучка с ростом тока эмиссии (рис. 7) вследствие действия пространственного заряда пучка.

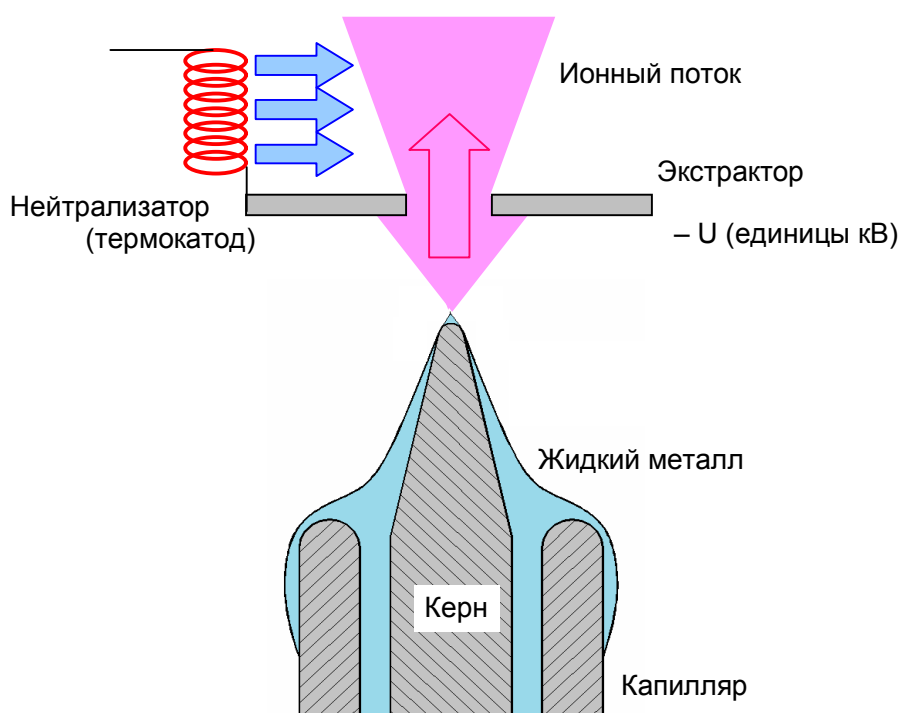
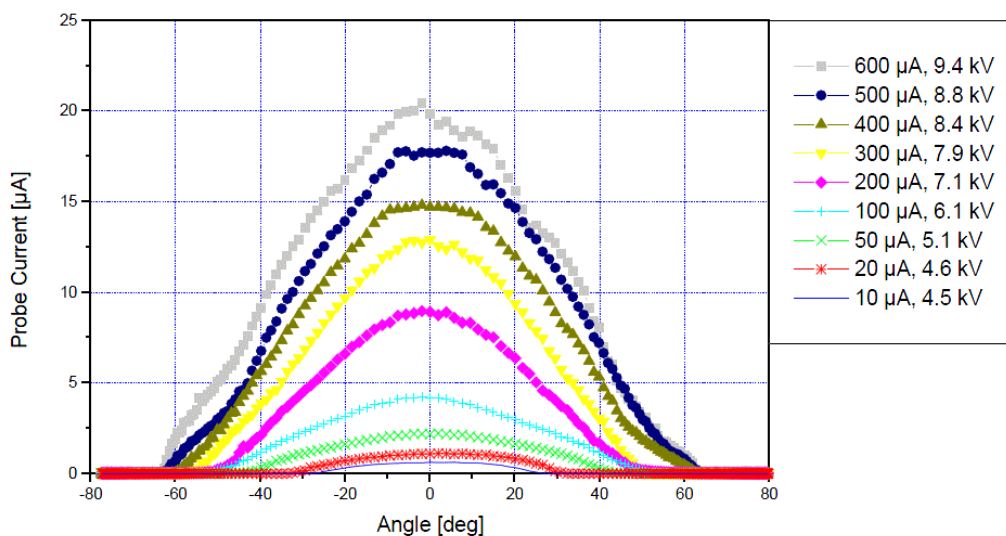


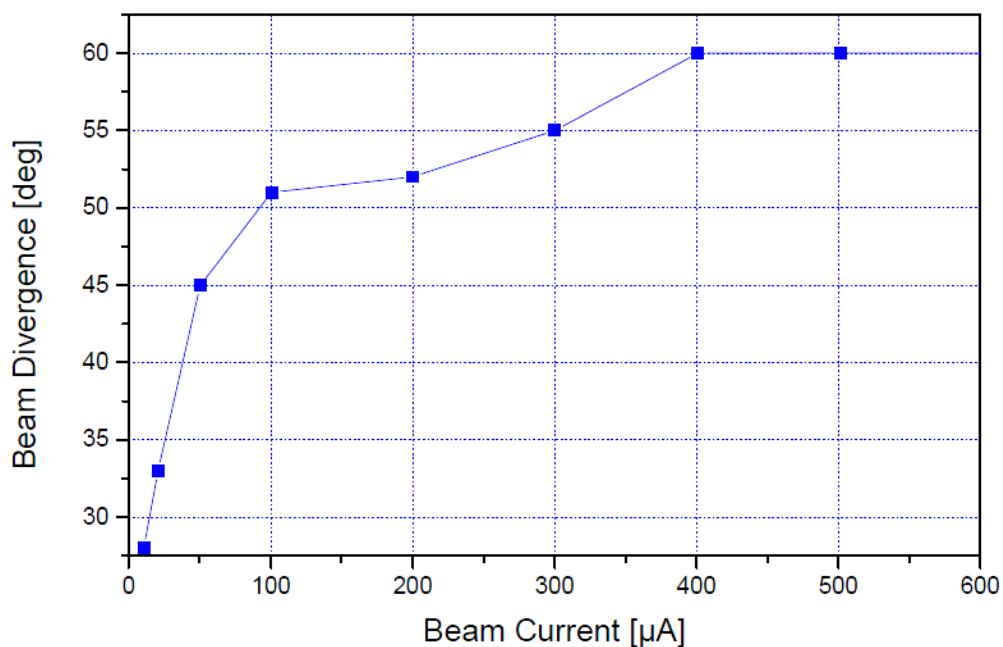
Рис. 6. Принцип действия жидкометаллического источника ионов.

Таблица 1.1. Параметры автоионного двигателя [12].

Параметр	Значение	Примечание
Тяга	1 ÷ 60 мкН	
Точность установки тяги	0,01 мкН	
Нестабильность тяги	0,15 мкН	за время измерения 1000 с
Минимальный импульс отдачи	0,005 мкН с	
Общий импульс отдачи	600 Н с	для запаса рабочего тела 30 г
Удельный импульс	1600 ÷ 8000 с	
Доля однозарядных ионов	98%	
Электрическая эффективность	95%	При относительно малых значениях тяги. При предельной тяге – 70%.
Мощность источника питания	13 Вт	
Общий вес	2,5 кг	включает вес нейтрализатора и источника питания



(а)



(б)

Рис. 7. Распределения плотности тока по углу при различных токах эмиссии жидкометаллического источника ионов (а) и зависимость расходимости ионного пучка от тока эмиссии (б) по данным [12]. Асимптотика расходимости при токах свыше 400 мкА связано с диафрагмированием пучка.

Другим источником потери рабочего тела является эмиссия капель, обладающих относительно низкой скоростью. Доля массы, уносимой каплями, растёт с увеличением тока, и также растёт угол разлёта капель (рис. 8). Это связано с ростом интенсивности эмиссии капель при увеличении тока

[13], причём, генерация капель является наиболее интенсивной на боковой поверхности. Одной из причин интенсификации эмиссии капель является рост энергии звуковых колебаний в жидком металле, генерируемых в зоне эмиссии на вершине конуса Тейлора [14].

Жидкометаллический источник ионов даёт возможность использования рабочего тела в предельно компактном виде – в конденсированном состоянии вещества. При этом подача рабочего тела (жидкого металла) не требует использования специальных приспособлений (насосов, клапанов и пр.), а осуществляется за счёт высокого напряжения, используемого для ускорения ионов. На рисунке 9 приведены примеры эмиттера, совмещённого с резервуаром рабочего тела.

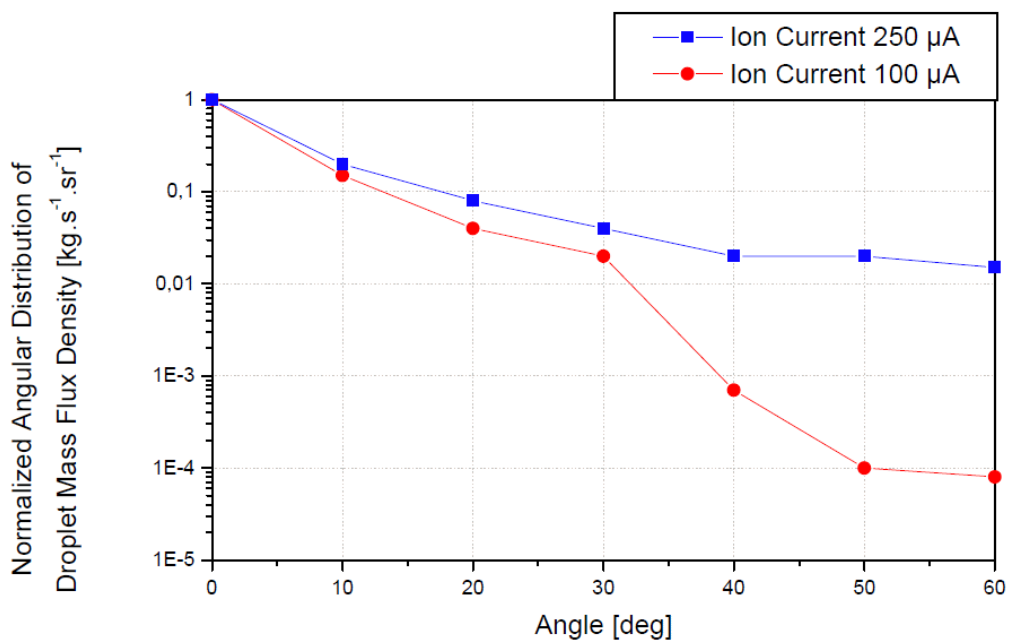


Рис. 8. Распределение плотности эмиссии капель по углу для различных токов полевой ионной эмиссии [12].

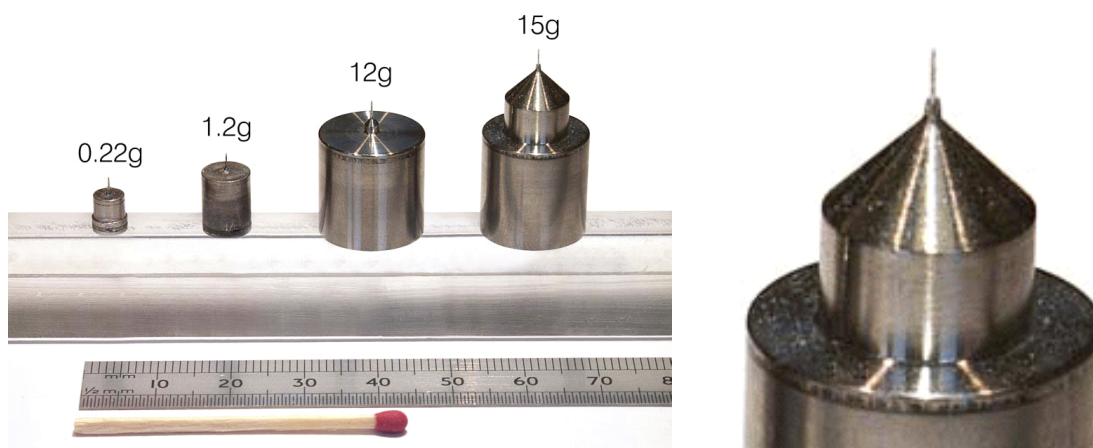


Рис. 9. Эмиттеры ионов индия, совмещённые с резервуарами рабочего тела [12].

5.1.2.3. Лазерно-плазменные ракетные двигатели

В основе лазерно-плазменного двигателя (ЛПД) лежит явление светоабляционного давления, обнаруженное благодаря лазерам и впервые [15] описанное в 1962 г. Давление в плазме, создаваемое при лазерной абляции, приводит к высоким скоростям истечения вещества. К сожалению, научный приоритет не был использован национальной научной школой для утверждения технического приоритета, и первый патент ЛПД, базирующегося на летательном аппарате и использующего явления лазерной абляции для создания тяги, принадлежит США [16]. Принцип действия предложенного ЛПД представлен на рисунке 10 и, по сути, является прототипом для практического всех ЛПД, основанных на абляции мишени из конденсированного вещества.

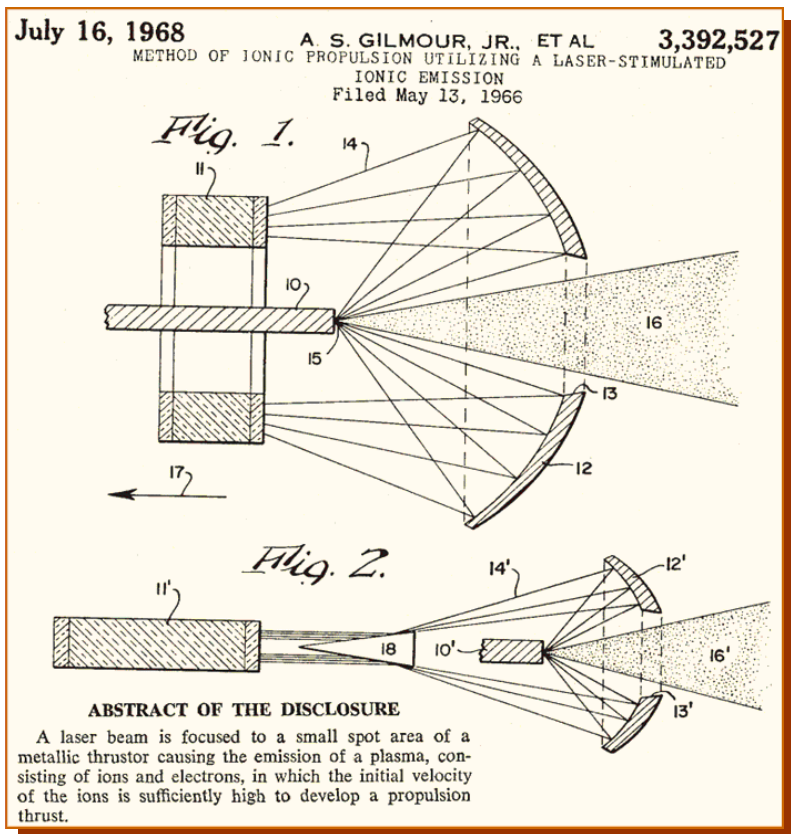


Рис. 10. Конструкция первого лазерно-плазменного двигателя, основанного на принципе абляции твердотельной мишени (1962 г.).

Практическая реализация подобного двигателя в 60-х годах прошлого столетия была невозможна, поскольку лазерная техника была громоздкой и низкоэффективной. Именно поэтому основное направление научных технических изысканий, связанных с использованием лазерного излучения для создания тяги, касалось схем, подразумевающих неподвижные лазерные установки, разгоняющие летательные аппараты [17], и для целей данного обзора не представляющие интереса. Ситуация изменилась в 90-х годах, когда были разработаны высокоэффективные лазерные светодиоды, позволившие в дальнейшем создать твердотельные лазеры с эффективностью преобразования электрической энергии в энергию излучения 40–60%. Данное обстоятельство сделало идею практического использования лазерно-плазменного двигателя актуальной.

Принцип действия ЛПД основан на поглощении энергии лазерного излучения конденсированным веществом мишени при условии, что удельный энерговклад, ε_{in} (Дж/кг), значительно превосходит теплоту сублимации мишени ε_{vapor} , что приводит к интенсивному испарению вещества. При больших интенсивностях лазерного излучения процесс испарения сопровождается ионизацией вещества, что приводит к абсорбции лазерного излучения свободными электронами. При достижении концентрации плазмы

$$n_{ec} = \frac{m_e \pi c^2}{e^2 \lambda^2} \quad (1.3)$$

показатель преломления плазмы становится мнимым, что означает полную непрозрачность среды. Дальнейшее лазерное излучение в течение импульса полностью поглощается плазмой, что приводит к её нагреву и, следовательно, увеличению скорости истечения плазмы. Такой режим воздействия лазерного излучения получил название плазменного режима [18]. При плазменном режиме лазерной абляции увеличение длины волны излучения удлиняет стадию испарения материала мишени и позволяет достичь бóльших значений темпа уноса массы \dot{m} . Но, с другой стороны, это требует большей плотности мощности для нагрева плазмы излучением с целью достижения бóльших значений скорости истечения плазмы v_{ex} . При этом следует учитывать, что испарённое вещество разлетается в некоторый телесный угол, много больший угла схождения лазерного луча. В этой связи задача повышения эффективности ЛПД, работающего в плазменном режиме абляции, должна решаться путём поиска оптимума с точки зрения размера фокального пятна в зависимости от характеристик материала мишени и параметров лазерного излучения. В частности, при длительности импульса лазерного излучения 5 нс нецелесообразно уменьшать радиус фокального пятна до значений менее 50 мкм, поскольку за время в единицы наносекунд можно ожидать, что плазма в радиальном направлении разлетится на расстояния в десятки микрометров.

При длительностях лазерного импульсов, лежащих в пикосекундном и фемтосекундном диапазонах, вся энергия излучения поглощается конденсированным веществом мишени. Такой режим назван испарительным, поскольку для него характерна меньшая степень ионизации плазмы, определяемая спонтанной ионизацией плотного пара. Средняя скорость разлёта испарённого материала полностью определяется энергоскладом и вычисляется как [19]

$$v_m = \sqrt{2(\epsilon_{in} - \epsilon_{vapor})} \quad (1.4)$$

Испарительный режим не является актуальным в настоящей работе. Теоретический анализ параметров ЛПД в зависимости от режима лазерной абляции детально изложен в [18].

Для практического воплощения идеи ЛПД потребовалось решение проблемы эрозии материала мишени, поскольку формирование эрозионного кратера неминуемо приводит к «уходу» поверхности мишени из фокального пятна. Эта проблема была решена Фиппсом путём использования ленты с лентопротяжным механизмом (рис. 11) [20]. Патент Фиппса предполагает использование ленты, как на отражение, так и на прострел. При использовании ленты на прострел предполагается, что лента прозрачна (или почти прозрачна) для лазерного излучения. Безусловно, прозрачность ленты не равна строго 1, и некоторые потери неизбежны. Но, тем не менее, на практике были реализованы прототипы двигателей по схеме Фиппса, работающие на прострел мишенной ленты, поскольку именно эта схема обеспечивает защиту фокусирующей линзы от запыления продуктами абляции. ЛПД по схеме Фиппса был реализован во многих экспериментах, в том числе и орбитальных [21]. Коэффициент передачи импульса при использовании пассивной мишени (как правило, лента из поливинилхлорида) не превосходил 30% максимального значения, равного $2/g_0$, что значительно уступает показателям автоионных двигателей (см. табл. 1.1). Улучшить

показатели ЛПД с точки зрения эффективности преобразования энергии удалось путём использования мишени с активным наполнителем, обеспечивающим дополнительную тягу за счёт химического горения ограниченной порции мишени (рис. 12).

Главной сложностью и потенциально слабым местом при использовании ЛПД на основе твёрдой мишени (ленты) является необходимость механизма перемещения мишени. Пример такого двигателя с вращающимся мишенным диском приведён на рисунке 13 [22]. В качестве мишени и её привода использован жёсткий диск компьютера. Двигатель работает в режиме отражения. В качестве рабочего тела использовалось золотое либо алюминиевое покрытие диска.

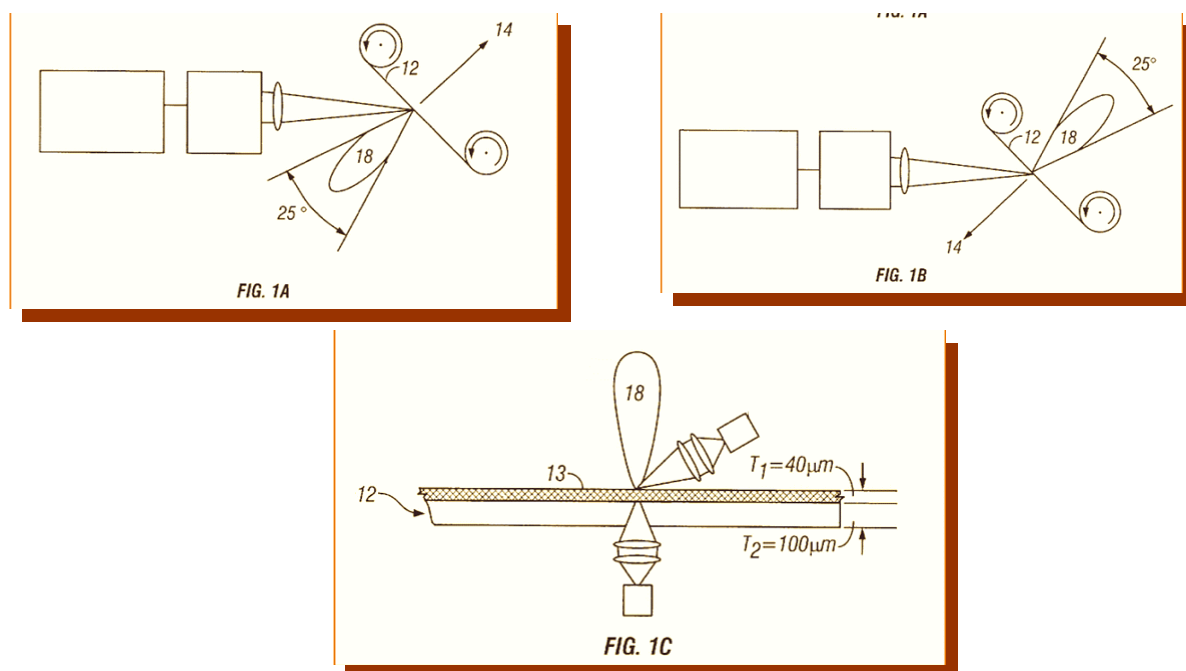


Рис. 11. Конструкция первого лазерно-плазменного двигателя Фиппса [22], основанного на мишени в виде прозрачной ленты 12 с нанесённым непрозрачным слоем 13. ЛПД работает в режиме на отражение (FIG. 1A) и на прострел (FIG. 1B) мишени. 18 – плазменный факел, 14 – направление вектора тяги.

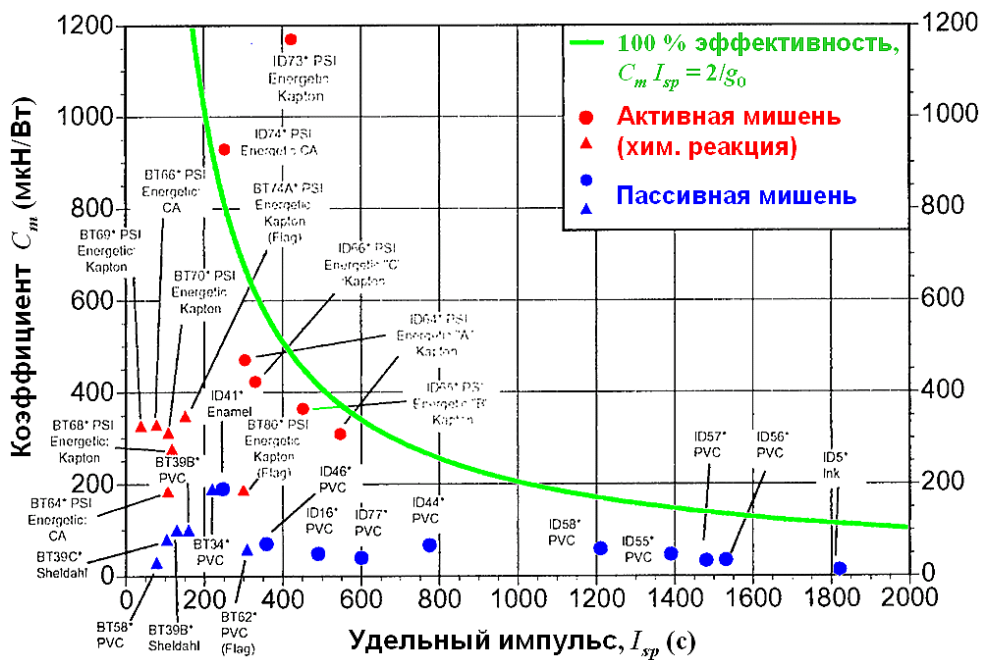


Рис. 12. Показатели эффективности ЛПД, реализованных [21] по схеме Фипса [20].

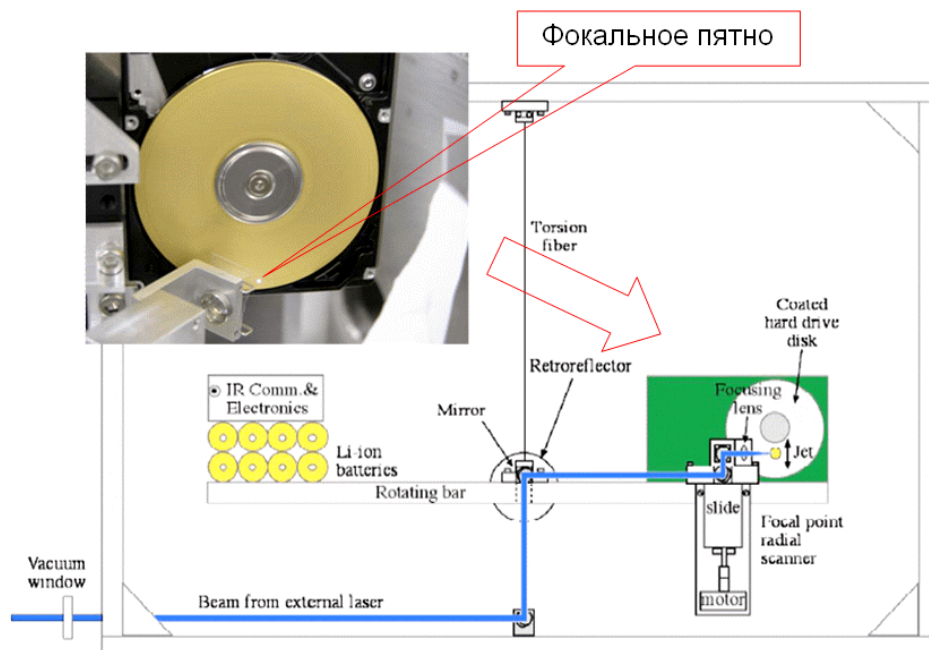


Рис. 13. Конструкция лазерно-плазменного двигателя Фипса с дисковой мишенью [20], используемого в стендовых испытаниях.

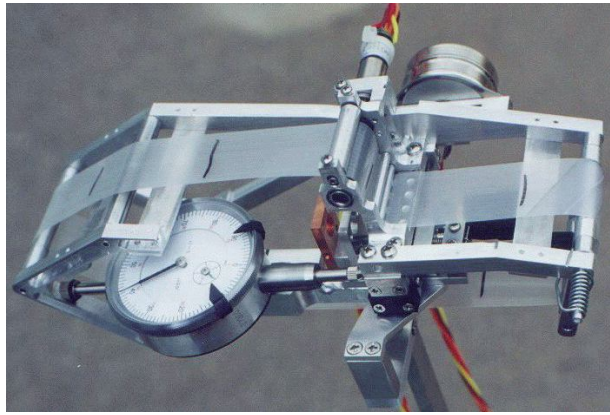
Измеренные параметры ЛПД [22] приведены в таблице 1.2. Обращает на себя внимание неточность данных, свидетельством которой является значение эффективности абляции η_{AB} , превышающее 100%. Тем не менее, приведённые в таблице 1.2 данные, как и данные рисунка 12, можно рассматривать как сравнительную информацию для анализа эффективности новых разрабатываемых ЛПД.

В качестве мишени была использована также и лента с лентопротяжным механизмом [21,23]. Пример реализации лентопротяжного ЛПД приведён на рисунке 14 для пассивного рабочего тела (а, ПВХ), так и химически активного (б), обеспечивающего η_{AB} выше 100% за счёт несамостоятельной химической реакции в мишени, инициируемой лазерным излучением.

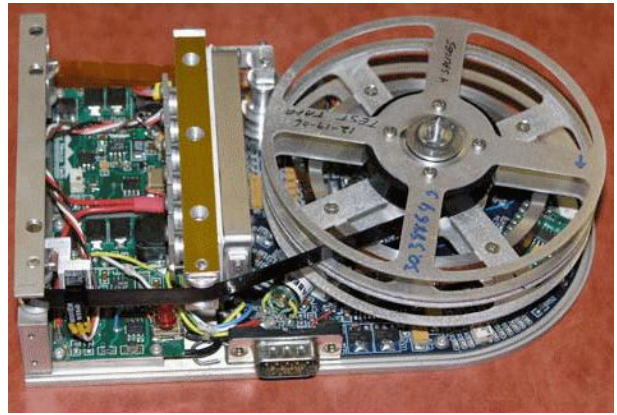
Эффективность ЛПД, работающего в плазменном режиме абляции, как отмечалось выше, определяется балансом между процессом испарения мишени и последующей ионизацией и нагревом испарённого вещества этим же лазерным излучением. В фазе нагрева плазмы энергия в мишень передаётся опосредованно плазмой. В результате воздействия плазмы на мишень осуществляется преобразование энергии лазерного излучения в кинетическую энергию тела. В этом сценарии нельзя беспредельно наращивать плотность мощности лазерного излучения, т.к. по мере нагрева плазмы факела всё бóльшая доля энергии будет тратиться на излучение плазмы. Таким образом, должен существовать оптимум в зависимости эффективности преобразования энергии S_m от плотности мощности на мишени, который наблюдался рядом исследователей [22,24] в области 10^{10} Вт/см² (рис. 15).

Таблица 1.2. Параметры ЛПД Фиппса с дисковой мишенью, измеренные на стенде [22].

Лазер	Quantel		Concepts Research	
Энергия в импульсе (мДж)	1-20		0.0132	
Частота следования имп. (Гц)	10		8000	
Диаметр фокального пятна на мишени (мкм)	20÷60		5÷20	
Длительность импульса (нс)	4.55		4.0	
Материал мишени	Au		Al	
Плотность энергии на мишени (Дж/см ²)	64	2080	35	11
Плотность мощности на мишени (Вт/см ²)	1.40E10	4.57E11	7.6E9	2.4E9
Тяга (мкН)	0.63	0.47	0.94	1.88
C_m (мкН/Вт)	68	7.2	111	32
Q (кДж/кг)	5.28E5	5.90E5	9.79E4	2.71E5
I_{sp} (с) = $C_m Q / g_0$	3660	212	1120	520
$\eta_{AB}(\%) = 100 C_m I_{sp} g_0 / 2$	120	0.75	61	8.1
v_i из TOF (см/с) по максимуму ионного тока	3.6E6	7.8E6	6.5E6	0.81E6
I_{sp} из v_i	3664	7905	6610	822



(a)



(б)

Рис. 14. Конструкции лазерно-плазменного двигателя Фипса с ленточными мишенями [21], пассивной (а) и активной (б).

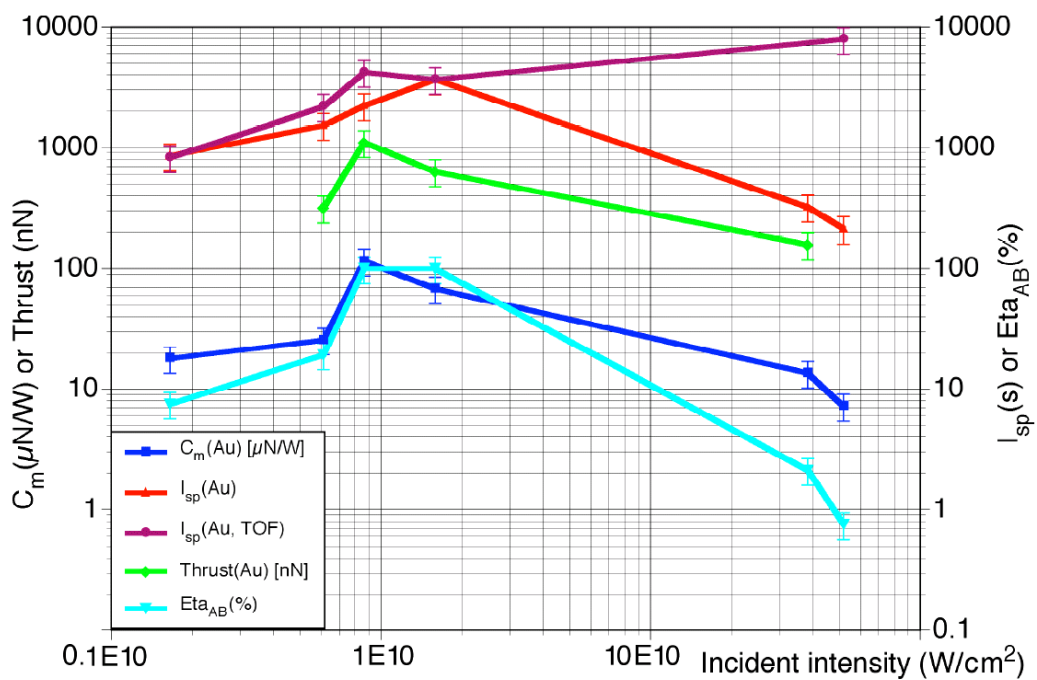


Рис. 15. Зависимость параметров ЛПД от плотности мощности лазерного излучения длительностью порядка 5 нс на мишени [22].

При этом, руководствуясь критерием достижения оптимальной плотности мощности на мишени, следует учитывать, что диаметр фокального пятна не должен быть много меньше радиуса разлёта плазменного факела за время

длительности импульса лазерного излучения, иначе значительная доля продуктов абляции не испытает требуемого нагрева лазерным излучением. Так, например, при длительности лазерного излучения 5 нс и скорости разлёта плазмы вдоль поверхности катода 12 км/с ожидаемый оптимальный радиус фокального пятна должен быть порядка 50 мкм.

5.1.2.4. Сравнение лазерно-плазменных двигателей с электрическими двигателями

Эффективность передачи электрической (электромагнитной) энергии в кинетическую энергию ускоряемого тела, а также скорость истечения рабочего тела, являются главными параметрами, определяющими область использования и перспективность ракетного двигателя. В этой связи представляется интересным сравнить различные типы двигателей в виде диапазона достигнутых параметров на зависимости C_m от I_{sp} . Такое сравнение представлено на рисунке 16 в виде условных (не точных) областей. Диаграмма построена на основе данных [21-23,25].

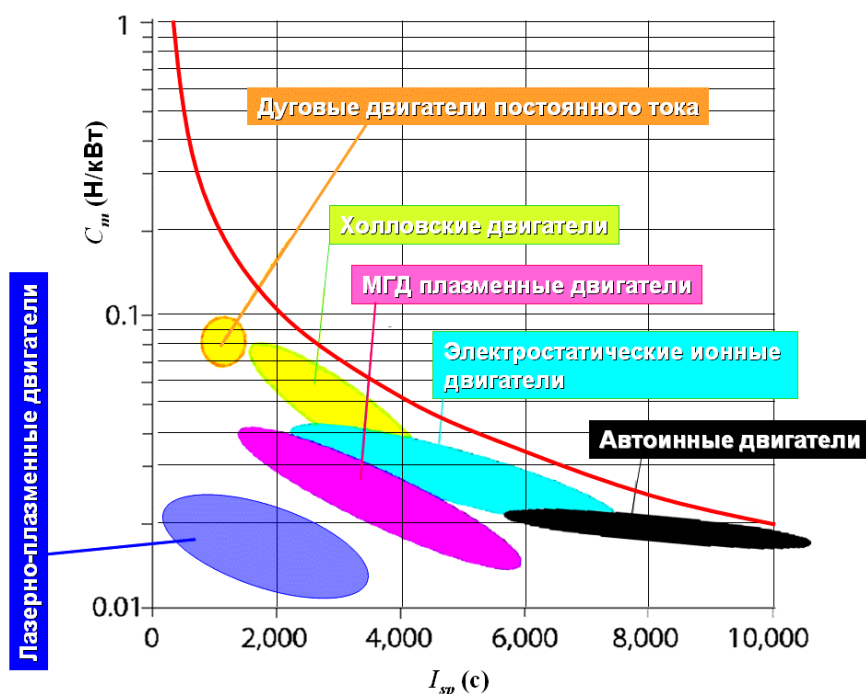


Рис. 16. Сравнение диапазонов параметров плазменных двигателей различных типов на основе литературных данных [21-23,25]. Сплошная линия соответствует функции $C_m I_{sp} = 2 / g_0$.

Из анализа диаграмм на рисунке 16 видно, что в настоящее время ЛПД значительно уступают двигателям других типов, особенно автоионным жидкометаллическим двигателям. Данная ситуация связана не с потенциальными ограничениями принципа построения ЛПД, а с недостаточной оптимизацией двигателя в целом, включая параметры лазерного излучения, оптической схемы и мишени. В частности, для наносекундного лазера, обеспечивающего плазменный режим абляции, должны быть выполнены следующие условия:

- 1) Плотность мощности на мишени должна соответствовать оптимальному значению порядка 10^{10} Вт/см².
- 2) Радиус фокального пятна r_f должен соответствовать условию $r_f \approx v_r \tau$, где v_r – скорость расширения плазменного факела в радиальном направлении, τ – длительность импульса лазерного излучения.
- 3) Доля капельной фракции должна быть минимизирована геометрией зоны абляции.

5.1.3. Выводы по разделу 5.1

5.1.3.1. Гибридный вакуумный выключатель

Объектом дальнейших исследований может быть комбинированное коммутационное устройство. Такое устройство должно содержать в своём составе механический коммутационный аппарат и полупроводниковый блок, соединённые параллельно. В качестве механических аппаратов предлагается использовать коммутационные аппараты, содержащие ВДК. Для разработки экспериментального ВКВ необходимо выполнение следующих работ:

1. Определение динамических ВАХ в переходные периоды.
2. Формулировка технических требования к полупроводниковому блоку ВКВ для сетей различного назначения:
 - распределительных сетей (кабельных, воздушно-кабельных);

- сетей собственных нужд электрических станций;
 - сетей передвижных электрических станций (объектов нефтегазового комплекса);
 - сетей крупных промышленных предприятий;
 - сетей насосно-фильтровальных станций.
3. Определение времени переходных периодов ВКВ на опытной установке.
 4. Определение требований к блоку управления ВКВ с управляемой коммутацией.
 5. Анализ полученных результатов и определение возможности разработки ВКВ с управляемой коммутацией при современном состоянии техники.
 6. Подготовка проекта технических требований к ВКВ.

5.1.3.2. Гибридный плазменный двигатель

Принципы работы электрореактивных двигателей и ЛПД позволяют их совмещение в едином комбинированном двигателе. Более подробно данный вопрос анализируется в разделах 5.2 и 5.5.

5.2. Разработка Технического задания на НИОКР по разработке и созданию экспериментального образца мишенно-соплового узла лазерно-плазменного микродвигателя малых космических аппаратов

Тема работы: «Разработка научно-технических основ и экспериментального образца комбинированного плазменного двигателя, использующего жидкий металл в качестве рабочего тела и сочетающего в себе различные принципы электрореактивных двигателей»

Цель работы: Повышение эффективности электрореактивных двигателей, основанных на принципах плазменных ускорителей, за счёт расширения диапазонов их параметров, в частности:

- 1) Снижение массы двигателей.
- 2) Повышение точности установки значения импульса, передаваемого ускоряемому телу.
- 3) Значительное снижение эрозии конструкционных и функциональных элементов, имеющих контакт с плазмой.

Необходимость выполнения предлагаемых работ

Актуальность проекта

Двигатель – сердце любого транспортного средства, включая космические аппараты. В этой связи научные исследования и разработки, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик двигателей, всегда будет задачей первостепенной важности.

Для ускорения и ориентации космических аппаратов в космосе одними из наиболее эффективных являются электрореактивные двигатели, реализующие принципы плазменно-ионных ускорителей.

Описание решаемых проблем, поставленной задачи и предлагаемых подходов к её решению

Проект направлен на поиск путей решения следующих проблем электрореактивных плазменно-ионных двигателей:

1. Повышение эффективности двигателей.
2. Повышение стабильности работы двигателя на малых тягах, что необходимо для более точного позиционирования космического аппарата.
3. Увеличение срока эксплуатации двигателей.

Данные проблемы предполагается решать в комплексе за счёт совмещения нескольких принципов ускорения ионов в рамках одного

двигателя. Объединяющим началом в концепции двигателя будет использование жидкого металла с относительно низкой температурой плавления (висмут, индий, галлий) в качестве вещества для рабочего тела. Концепция двигателя, на разработку которого направлены заявляемые исследования, является новой.

Для решения проблем предполагается реализация следующих подходов:

1) Снижение массы двигателя за счёт использования конденсированного вещества большой плотности (жидкий висмут, индий, галлий) в качестве вещества для рабочего тела, что исключает необходимость использования резервуара газа. Идея использования металла в качестве рабочего тела родилась давно (L.A. Gomilka, A.I. Zemskov, L.N. Lesnevskii, and A.D. Pavlov, "A study of the plasma pulsed accelerator with the metallic propellants", 24th IAF International Astronautical Conference, Baku, Azerbaidzhan SSR. Oct., 1973) и продолжает быть актуальной. Для практической реализации данного подхода жидкий металл имеет явное преимущество за счёт предельной простоты его доставки (капиллярные явления) в область генерации плазмы. Эффективность использования металла в качестве рабочего тела продемонстрирована, в частности, в экспериментах по лазерной абляции (работа S.A. Popov, A.N. Panchenko, A.V. Batrakov, F.N. Ljubchenko, V.V. Mataibaev. Experimental Study of the Laser Ablation Plasma Flow From the Liquid Ga-In Target // IEEE Trans. Plasma Sci.-2011.- vol. 39.- issue 6.- pp. 1412-1417, выполненная совместно ИСЭ СО РАН и ЦНИИмаш), в которых для восстановления поверхности мишени с частотами следования лазера в сотни герц не требовалось использования дополнительных мер, кроме действия капиллярных сил.

2) Повышение точности задания значения импульса, передаваемого ускоряемому телу, за счёт понижения порога минимальной тяги, что обеспечивается использованием дополнительного ускорителя ионов, основанного на полевой ионной эмиссии с поверхности жидкого металла.

При этом этот же ускоритель ионов может быть использован в качестве источника электронов для нейтрализации пучка при работе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов. Использование автоионной эмиссии в космических двигателях является перспективным направлением, поскольку именно эти двигатели являются рекордсменами по многим параметрам, включая удельный импульс (например: M. Tajmar, A. Genovese, W. Steiger. Indium FEEP Microthruster Experimental Characterization // AIAA Journal of Propulsion and Power.- 2004.- Vol. 20.- No. 2.- pp. 211-218). Новым в настоящем проекте является интегрирование данного ионного источника в комплексное устройство, а также его использование как в режиме ионной миссии, так и в режиме источника электронов для нейтрализации ионного пучка. В рамках комплексного устройства предполагается использование нескольких автоионных источников.

3) Значительное снижение эрозии электродов за счёт использования пористого материала, пропитанного рабочим телом, в качестве конструкционного материала. При этом в процессе эрозии происходит унос преимущественно жидкого металла, что позволяет сохранять геометрию конструкционных элементов. Одновременно конструкционные элементы играют роль дополнительных резервуаров рабочего тела. По сути, эрозия остаётся, но осуществляется за счёт уноса жидкого металла, и вместо изменения геометрии элементов происходит опорожнение внутренних полостей, заполненных жидким металлом. Данный принцип известен и используется в конструкции электродов электрореактивных двигателей (например: Polzin, Kurt A.; Markusic, Thomas E. Galium Electromagnetic (GEM) Thruster Concept and Design // Joint Propulsion Conference; 53rd JPM/2nd LPS/SP Joint Meeting; 11-13 Jul. 2005; 5-8 Dec. 2005; Tucson, AZ; Monterey, CA). Новым в концепции двигателя будет использование пористого металла, пропитанного жидким металлом (рабочим телом), не только при изготовлении электродов, но и внутренних стенок генератора

плазмы. Данная мера позволит не только контролировать эрозию поверхности, но и снижать эрозионные потери за счёт абсорбции продуктов эрозии внутренними стенками.

Краткая характеристика работы

Объектом исследования НИР является комбинированный источник ионов, извлекаемых из плазмы и ускоряемых для создания реактивной тяги в вакууме. При этом веществом, используемым для генерации плазмы, является жидкий металл.

В процессе выполнения НИР будут решены следующие проблемы:

- 1) Снижение массы двигателя за счёт использования конденсированного вещества большой плотности (жидкий висмут, индий и/или галлий) в качестве рабочего тела, что исключает необходимость использования резервуара газа.
- 2) Повышение точности задания значения импульса, передаваемого ускоряемому телу, за счёт понижения порога минимальной тяги, что обеспечивается использованием дополнительного ускорителя ионов, основанного на полевой ионной эмиссии с поверхности жидкого металла. При этом этот же ускоритель ионов может быть использован в качестве источника электронов для нейтрализации пучка при работе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов.
- 3) Значительное снижение эрозии электродов за счёт использования пористого материала, пропитанного рабочим телом, в качестве конструкционного материала. При этом в процессе эрозии происходит унос преимущественно жидкого металла, что позволяет сохранять геометрию конструкционных элементов. Одновременно конструкционные элементы играют роль дополнительных резервуаров

рабочего тела. По сути, эрозия остаётся, но осуществляется за счёт уноса жидкого металла, и вместо изменения геометрии элементов происходит опорожнение внутренних полостей, заполненных жидким металлом.

Решение данных проблем позволит существенно улучшить эксплуатационные характеристики электрореактивных двигателей.

Характеристика ожидаемого народно-хозяйственного эффекта

В результате выполнения планируемых исследований будут найдены подходы, позволяющие реализовать принцип совмещения различных методов ускорения ионов плазмы в одном устройстве (двигателе), основанном на использовании жидкого металла в качестве вещества для генерации металлической плазмы (рабочего тела). Планируется постановка ОКР на разработку технической документации и опытного образца нового двигателя с существенно улучшенными характеристиками и расширенным диапазоном рабочих параметров.

Планируемые научно-технические результаты

Описание планируемых результатов

1. Способ генерации металлической плазмы за счёт импульсно-периодического горения электрического разряда в коротком вакуумном промежутке, образованном пористыми металлическими электродами, пропитанными жидким металлом.
2. Способ совмещения различных принципов ускорения ионов плазмы в едином электрореактивном двигателе.
2. Лабораторный образец электрореактивного двигателя и результаты его испытания в условиях лабораторного вакуума.

Предпосылки для успешного завершения работ (реальность получения ожидаемого научно-технического результата)

Для выполнения проекта предполагается создание консорциума в составе:

1. ИСЭ СО РАН, г. Томск
2. ЦНИИмаш, г. Королёв.
3. НИ ТПУ, г. Томск

Приборные базы:

1. Томский региональный центр коллективного пользования ТНЦ СО РАН <http://www.ckp-rf.ru/ckp/3058/>
2. Центр коллективного пользования Учреждения российской академии наук Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН <http://www.ckp-rf.ru/ckp/76884/>
3. Научно-аналитический центр <http://www.ckp-rf.ru/ckp/3139/>

Описание потенциальных потребителей научного результата

ГК Роскосмос

Какие организации потенциально могут выполнить предлагаемые работы

Для выполнения проекта предполагается создание консорциума в составе:

4. ИСЭ СО РАН, г. Томск
5. ЦНИИмаш, г. Королёв.
6. НИ ТПУ, г. Томск

5.3. Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс

Программы внедрения результатов НИР по ГК № 14.740.11.0317 по теме «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» в образовательный процесс

Результаты данной НИР будут внедрены в образовательный процесс подготовки специалистов высшей категории в Институте физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета (ИФВТ НИ ТПУ). Кроме того, результаты данной НИР могут быть использованы с целью повышения квалификации специалистов, выполняющих научные и инженерные разработки в области генерации и использовании низкотемпературной плазмы в вакууме.

Программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс:

	Форма внедрения	Тип внедрения	Место внедрения
1.	Образовательная программа по направлению подготовки магистров 210100 «Электроника и наноэлектроника», по профилю подготовки «Физическая электроника», по курсу учебной дисциплины «Электрическая изоляция и разряд в вакууме»	Дополнение в уже существующий курс в виде: 1. Новый раздел по теме «процессы в дугогасительной камере при переходе тока сильноточной вакуумной дуги через ноль» (2 ч) в курс лекций по дисциплине. 2. Лабораторная работа «Многозондовая диагностика низкотемпературной плазмы в вакуумном	Кафедра сильноточной электроники ИФВТ НИ ТПУ

		сетевом выключателе» (4 ч).	
2.	Образовательная программа по направлению подготовки магистров 210100 «Электроника и наноэлектроника», по профилю подготовки «Физическая электроника», по курсу учебной дисциплины «Физика плазмы»	Дополнение в уже существующий курс в виде: 1. Лабораторная работа «Многозондовая диагностика низкотемпературной плазмы при лазерной абляции мишени из легкоплавкого металла» (4 ч).	Кафедра сильноточной электроники ИФВТ НИ ТПУ
3.	Образовательная программа по направлению подготовки магистров 210100 «Электроника и наноэлектроника», по профилю подготовки «Физическая электроника», по	Дополнение в уже существующий курс в виде: 1. Лабораторная работа «Многозондовая диагностика низкотемпературной плазмы газовых разрядов» (4 ч).	Кафедра сильноточной электроники ИФВТ НИ ТПУ

курсу учебной дисциплины «Физика газового разряда»		
--	--	--

При внедрении результатов НИР были использованы следующие методические материалы, разработанные в рамках данной НИР:

1. Батраков А.В. Физические основы электрической изоляции и разряда в вакууме: учебное пособие / А.В. Батраков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 125 с. (издано).
2. Батраков А.В. Многозондовая диагностика низкотемпературной плазмы в вакууме: Методические указания к лабораторной работе / А.В. Батраков. – ТПУ, 2012. – 23 с. (подготовлено к изданию).

Программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс рассмотрена и одобрена на Совете ИФВТ НИ ТПУ.

4.4. Разработка методических указания к лабораторной работе по теме «Многозондовая диагностика низкотемпературной плазмы в вакууме» для подготовки магистрантов по программе «Физическая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете

Методические указания к лабораторным работам являются составной частью курса «Электрическая изоляция и разряд в вакууме» программы 210100 «Микроволновая электроника» по профилю подготовки «Физическая электроника», преподаваемого магистрантам на кафедре сильноточной

электроники ИФВТ НИ ТПУ. Цель пособия заключается в формировании у студентов и аспирантов практических навыков диагностики плазмы вакуумных разрядов с использованием совокупности нескольких зондов Ленгмюра, используемых одновременно с целью измерения пространственного распределения концентрации плазмы. Учебное пособие излагает методику проведения экспериментов по зондовой диагностике и позволяет в совокупности с соответствующим оборудованием проводить эксперименты по многозондовой диагностике плазмы. В пособии кратко описываются теоретические основы методов диагностики и даются практические рекомендации по реализации методов. Объем пособия - 23 стр., 8 рисунков и 31 формула. В конце теоретической и практической части пособия приводятся контрольные вопросы и задания.

Теоретическая часть

Введение

Зондовый метод диагностики плазмы разработан И. Ленгмюром в 20-х годах 20-го века и основан на анализе вольтамперных характеристик проводника, находящегося под потенциалом в плазме. Электрический ток на зонд зависит от потенциала зонда и определяется эмиссионной способностью окружающей плазмы. В этой связи эмиссия заряженных частиц из плазмы должна быть рассмотрена в первую очередь.

Эмиссия электронов из плазмы

Потенциальная энергия электронов в плазме определяется их кулоновским взаимодействием с ионами:

$$w_{\text{пот}} = \frac{kT_e}{6V_D n_e}, \quad (1)$$

где n_e – концентрация электронов в плазме, T_e – температура электронов, L_D – длина Дебая, V_D – объем радиусом L_D .

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k T_e}{e^2 n_e}} \quad (2)$$

Параметры плазмы вакуумного разряда таковы, что $V_D n_e \gg 1$. Тогда, согласно (1), $w_{\text{пот}} \ll w_{\text{кин}} = 3kT_e/2$. В такой ситуации плазменное образование беспрепятственно расширяется, пока не заполнит весь объём, ограниченный стенками вакуумной камеры или полости, где осуществляется генерация плазмы.

В условиях вакуумного разряда граница плазмы находится в электрическом поле, ускоряющем электроны и тормозящем ионы (рис. 17). При этом формируется граница эмиссии электронов. Если удаётся остановить границу плазмы, то её положение определяется из соотношения равенства давления внешнего электрического поля кинетическому давлению плазмы (СГС):

$$nkT_e = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \quad (3)$$

Таким образом, эмиссионная граница представляет собой поверхность плазмы, на которой реализуется равновесие между давлением внешнего электрического поля на ионы плазмы (тяжелые частицы) и кинетическим давлением плазмы. Если равновесие не достигается, граница движется.

Отбор электронов производится с границы плазмы в ускоряющий промежуток по закону *Чайльда–Ленгмюра*. Между границей плазмы и анодом образуется слой отрицательного пространственного заряда, на котором падает ускоряющее напряжение. Ионы плазмы, подходя из объема плазмы к эмиссионной поверхности, попадают в тормозящее электрическое поле (рис. 1). Распределение концентрации ионов в тормозящем поле ускоряющего промежутка запишется в виде (формула *Больцмана*)

$$n_i(x) = n_{i_0} \exp\left[-\frac{eU(x)}{kT_i}\right]. \quad (4)$$

Распределение потенциала в ускоряющем промежутке $U(x)$ решается уравнение Пуассона. В одномерном случае решение имеет вид:

$$U(x) = \left[\frac{9}{4\epsilon_0} j_{чл} \left(\frac{m}{2e} \right)^{1/2} \right]^{2/3} x^{4/3}, \quad (5)$$

где ток $j_{чл}$ находится из граничного условия на аноде $V(d)=U_a$ и описывается формулой *Чайльда–Ленгмюра* для тока вакуумного диода, ограниченного пространственным зарядом электронов:

$$j_{чл} = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U_a^{3/2}}{d^2}. \quad (6)$$

Подстановкой (6) в (5) получаем:

$$U(x) = U_{\text{уск}} \left(\frac{x}{d} \right)^{4/3}, \quad (7)$$

где d – длина ускоряющего промежутка между границей плазмы и анодом. Из (4) и (7) следует, что уменьшение концентрации ионов в e раз происходит на расстоянии:

$$x_0 = d \left(\frac{kT_i}{eU_{\text{уск}}} \right)^{3/4}. \quad (8)$$

Подставив характерные значения $T_i \approx 10^3$ К, $U_{\text{уск}} = 10^4$ В, $d = 1$ см, получим $x_0 \approx 2 \cdot 10^{-3}$ см, т.е. на практике как правило $x_0 \ll d$.

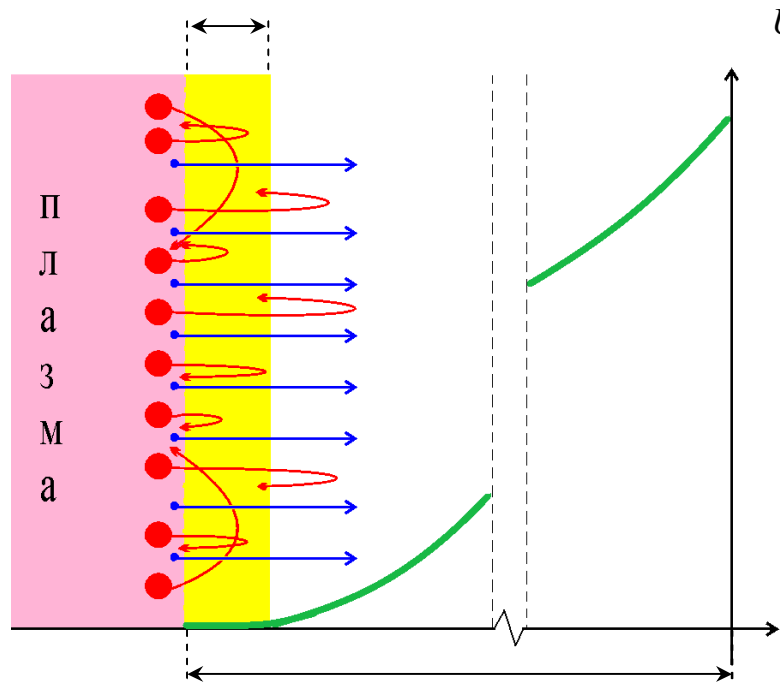


Рис. 17. Распределение потенциала на плазменной границе.

Граница эмиссии электронов из плазмы представляет собой переходный слой толщиной порядка x_0 от квазинейтральной плазмы к области объемного заряда электронов. Положение плазменной эмитирующей поверхности и ее устойчивость зависит от ускоряющего напряжения, плотности плазмы и температуры ее компонентов. Эмиссия электронов из плазмы в ускоряющий промежуток через плазменную границу происходит в результате теплового движения электронов в плазме. Этим электронная эмиссия из плазмы в значительной степени подобна термоэлектронной эмиссии из твердых тел. С другой стороны, в отличие от ТЭЭ из твердого тела, где эмитируются электроны высокоэнергетического «хвоста» распределения *Максвелла*, в эмиссии из плазмы участвуют все электроны. В этом состоит принципиальное отличие плазменных катодов от твердотельных катодов. Кроме того, в силу подвижности плазменной границы, виртуальный катод при стационарной эмиссии из плазмы не

формируется, т.е. при медленном росте напряжения на плазменной эмиссионной границе $E = 0$.

В термодинамическом отношении плазма ведет себя как идеальный газ, и электроны плазмы подчиняются статистике *Максвелла–Больцмана*. Тогда для эмиссии электронов из плазмы можно воспользоваться выражением (18), из которого следует:

$$j_e = en_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m} \right)^{1/2}, \text{ или} \quad (9)$$

$$j_e = 2,5 \cdot 10^{-14} n_e \sqrt{T_e}. \quad (10)$$

В формуле (10) $[n_e] = \text{см}^{-3}$, $[T_e] = \text{К}$, $[j_e] = \text{А/см}^2$.

Остается невыясненным вопрос, на каком расстоянии от анода $d_{\text{эфф}}$ окажется положение плазменной границы в случае выполнения условия (3). Принимая во внимание $j_e = j_{3/2}$, где $j_{3/2}$ – плотность тока, определяемая законом *Чайльда–Ленгмюра* (6), , получаем

$$d_{\text{эфф}} = \frac{\sqrt{2}}{3\pi^{1/4}} \sqrt{\frac{U_{\text{уск}}^{3/2}}{n_e (ekT_e)^{1/2}}}. \quad (11)$$

Таким образом, положение границы эмиссии является функцией ускоряющего напряжения, концентрации и температуры электронов плазмы. В зависимости от параметров плазмы и приложенного напряжения положение плазменной границы может изменяться.

Эмиссия ионов из плазмы

Между плазмой и катодом существует разность потенциалов U_c , равная катодному падению потенциала в разряде и играющая роль ускоряющего напряжения для ионов. В глубине плазма квазинейтральна, т.е. $n_i \approx n_e = n_0$,

но в катодном слое $n_i > n_e$. В рассматриваемой ситуации существует определённое ограничение на скорость ионов, эмитируемых из плазмы. Обычно в разрядной плазме $T_i \ll T_e$, т.е. ускоряемые к катоду ионы практически не имеют тепловых скоростей. Тогда в области разделения зарядов (плазменная граница) им необходимо придать какую-то конечную минимальную начальную скорость v_0 . В противном случае их скорость на границе была бы равна нулю, а плотность n_i стала бы равной бесконечности, поскольку плотность ионного тока всегда бывает конечной, $j_i = en_i v_0$.

Скорость v_0 можно найти из решения уравнения Пуассона:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -4\pi e[n_i(x) - n_e(x)]. \quad (12)$$

Чтобы решить это уравнение, необходимо найти зависимости $n_i(x)$ и $n_e(x)$. Электроны распределены по энергиям согласно распределению *Больцмана*, тогда

$$n_e(x) = n_0 \exp\left[-\frac{e(U_c - U(x))}{kT_e}\right]. \quad (13)$$

Ионы же, не имея тепловых скоростей, будут просто ускоряться к катоду, и

$$n_i(x) = n_0 \left(1 + \frac{2e(U_c - U(x))}{m_i v_0^2}\right)^{-1/2}. \quad (14)$$

Формулы (13) и (14) подставляем в (12) и записываем уравнение Пуассона в виде:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -4\pi e n_0 \left[\left(1 + \frac{2e(U_c - U(x))}{m_i v_0^2}\right)^{-1/2} - \exp\left[-\frac{e(U(x) - U_c)}{kT_e}\right] \right]. \quad (15)$$

Для нахождения v_0 можно рассматривать только ту область, в которой $U(x)$ мало, тогда

$$\begin{cases} \frac{e(U_c - U(x))}{kT_e} \ll 1 \\ \frac{2e(U_c - U(x))}{m_i v_0^2} \ll 1 \end{cases},$$

и выражения (13) и (14) можно разложить в ряд:

$$\begin{cases} n_e(x) \approx n_0 \left(1 - \frac{e(U_c - U(x))}{T_e} + \dots \right) \\ n_i(x) \approx n_0 \left(1 - \frac{e(U_c - U(x))}{m_i v_0^2} + \dots \right). \end{cases}$$

Опять же, в силу малости $U(x)$ в рассматриваемой области, можно ограничиться первыми членами разложения n_e и n_i . Тогда уравнение Пуассона преобразуется в вид:

$$\frac{d^2(U_c - U(x))}{dx^2} \approx \frac{1}{L_D^2} \left(1 - \frac{kT_e}{m_i v_0^2} \right) (U_c - U(x)). \quad (16)$$

В зависимости от знака в правой части уравнения (16) возможны решения:

$$\begin{cases} \left(1 - \frac{kT_e}{m_i v_0^2} \right) < 0 \Rightarrow \text{осциллирующее решение,} \\ \left(1 - \frac{kT_e}{m_i v_0^2} \right) \geq 0 \Rightarrow \text{экспоненциальное решение.} \end{cases} \quad (17)$$

Очевидно, что в стационарной задаче первое решение лишено физического смысла. Остаётся второе решение, из которого следует условие *Бома* (1949 г.):

$$v_0 \geq \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} . \quad (18)$$

Это условие является критерием образования слоя пространственного заряда ионов при отрицательном потенциале катода относительно плазмы. Согласно критерию *Бома* ионы должны пролетать границу слоя с энергией, превышающей $kT_e/2$, которая много больше их тепловой энергии. Физически это означает, что экранирование внешнего поля слоем толщиной $\sim x_0$ у границы эмиссии ионов не является полным. Падение потенциала величиной порядка kT_e должно проникать в область нейтральной плазмы, чтобы ускорить ионы до этой энергии к тому моменту, когда они достигнут границы эмиссии, где уже нарушается условие квазинейтральности.

Плотность ионного тока $j_i = en_i v_0$. С учётом (18) ток *Бома*:

$$j_i \geq en_0 \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{1/2} . \quad (19)$$

Сравнивая (9) и (19), следует отметить, что ионная плотность тока значительно ниже электронной. В случае использования плазменного эмиттера электронов площадь внутренней стенки генератора плазмы, через которую замыкается ток внешней цепи, должна быть много больше площади эмиссионного отверстия.

Из решения уравнения (15) также следует выражение для толщины катодного слоя под плазмой:

$$x_{CL} = \frac{\sqrt{2}}{3} L_D \left(\frac{2eU_c}{kT_e} \right)^{3/4} . \quad (20)$$

Вольтамперная характеристика зонда

Наиболее простым и доступным для исследования является одиночный зонд. Его вольтамперная характеристика схематически представлена на рис. 18. 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), 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

$$\frac{\partial \ln I}{\partial \phi_B} = \frac{e}{k T_e}, \quad (21)$$

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

$$I_{Se} = \frac{1}{4} A_p e n_e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}, \quad (22)$$

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

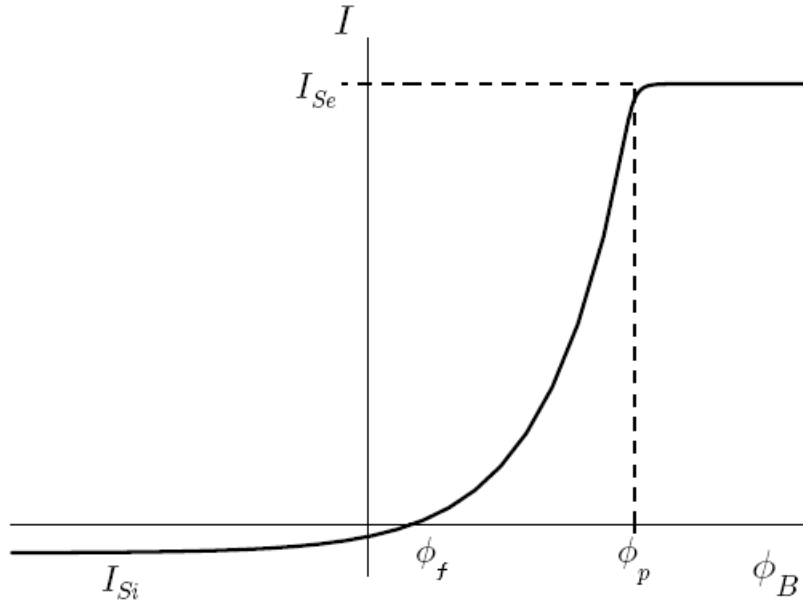


Рис. 18. Типичная вольтамперная характеристика одиночного зонда, где I – ток на зонд и ϕ_B – потенциал зонда.

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

$$\tau_m \approx 2\pi \sqrt{\frac{m_i \varepsilon_0}{n Z^2 e^2}}, \quad (23)$$

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 (22), должен быть тоньше характерного размера зонда.

Контрольные вопросы

1. Возможно ли провисание потенциала в вакуумном диоде при стационарной эмиссии электронов из плазменного эмиттера?
2. Которая из величин, температура электронов или их концентрация, оказывает большее влияние на плотность тока электронного плазменного эмиттера?
3. Температура какой компоненты плазмы, электронной или ионной, определяет плотность тока эмиссии ионов из плазмы?
4. Как соотносится кинетическая и потенциальная энергия электронов в плазме?

Задания

1. Электрический разряд в парах меди горит в режиме, обеспечивающем долю ионного тока, равную 10%, при среднем зарядовом числе ионов меди, равном 2. Оценить отношение площади внутренней поверхности разрядной ячейки к площади эмиссионного отверстия плазменного эмиттера электронов, в котором горит данный разряд.
2. Какова максимальная концентрация электронов в плазме разряда в парах цезия при среднем зарядовом числе ионов, равном 1, в случае измерений, выполненных зондом, питаемом переменным напряжением частотой 1 кГц.

Практическая часть. Оборудование и методика проведения эксперимента

Конструкция зондов

Для реализации многозондовой диагностики зонды должны быть собраны на общем манипуляторе, обеспечивающем их перемещение и

подключение в систему питания зондов и регистрации токов из плазмы на зонды. Для достижения последнего условия манипулятор должен содержать количество герметичных электрических вводов, равное количеству зондов. При этом в качестве контакта «земля» может быть использован фланец, на котором собраны зонды, если корпус экспериментальной вакуумной камеры не подвержен изменению его потенциала в процессе измерений. В противном случае манипулятор должен быть изолирован от камеры с использованием проходного офланцованного изолятора, способного выдерживать ожидаемый уровень смещения потенциала камеры относительно потенциала земли.

Реализация сборки из 5-ти зондов, образующих линейку, представлена на рис. 19. Каждый из зондов линейки представляет собой цилиндрический зонд Ленгмюра. Собирающая часть зонда ограничена керамической трубкой, одетой на проводник из тугоплавкого металла, например, молибдена. Собирающая поверхность зонда предварительно очищается электрохимически. С использованием электрохимической очистки достигается также округление торца зонда.

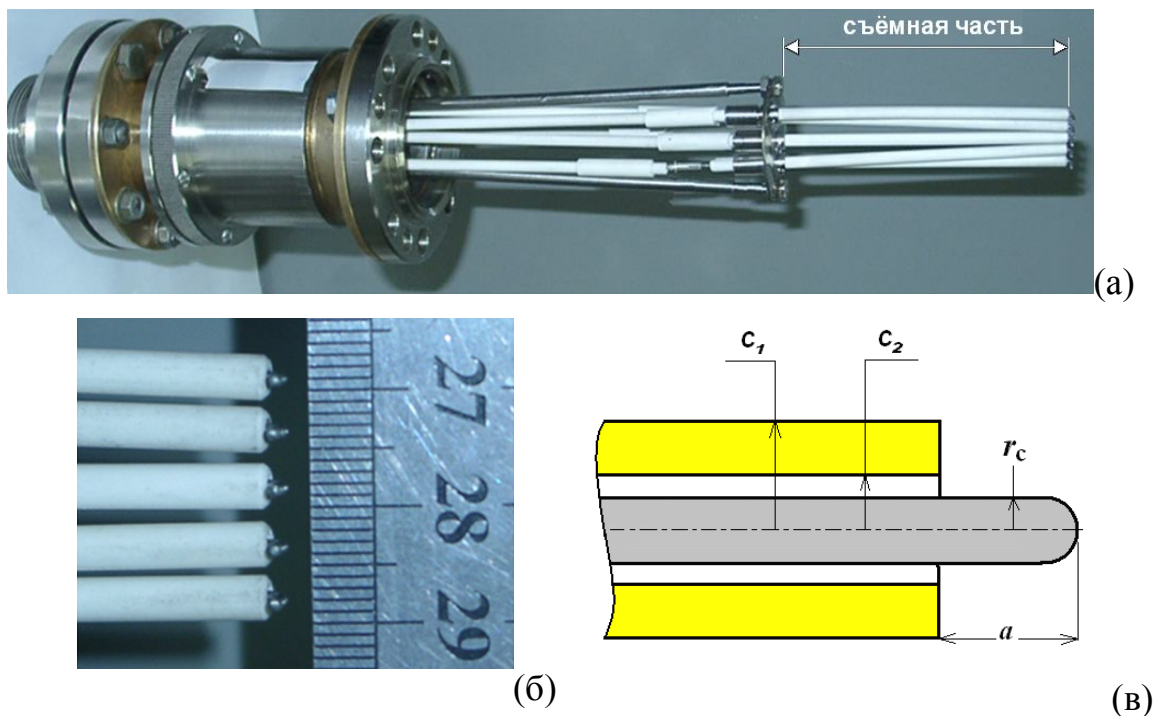


Рис. 19. Конструкция сборки зондов (а, б) и отдельного зонда (в).

Электропитание зондов

При высокой концентрации окружающей плазмы оправдано использование двойного зонда. В такой системе один из зондов всегда находится в режиме ионного тока насыщения. В случае низкой концентрации исследуемой плазмы ионный ток насыщения может оказаться на уровне шумов, генерируемых при работе установки, и оправданным становится использование одиночного зонда в режиме электронного тока насыщения.

Для питания зондов использовались схемы, представленные на рис. 20. На одиночные зонды подаются одновременно одинаковые прямоугольные импульсы напряжения положительной полярности амплитудой до 60 В и длительностью 200 мкс. О динамике параметров плазмы можно получить информацию по динамике тока на зонды.

Питание двойного зонда осуществляется переменным напряжением амплитудой до 60 В и частотой, регулируемой в пределах от 100 до 400 кГц. Использование переменного напряжения также позволяет получать данные о параметрах плазмы в динамике.

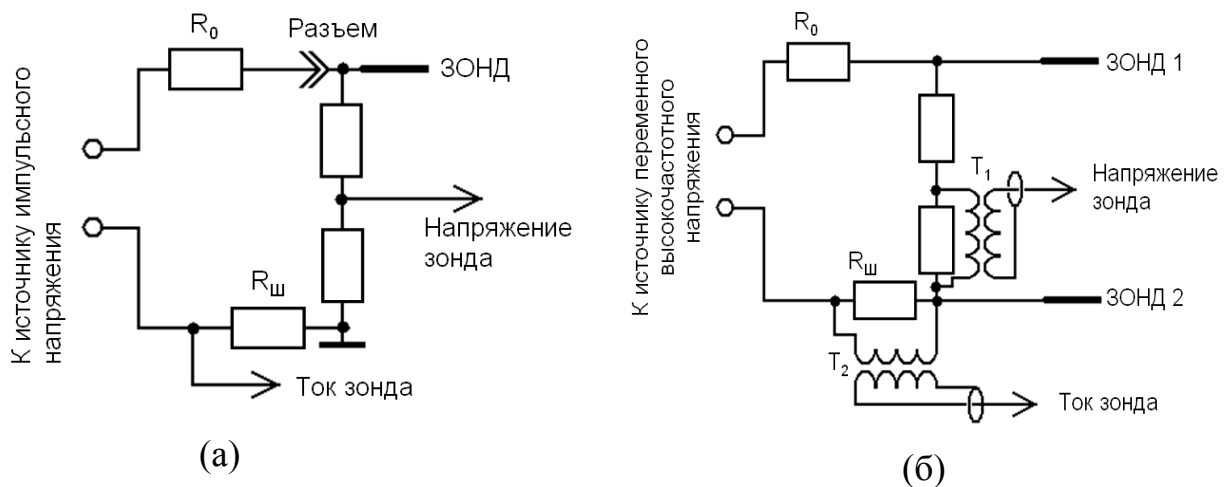


Рис. 20. Принципиальные электрические схемы питания одиночного (а) и двойного (б) зондов. R_0 – ограничивающий ток резистор, $R_{ш}$ – шунт, T_1 , T_2 – трансформаторы напряжения.

Сигналы от зондов регистрируются многоканальным осциллографом с полосой пропускания выше 10 МГц. Вместе с током регистрируется напряжение на зонде. Типичный набор осциллограмм двойного зонда

представлен на рис. 21. В качестве примера использования взят вакуумный дуговой разряд. Хорошо видна корреляция тока зонда и тока дуги. По мере падения тока дуги концентрация плазмы падает настолько, что ток, соответствующий ионному току насыщения, близок к нулю.

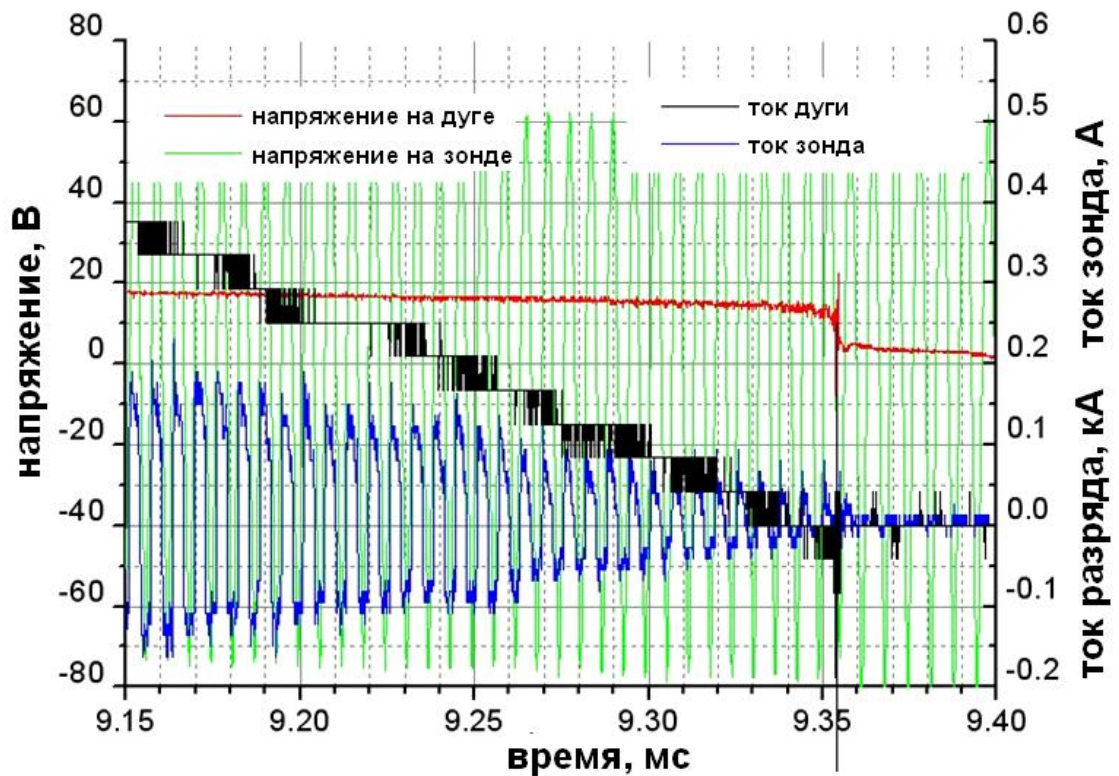


Рис. 21. Типичный набор осциллограмм напряжения и тока двойного зонда.

Типичный набор осциллограмм линейки одиночных зондов в момент времени, соответствующий нулю тока дуги, когда ионный ток насыщения на зонды становится ниже порога регистрации, представлен на рис. 22. Токи на зонд экспоненциально падают и исчезают лишь через 50 мкс после обрыва дуги.

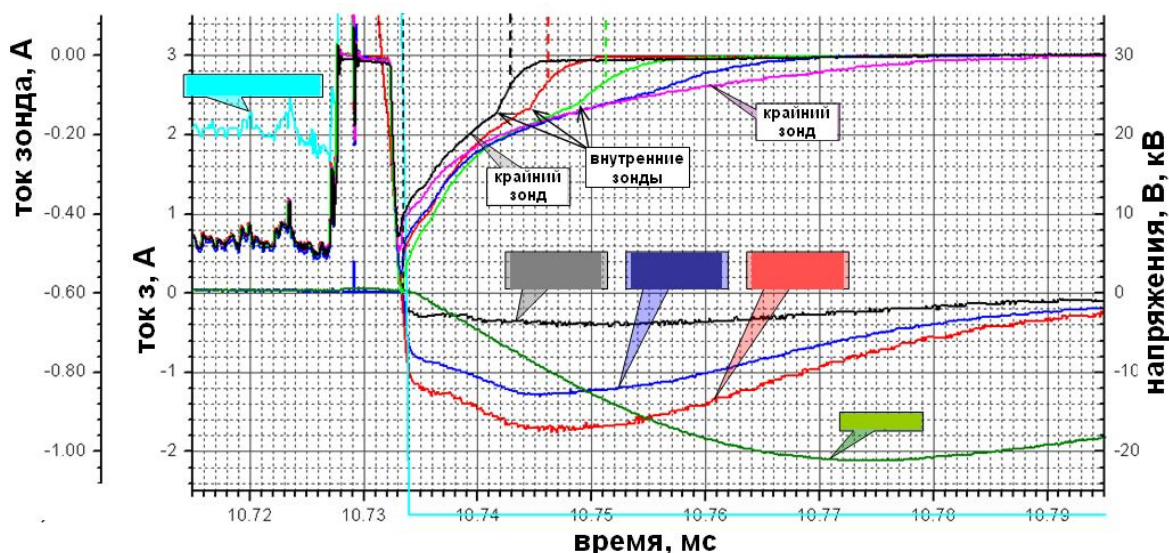


Рис. 22. Типичный набор осциллограмм тока двойного зонда.
Напряжение постоянное и равно +50 В.

Математическая обработка вольтамперных характеристик зондов
Вольтамперные характеристики двойного зонда

Электронная температура плазмы реконструируется путем подгонки вольтамперной характеристикит зонда выражением:

$$i_p(V) = i_{is} \operatorname{th} \frac{e(V - \Delta V)}{2kT_e} \quad (24)$$

где T_e – электронная температура плазмы, определяющая наклон кривой в переходной области, i_{es} – ионный ток насыщения, V – напряжение и ΔV – разница в потенциалах плазмы в окрестности зондов. Для уменьшения ошибки вычисления проводятся по пяти–десяти периодам. Пример обработки вольтамперных характеристик приведён на рис. 23. Характеристики на росте и на падении напряжения подобны, но отличаются смещением напряжения, что свидетельствует об инерционности плазмы в формировании слоя вокруг зонда. Полученные значения температуры несколько отличаются друг от друга, и рекомендуется использовать среднее арифметическое в качестве искомой величины.

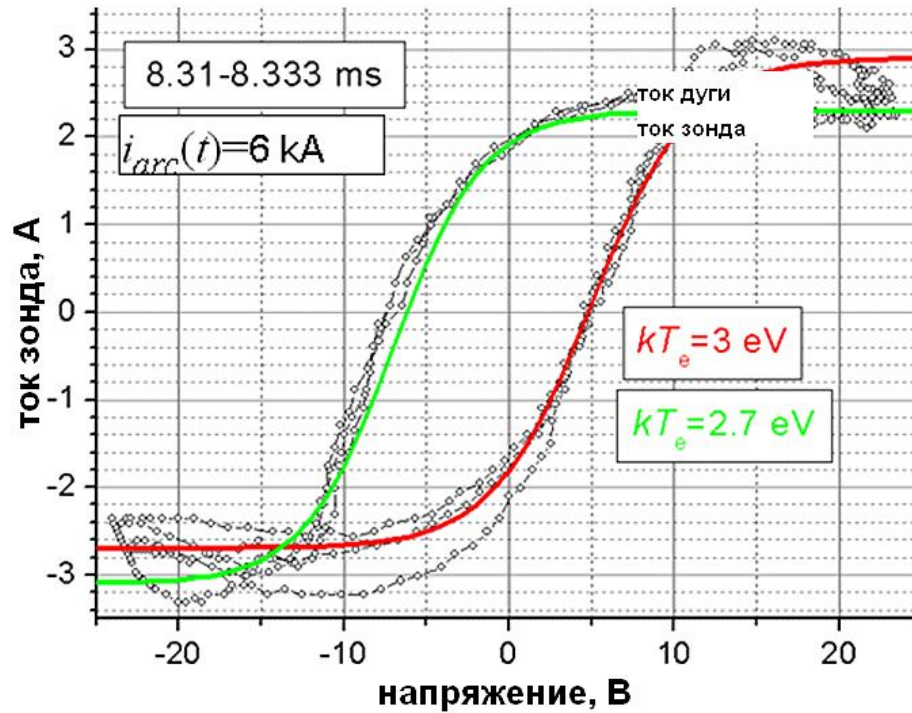


Рис. 23. Обработка вольтамперных характеристик двойного зонда.

Для восстановления концентрации плазмы, исходя из величины ионного тока насыщения, необходимо знать функцию распределения ионов по скоростям. Данный вопрос не является тривиальным. С одной стороны, известно, что ионы в потоке катодной плазмы дуги имеют направленную компоненту скорости $v_d \sim 10^6$ см/с, намного превосходящую тепловые скорости и даже Бомовскую скорость ионов в окрестностях отрицательного зонда. В этом случае ток на зонд будет составлять величину

$$i_{is} = i_{dir} = S_{cs} e \langle Z \rangle n_i v_d = S_{cs} e n_e v_d, \quad (25)$$

где площадь собирающей поверхности зонда в плазменном потоке представляет собой площадь проекции зонда в направлении катода

В этом случае электронная концентрация плазмы

$$n_e = i_{is} / (S_{cs} \cdot e v_d). \quad (26)$$

С другой стороны, необходимо учитывать взаимодействия потока ионов катодной плазмы с плотным нейтральным паром материала электродов в разрядном промежутке. В частности, в ряду ионно-атомных взаимодействий наибольшим сечением обладает процесс резонансной перезарядки. В результате таких взаимодействий в плазме появится значительная доля ионов с энергиями, характерными для паров (с Максвелловским распределением, $kT_i \leq 1$ eV).

В этом случае ионный ток насыщения на отрицательный зонд и концентрация плазмы связаны между собой формулой Бома:

$$i_{is} = i_B = 0.4 S_{\text{probe}} e n_e (2kT_e/M_i)^{1/2}, \quad (27)$$

в которой собирающей поверхностью является полная поверхность зонда S_{probe} . Подставляя измеренную электронную температуру kT_e , получаем для восстановления концентрации плазмы выражение

$$n_e = i_{is} / (0.4 S_{\text{probe}} e (2kT_e/M_i)^{1/2}). \quad (28)$$

В реальности функция распределения ионов по скоростям в плазме представляет собой некоторую комбинацию рассмотренных крайних случаев, причем, доля низкоэнергетических ионов должна возрастать с ростом давления нейтральных паров и уменьшении тока катодных пятен. Задолго до нуля тока необходимо использовать для восстановления плотности плазмы скорее выражение (26), чем (28).

Вольтамперные характеристики одиночного зонда

Регистрация электронного тока насыщения на зонд позволяет восстановить динамику изменения концентрации плазмы в окрестности зонда вблизи нуля тока. Электронная концентрация плазмы в окрестности зонда

$$n_e(t) = \frac{4j_e(t)}{ev_{eT}}, \quad (29)$$

где тепловая скорость электронов

$$v_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}, \quad (30)$$

и плотность эмиссионного электронного тока из плазмы

$$j_e(t) = i_p(t) / S_e(t), \quad (31)$$

где $i_p(t)$ – ток на зонд, S_e – площадь эмиссионной границы квазинейтральной плазмы вокруг зонда.

Пример восстановленной концентрации плазмы и границы слоя вокруг зондов представлен на рис. 24.

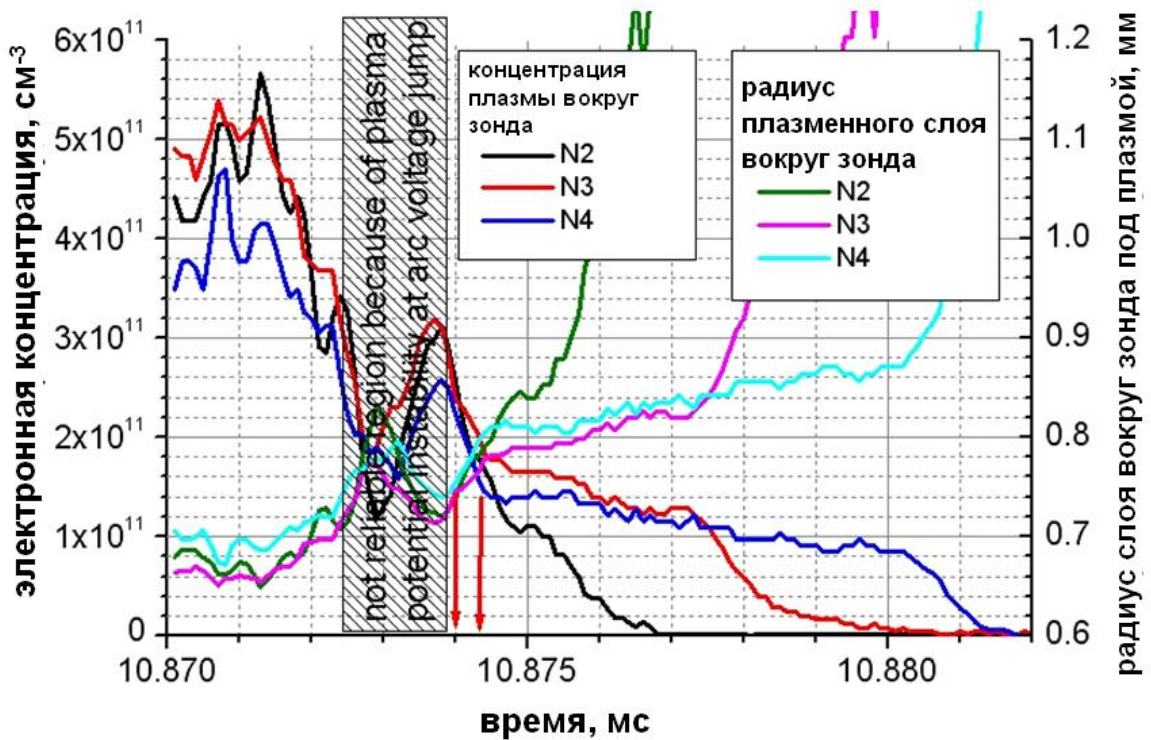


Рис. 24. Обработка вольтамперных характеристик одиночного зонда.

Лабораторная работа

При проведении лабораторной работы следует использовать экспериментальную установку по исследованию процессов в вакуумном сетевом выключателе, либо другую установку с источником низкотемпературной плазмы с концентрацией в пределах от 10^{11} до 10^{15} см^{-3} .

При подготовке и проведении экспериментов необходимо строго следовать инструкциям по эксплуатации и безопасным методам работы на экспериментальной установке.

Порядок проведения работы:

1. Снять съёмную часть сборки зондов (рис. 3) и произвести ревизию зондов. При это произвести визуальный контроль наличия промежутка между зондом и керамической трубкой, а также с использованием мультиметра произвести замер сопротивления зондов на крепление трубок, которое должно быть не менее 2 МОм.
2. Промыть сборку зондов в ультразвуковой ванне и высушить с помощью фильтровальной бумаги или фена. Все дальнейшие манипуляции с зондами производить при использовании чистых безворсовых перчаток.
3. Установить сбоку зондов на держатель. Держатель установить на экспериментальную вакуумную камеру. Перед установкой на вакуумную камеру убедиться, что манипулятор полностью выкручен, и зонды находятся в крайнем удалённом положении.
4. Выполнить все необходимые манипуляции в камере с подготовкой разрядной ячейки.
5. Герметично закрыть камеру и выполнить необходимые действия по получению рабочего вакуума.
6. Установить линейку зондов на необходимое удаление от источника плазмы.
7. Парно подсоединяя соседние зонды к схеме питания двойного зонда и двухканальному осциллографу, выполнить регистрацию вольтамперных характеристик двойного зонда для различных областей пространства, а при необходимости (импульсный источник плазмы) и в различные моменты времени.

8. Подсоединив зонды к источнику постоянного напряжения (+50 В) и многоканальному осциллографу (при необходимости к двум и более осциллографам) произвести регистрацию токов одиночных зондов.
9. Выполнить математическую обработку вольтамперных характеристик с построением графиков зависимостей параметров плазмы (температуры и концентрации) от координаты и от времени (в случае использования импульсного источника плазмы).

Рекомендуемая литература

1. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат. 1969.
2. Чен Ф. Электрические зонды // Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна и С. М. Леонарда. М.: Мир, 1967.
3. Шотт Л. Электрические зонды // Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. М.: Мир, 1971.
4. Чан П., Талбот Л., Турян К. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме. М.: Мир, 1978.
5. Демидов В. И., Колоколов Н. Б., Кудрявцев А. А. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996.

4.5. Проведение дополнительных патентных исследований по ГОСТ Р 15.011-96

В данном разделе приведена лишь содержательная часть отчёта о патентных исследованиях. Полный текст отчёта приводится как самостоятельный документ.

Общие данные об объекте исследования

Объектом настоящего патентного поиска являются электрореактивные двигатели, способные обеспечивать тягу, изменяемую в широком диапазоне значений от долей Н до долей мН. Верхний предел требуемых значений тяги

обусловлен необходимостью разгона (торможения) аппарата при смене орбиты, а нижний предел – при ориентации аппарата. Как правило, разделение функций подразумевает использование различных двигательных установок. Однако безусловный интерес представляет разработка комбинированных двигателей, объединённых общим рабочим телом.

Основная (аналитическая) часть

Патентный поиск осуществлялся по вопросам конструкций и принципа работы электрореактивных двигателей, основанных на импульсном вакуумном разряде. Данное направление поиска связано с тем, что при выполнении НИР, являющейся основанием для данного поиска, были разработаны принципы создания мишенно-соплового узла лазерно-плазменного двигателя, способного обеспечивать малые значения тяги двигателя с высокой точностью их предустановки. В то же время, лазерно-плазменные двигатели на настоящем этапе развития лазерной техники не могут обеспечивать большие значения тяги. С другой стороны, большие значения тяги обеспечивают импульсные электроразрядные двигатели, в которые, по мнению исполнителей данной НИР, может быть интегрирован мишенно-сопловый узел с жидкометаллическим рабочим телом, разработанный в рамках данной НИР. Такая интеграция подразумевает горение вакуумного разряда в промежутке, образованном жидкометаллическими электродами. При анализе привлекалась информация об изобретениях, раскрытая в охранных документах. По фонду охранных документов СССР и России в процессе поиска для дальнейшего анализа не было отобрано 4 патента Российской Федерации, 2 патента Евросоюза и 43 патентов США. Список отобранных для анализа источников с указанием наиболее существенных технических особенностей приведен в Приложении 4 Отчета о патентных исследованиях.

Для реализации идеи импульсного электроразрядного промежутка с жидкометаллическими электродами в качестве электрореактивного двигателя наиболее близкими техническими решениями являются:

1. Плазменные ускорители, основанные на принципе рельсотрона (rail-gun thruster).
2. Импульсные торцевые плазменные ускорители (pulsed arc-jet thruster, pulsed plasma thruster).
3. Электроэрозионные плазменные ускорители на основе разряда по поверхности диэлектрика (pulsed ablating thruster).

Первые импульсные плазменные ускорители были созданы в 60-х годах прошлого века и являлись торцевыми ускорителями (US3159966, US3321919, US3360988) и рельсотронами (US3221212, US3298179) на основе газа в качестве рабочего тела. Наличие газа обеспечивает лёгкое (при относительно низких напряжениях) и стабильное инициирование разряда, что является ключевым условием для импульсного режима его горения. Это обстоятельство является причиной того, что, несмотря на недостатки использования газа в качестве рабочего тела, ускорители на основе газа продолжают совершенствоваться вплоть до настоящего времени (US4995231, US5866871, EP1015161, US6084198, US6300720, US6696792).

Основным недостатком использования газа в качестве рабочего тела является необходимость оснащения двигателя резервуаром высокого давления, что является неиспользуемой массой. Данная проблема успешно решается путём использования твёрдого тела в качестве рабочего тела (US3447322, US3603089, US3636709, US3735591, US5033355, US5439191, RU2143586, US5924278, US6153976, RU2146776, US6216445, US6269629, US6295804, US6769241, US6818853, US7068226, US7053333, US7408303, US20080253040, US7518085, US7530218, US7530219, US20100024385, US7926257, US7926258, EP1668966). В качестве рабочего тела в этих двигателях используется диэлектрик. Разряд инициируется пробоем по

поверхности диэлектрика, но для этого требуется высокое напряжение, значительно превышающее напряжение горения разряда после пробоя. Поскольку температура плазмы достаточно высока не только для парообразования твёрдого вещества, но и для ионизации паров, использование твёрдого диэлектрика в качестве рабочего тела оправдано. Прогресс в развитии этого направления электрореактивных двигателей был и продолжает быть сосредоточен на максимально полном использовании рабочего тела.

С целью понижения напряжения инициирования разряда был разработан двигатель (US6001426), в котором внутрь разрядной ячейки вставляется тонкая проволока, электрический взрыв которой иницирует разряд. Однако такое техническое решение не нашло широкого применения, поскольку устройство требует наличия в своём составе механизма подачи проволоки.

Наиболее полного использования рабочего тела удаётся добиться путём использования жидкого рабочего тела (RU2266428 и RU2358153). При этом разряд развивается по поверхности твёрдого диэлектрика, смоченного диэлектрической жидкостью. В этом случае твёрдый диэлектрик не эродировать, и, тем самым, достигается высокая стабильность параметров разряда. Устройства такого типа требуют дополнительного механизма подачи жидкости, что значительно усложняет конструкцию устройств.

Жидкость способна течь сама под действием капиллярных сил, восстанавливая тем самым форму рабочего тела, необходимую для стабильной работы двигателя. Это свойство жидкого рабочего тела успешно использовано в электростатических двигателях на основе жидкометаллического источника ионов, функционирующего за счёт полевого испарения и ионизации пара на вершине конуса Тейлора (US4328667, US7690187, US7827779, US8080930, US20120144796). Данное свойство жидкого рабочего тела используется также в торцевом двигателе (US7302792) с иницированием разряда пробоем по поверхности

диэлектрика. Однако в такой конфигурации использование жидкометаллического рабочего тела не всегда оправдано, поскольку жидкий металл растекается по поверхности диэлектрика, приводя к падению сопротивления между электродами, и для инициирования разряда требуются значительно бóльшие токи.

Следует отметить, что с точки зрения создания реактивной тяги наиболее перспективным рабочим телом является тяжёлый металл (наиболее компактное хранение массы). В совокупности с преимуществами жидкости одним из наиболее перспективных материалов для использования в качестве рабочего тела электрореактивного двигателя может рассматриваться висмут как тяжёлый и одновременно легкоплавкий металл, при этом нетоксичный.

Большой интерес в решении проблемы расширения рабочего диапазона значений тяги двигателя представляют комбинированные двигатели. Такие двигатели активно разрабатываются в последние годы, и они основаны преимущественно на сочетании химического ракетного двигателя с электрореактивным с использованием общего соплового узла (например, US7703273) и значительно реже на сочетании двух электрореактивных двигателей в одном устройстве (US7395656).

Заключение

Таким образом, в качестве итога данного аналитического обзора можно сделать следующие выводы:

1. Использование жидкого металла в качестве рабочего тела электрореактивных двигателей имеет ряд преимуществ.
2. Можно утверждать, что ниша комбинированных электрореактивных двигателей в настоящее время остаётся слабо разработанной, и новые технические решения, не требующих создания сложных устройств, но позволяющих при этом существенно расширять диапазон значений тяги двигателя, представляют большой практически интерес.

Задачи патентных исследований: Определение уровня техники гибридных электрореактивных двигателей.

Ретроспективность поиска – 1962 – 2012 гг.

Предмет поиска		Источники информации, по которым будет производиться поиск	
		Патентные	
Объект исследования	Страна поиска	Наименование	Классификационные рубрики МПК
Мишенные узлы лазерно-плазменных двигателей	Россия СНГ СССР	Электронная база данных ФГУ ФИПС, электронная библиотека e-library	B05D, B23K B63H, B64G F02K, F03H F41B, G21D H01J, H01Q H05B, 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	

Материалы, отобранные для анализа

Таблица В.6.1. Патентная документация

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.
Электрореактивные двигатели на основе торцевых ускорителей плазмы с газовым (паровым) питанием	патент US3159966, 8.12.1964.	D.L. Curtis. Litton Systems Inc. (USA)	Ionization and plasma acceleration apparatus
	патент US3321919, 30.05.1967.	A.J. Marolda. High Voltage Engineering Corp. (USA)	Apparatus for generating high density plasma
	патент US3360988, 02.01.1998.	H.A. Stine et.al. The USA as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration	Electric arc apparatus
	патент US4995231, 26.02.1991, F02K 11/00.	R.D. Smith et. al. Olin Corp. (USA)	Performance arcjet thruster
	патент US5866871, 02.02.1999, B23K 10/00.	D. Birx.	Plasma gun and methods for the use thereof

	патент EP1015161, 21.06.2006, H01J 27/04.	L.D. Birx. Science Research Laboratory, Inc, (USA)	Plasma gun and method using the latter
	патент US6084198, 04.07.2000, B23K 10/00.	D. Birx.	Plasma gun and methods for the use thereof
	патент US6216445, 17.04.2001, G21D 1/00; H05B 1/00.	D.C. Byers et. al. TRW Inc., California Institute of Technology (USA)	Micro pulsed plasma thruster and method of operating same
	патент US6696792 24.02.2004, H01J 33/00.	J.E. Foster. The United States of America as represented by the United States National Aeronautics and Space Administration	Compact plasma accelerator
	патент US7530218 12.05.2009, F03H 1/00.	D.H. Simon et. al. The Johns Hopkins University (USA)	Pulsed plasma thruster using vapor
Электрореактивные двигатели на основе	патент US3603089, 07.09.1971, F02K 7/08.	D.W. Esker et.al. McDonnell Douglas Corp. (USA)	Plasma arc thruster
	патент US5924278, 20.07.1999, F03H 1/00.	R.L. Burton et. al. The Board of Trustees of the University of Illinois (USA)	Pulsed plasma thruster having an electrically insulating nozzle and utilizing propellant bars

торцевых ускорителей плазмы с твердотельным питанием	патент RU2146776, 20.03.2000, F03H 1/00.	Вершинин Ю.Н. и др. Институт электрофизики Уральского отделения РАН (RU)	ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ТОРЦЕВОГО ТИПА НА ТВЕРДОМ РАБОЧЕМ ТЕЛЕ
	патент US6269629, 07.08.2001, G21D 1/00, H05B 1/00.	G.G. Spanjers. The USA as represented by the Secretary of the Air Force	Micro-pulsed plasma thruster having coaxial cable segment propellant modules
	патент US6818853 16.11.2004, B23K 10/00.	J. Schein et. al. Alameda Applied Sciences Corp. (USA)	Vacuum arc plasma thrusters with inductive energy storage driver
	патент EP1668966 14.06.2006, H05H 1/54, F03H 1/00, H05H 1/00, B64G 1/40, B64G 1/22.	N.A. Antropov. Государственный НИИ прикладной механики и электродинамики (RU)	Pulsed plasma accelerator and method
	патент US7053333 30.05.2006, B23K 10/00.	J. Schein et. al. Alameda Applied Sciences Corp. (USA)	Vacuum arc plasma thrusters with inductive energy storage driver
	патент US7408303 05.08.2008, H01J 7/24.	N.N. Antropov et. al. Государственный НИИ прикладной механики и электродинамики (RU)	Pulsed plasma accelerator and method
	патент US7518085 14.04.2009, B23K 10/00.	Mahadevan Krishnan. Alameda Applied Sciences Corp. (USA)	Vacuum arc plasma thrusters with inductive energy storage driver

	заявка на патент US20100024385 04.02.2010, F03H 1/00.	S.B. Gabriel et. al. UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON (GB)	PULSED PLASMA THRUSTER AND METHOD OF OPERATION THEREOF
	патент US7926257 19.04.2011, F03H 1/00, H05H 1/00.	R.L. Burton et. al. CU Aerospace, LLC (USA)	Advanced pulsed plasma thruster with high electromagnetic thrust
	патент US7926258 19.04.2011, F03H 1/00, H05H 1/00.	R.L. Burton et. al. CU Aerospace, LLC (USA)	Advanced pulsed plasma thruster with high electromagnetic thrust
	патент US6153976, 28.11.2000, H01J 7/24.	G.G. Spanjers. The USA as represented by the Secretary of the Air Force	Pulsed plasma thruster with electric switch enabling use of a solid electrically conductive propellant
	патент US6295804, 02.10.2001, F03H 1/00.	R.L. Burton et. al. The Board of Trustees of the University of Illinois (USA)	Pulsed thruster system
	патент US6769241, 03.08.2004, G21D 1/00, H05B 1/00.	G.G. Spanjers et. al. W. E. Research LLC (USA)	Description of methods to increase propellant throughput in a micro pulsed plasma thruster
Электрореактивные двигатели на основе торцевых ускорителей	патент RU2266428, 20.12.2005, F03H 1/00	Казанкин Ф.А. и др. Государственное предприятие НИИмаш (RU)	Импульсный плазменный электрический реактивный двигатель

ПЛАЗМЫ С ЖИДКОСТНЫМ ПИТАНИЕМ	патент US7302792, 04.12.2007, F03H 1/00, H01J 7/24.	H.B. Land, III et. al. The Johns Hopkins University (USA)	Pulsed plasma thruster and method of making
	патент RU2358153, 10.09.2008, F03H 1/00	Потабачный Л.А. и др. ФГУП НИИмаш (RU)	ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
Электрореактивные двигатели на основе рельсотронных ускорителей плазмы с газовым питанием	патент US3221212, 30.11.1965.	B. Gorowitz et. al. General Electric Company Corp. (USA)	Plasma accelerator
	патент US3298179, 17.01.1967.	M.E. Maes. Rocket Research Corp. (USA)	Confined parallel rail pulsed plasma accelerator
	патент US6300720, 09.10.2001, H01J 7/24.	D. Birx.	Plasma gun and methods for the use thereof
Электрореактивные двигатели на основе рельсотронных	патент US3636709, 25.01.1972, F03H 5/00.	A.V. La Rocca.	Propellant device
	патент US3735591, 29.05.1973, F03H 5/00.	J.A. Burkhart. The USA as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration	Magneto-plasma-dynamic arc thruster

ускорителей плазмы с твердотельным питанием	патент US5439191, 08.09.1995, B64G 1/26	S.P. Nichols et. al. Board of Regents, The University of Texas System, (USA)	Railgun thruster
	патент RU2143586, 27.12.1999, F03H 1/00, H05H 1/54.	Антропов Н.Н. и др. НИИПМиЭ МАИ (RU)	ЭРОЗИОННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
	патент US7068226, 27.06.2006, H01Q 1/26	A.K. Mitra. The USA as represented by the Secretary of the Air Force	Pulsed plasma antenna
Электрореактивные двигатели на основе ускорителей плазмы с электрическим разрядом капиллярного типа	патент US3447322, 03.06.1969, F02K 11/00, H01J 1/02, H05B 7/02.	F.N. Mastrup et. al. TRW Inc. (USA)	Pulsed ablative thruster apparatus
	патент US5033355, 23.07.1991, F41B 6/00.	Y.S.A. Goldsteing et. al. GT-Device (Ireland)	Method of and apparatus for deriving high pressure, high temperature plasma jet with a dielectric capillary
	патент US5425231, 20.01.1995, B63H 11/00.	R.L. Burton.	Gas fed pulsed electric thruster
	патент US6001426, 14.12.1999, B05D 1/08.	F.D. Witherspoon et. al. Utron Inc. (USA)	High velocity pulsed wire-arc spray

	заявка на патент US20080253040, 16.04.2007, B23K 9/23.	Thangavelu Asokan et. al.	Ablative Plasma Gun
	патент US7530219, 12.05.2009, F03H 1/00.	R. Burton et. al. Cu Aerospace LLC (USA)	Advanced pulsed plasma thruster with high electromagnetic thrust
Электрореактивные двигатели на основе жидкометаллических источников ионов	патент US4328667, 11.08.1982, F03H 1/00.	D.R. Valentian et. al. The European Space Research Organization (FR)	Field-emission ion source and ion thruster apparatus comprising such sources
	патент US7690187, 06.04.2010, F03H 1/00, H05H 1/00.	I. Bekey. The Aerospace Corporation (USA)	Modular micropropulsion device and system
	патент US7827779, 09.11.2010, F03H 1/00.	Mahadevan Krishnan et. al. Alameda Applied Sciences Corp. (USA)	Liquid metal ion thruster array
	патент US8080930, 20.12.2011, H01J 1/14, H01J 1/16, H01J 37/08.	L.B. King. Michigan Technological University (USA)	Self-regenerating nanotips for low- power electric propulsion (EP) cathodes
	заявка на патент US20120144796, 14.06.2012, F03H 1/00	C.M. Marrese-Reading et. al. California Institute of Technology (USA)	MICROFLUIDIC ELECTROSPRAY THRUSTER

Гибридные электрореактивные двигатели	патент US7395656, 08.07.2008, F03H 1/00	K.J. Rooney. The Boeing Company (USA)	Dual mode hybrid electric thruster
	патент US7703273, 24.04.2010, F02K 9/94	G.G. Spanjers et. al.	Dual-mode chemical-electric thrusters for spacecraft

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения пятого этапа выполнения проекта были получены следующие результаты:

- Проведена технико-экономическая оценка полученных результатов. Показано, что перспективным как с точки зрения достижения технических показателей, так и с точки зрения экономической эффективности является целесообразным разработка принципов построения гибридных устройств, а именно: а) вакуумного комбинированного выключателя, б) гибридного плазменного двигателя.
- Сформулированы основные пункты Технического задания на НИОКР по разработке и созданию экспериментального образца мишенно-соплового узла лазерно-плазменного микродвигателя малых космических аппаратов.
- Разработана и принята Советом ИФВТ НИ ТПУ программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс.
- Разработаны методические указания к лабораторной работе по теме «Многозондовая диагностика низкотемпературной плазмы в вакууме» для подготовки магистрантов по программе «Физическая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете.
- Выполнены патентные исследования по ГОСТ Р 15.011-96 на предмет определение уровня техники гибридных электрореактивных двигателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Алферов Д.Ф., Ахметгареев М.Р., Будовский А.И., Евсин Д.В., Иванов В.П., Дерменжи П.Г. Гибридный выключатель с управляемой коммутацией для цепей с конденсаторными батареями // М: Энергоатомиздат.– Электротехника.– 2010.– № 3.– 6 с.
- [2] Алферов Д.Ф., Ахметгареев М.Р., Евсин Д.В., Иванов В.П., Дерменжи П.Г. Гибридный аппарат управляемой коммутации конденсаторных батарей // Тезисы докладов на IX симпозиуме «Электротехника 2030».– 28 мая-1 июня 2007.– 3 с.
- [3] Edgar Y. Choueiri. A Critical History of Electric Propulsion: The First Fifty Years (1906-1956) // Journal of Propulsion and Power.– 2004.– Vol. 20.– No. 2.– pp. 193–203.
- [4] К.Э. Циолковский. Труды по ракетной технике.– М: Оборонгиз.– 1947.– 368 с.
- [5] R.H. Goddard. Method and means for producing electrically-charged particles // US Patent No. 1137964.- 1915.
- [6] R.H. Goddard. Method and means for producing electrified jets of gas // US Patent No. 1363037.- 1920.
- [7] Пионеры ракетной техники: Кибальчич, Циолковский, Цандер, Кондратюк: избр. тр. / под. ред. Мелькумова Т.М.– М. : Наука, 1964.– 671 с.
- [8] Глушко Валентин Петрович Путь в ракетной технике 1924-1946.- Москва. «Машиностроение» 1977 г.- 504 с.
- [9] Стависский Ю.Я. и др. Опыт получения реактивной тяги в лабораторной модели ионного двигателя // ЖТФ.- 1959.- т. 29.- вып. 8.- с.1058-1064.
- [10] С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов. Электрические ракетные двигатели.- М: Машиностроение, 1975.- 272 с.

-
- [11] D.M. Goebel, I. Katz. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters.- California Institute of Technology: JPL SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY SERIES, 2008.- 493 p.
- [12] M. Tajmar, A. Genovese, W. Steiger. Indium FEEP Microthruster Experimental Characterization // AIAA Journal of Propulsion and Power.- 2004.- Vol. 20.- No. 2.- pp. 211-218.
- [13] M. Tajmar. Influence of Taylor cone size on droplet generation in an indium liquid metal ion source // Appl. Phys. A. Materials Science & Processing.- 2005.- vol. 81.- pp. 1447–1450.
- [14] C. Akhmadaliev, G.L.R Mair, C.J. Aidinis, L. Bischoff. Frequency spectra and electrohydrodynamic phenomena in a liquid gallium field-ion-emission source // J. Phys. D: Appl. Phys.- 2002. vol. 35.- pp. L91–L93.
- [15] Аскаръян Г.А., Мороз Е.М. Давление при испарении вещества в луче радиации // ЖЭТФ.- 1962.- Т.43.- с. 2319-2321.
- [16] A.S. Gilmour, F.A. Giori, Method of ionic propulsion utilizing a laser-stimulated ionic emission // US Patent No. 3392527.- 1968.
- [17] Ф.В. Бупкин, А.М. Прохоров. Использование лазерного источника энергии для создания реактивной тяги // УФН.- 1976.- т. 119.- вып. 3.- с. 425-446.
- [18] C. Phipps, M. Birkan, W. Bohn, H.-A. Eckel, H. Horisawa, T. Lippert, M. Michaelis, Yu. Rezunkov, A. Sasoh, W. Schall, S. Scharring, J. Sinko. Review: Laser-Ablation Propulsion // Journal of Propulsion and Power.- 2010.- Vol. 26.- No. 4.- 609-637.
- [19] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 3-е изд., исправл.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.- 656 с.
- [20] C.R. Phipps, J. Luke. Laser plasma thruster // US Patent No. 6530212.- 2003.

-
- [21] C.R. Phipps. Micro Laser Plasma Thruster for Small satellites.- US Department of the Air Force. Doc. No. 0002AC, 2003.- 76 p.
- [22] C.R. Phipps, J.R. Luke, W.D. Helgeson. 3ks Specific Impulse with a ns-pulse Laser Microthruster // International Electric Propulsion Conference IEPC, Princeton, NJ, 2005.- 319 (10 p.).
- [23] C. Phipps, J. Luke, T. Lippert, M. Hauer, A. Wokaun. Micropropulsion Usin a Laser Ablation Jet // J. Propulsion and Power.- 2004.- vol. 20.- No. 6.- p. 1000-1011.
- [24] A.N. Chumakov, N.A. Bosak, A.M. Petrenko, M.V. Bogdanovich, A.I. Yenzhyieuski, A.V. Pozhidaev, M.A. Shemelev, A.G. Ryabtsev, G.I. Ryabtsev, Yu. A. Stankevich. Pulsed plasma thruster based on solid-state lasers // Proc. of SPIE.- 2007.- Vol. 6735, p. 673510-(1-6).
- [25] A.S. VanderWyst. Field Emission Electric Propulsion Thruster. Modeling and Simulation // Ph.D. thesis, University of Michigan, 2006.- 293 p.
- [24] Козырев А.В., Использование баллистического маятника на гибком подвесе для измерения малых импульсов, Письма в ЖТФ, 2011, Т.37, вып. 24, стр.81-87
- [25] Yu.Ralchenko, A.E.Kramida, J.Reader, and NIST ASD Team (2008). *NIST Atomic Spectra Database* (version 3.1.5), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd3> [2008, October 21]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [25] A.K.Shuaibov, A.I.Dashchenko, and I.V.Shevera, “Optical Diagnostics of Laser-Generated Indium Plasma”, Technical Physics Letters, Vol. 26, No. 9, p. 832–834, 2000.
- [26] K.Shuaibov, L.L.Shimon, A.I.Dashchenko, I.V.Shevera, and M.P.Chuchman, “Optical Characteristics of a Gallium Laser Plasma”, Plasma Physics Reports, Vol. 27, No. 1, p.82–85, 2001.

-
- [27] D.A.Gonzales, and R.P.Baker, “Micropropulsion using a Nd:YAG microchip laser”, // Proc. SPIE. 2002. Vol.4760. P.752-765.
- [28] В.П.Агеев, А.А.Горбунов, В.И.Конев, А.М.Прохоров, «Взаимодействие интенсивного УФ-лазерного излучения с поверхностью твердых тел». // Известия АН СССР, сер. Физическая. 1985. Т.49. №4. С.732-737.
- [29] А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко. Экспериментальное исследование образования и разлета плазмы при облучении металлов УФ-лазером. // Физика плазмы. 1988. Т.14, в.6. С. 761-764.
- [30] Tatiana E. Itina, Karine Gouriet, Leonid V. Zhigilei, Sylvie Noel, Jorg Hermann, Marc Sentis, “Mechanisms of small clusters production by short and ultra-short laser ablation”, Appl. Surf. Science, 2007