

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. № 266.10.04

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 ОТЧЕТ

о выполнении 4 этапа Государственного контракта
№ 14.740.11.0317 от 17 сентября 2010 г.

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

Реферат

Отчет 73 с., 1 ч., 16 рис., 13 табл., 16 источн., 0 прил.

Диагностика низкотемпературной плазмы, лазерная абляция, лазерно-плазменные двигатели

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 4 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.

В отчёте рассмотрены результаты исследований по динамике плазмы лазерного абляционного факела. При воздействии лазерного излучения наносекундной длительности и интенсивности, значительно превышающей порог испарения материала мишени, происходит образование плазмы за счёт испарения материала и электрического пробоя в электромагнитном поле падающей волны излучения лазера. При достижении критической плотности плазма становится непрозрачной, и далее энергия лазерного излучения поглощается плазмой, что приводит к росту температуры плазмы и, как следствие, давления на мишень. Такой механизм преобразования энергии

лазерного излучения в кинетическую энергию мишени требует оптимизации с точки зрения эффективности преобразования. В этой связи целью четвертого этапа проекта является диагностика тяжёлой (ионной) компоненты плазмы факела, генерируемого при лазерной абляции жидкого металла.

Поскольку поведение плазмы подвержено многим случайным процессам, все измеряемые величины имеют большой разброс, носящий случайный характер. В этой связи основные параметры плазмы 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 был выбран метод зонда Ленгмюра в режиме ионной ветви тока насыщения для измерения концентрации плазмы, а также для времяпролётных измерений скорости распространения плазменного сгустка. Для детальной диагностики тяжёлой (ионной) компоненты плазмы использовался масс-энергоанализатор HIDEN EQP, позволяющий измерять зарядовый состав плазмы и распределение ионов по энергиям для каждого зарядового состояния. Такой подход позволяет получить наиболее полное представление о ионной компоненте плазмы и о механизмах передачи энергии от лазерного излучения в плазму. Обработка полученных данных позволяет измерять импульс отдачи в мишень. Для проверки результатов обработки распределений ионов по энергиям использован прямой метод измерения импульса отдачи с использованием высокоскоростной камеры HSFC Pro, синхронизированной с импульсом лазерного излучения. Проверка достоверности полученных данных осуществлялась также путём сравнения результатов обработки энергетических спектров с результатами обработки оптических спектров, полученных традиционными спектроскопическими методами.

В результате выполнения экспериментов были полученные данные, характеризующие в полном объёме энергетические характеристики плазмы абляционного факела при воздействии лазерного излучения на жидкометаллическую мишень на основе сплава галлия и индия. Данные экспериментов показали высокую энергоёмкость лазерного сгустка, превышающую энергоёмкость плазмы взрывоэмиссионного центра при горении вакуумного разряда. Путём интегрирования ионных спектров была измерена скорость истечения порядка 28 км/с. Температура плазмы, соответствующая данной скорости истечения, составляет 3-4 эВ. Эти данные согласуются с результатами обработки оптических спектров излучения плазмы. Установлено, что скорость истечения ионов индия выше, чем ионов галлия, несмотря на то, что масса иона индия также больше массы иона галлия. Это наблюдение доказывает более высокую эффективность преобразование энергии излучения в кинетическую энергию при использовании более тяжёлых ионов. С использованием зондовых измерений были отработаны механизмы оптимизации импульса отдачи путём достижения требуемого диаметра фокального пятна, большего, чем минимальное значение диаметра. Показано, что при длительности импульса лазерного излучения 5 мкм диаметр фокального пятна не должен быть менее 50 мкм, в противном случае энергия лазерного излучения будет не полностью поглощена плазмой. Был выполнен цикл экспериментов по минимизации капельной фракции эрозии мишени. В результате экспериментов были найдены условия, при которых доля капельной фракции минимальна. Для достижения такого режима абляции требуется формирование лунки на открытом конце капилляра мишени таких размеров, при которых объём испарённого за импульс рабочего вещества (жидкого металла) строго равен объёму лунки. Патентные исследования, выполненные на четвёртом этапе выполнения проекта, показали новизну и патентную чистоту найденного технического решения, необходимую для подачи заявки

на полезную модель «мишеный узел лазерно-плазменного двигателя». Результаты выполненных работ обобщены в рукописи статьи, подготовленной для публикации в журнале «Известия вузов. Физика». Было выполнено сравнение полученных результатов с требуемыми для практического использования параметрами импульса отдачи. Показано, что плотность мощности лазерного излучения порядка 10^9 Вт/см² является недостаточно высокой и требует увеличения на порядок величины без уменьшения диаметра фокального пятна. Данный вывод имеет практическое значение для выбора (либо создания) оптимального источника лазерного излучения.

СОДЕРЖАНИЕ

Сокращения и обозначения	9
Введение	9
Основная часть. Проведение экспериментов по динамике плазмы лазерного абляционного факела	12
4.1. Проведение серии статистических экспериментов согласно ГОСТ 8.207-76 по измерению зарядового и энергетического состава ионной компоненты лазерной абляционной плазмы.	12
<i>4.1.1. Общие требования к проведению измерений</i>	<i>12</i>
<i>4.1.2. Методика измерения распределения ионов плазменного сгустка по массе, зарядовому состоянию и энергии с использованием энерго-масс- анализатора HIDEN EQP, серийный номер WR 12035</i>	<i>15</i>
<i>4.1.3. Параметры лазерной плазмы жидкофазной мишени</i>	<i>22</i>
4.2. Проведение спектроскопических исследований излучения лазерной абляционной плазмы и оценка её температуры на основе анализа соотношений спектральных линий.	26
<i>4.2.1. Измерение температуры электронной компоненты плазмы по соотношению интенсивностей атомарных линий</i>	<i>26</i>
<i>4.2.2. Анализ спектров излучения плазмы при лазерной абляции жидкометаллической мишени.....</i>	<i>27</i>
4.3. Измерение скорости истечения лазерной абляционной плазмы с использованием распределений ионов по энергиям по пункту 4.1 и зондовых измерений в соответствии с методикой по пункту 2.1	30
<i>4.3.1. Результаты анализа энергетических спектров ионов</i>	<i>30</i>
<i>4.3.1. Результаты исследования скорости и углового распределения потока плазмы зондовыми измерениями</i>	<i>33</i>

4.4. Измерение механического импульса отдачи лазерного абляционного факела при воздействии наносекундного импульса лазерного излучения плотностью мощности на поверхности мишени порядка 10^9 Вт/см²	37
<i>4.4.1. Измерения механического импульса отдачи на воздухе</i>	<i>37</i>
<i>4.4.2. Измерения механического импульса отдачи в вакууме</i>	<i>40</i>
4.5. Проведение патентных исследований по ГОСТ Р 15.011-96.....	42
<i>4.5.1. Общие данные об объекте исследования</i>	<i>42</i>
<i>4.5.2. Основная (аналитическая) часть</i>	<i>44</i>
<i>4.5.3. Заключение</i>	<i>47</i>
<i>4.5.4. Задание на проведение патентных исследований</i>	<i>47</i>
<i>4.5.5. Регламент поиска</i>	<i>48</i>
<i>4.5.6. Справка о поиске</i>	<i>50</i>
<i>4.5.7. Отчёт о поиске</i>	<i>51</i>
<i>4.5.8. Материалы, отобранные для анализа</i>	<i>51</i>
4.6. Подготовка заявки на полезную модель «мишенно-сопловый узел лазерно-плазменного двигателя».....	55
4.7. Подготовка статьи для опубликования в журнале из списка рекомендованных ВАК со ссылкой на проведение НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.....	61
Заключение	70
Список использованных источников	71

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

В отчёте использованы следующие сокращения:

ЛПД – лазерно-плазменный двигатель.

МСУ – мишенно-сопловый узел.

КА – космический аппарат.

СКО – среднеквадратическое отклонение.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчёт посвящён выполнению четвёртого 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 проведение статистических экспериментов по динамике плазмы лазерного абляционного факела. Данная работа имеет отношение к проблеме создания сверхминиатюрных ЛПД для ориентации малых КА. В этой связи условия экспериментов были максимально приближены к реальным условиям ЛПД.

Отчёт состоит из семи разделов. Первый раздел посвящён измерению зарядового и энергетического состава ионной компоненты лазерной абляционной плазмы с использованием масс-энергоанализатора 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-энегоспектроскопических 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 технического решения выполнен патентный поиск, результаты которого приведены в пятом разделе отчёта.

В шестом разделе отчёта приведён текст заявки на патент на полезную модель «мишенный 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.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ДИНАМИКЕ ПЛАЗМЫ ЛАЗЕРНОГО АБЛЯЦИОННОГО ФАКЕЛА

4.1. Проведение серии статистических экспериментов согласно ГОСТ 8.207-76 по измерению зарядового и энергетического состава ионной компоненты лазерной абляционной плазмы.

4.1.1. Общие требования к проведению измерений

Целью настоящих измерений является определение концентрации плазмы, зарядового состава и распределений ионов различных зарядовых состояний по энергии. Данные параметры определяются эффективностью передачи энергии лазерного излучения в мишень, и их знание необходимо для оптимизации режима абляции в ЛПД. Поскольку значения данных параметров плазмы зависит от случайных факторов, связанных с состоянием поверхности мишени и неустойчивостями в плазме, измерения должны проводиться в соответствии со стандартной процедурой статистических измерений.

Измерения проводились в следующей последовательности операций:

(а) Проверка схемы измерения и аппаратуры на исключение систематических погрешностей, связанных с изменением температурного режима задающих генераторов управления синтетической схемой, источников питания зондов и контуров синтетической схемы, осциллографов.

(б) Кроме систематических погрешностей, перечисленных выше, в настоящем эксперименте возможны случайные погрешности, связанные со случайным характером положения дугового канала в пределах вакуумного промежутка и с возможным дрожанием зондов. Для исключения данной погрешности в экспериментах одновременно с зондовыми измерениями осуществлялась визуализация промежутка и положения зондов. При

восстановлении динамики плазменной границы расстояния между дуговым каналом и зондами измерялось по цифровым изображениям для каждого акта горения дуги.

вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения;

(в) Вычисление средних величин и среднеквадратичных отклонений. Для каждой серии экспериментов (набор входных параметров: амплитудное значение тока дуги, время наблюдения относительно точки перехода тока дуги через ноль, положения зондов) проверялось соответствие набора выборок нормальному распределению с уровнем значимости 5% и доверительной вероятности 95%.

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(\tilde{A})$ результата измерения оценивалось по формуле

$$\sigma(\tilde{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n(n-1)}}, \quad (1)$$

где x_i – i -й результат наблюдения; \tilde{A} – результат измерения (среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений); n – число результатов наблюдений. Доверительные границы ε случайной погрешности результата измерения находят по формуле

$$\varepsilon = \pm t S(\tilde{A}), \quad (2)$$

где t – коэффициент Стьюдента. При выполнении измерений проверялось выполнение условия, что систематическая погрешность Θ не превосходит уровня $0,8\sigma$. Суммарное среднеквадратическое отклонение результата измерения вычислялось по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Theta_i^2}{3} + \sigma^2(\tilde{A})}. \quad (3)$$

Поскольку число результатов наблюдений в настоящих экспериментах $n < 50$, нормальность их распределения проверялась по двум критериям.

Согласно критерию №1 вычислялось отношение \tilde{d}

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{A}|}{nS^*}, \quad (4)$$

где S^* вычисляется по формуле:

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n}}. \quad (5)$$

Результаты наблюдений группы можно считать распределенными нормально по критерию №1, если

$$d_{1-q_1/2} < \tilde{d} \leq d_{q_1/2}, \quad (6)$$

где квантили распределения $d_{1-q_1/2}$ и $d_{q_1/2}$ приведены в таблице 1 по n .

Согласно критерию № 2 полагалось, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, если не более m разностей $|x_i - \tilde{A}|$ превзошли значение $z_{P/2} S$, где S – оценка среднеквадратического отклонения, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n-1}}, \quad (7)$$

где $z_{P/2}$ – верхняя квантиль распределения нормированной функции Лапласа, отвечающая вероятности $P/2$. Значения P определялись из табл. 2 по числу результатов наблюдений n . В случае, если хотя бы один из критериев не соблюдается, полагалось, что распределение результатов наблюдений группы не соответствует нормальному и подлежит анализу на выяснение причин несоответствия, их устранению и повторному воспроизведению.

Таблица 1. Параметры уравнения (6) для различного числа выборок.

n	$d_{q_1/2}$	$d_{1-q_1/2}$
	Уровень значимости 5%	Доверительная вероятность 95%
3	0,93427	0,7785
5	0,92496	0,78324
7	0,91658	0,78763
10	0,90555	0,79359
12	0,89911	0,79719
15	0,89063	0,80208
20	0,87916	0,80905
25	0,87034	0,81478

Таблица 2. Значения P для вычисления $z_{P/2}$.

n	m	Уровень значимости 5%
3-7	1	0,94
7-9	1	0,95
10	1	0,96
11-14	1	0,97
15-20	1	0,98
21-22	2	0,96
23	2	0,96
24-27	2	0,97
28-32	2	0,97

4.1.2. Методика измерения распределения ионов плазменного сгустка по массе, зарядовому состоянию и энергии с использованием энерго-масс-анализатора HIDEN EQP, серийный номер WR 12035

4.1.2.1. Общие положения

4.1.2.1.1. Данная методика предназначена для проведения масс-спектрометрического анализа тяжелой компоненты плазменных и

газовых сред, включая измерения распределений по энергиям для каждой из составляющих тяжелой компоненты среды, с использованием прибора HIDDEN EQP производства Hiden Analytical Ltd., Англия, (представительство в России: ЗАО «ИНТЕК АНАЛИТИКА», 197374, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Оптиков, 4, корп. 2, лит. А, пом. 209).

4.1.2.1.2. К работе с прибором допускается персонал, имеющий высшее физико-математическое или техническое образование, не ниже III группы допуска по электробезопасности, изучивший полное описание на прибор (Документ № НА-085-003, 338 стр.) и прошедший вводный практический курс в Лаборатории вакуумной электроники ИСЭ СО РАН.

4.1.2.1.3. При проведении измерений по данной Методике должны быть выполнены условия, предусмотренные техническим описанием на прибор, ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ «Методики выполнения измерений» и ГОСТ 8.207-76 ГСИ «Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений».

4.1.2.2. Краткое описание оборудования

4.1.2.2.1. Поскольку в стандартной комплектации прибора HIDDEN EQP, поставляемого заводом-изготовителем, содержатся собственные средства откачки на основе турбомолекулярного насоса, специальных требований к вакууму в экспериментальной камере и к средствам откачки не предъявляются.

4.1.2.2.2. Энерго-масс-анализатор в стандартной комплектации представлен схематично на рис. 1. Принцип работы прибора состоит в следующем. Прибор стыкуется с исследовательской (или технологической) вакуумной камерой с использованием фланца

DN-63-CF так, что зонд прибора помещается в исследуемый объем. Габариты прибора в мм приведены на рис. 2.

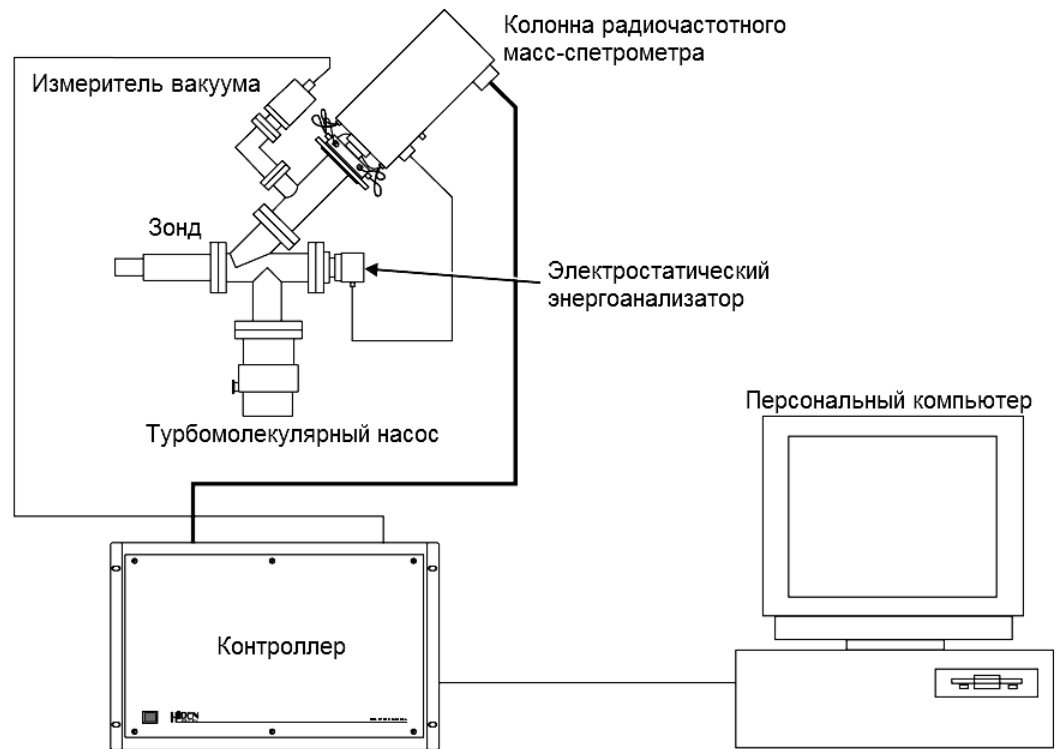


Рис. 1. Блок-схема энерго-масс-анализатора HIDEN EQP.

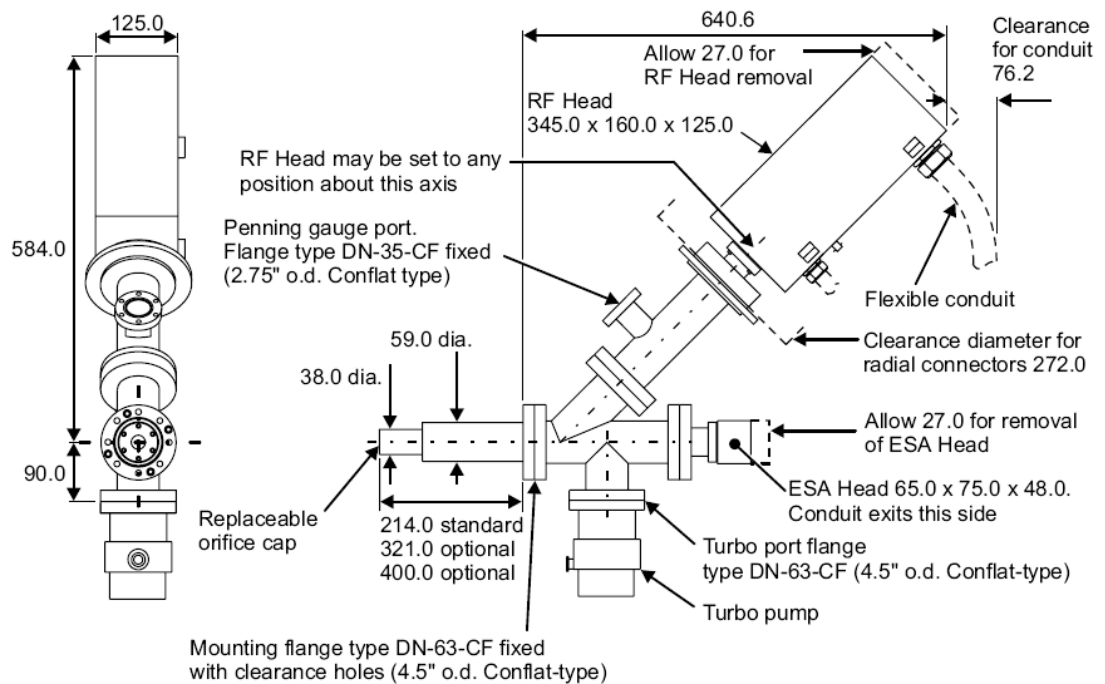


Рис. 2. Габаритные размеры энерго-масс-анализатора HIDEN EQP.

4.1.2.2.3. На лицевой поверхности зонда имеется возможность присоединения чашки с коллимирующим входным отверстием (replaceable orifice cap на рис. 2) для ограничения потока газа или плазмы, если это необходимо. С прибором поставляется комплект из шести чашек. В таблице 3 приведено соответствие требуемого диаметра коллимирующего отверстия давлению в исследуемом объеме.

Таблица 3.

Максимальное давление в исследуемом объеме, мТорр	Диаметр коллимирующего отверстия, мм
500	0,05
100	0,1
40	0,15
20	0,2
15	0,25
10	0,3

4.1.2.2.4. Конструкция анализатора схематически представлена на рис. 3. После коллиматора исследуемый поток попадает в экстрактор, затем ионизируется, если исследуется нейтральная компонента среды. В случае исследования заряженной компоненты ионизатор не включается. После прохождения через трубу дрейфа поток попадает в поворотный электростатический фильтр по энергиям, после которого на выходе остается лишь та часть потока, которая соответствует заданному интервалу энергий. Прошедший поток затем попадает в радиочастотный фильтр, в котором рассеиваются на стенки все ионы, кроме тех, массы которых лежат в заданном

интервале масс. Прошедший оба фильтра поток усиливается до измеряемых значений тока вторично-электронным умножителем. Поскольку сепарация частиц происходит по отношениям заряда частиц к измеряемым величинам, энергии и массе, то при ожидании многозарядных ионов в исследуемой среде следует формально полагать, что сепарация по массам осуществляется для однозарядных ионов с массой, вычисленной по формуле:

$$M_{\text{eff}} = M/Z, \quad (8)$$

где M_{eff} – формально измеряемая масса иона, M – реальная масса иона, Z – реальное зарядовое состояние иона. При этом регистрируемая энергия будет в Z раз меньше реальной, поэтому реальная энергия E вычисляется по формуле:

$$E = E_{\text{eff}} \cdot Z, \quad (9)$$

где E_{eff} – формально измеряемая энергия иона, E – реальная энергия иона, Z – реальное зарядовое состояние иона.

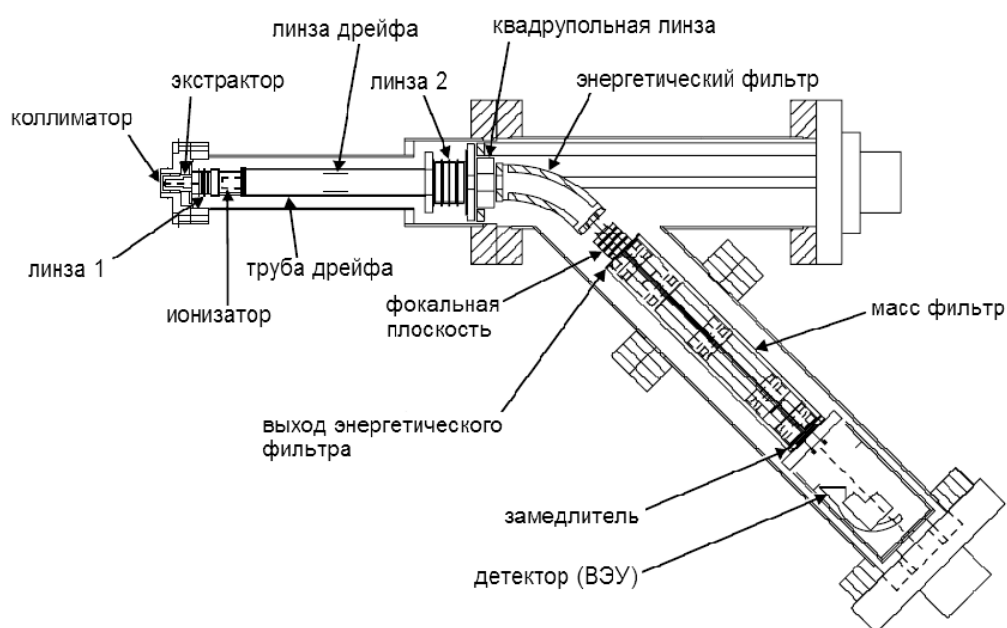


Рис. 3. Блок-схема внутреннего устройства прибора.

4.1.2.3. Обслуживание прибора

4.1.2.3.1. Подключение прибора к исследовательской или технологической вакуумной камере осуществляется согласно разделам 2.1 – 2.13, 3.3 Технического описания (документ № НА-085-003).

4.1.2.3.2. После подключения и достижения рабочих условий по давлению в исследуемом объеме и в анализаторе требуется проведение регламентных работ по калибровке анализаторов энергий и масс согласно разделам D1 – D5, E1, E3 Технического описания (документ № НА-085-003).

4.1.2.4. Проведение измерений

4.1.2.4.1. Измерения проводятся в два этапа. На первом этапе осуществляется настройка прибора на диапазон параметров исследуемых ионов. Настройка осуществляется согласно пунктам 4.1 – 4.11 Технического описания прибора (документ № НА-085-003) путем сканирования напряжений на экстракторе и линзе 1 по всему диапазону рабочих напряжений при фиксированных значениях M_{eff} и E_{eff} . В результате сканирования снимается зависимость чувствительности прибора от потенциала управляющих электродов. В качестве рекомендуемых значений напряжений экстрактора и линзы 1 выбираются такие значения, при которых производные зависимостей чувствительностей от потенциалов минимальны. Для примера на рис. 4 рекомендованное значение для потенциала экстрактора равно -95 В, а для линзы 1 равно -20 В.

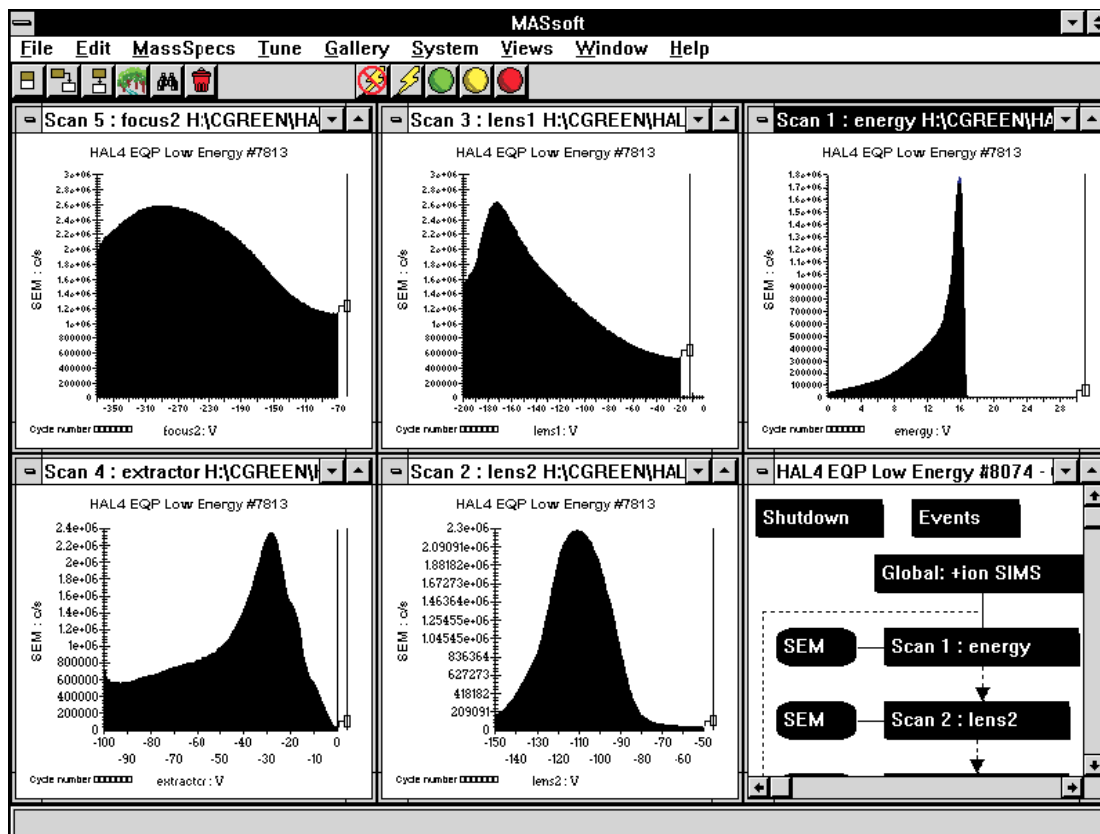


Рис. 4. Пример протокола сканирования чувствительности прибора по напряжениям на управляющих электродах.

4.1.2.4.2. Измерения производятся путем сканирования по энергии ионов. Для получения статистически достоверных зависимостей требуется получение численных значений в 100 или более точках спектра. Для вычисления значения энергии в одной точке спектра требуется измерение не менее чем по 300 ионам. Таким образом, интеграл потока ионов по времени измерения и по площади входного коллимирующего отверстия должен быть не менее $3 \cdot 10^4$ частиц.

4.1.2.5. Отчетность

4.1.2.5.1. Данные измерений хранятся в ИСЭ СО РАН в виде электронных таблиц и используются для их последующей обработки или отчетности.

4.1.2.5.2. Срок хранения информации не менее 10 лет, если не оговорено иначе в документах на выполнение НИР (НИОКР), в рамках которых используется данная методика.

4.1.3. Параметры лазерной плазмы жидкофазной мишени

Программное обеспечение масс-энергоанализатора позволяет осуществлять статистические измерения в соответствии с ГОСТ 8.207-76, основные положения которого изложены в разделе 4.1.1. При этом прибор осуществляет считывание измеряемых величин не менее чем 100 раз, что является осуществимым благодаря частотному режиму лазера и способности МСУ воспроизводить форму мениска жидкого металла в промежутках времени между импульсами лазерного излучения.

Типичный масс-спектр ионов плазмы абляционного факела при работе в режиме, близком к оптимальному, полученный с помощью масс-энергоанализатора "Hiden EQP", приведен на Рис. 5 для фиксированной энергии ионов $E/Z=280$ эВ.

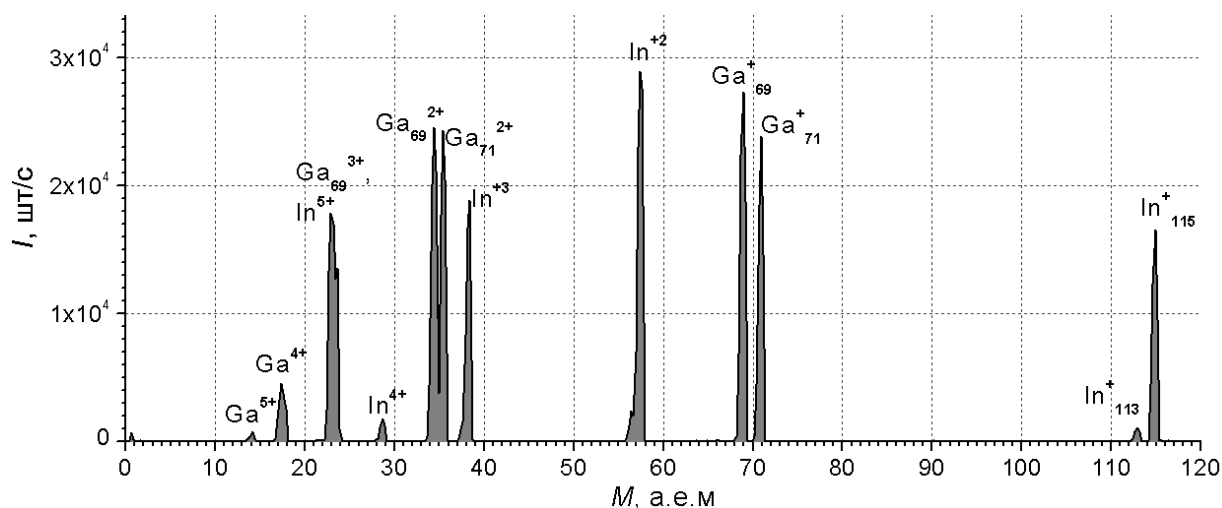


Рис. 5. Состав ионной компоненты абляционной плазмы при фиксированной энергии ионов на единичный заряд $E/Z=280$ эВ. Частота следования лазерных импульсов 100 Гц.

Как видно в плазме присутствуют ионы изотопов Ga 69 и Ga 71 с кратностью заряда Z до +5 и ионы изотопов In 115 и 113 с кратностью заряда Z по крайней мере до 4. Приведенные на этом рисунке данные могут быть использованы для определения изотопного состава. В частности отношение изотопов Ga 69 и Ga 71 может быть оценено как 1 : 0.9, а изотопов In 115 и 113- как приблизительно 1 : 0.07.

Что касается зарядового и стехиометрического состава плазмы, то более корректным при определении количества ионов каждого сорта является интегрирование функции распределения по энергии. Распределения ионов каждой кратности заряда по энергии исследовались для одного из изотопов галлия (Ga-69) и индия (In-115). На Рис. 6 (а-г) приведены экспериментальные данные $I(E/Z)$, представляющие собой распределения по энергии ионов различной зарядности. Абсцисса распределений представляет собой энергию, приходящуюся на единичный заряд E/Z .

Очевидно, функции распределения ионов каждого сорта по полной энергии $F(E)$ и по скоростям $f(v)$ могут быть легко получены с учетом требований нормировки как

$$F(E) = I(E/Z)/Z \quad (10)$$

и

$$f(v) = F(mv^2/2) \times mv. \quad (11)$$

Соответствующие функции распределений $F(E)$ приведены на Рис. 7.

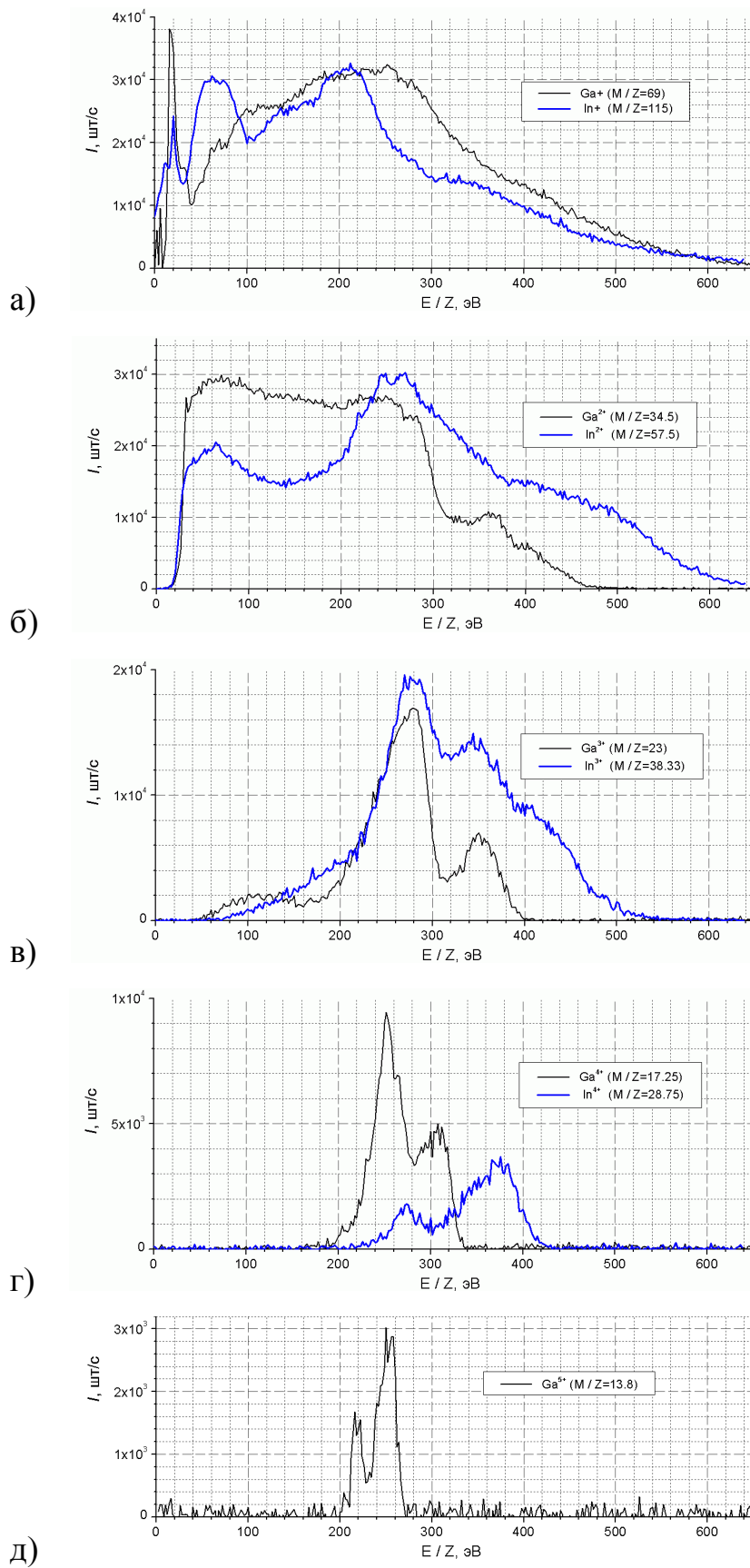


Рис. 6. Экспериментальные распределения ионов различной кратности заряда Z по удельной энергии: а)- $Z=1$, б)- $Z=2$, в)- $Z=3$, г)- $Z=4$, д)- $Z=5$.

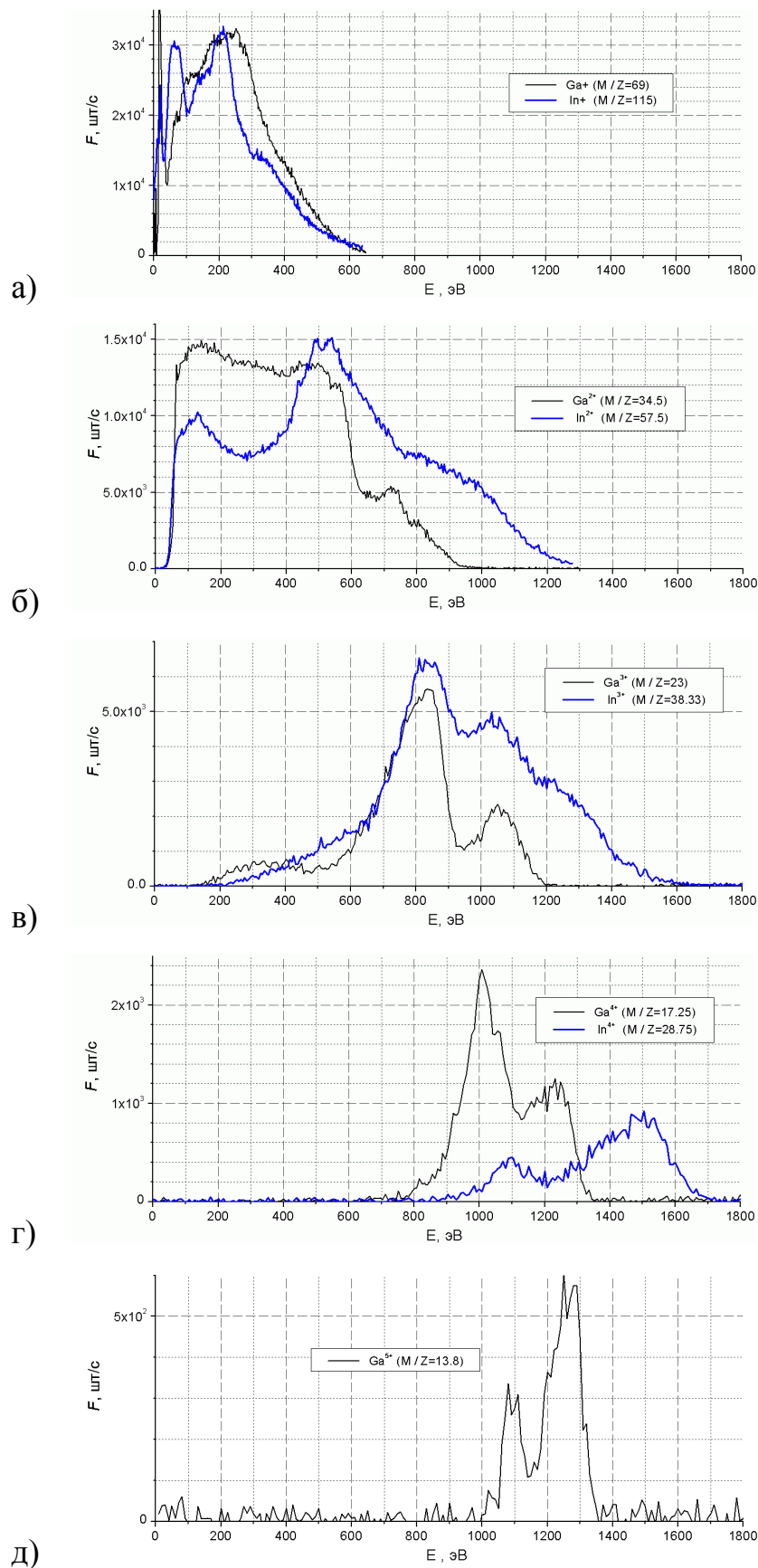


Рис. 7. Распределения $F(E)$ ионов различной кратности заряда Z по энергии: а)- $Z=1$, б)- $Z=2$, в)- $Z=3$, г)- $Z=4$, д)- $Z=5$.

4.2. Проведение спектроскопических исследований излучения лазерной абляционной плазмы и оценка её температуры на основе анализа соотношений спектральных линий.

4.2.1. Измерение температуры электронной компоненты плазмы по соотношению интенсивностей атомарных линий

Излучательная способность газа (плазмы) I в спектральной линии, соответствующей определенному переходу $n' \rightarrow n$ в атоме (ионе), пропорциональна заселенности верхнего уровня:

$$I_{n' \rightarrow n} = \frac{1}{4\pi} h\nu_{n'n} A_{n'n} N, \quad (12)$$

где $\nu_{n'n}$ – частота излучения при переходе $n' \rightarrow n$, $A_{n'n}$ – вероятность данного перехода.

Если вероятность перехода $A_{n'n}$ известна и система откалибрована таким образом, что экспериментатор знает соотношение между интенсивностью сигнала и числом фотонов, падающих на приемную площадку прибора, можно найти заселенность верхнего уровня и из нее определить температуру. Обычно метод измерения абсолютного излучения атомных состояний применяют только для нахождения плотности атомов в возбужденном состоянии при условии, что плазма оптически тонкая, то есть перепоглощение отсутствует. Для определения температуры гораздо проще определить относительную заселенность двух состояний. Если измерения интенсивностей переходов I_1 и I_2 проведены в одних и тех же условиях, то определить электронную температуру можно из соотношения Саха [1]

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{g_1 \nu_1 A_1}{g_2 \nu_2 A_2} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT_e}\right), \quad (13)$$

где g_i – статистический вес i -го перехода, E_i – энергия i -го уровня.

4.2.2. Анализ спектров излучения плазмы при лазерной абляции жидкометаллической мишени

На Рис. 8 приведены осциллограммы свечения плазмы, образованной на поверхности жидкого металла в воздухе и в вакууме. Видно, что свечение на поверхности мишени начинается уже через ~ 1 нс после начала лазерного импульса. Это говорит о высоком коэффициенте поглощения ИК - лазерного излучения поверхностью жидкого металла, что приводит к ее быстрому разогреву до температуры испарения и развитию оптического пробоя в парах металла. Интенсивность свечения плазмы оптического пробоя растет во время лазерного импульса, что можно связать с эффективным нагревом эрозионного факела падающим излучением. После окончания лазерного импульса начинается экспоненциальный спад свечения лазерной плазмы, связанный с ее разлетом и охлаждением. Наличие окружающего мишень газа несколько замедляет скорость разлета плазмы, что приводит к увеличению времени ее свечения.

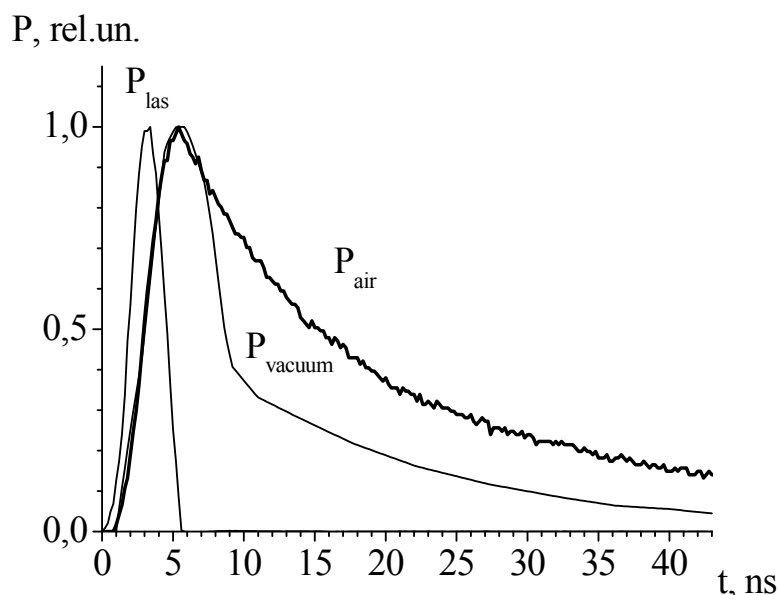


Рис. 8. Осциллограммы лазерного импульса (P_{las}) и свечения плазмы, образованной на поверхности жидкого металла в воздухе (P_{air}) и в вакууме (P_{vacuum}).

В ходе выполнения экспериментов было замечено, что на сигнале с коллектора при отрицательном напряжении смещения на нем наблюдается пик, начинающийся вместе с лазерным импульсом (Рис. 9). Появление данного пика можно связать с фотоэмиссией электронов с поверхности коллектора под действием ультрафиолетового излучения эрозионного факела на поверхности жидкого металла. В пользу этого говорит близкая форма импульса свечения плазмы и сигнала с коллектора.

На Рис. 10 приведен спектр в диапазоне 200-600 нм. Значения длин волн взяты из [2]. В спектре свечения эрозионного факела видны интенсивные линии атомов Ga и In и их одно- и двухкратных ионов. Следует отметить, что полученный спектр близок к спектрам свечения плазмы, полученной при подобных условиях облучения катодного пятна вакуумной дуги [3,4].

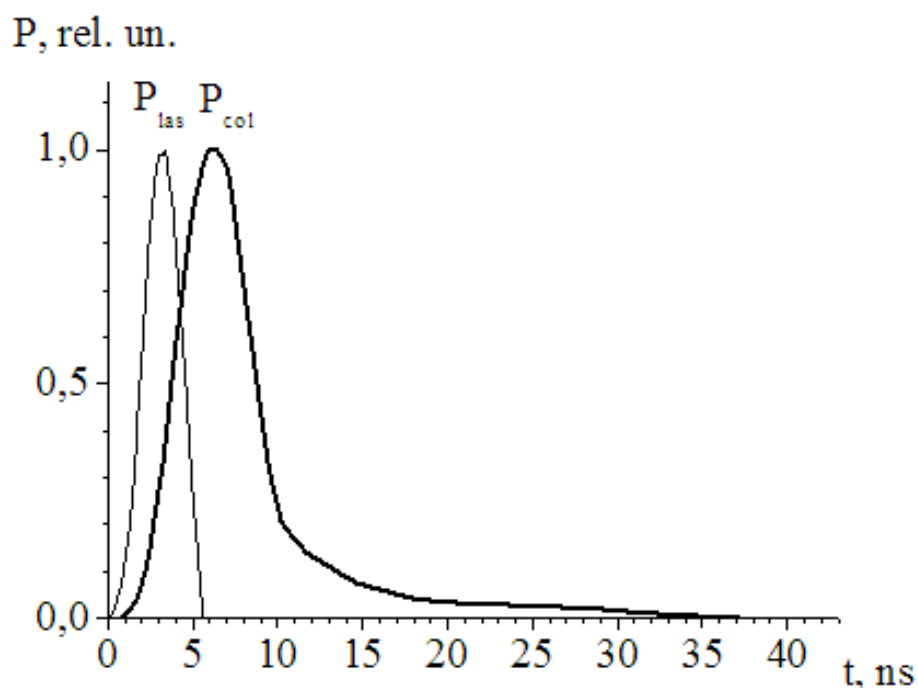


Рис. 9. Осциллограммы лазерного импульса (P_{las}) и сигнала с коллектора (P_{col}). Мишень расположена в вакууме.

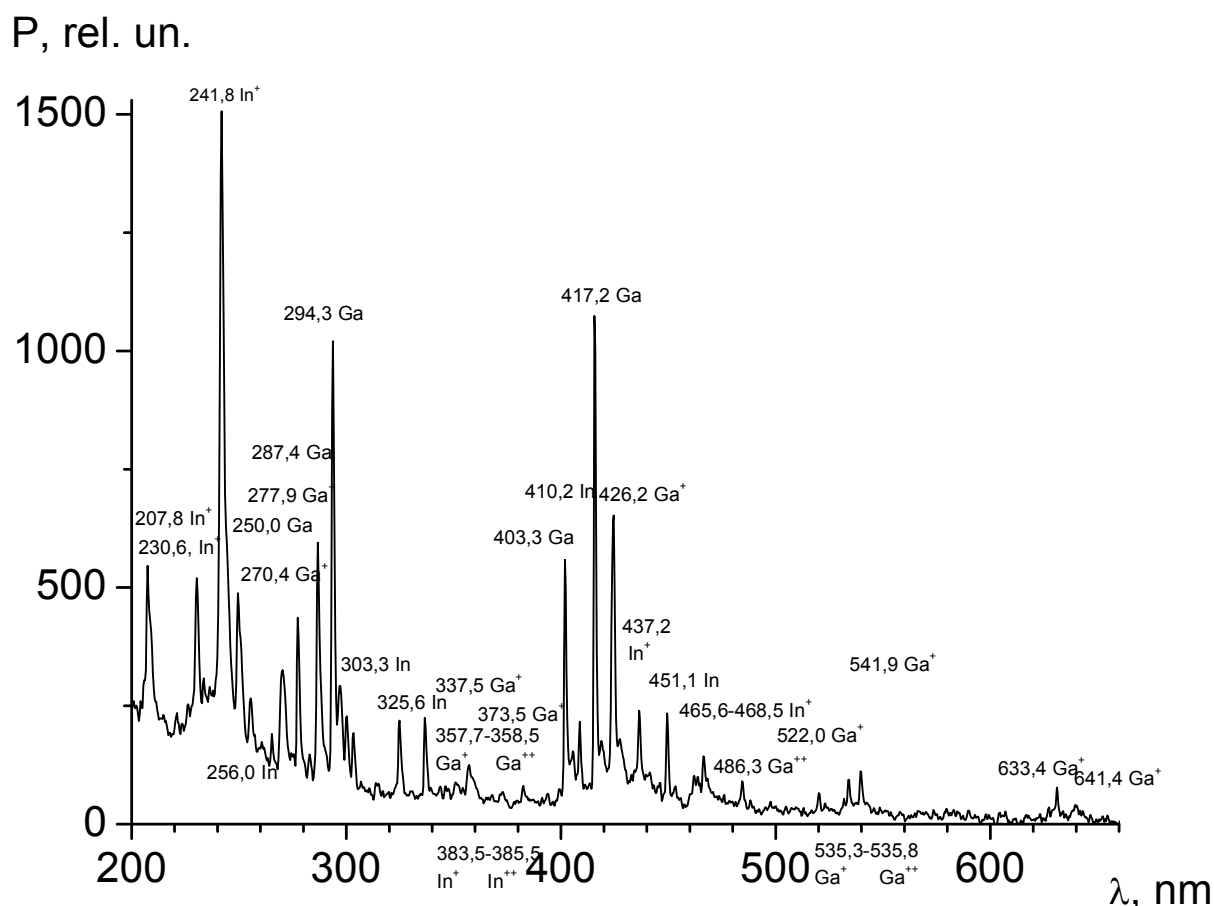


Рис. 10. Спектр свечения приповерхностной лазерной плазмы сплава галлия с индием.

Для анализа концентрации и температуры плазмы в абляционном факеле вблизи мишени (на расстояниях, не превышающих радиус фокального пятна лазерного излучения) были выбраны линии Ga I 403 нм и 417 нм и In I 410 нм и 451 нм. Данные линии достаточно интенсивны, и параметры линий, необходимые для анализа данных с использованием уравнения (13), известны из литературных источников [5].

Результаты решения уравнения (13) для выбранных линий приведены в таблице 4. Средние значения электронной температуры T_e вычислялись после обработки 20 спектров.

Таблица 4. Средние значения температуры электронной компоненты плазмы, вычисленные из соотношения интенсивностей спектральных линий

Пары линий	$\langle T_e \rangle$, эВ	ΔT , эВ
Ga I 403, 417 нм	2.8	± 0.2
In I 410, 451 нм	3.0	± 0.3

Данные значения температуры электронной компоненты абляционной плазмы оказались выше значений, измеренных в катодном пятне вакуумной дуги [6], что свидетельствует о большем энергокладе, реализованном в настоящих за счёт лазерной абляции, а также объясняет более высокие, чем в вакуумной дуге, скорости разлёта плазмы.

4.3. Измерение скорости истечения лазерной абляционной плазмы с использованием распределений ионов по энергиям по пункту 4.1 и зондовых измерений в соответствии с методикой по пункту 2.1

4.3.1. Результаты анализа энергетических спектров ионов

Путем стандартных процедур интегрирования функций распределения, представленных в разделе 4.1, могут быть получены относительное количество ионов той или иной зарядности в общем потоке, их средняя энергия, скорость, и т.д.

В Таблицах 5 и 6 для Ga и In соответственно, приведены наиболее важные статистические данные: доля ионов каждой кратности и средний заряд, средняя энергия и средняя скорость ионов каждой зарядности, а также средние скорости разлета ионов исследованных изотопов.

Таблица 5. Статистические параметры ионов Ga

	Z=1	Z=2	Z=3	Z=4	Z=5
Доля ионов данной зарядности, %	49	40	8	3	<1
Средний заряд иона Ga, Z	1.66				
Средняя энергия ионов данной зарядности <E>, эВ	235	372	782	1061	1209
Средняя энергия иона Ga, E _{Ga} , эВ (Дж)	360 (5.76×10⁻¹⁷)				
Средняя скорость ионов данной зарядности <v>, м/с	24439	30909	45982	53253	58087
Средняя скорость иона Ga, V _{Ga} , м/с	29663				
Средний импульс иона Ga, P _{Ga} , кг·м/с	3.42×10⁻²¹				

Таблица 6. Статистические параметры ионов In

	Z=1	Z=2	Z=3	Z=4
Доля ионов данной зарядности, %	42	41	15	2
Средний заряд иона In, Z	1.75			

Средняя энергия ионов данной зарядности $\langle E \rangle$, эВ	221	565	974	1330
Средняя энергия иона In , E_{In} , эВ (Дж)	491 (7.86×10^{-17})			
Средняя скорость ионов данной зарядности $\langle v \rangle$, м/с	18163	29539	39824	45405
Средняя скорость иона In , V_{In} , м/с	26496			
Средний импульс иона In , P_{In} , кг·м/с	5.09×10^{-21}			

Как следует из анализа полученных результатов, средний энерговклад в индиевую компоненту плазменного факела существенно превышает энерговклад в галлиевую компоненту. При этом средние скорости движения ионов In все же остаются несколько ниже скоростей галлиевых ионов. Однако средний импульс In иона существенно превышает средний импульс иона галлия. Эффективность преобразования энергии в импульс, т.е. отношение полученного импульса к вложенной энергии, уменьшается с ростом зарядности иона, и остается несколько выше для индиевой компоненты по сравнению с галлиевой. Следует также заметить, что энергии ионов увеличиваются практически прямо пропорционально их зарядовому состоянию, что свидетельствует о превалировании потенциального механизма ускорения ионов в плазменном факеле, например амбиполярного ускорения.

Наконец, с использованием относительного количества ионов каждого сорта, найденного путем интегрирования энергетических распределений и с

учетом изотопного состава металлов было найдено соотношение общего количества атомов Ga и In в сплаве. Поправочный множитель составлял 1.9 для галлия и 1.07 для индия. Найденный таким образом элементный состав плазменного потока оказался: Ga- 64% , In- 36%, что удовлетворительно согласуется с элементным составом сплава, использованного для заполнения мишени (~70% Ga, ~30% In). С учетом изотопического состава можно найти некие "эффективные" параметры плазменного потока, которые можно использовать для дальнейших оценок, представленные в таблице 7.

Таблица 7. усреднённые параметры абляционного факела.

средняя атомная масса $\langle m \rangle$	86.2 а.е.м., или 1.44×10^{-25} кг
средний заряд иона	1.69
средняя энергия иона	407 эВ , или 6.51×10^{-17} Дж
средняя скорость иона	28523 м/с
средний импульс иона $\langle p \rangle$	4.1×10^{-21} кг·м/с

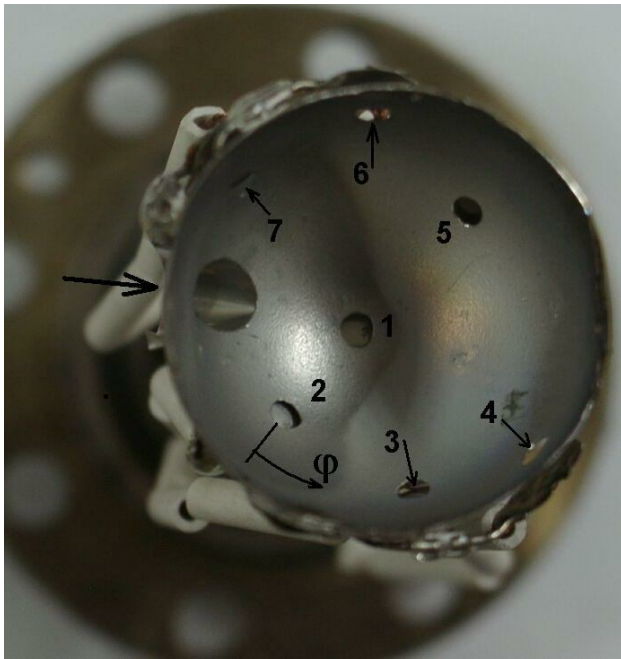
4.3.1. Результаты исследования скорости и углового распределения потока плазмы зондовыми измерениями

Прибор для проведения зондовых измерений представлял собой полусферу из нержавеющей стали диаметром 34 мм, в которой имелось отверстие для ввода лазерного луча (обозначено на рисунке жирной стрелкой), а также 7 отверстий одинакового диаметра 2.6 мм, расположенных под различными осевым и азимутальным углами θ и φ . Значения углов θ и φ для всех коллекторов приведены в табл. 8. Там же приведены значения скорости распространения плазмы, измеренные по задержке сигнала на зонды относительно момента времени окончания лазерного импульса, и общий заряд ионов плазменного сгустка.

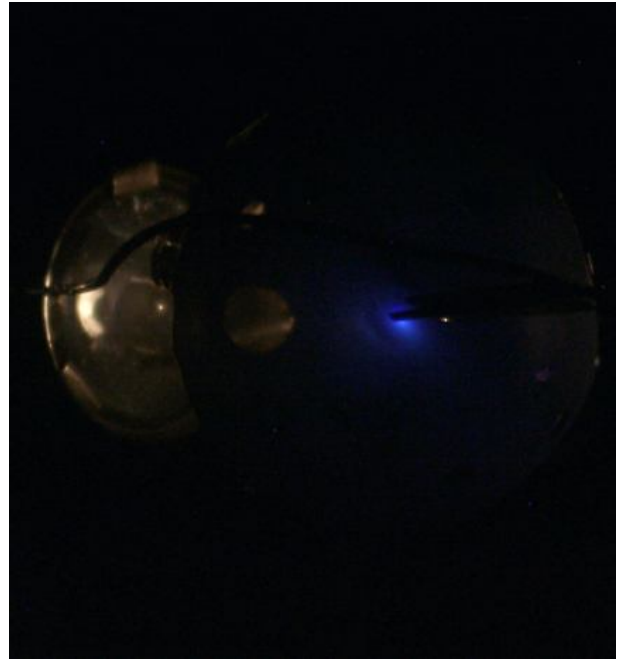
Таблица 8. Аксиальные и азимутальные углы коллекторов θ и φ , а также зарегистрированный в цепи коллекторов за один импульс электрический заряд q_p и средняя скорость разлеты электрических зарядов $\langle v \rangle$.

№ коллектора	$\theta, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$	$q_p, \text{ Кл}$	$\langle v \rangle, \text{ м/с}$
1	0	-	1.11×10^{-8}	25931
2	39	0	4.37×10^{-9}	17721
3	64	46	4.11×10^{-9}	18275
4	80	82	1.67×10^{-9}	12814
5	58	170	7.64×10^{-10}	10826
6	73	215	2.28×10^{-10}	8523
7	64	260	6.9×10^{-10}	10220

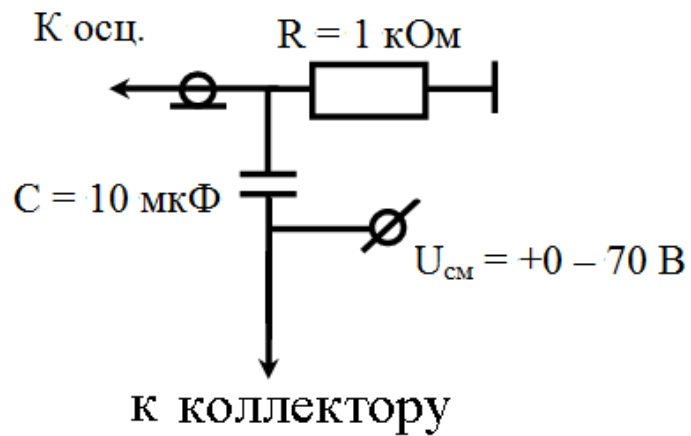
За отверстиями на расстоянии около 1 мм располагались коллекторы, электрические выводы которых посредством многоконтактного вакуумного ввода выводились наружу. Регистрировались ионные токи насыщения из плазмы. При этом для подачи небольших напряжений смещения на коллекторы использовалась ихема, приведенная на Рис. 11 (в). На Рис. 11, (б) представлена фотография узла в процессе работы в режиме, близком к оптимальному, т.е. такому, при суммарный ток на коллекторы был близок к максимальному. На фотографии можно видеть форму свечения плазменного факела. Осциллограммы ионного тока насыщения на коллекторы, соответствующие данному режиму работы, приведены на Рис. 12. Цифры, которыми помечены осциллограммы, соответствуют номерам коллекторов.



а)

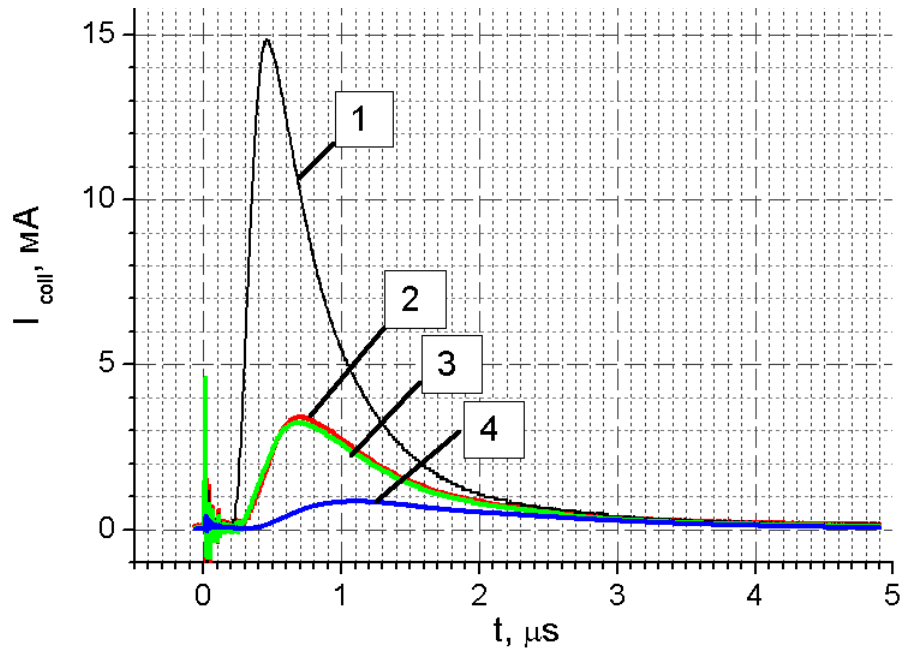


б)

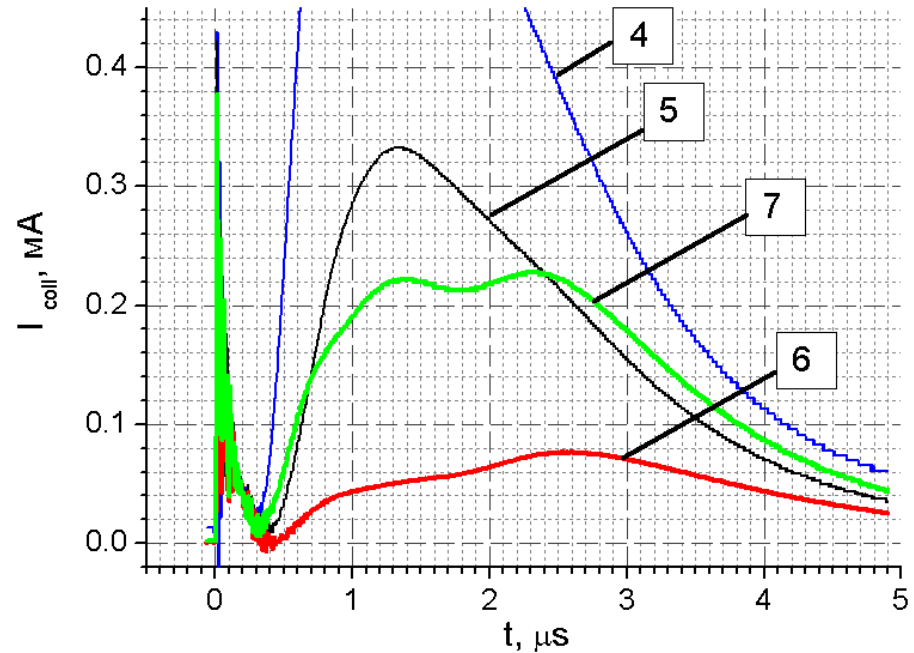


в)

Рис. 11. (а) Фотография коллекторной системы с нумерацией коллекторов. Большой стрелкой показано отверстие для ввода лазерного луча.
 (б) Фотография работающего макета МСУ;
 (в) схема регистрации и подачи напряжения смещения на коллекторы.



a)



б)

Рис. 12. Осциллограммы ионных токов насыщения на коллекторы 1-4 (а) и 4-7 (б) в режиме работы, близком к оптимальному.

Амплитуды токов и времена достижения максимума тока (времена пролета) сильно различаются. Максимальная амплитуда и минимальное время пролета достигается на осевом коллекторе. Для количественной характеристики в таблице 8 приведены интегралы токов коллекторов

(количество электричества, прошедшее за один импульс $q = \int I dt$), а также средние скорости зарядов, найденные как

$$\langle v \rangle = [\int I(t) (r / t) dt] / q \quad (14)$$

где $r = 1.8$ см – расстояние от мишени до коллекторов.

Как видно из представленных данных, разлет плазменной струи происходит в относительно небольшой угол, при этом осевая часть струи характеризуется не только примерно на полтора порядка величины более высокой плотностью потока, но и более высокой скоростью разлета. Периферические зоны струи движутся существенно (до 3 крат) медленнее. Сопоставляя эти данные с распределением ионов различной зарядности по скоростям, можно косвенно полагать, что в осевой части струи степень ионизации плазмы выше, чем в периферийных областях.

Заметим, что наблюдается некоторая ”несимметричность” струи с преимущественным распространением в нижние левые сегменты. Предположительно, это может быть связано с неточной установкой рабочего среза капилляра мишени.

4.4. Измерение механического импульса отдачи лазерного абляционного факела при воздействии наносекундного импульса лазерного излучения плотностью мощности на поверхности мишени порядка 10^9 Вт/см²

Измерения проводились в соответствии с методикой, описанной в разделе 2.5 отчёта по второму этапу настоящего проекта.

4.4.1. Измерения механического импульса отдачи на воздухе

На Рис. 13 приведены фотографии отклонения мишени маятника после одного (а) и пяти (б) лазерных импульсов. Измерения были проведены в воздухе атмосферного давления. При однократном воздействии отклонение

маятника №1 составило $S = 0.216$ мм и расчет по формуле (2.5.2) дает $P = 9.10 \pm 1.2 \times 10^{-9}$ Н·с. При воздействиях пятью импульсами лазерного излучения отклонение составило $S = 0.918$ мм или 0.183 мм/имп. Соответственно, средний за одно лазерное воздействие передаваемый механический импульс снижался на $\approx 15\%$. Падение переданного механического импульса можно связать с выходом мишени из фокальной области линзы. Причиной этого может быть уменьшение выноса массы, скорости и направления разлета эрозионного факела при падении плотности мощности лазерного излучения на поверхности мишени. При измерении маятником №2 переданный мишени импульс в воздухе составил $P = 9.30 \pm 1.2 \times 10^{-9}$ Н·с.

Важными параметрами мишенно-соплового узла ЛПД с рабочим телом на основе жидкого металла являются воспроизводимость механического импульса и возможность регулировки данного параметра. Для проверки воспроизводимости механического импульса были проведены измерения отклонения маятника №2 в вакууме в серии из 20 последовательных воздействий лазерными импульсами. На Рис. 14 показаны отклонения маятника в двух последовательных воздействиях на мишень из данной серии измерений. Во всех экспериментах разброс отклонения маятника был не больше пространственного разрешения объектива CCD-камеры ($\Delta S = \pm 0,0145$ мм). Импульс, переданный мишени в вакууме, в проведенной серии оставался стабильным и составлял $P = 5.60 \pm 1.2 \times 10^{-9}$ Н·с. Отметим, что полученные значения механического импульса примерно в два раза превышают значения, полученные в [7] при испытаниях макета ЛПД с рабочим телом на основе твердых металлов и близких параметрах лазерного импульса.

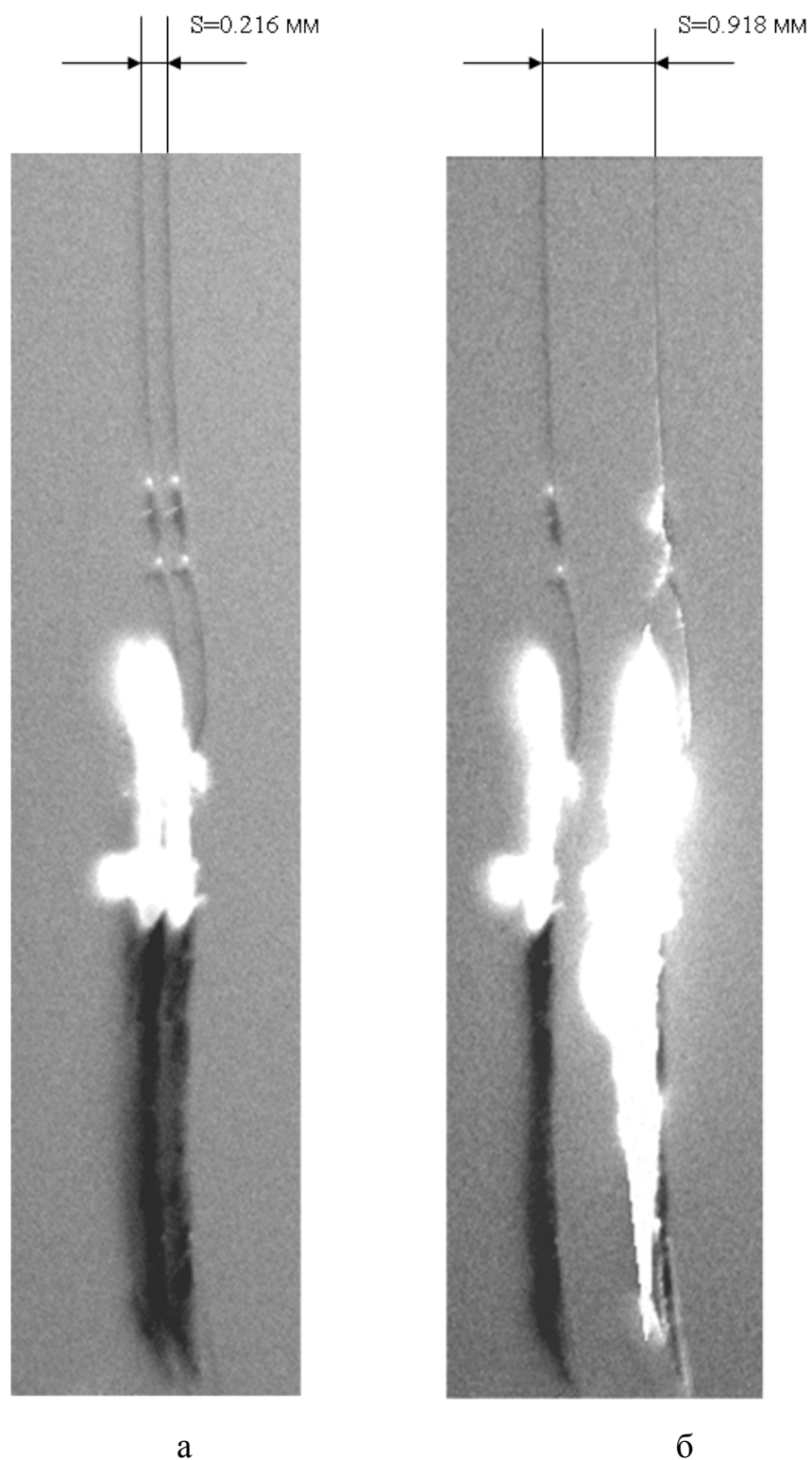


Рис. 13. Отклонение мишени маятника №1 при воздействии на него одного (а) и пяти (б) лазерных импульсов. Измерения проведены в воздухе атмосферного давления.

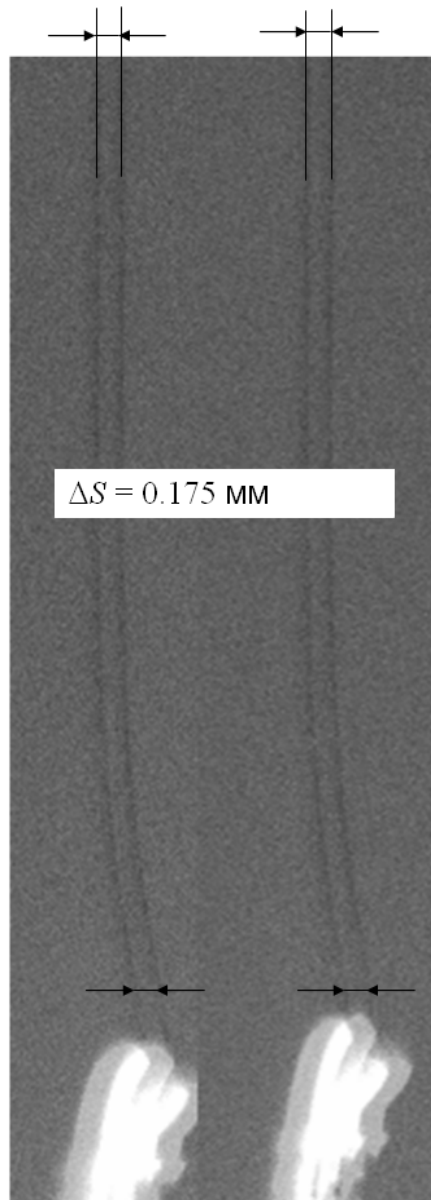


Рис. 14 Отклонение маятника №2 при двух последовательных воздействиях лазерными импульсами в вакууме. Выборка из серии 20 последовательных воздействий.

4.4.2. Измерения механического импульса отдачи в вакууме

Импульс, передаваемый жидкофазной мишени при воздействии в вакууме составил 60% данной величины, полученной при облучении мишени в воздухе атмосферного давления. Передаваемый механический импульс определяется скоростью разлета плазмы и временем воздействия плазмы на

мишень. Известно, что при лазерной абляции [8,9] скорость разлета эрозионного факела падает с ростом давления окружающего газа, но при этом давление плазмы вблизи мишени спадает медленнее, что увеличивает время воздействия эрозионного факела на мишень. Полученный результат говорит о том, что падение времени воздействия на мишень при облучении в вакууме определяет уменьшение передаваемого мишени механического импульса.

На Рис.16 показана зависимость механического импульса, передаваемого на мишень от ее положения относительно точки фокуса кварцевой линзы. Удаление мишени из фокальной области позволяет плавно изменять механический импульс в пределах от 0 до максимального значения $P = 5.60 \pm 1.2 \times 10^{-9}$ Н·с.

P/P_0 , отн. ед.

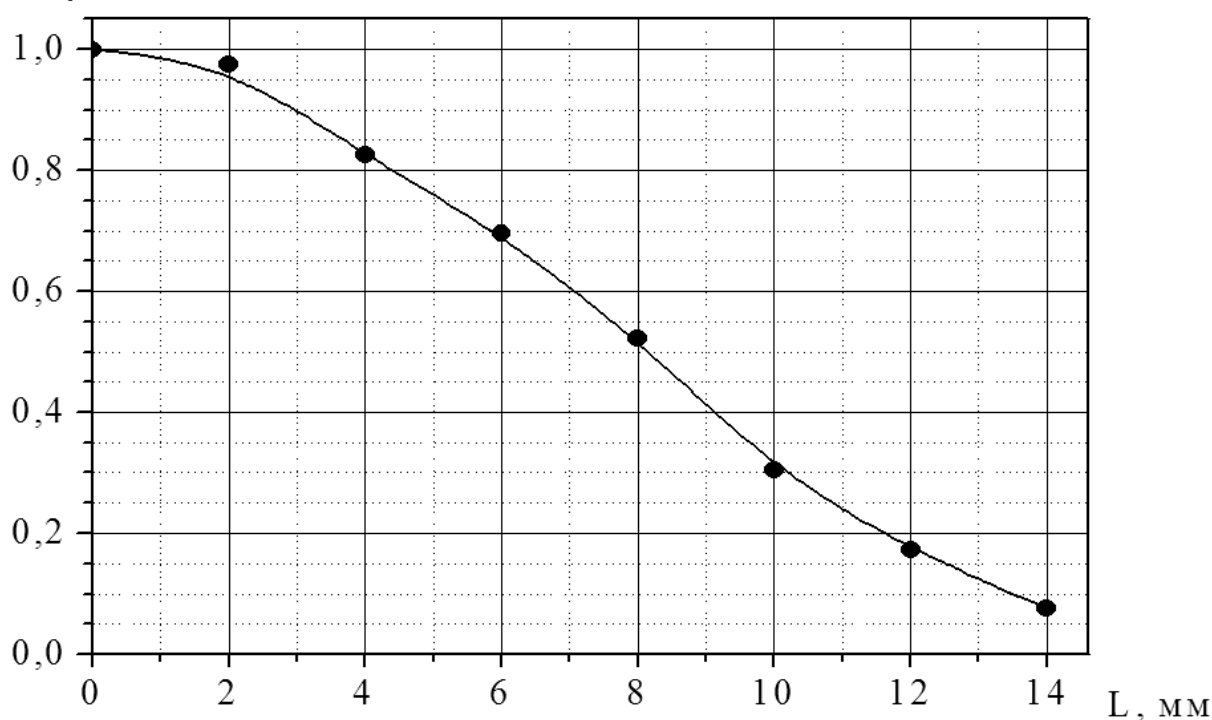


Рис. 15. Зависимость механического импульса, передаваемого жидкофазной мишени, от ее положения L относительно точки фокуса линзы. $L = 0$ соответствует положению мишени в фокусе линзы.

4.5. Проведение патентных исследований по ГОСТ Р 15.011-96

Отчет о патентных исследований по теме проекта выполнялся в соответствии с ГОСТ Р. 15.011-96. Отчёт о патентных исследованиях № 2012.06.29 по четвёртому этапу проекта выполнен в виде отдельного документа. В данном разделе приводится содержательная часть отчёта о патентных исследованиях.

4.5.1. Общие данные об объекте исследования

Принцип действия лазерно-плазменного двигателя (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

$$n_{ec} = \frac{m_e \pi c^2}{e^2 \lambda^2}, \quad (15)$$

где λ – длина волны лазерного излучения, e – элементарный заряд, m_e – масса покоя электрона, c – скорость света, 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. При плазменном режиме лазерной абляции увеличение длины волны излучения удлиняет стадию испарения материала мишени и позволяет достичь больших 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 удельным энерговыделением [10] и вычисляется как

$$v_m = \sqrt{2(\epsilon_{in} - \epsilon_{vapor})} \quad (16)$$

Испарительный режим для создания реактивной тяги в настоящее время не используется, поскольку он реализуется в пикосекундном и фемтосекундном диапазонах длительностей лазерного излучения, но такие лазерные системы обладают низкой эффективностью преобразования электрической энергии в излучение. С другой стороны, современные твердотельные лазеры наносекундного диапазона длительностей обеспечивают коэффициент преобразования энергии на уровне 40%, что делает их использование в ЛПД актуальным.

Эффективность ЛПД, работающего в плазменном режиме абляции 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 процессе преобразования энергии нельзя беспредельно наращивать плотность мощности лазерного излучения, т.к. по мере нагрева плазмы факела всё большая доля энергии будет тратиться на излучение плазмы. Этот баланс определяет оптимум в зависимости эффективности преобразования энергии от плотности мощности на мишени, который наблюдается [11,12] в области 10^{10} Вт/см².

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 типичных значениях длительности импульса лазерного излучения 5 нс и скорости разлёта плазмы вдоль поверхности мишени 12 км/с ожидаемый оптимальный радиус фокального пятна должен быть порядка 50 мкм.

Условие на плотность мощности лазерного излучения в фокальном пятне и на размер самого фокального пятна являются ключевыми параметрами, определяющими функциональные возможности требуемого для построения ЛПД лазера и мишенного узла.

4.5.2. Основная (аналитическая) часть

Патентный поиск осуществлялся по вопросам конструкций мишенных узлов ЛПД. При анализе привлекалась не только информация об

изобретениях, раскрытая в охранных документах, но и другая научно-техническая информация, отобранная из различных источников. По фонду охранных документов СССР и России в процессе поиска отобран для дальнейшего анализа 1 патент Российской Федерации. Кроме того, для анализа был отобран также 1 патент США и 2 публикации в открытой научной печати. Список отобранных для анализа источников с указанием наиболее существенных технических особенностей приведен в Приложении 4 Отчета о патентных исследованиях.

Объектом данного патентного исследования является мишенный узел ЛПД.

Известен лазерно-плазменный двигатель (ЛПД) [13], в составе которого используется мишенный узел в виде прозрачной ленты, на одну из сторон которой нанесено непрозрачное покрытие из рабочего вещества ЛПД. При воздействии лазерного излучения со стороны нанесённого покрытия происходит абляция рабочего тела с образованием реактивной струи, направленной перпендикулярно к плоскости ленты. При воздействии лазерного излучения со стороны прозрачной ленты также происходит формирование реактивной струи в том же направлении. В результате абляции происходит унос рабочего вещества, и для воспроизведения процесса требуется перемещение ленты, осуществляемое лентопротяжным механизмом. Необходимость использования лентопротяжного механизма является одним из недостатков данного мишенного узла, поскольку утяжеляет ЛПД и увеличивает его габариты. Кроме того, для подачи рабочего тела в зону абляции используется носитель (лента) масса которой является также неиспользуемой. Кроме того, в качестве материалов ленты используются органические полимеры, не обладающие радиационной стойкостью и имеющие ограниченный срок эксплуатации в условиях космического пространства.

Известен ЛПД [14], в составе которого используется твердотельная мишень, не требующая носителя и представляющая собой цилиндр, изготовленный из рабочего вещества. В результате абляции происходит унос рабочего вещества, и поверхность мишени оказывается вне зоны фокуса лазерного излучения. Для продолжения работы ЛПД в составе мишенного узла предусмотрен механизм перемещения мишени. В данном мишенном узле по сравнению с [13] улучшены массогабаритные характеристики за счёт более компактного механизма позиционирования рабочего тела и за счёт полного использования рабочего вещества. Однако данный мишенный узел сохраняет недостаток предыдущего устройства, заключающийся в необходимости использования механизма позиционирования рабочего тела.

Известен мишенный узел ЛПД [15], не требующий использования механизма позиционирования рабочего тела и обеспечивающий поступление рабочего вещества в зону лазерной абляции ЛПД без использования дополнительного носителя. Мишенный узел ЛПД представляет собой герметичный резервуар, заполненный рабочим веществом - жидким металлом или иной жидкостью с низким давлением насыщенных паров, герметично соединённый с капилляром, открытый торец которого является зоной абляции, находящейся в области фокуса лазерного излучения ЛПД. Подобное устройство используется в космических двигателях на основе полевой эмиссии ионов из жидкого металла [16]. При работе ЛПД происходит унос рабочего вещества за счёт абляции и его естественное поступление, восстанавливающее форму зоны абляции (мениск на торце капилляра) за счёт капиллярных сил. Поступление рабочего вещества из резервуара в зону абляции обеспечивается превышением отрицательного давления мениска в капилляре над отрицательным давлением мениска в резервуаре, в результате чего результирующее давление оказывается отрицательным вплоть до восстановления поверхности в области абляции. Прототип мишенного узла [15] лишён недостатков мишенных узлов [13] и

[14]. Однако устройство [15] обладает собственным существенным недостатком, заключающимся в формировании поверхностной волны на поверхности жидкости при лазерной абляции, что приводит к формированию большого числа капель с их последующей эмиссией в пространство при отражении поверхностной волны от стенок капилляра. Ещё одним механизмом формирования капель является формирование кумулятивной струи при восстановлении стационарного мениска на торце капилляра. Интенсивная эмиссия капель при работе ЛПД с мишенным узлом, выполненным в соответствии с прототипом [15], приведёт к снижению эффективности ЛПД вследствие потерь рабочего вещества.

4.5.3. Заключение

Создание мишенного узла ЛПД на основе металлического капилляра с резервуаром, заполненным жидким рабочим веществом является техническим решением, обладающим недостаточным изобретательским уровнем для защиты его в качестве изобретения. Однако в связи с оригинальным подходом к порционной подаче рабочего вещества в зону абляции за счёт придания нужной формы элементу конструкции (капилляру), разработанный мишенный узел ЛПД обладает новизной, достаточной для подачи патента на полезную модель.

4.5.4. Задание на проведение патентных исследований

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

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

Этап работы: четвёртый, **срок выполнения** 30 июня 2012 г.

Задачи патентных исследований: Исследование новизны разрабатываемого «мишенного узла лазерно-плазменного двигателя».

Ретроспективность поиска – 1965 – 2012 гг.

Таблица 9. **КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**

Виды патентных исследований	Подразделения исполнители (соисполнители)	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения патентных исследований. Начало. Окончание	Отчетные документы
Поиск и отбор патентной документации в соответствии с регламентом	ИСЭ СО РАН	Попов С.А.	20.03.2012 – 10.04.2012	Справка о поиске. Приложение 3
Систематизация и анализ отобранной документации	ИСЭ СО РАН	Попов С.А.	11.04.2012 – 10.05.2012	таблица В.6.1. Обзор.
Составление отчета в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96	ИСЭ СО РАН	Попов С.А.		Отчет о патентных исследованиях

4.5.5. Регламент поиска

Наименование работы (темы): «Развитие диагностического комплекса на базе НОЦ «Сильноточная электроника» в ИСЭ СО РАН и проведение исследований по диагностике плазмы дуги в вакуумных сетевых

выключателях и плазмы лазерной абляции жидкометаллической мишени в лазерно-плазменных двигателях малых космических аппаратов».

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

Номер и дата утверждения задания: №1 от 20 марта 2012 г.

Этап работы четвёртый.

Цель поиска информации: Определение «новизны» разрабатываемого «мишенного узла лазерно-плазменного двигателя» при подготовке заявки на выдачу патента с целью снижения риска получения отказа в выдаче патента или последующего его опротестования.

Обоснование регламента поиска: Патентные исследования в странах Россия, СНГ, США, Канада, Страны Евросоюза, Япония, Китай с глубиной поиска 43 года.

Начало поиска: 20 марта 2012 г.

Окончание поиска: 10 мая 2012 г.

Таблица 10.

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	F02K, 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	

4.5.6. Справка о поиске

Поиск проведен по следующим материалам:

Начало поиска 20.03.2012г.

Окончание поиска 10.05.2012г.

Таблица 11.

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	F02K, 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	

4.5.7. Отчёт о поиске

Поиск проведен в соответствии с заданием на проведение патентных исследований руководителя темы Батракова А.В., зав. лаб., № 1 от 20 марта 2012 г. и Регламентом поиска № 1 от 20 марта 2012 г.

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

Этап работы четвертый.

Начало поиска 20 марта 2012 г. Окончание поиска 10 мая 2012 г.

Сведения о выполнении регламента поиска: Установлена новизна, достаточная для подачи патента на полезную модель, регламент выполнен в полном объеме.

4.5.8. Материалы, отобранные для анализа

Таблица 12. 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.
Мишенные узлы лазерно-плазменных двигателей	US 6530212, F02K 11/00, H05H 1/24 патент	С.Р. Phipps, J. Luke, Photonic Associates, (US), 11.03.2003	Laser plasma thruster
	RU (11) 2338918(13) F02K 11/00 (2006.01) патент	Чумаков А.Н., Босак Н.А., Петренко А.М., Рябцев Г.И., Богданович М.В., Енжиевский А.И., Безъязычная Т.В., Рябцев А.Г., Щемелев М.А., Красковский А.С.,	Лазерно-плазменный двигатель

		<p>Государствен ное научное учреждение «Институт физики имени Б.И. Степанов а» Национально й академии наук Беларуси» (BY), 14.02.2007</p>	
	<p>IEEE Trans. Plasma Sci. - 2011. - vol. 39. - issue 6. - pp. 1412-1417.</p>	<p>S.A. Popov, A.N. Ranchenko, A.V. Batrakov, F.N. Ljubchenko, V.V. Mataibaev., ИСЭ СО РАН (RU), ФГУП ЦНИИмаш (RU), 01.11.2010</p>	<p>Experimental Study of the Laser Ablation Plasma Flow From the Liquid Ga- In Target</p>

Таблица 13. Научно-техническая документация по исследуемой тематике

Авторы	Название	Источник
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
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.).
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).
S.A. Popov, A.N. Panchenko, A.V. Batrakov, F.N. Ljubchenko, V.V. Mataibaev.	Experi-mental 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.
M. Tajmar, A. Genovese, W. Steiger.	Indium FEED Microthruster Experimental Characterization	AIAA Journal of Propulsion and Power. - 2004. - Vol. 20. - No. 2. - pp. 211-218.

4.6. Подготовка заявки на полезную модель «мишенно-сопловый узел лазерно-плазменного двигателя»

В результате проведения исследований по диагностике плазмы жидкометаллической мишени при лазерной абляции было показано, что плазменный факел имеет узкую направленность, и управление вектором тяги достигается путём сканирования мениска капилляра, заполненного жидким металлом, фокальным пятном лазерного излучения. Такой подход существенно упрощает конструкцию ЛПД за счёт исключения необходимости использования сопла. В связи с обстоятельствами, обнаруженными в ходе исследования, название заявки было изменено.

МПК F02K 99/00 (2009)

МИШЕННЫЙ УЗЕЛ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Полезная модель относится к области ракетной техники, в частности, к компонентам реактивных двигателей, основанных на лазерной абляции.

Известен лазерно-плазменный двигатель (ЛПД) [13], в составе которого используется мишенный узел в виде прозрачной ленты, на одну из сторон которой нанесено непрозрачное покрытие из рабочего вещества ЛПД. При воздействии лазерного излучения со стороны нанесённого покрытия происходит абляция рабочего тела с образованием реактивной струи, направленной перпендикулярно к плоскости ленты. При воздействии лазерного излучения со стороны прозрачной ленты также происходит формирование реактивной струи в том же направлении. В результате абляции происходит унос рабочего вещества, и для воспроизведения процесса требуется перемещение ленты, осуществляемое лентопротяжным механизмом. Необходимость использования лентопротяжного механизма является одним из недостатков данного мишенного узла, поскольку

утяжеляет ЛПД и увеличивает его габариты. Кроме того, для подачи рабочего тела в зону абляции используется носитель (лента) масса которой является также неиспользуемой. Кроме того, в качестве материалов ленты используются органические полимеры, не обладающие радиационной стойкостью и имеющие ограниченный срок эксплуатации в условиях космического пространства.

Известен ЛПД [14], в составе которого используется твердотельная мишень, не требующая носителя и представляющая собой цилиндр, изготовленный из рабочего вещества. В результате абляции происходит унос рабочего вещества, и поверхность мишени оказывается вне зоны фокуса лазерного излучения. Для продолжения работы ЛПД в составе мишенного узла предусмотрен механизм перемещения мишени. В данном мишенном узле по сравнению с [13] улучшены массогабаритные характеристики за счёт более компактного механизма позиционирования рабочего тела и за счёт полного использования рабочего вещества. Однако данный мишенный узел сохраняет недостаток предыдущего устройства, заключающийся в необходимости использования механизма позиционирования рабочего тела.

Известен мишенный узел ЛПД [15], взятый нами за прототип, не требующий использования механизма позиционирования рабочего тела и обеспечивающий поступление рабочего вещества в зону лазерной абляции ЛПД без использования дополнительного носителя. Мишенный узел ЛПД представляет собой герметичный резервуар, заполненный рабочим веществом - жидким металлом или иной жидкостью с низким давлением насыщенных паров, герметично соединённый с капилляром, открытый торец которого является зоной абляции, находящейся в области фокуса лазерного излучения ЛПД. Подобное устройство используется в космических двигателях на основе полевой эмиссии ионов из жидкого металла [16]. При работе ЛПД происходит унос рабочего вещества за счёт абляции и его естественное поступление, восстанавливающее форму зоны абляции (мениск

на торце капилляра) за счёт капиллярных сил. Поступление рабочего вещества из резервуара в зону абляции обеспечивается превышением отрицательного давления мениска в капилляре над отрицательным давлением мениска в резервуаре, в результате чего результирующее давление оказывается отрицательным вплоть до восстановления поверхности в области абляции. Прототип мишенного узла [15] лишён недостатков мишенных узлов [13] и [14]. Однако устройство [15] обладает собственным существенным недостатком, заключающимся в формировании поверхностной волны на поверхности жидкости при лазерной абляции, что приводит к формированию большого числа капель с их последующей эмиссией в пространство при отражении поверхностной волны от стенок капилляра. Ещё одним механизмом формирования капель является формирование кумулятивной струи при восстановлении стационарного мениска на торце капилляра. Интенсивная эмиссия капель при работе ЛПД с мишенным узлом, выполненным в соответствии с прототипом [15], приведёт к снижению эффективности ЛПД вследствие потерь рабочего вещества.

Задача, решаемая в заявляемой полезной модели – повышение эффективности мишенного узла, что позволит повысить эффективность лазерно-плазменного двигателя.

Техническим результатом заявляемой модели является снижение паразитной эмиссии капель мишенного узла с жидким рабочим веществом, поступающим в зону абляции естественным образом за счёт действия капиллярных сил.

Указанный технический результат достигается тем, что в мишенном узле ЛПД, содержащем резервуар, заполненным жидким рабочим веществом, и герметично соединённым с капилляром, открытый торец которого является зоной абляции и находится в области фокуса лазерного излучения ЛПД, согласно полезной модели, капилляр выполнен диаметром меньшим диаметра фокального пятна падающего лазерного излучения, а на открытом

торце капилляра выполнена лунка, внешний диаметр которой совпадает с диаметром фокального пятна. При этом объём лунки равен объёму жидкого рабочего вещества, испаряемого за один импульс лазерного излучения.

Конструкция мишенного узла ЛПД представлена на Фиг. 1 (Рис. 16). Капилляр мишенного узла 1 соединён с резервуаром 2, заполненным рабочим веществом (жидкостью) 3, и имеет внутренний диаметр меньший, чем диаметр фокального пятна Φ_F лазерного излучения 4, вызывающего абляцию и формирующего реактивную струю. В начальный период функционирования ЛПД (приработка) происходит интенсивная эрозия торца капилляра с образованием эрозионной лунки 5. Размеры эрозионной лунки 5 при работе ЛПД после приработки не изменяются, если неизменными остаются параметры лазерного излучения 4 в зоне абляции. Внешний диаметр полностью сформированной лунки 5 равен диаметру фокального пятна Φ_F , а её глубина определяется количеством рабочего вещества, уносимого за один импульс лазерного излучения. При такой геометрии зоны абляции рабочее вещество (жидкость) уносится полностью из лунки с образованием реактивной струи, поверхностная волна не образуется в виду отсутствия жидкости в лунке, а кумулятивная струя имеет незначительные размеры в силу малости внутреннего диаметра капилляра. Поскольку энергия лазерного излучения тратится полностью на испарение рабочего вещества, заполняющего лунку, дальнейшая эрозия при длительной работе ЛПД не происходит. Эрозионная лунка заполняется рабочим веществом (жидкостью) в промежутки времени между импульсами лазерного излучения. Таким образом, представленный мишенный узел обеспечивает низкую интенсивность эмиссии капель и, как следствие, более высокую эффективность ЛПД.

Источники информации, принятые во внимание при составлении заявки на полезную модель:

13. С.R. Phipps, J. Luke. Laser plasma thruster // Патент США US 6530212 F02K 11/00, H05H 1/24, Photonic Associates, USA, 11.03.2003.
14. Чумаков А.Н., Босак Н.А., Петренко А.М., Рябцев Г.И., Богданович М.В., Енжиевский А.И., Безъязычная Т.В., Рябцев А.Г., Щемелев М.А., Красковский А.С. Лазерно-плазменный двигатель // Патент РФ (19) RU

(11) 2338918(13) F02K 11/00 (2006.01). - Заявл. 14.02.2007. - БИ № 32. - 20.11.2008.

15. 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.
16. 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.

МИШЕННЫЙ УЗЕЛ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

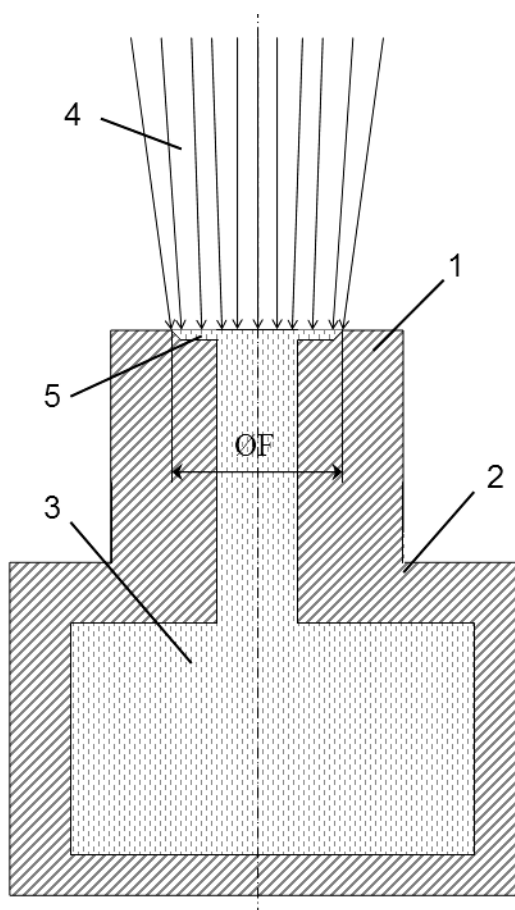


Рис. 16.

Фиг. 1

Формула полезной модели

МИШЕННЫЙ УЗЕЛ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Мишенный узел лазерно-плазменного двигателя, содержащий резервуар, заполненный жидким рабочим веществом, герметично соединённый с капилляром, открытый торец которого является зоной абляции и находится в области фокуса лазерного излучения лазерно-плазменного двигателя, отличающийся тем, что диаметр капилляра меньше диаметра фокального пятна падающего лазерного излучения, а на открытом торце капилляра выполнена лунка, внешний диаметр которой совпадает с диаметром фокального пятна, и объём которой равен объёму жидкого рабочего вещества, испаряемого за один импульс лазерного излучения.

РЕФЕРАТ

МИШЕННЫЙ УЗЕЛ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Полезная модель относится к области ракетной техники, в частности к компонентам реактивных двигателей, основанных на лазерной абляции. Задача, решаемая в заявляемой полезной модели – повышение эффективности мишенного узла лазерно-плазменного двигателя. Технический результат – снижение паразитной эмиссии капель жидкого рабочего вещества в мишенном узле при работе лазерно-плазменного двигателя. Указанный технический результат достигается тем, что в мишенном узле ЛПД, содержащем резервуар, заполненным жидким рабочим веществом, и герметично соединённым с капилляром, открытый торец которого является зоной абляции и находится в области фокуса лазерного излучения ЛПД, согласно полезной модели, капилляр выполнен диаметром меньшим диаметра фокального пятна падающего лазерного излучения, а на

открытом торце капилляра выполнена лунка, внешний диаметр которой совпадает с диаметром фокального пятна. При этом объём лунки равен объёму жидкого рабочего вещества, испаряемого за один импульс лазерного излучения. Поскольку рабочее вещество в зоне абляции за импульс лазерного излучения испаряется полностью, не происходит формирование волны на поверхности жидкого рабочего вещества, что снижает интенсивность эмиссии капель при работе двигателя. В промежутках времени между импульсами лазерного излучения происходит восстановление уровня рабочей жидкости в зоне абляции за счёт капиллярных сил.

4.7. Подготовка статьи для опубликования в журнале из списка рекомендованных ВАК со ссылкой на проведение НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы

Данная статья подготовлена для журнала «Известия вузов. Физика», ISSN 0021-3411, импакт-фактор (РИНЦ) 0.826.

УДК: 533.9.03.

*А.В. БАТРАКОВ, Ф.Н. ЛЮБЧЕНКО, В.В. МАТАЙБАЕВ, А.Н. ПАНЧЕНКО, С.А. ПОПОВ, А.Е. ТЕЛЬМИНОВ***ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗЕРКАЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКИ¹**

Использование лазерно-плазменных микродвигателей, основанных на использовании импульса отдачи при лазерной абляции, является перспективным способом управления положения микро и наноспутников. В рамках настоящей работы в качестве рабочего тела использован жидкофазный Ga-In сплав, а для фокусировки лазерного излучения на поверхность мишени- собирающее зеркало, изготовленное путем напыления алюминия. В работе методом регистрации и анализа ионного тока насыщения исследованы наиболее актуальные для лазерно-плазменного двигателя параметры: скорость разлета плазмы, интенсивность, однородность и угловое распределение плазменного потока. Путем анализа поверхности зеркала в растровом электронном микроскопе сделаны выводы об объеме капельной фракции в продуктах эрозии и ресурсе узла.

Введение

Для корректировки пространственного положения и траектории движения космических аппаратов массой от нескольких единиц до десятков килограммов (микро- и наноспутников) требуются небольшие движущие импульсы, выверенных с высокой точностью. Наиболее перспективным в этом отношении является использование лазерно-плазменных двигателей (ЛПД), принцип работы которых основан на использовании импульса отдачи испаряемого под воздействием мощного лазерного излучения материала мишени [1-6]. Достоинствами ЛПД являются устойчивая работа на малых уровнях тяги ($<10^{-7}$ Н·с), а также высокая эффективность использования рабочего тела, обусловленная высокой скоростью истечения рабочего тела (>10 км/с). Разработка ультракомпактных импульсно периодических лазеров малой массы делают такую задачу вполне реалистичной [5, 6].

Основным недостатком ЛПД с твердотельным рабочим телом является необходимость использования специальной механической системы подачи рабочего тела в область фокуса лазерного излучения, что существенно ухудшает массогабаритные характеристики ЛПД и снижает его надежность. Для решения этой проблемы представляется перспективным использование мишеней из материалов в жидкой фазе. В этом случае, после испарения под воздействием лазерного импульса первоначальная форма мениска рабочей жидкости восстанавливается за счет сил поверхностного натяжения, что позволяет исключить проблему механической подачи рабочего тела. Более того, при использовании жидкофазного рабочего тела порог абляции снижается, при этом скорость истечения рабочего тела и эффективность ЛПД повышаются [7, 8].

Недавно нами были начаты экспериментальные исследования лазерной абляции жидкофазной металлической Ga-In мишени применительно к ЛПД [9]. В целом эксперименты подтвердили целесообразность использования такого подхода. Вместе с тем, при использовании линзы для фокусировки лазерного излучения на поверхности мишени серьезной проблемой, ограничивающей ресурс ЛПД, является осаждение продуктов абляции на поверхности линзы.

Радикальным образом эту проблему можно решить, если использовать зеркальный фокусирующий элемент, образованный металлической поверхностью. В этом случае осаждение дополнительного покрытия из паро-плазменной фазы не должно существенно изменить отражающие свойства зеркала. В рамках настоящей работы экспериментально исследованы параметры абляции и ресурсные закономерности прототипа ЛПД с зеркальной фокусировкой лазерного излучения.

Второй целью работы было исследование капельной фракции эрозии рабочего тела. Данный аспект имеет принципиальное значение по следующим причинам. Во-первых, осаждение капель на зеркальной поверхности может существенно повлиять ее шероховатость, т.е. приводить к рассеянию лазерного луча. Во-вторых, можно ожидать, что скорость капель составляет величину, многократно меньшую по сравнению со скоростью ионной компоненты плазмы и требуемой скоростью истечения рабочего тела, что может негативно сказаться на коэффициенте использования рабочего тела.

¹ Работа выполнялась при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг. в рамках госконтракта № 14.740.11.0317.

Экспериментальная установка и методики

Схема эксперимента показана на рис. 1. Основная часть экспериментов проводилась в условиях безмасляного вакуума при давлении остаточных газов не более 10^{-6} Торр. Как и в [9], для абляции использовался миниатюрный Nd:YAG лазер с длиной волны 1064 нм с накачкой от полупроводникового светодиода, подобный описанному в [6]. Длительность импульса излучения на высоте $t_{1/2}$ составляла величину $t_{1/2} = 2.7$ нс при частоте следования импульсов до 500 Гц (в ходе эксперимента лазер обычно работал на частоте 100 Гц). Полная энергия излучения в отдельном импульсе Q составляла величину 0.28 мДж, мгновенная мощность излучения достигала 100 кВт.

Как и в [9], в качестве рабочего тела использовался эвтектический сплав галлия (70%) и индия (30%). Данный сплав имеет температуры плавления 16°C и низкое давление насыщенных паров при комнатной температуре. Конструктивно корпус мишени представлял капилляр из нержавеющей стали с внутренним и внешним диаметром 0.5 и 0.8 мм, соответственно (заготовкой служила медицинская игла). Рабочий торец капилляра был срезан под углом, близким к 45° . Посредством лазерной сварки капилляр мог быть интегрирован с резервуаром жидкого металла, изготовленным также из нержавеющей стали. Заполнение корпуса мишени рабочей жидкостью производилось в вакууме при высокой температуре, благодаря чему жидкий металл хорошо смачивал стенки корпуса и в рабочем (открытом) торце капилляра формировался вогнутый мениск, который и являлся собственно мишенью.

Лазерное излучение заводилось в вакуумную камеру через окно и фокусировалось на поверхность мишени с помощью собирающего зеркала. Зеркало было изготовлено путем напыления алюминия на стеклянную подложку. Фокусное расстояние составляло 10 мм. Мишень и фокусирующее зеркало размещались на общем основании, которое фиксировалось в отростках вакуумной камеры с помощью опорных колец. Оправка зеркала была снабжена юстировочными винтами. Предварительная юстировка производилась вне вакуумной камеры, затем вся сборка фиксировалась в вакуумной камере, и юстировалась еще раз. Окончательная юстировка производилась микрометрическими винтами держателя лазера в процессе эксперимента.

Для визуального контроля абляции использовалось второе (ортогональное) окно в вакуумной камере. Как и в [9], для исследования интенсивности и скорости разлета абляционной плазмы производилась регистрация ионного тока насыщения из плазмы в цепи системы секционированных коллекторов. Её фотография приведена на рис. 2, а. Система коллекторов включала в себя центральный круглый коллектор и четыре периферийных коллектора-сегмента. Внешний диаметр коллекторной системы D_0 был ограничен внутренним диаметром патрубка фланца вакуумной камеры и составлял величину $D_0 = 30.2$ мм. Диаметр центрального коллектора D_5 составлял величину $D_5 = D_0 \cdot 5^{1/2} = 13.5$ мм. Таким образом, площади коллекторов были равны и составляли величину $S_1 = S_2 = \dots = S_5 = 143$ мм². Расстояние от мишени до коллекторов L составляло величину 6.2 см. Таким

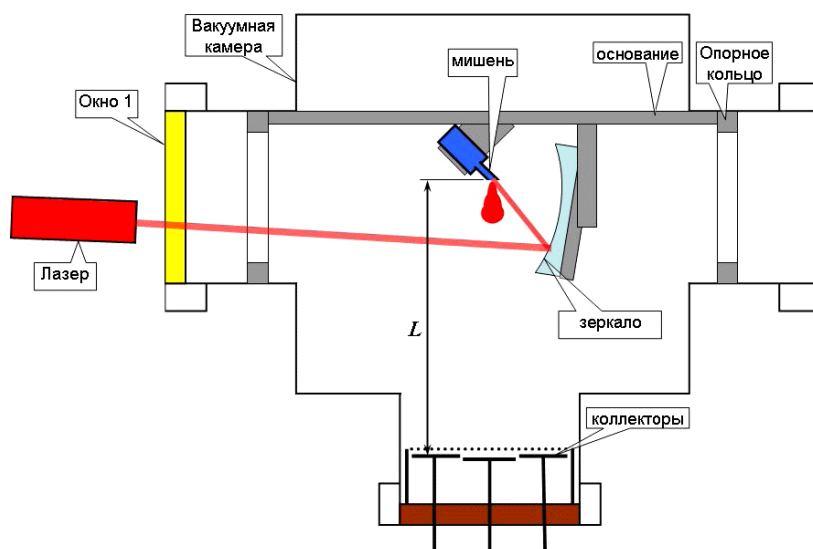


Рис. 1. Схема эксперимента.

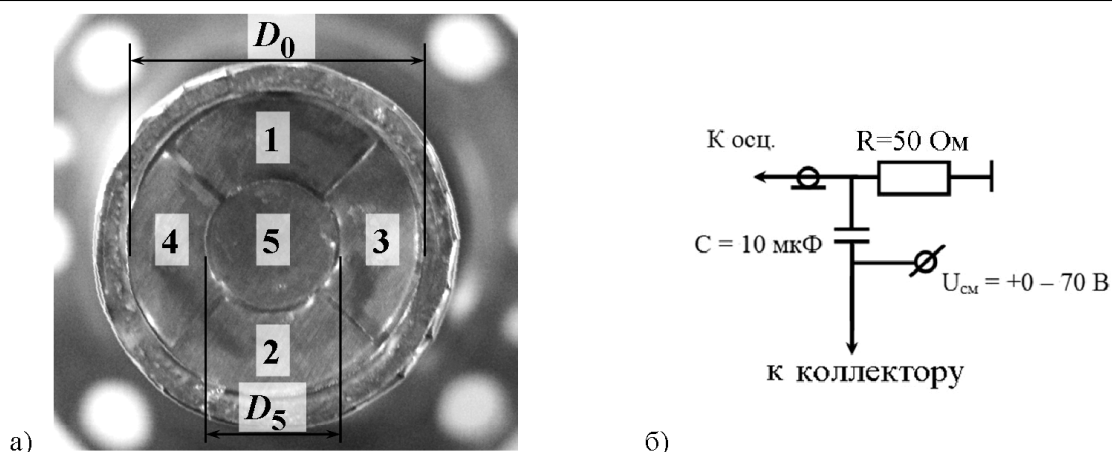


Рис. 2. Фотография секционированной системы коллекторов (а) и принципиальная электрическая схема для регистрации ионного тока насыщения в цепи коллекторов (б).

образом, полный угловой размер центрального коллектора составлял величину $\alpha_5=12.5^\circ$ (телесный угол $\Omega_5=0.037$ sr), всей коллекторной системы - $\alpha_0=26^\circ$ ($\Omega_0=0.178$ sr). Для регистрации ионного тока насыщения на коллекторы подавалось небольшое постоянное напряжение смещения $U_{см} \sim -50$ В, как показано на рис. 2, б. Для того, чтобы напряжение смещения коллекторов не проникало в пространство дрейфа плазмы, коллекторная система была прикрыта мелкоструктурной (шаг ячейки - 200 мкм) заземленной сеткой прозрачностью 75%.

Для измерения уноса массы мишень взвешивалась до начала и после окончания испытаний. Для исследования капельной фракции и ресурса покрытия зеркала поверхность зеркала исследовалась после испытаний в растровом электронном микроскопе SEM 515.

Результаты и их обсуждение

Частота следования импульсов составляла 100 Гц, общее время работы- 32 часа. Таким образом, общее количество импульсов в ходе испытания составило величину 1.152×10^7 шт. Разница в весе МСУ до и после окончания испытания 4.88 мг. Таким образом, унос массы рабочей жидкости за импульс составил 4.236×10^{-10} г/имп. Данная величина хорошо согласуется с нашими предыдущими измерениями [9].

Как уже говорилось, окончательная юстировка достигалась небольшими изменениями направления лазерного луча, т.е. микровинтами лазера. При этом луч не только перемещался по поверхности зеркала, но и, из-за изменения направления луча, по поверхности мениска внутри капилляра. При этом менялось направление разлета факела и амплитуда токов ионов в цепи коллекторов. Критерием “оптимальной” юстировки были достижение максимального суммарного ионного тока в цепи коллекторов и максимальной скорости разлета плазмы (т.е. минимального времени достижения пика ионного тока).

Типичная фотография МСУ в работе при оптимальной юстировке приведена на рис. 3. Соответствующие этой фотографии осциллограммы ионного тока насыщения на коллекторы, полученные для случая максимальной интенсивности плазменного потока, приведены на рис. 4. Нулевой момент времени соответствует моменту воздействия лазерного импульса. Как видно на фотографии, “оптимальное” направление разлета факела слегка отклонено (примерно на $6-7^\circ$) от направления оси коллекторной системы. При этом распределение токов по коллекторам также не было симметричным и соответствовало что отклонению оси плазменного потока в направлении коллектора № 3, что полностью согласуется с наблюдаемым на фотографии.

На рисунке 4 приведена также диаграмма скорости ионов

$$v_i=L/t \quad (1)$$

Видно, скорость разлета ионов плазмы, соответствующая максимуму ионного тока (наиболее вероятная скорость) превышает 40 км/с. Данная величина хорошо согласуется с найденной ранее при использовании линзы для фокусировки лазерного луча [9]. То же можно сказать и об угловом распределении и интенсивности потока ионной компоненты плазмы с учетом актуального телесного угла коллекторов.

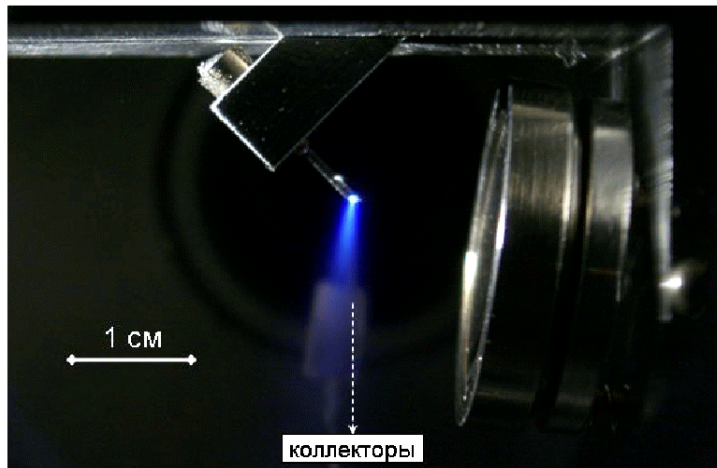


Рис. 3. Фотография абляционного факела в режиме оптимальной юстировки фотоаппаратом с открытым затвором.

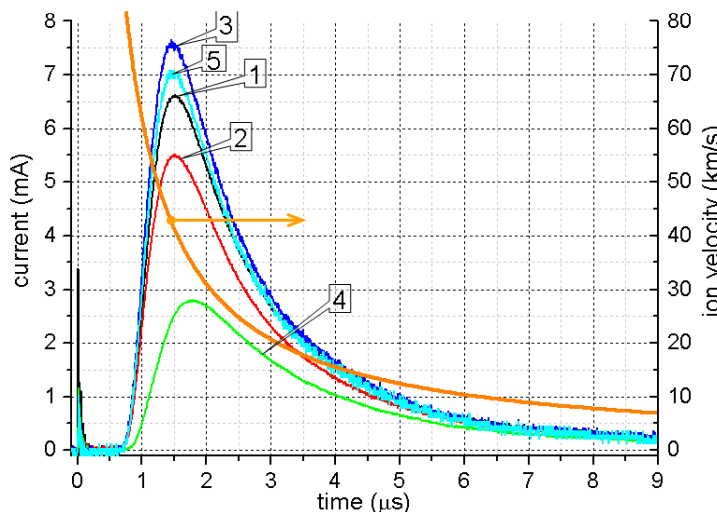


Рис. 4. Осциллограммы ионного тока насыщения на коллекторы 1-5 при оптимальной юстировке и количестве прошедших от начала испытания импульсов $N=9.03 \times 10^6$ (левая ось) и диаграмма скорости ионов (правая ось).

Для нахождения средней скорости необходимо использовать стандартные процедуры интегрирования осциллограмм коллекторного тока:

$$v_{av} = \left\{ \int i_{coll}(t) (L/t) dt \right\} / \left\{ \int i_{coll}(t) dt \right\} , \quad (2)$$

где в качестве тока $i_{coll}(t)$ – необходимо принимать сумму токов на отдельные коллекторы. $i_{coll}(t) = i_1(t) + i_2(t) + \dots + i_5(t)$. Эта величина использовалась ниже для количественной характеристики изменения параметров абляции в процессе ресурсных испытаний.

Осциллограммы полного (суммарного) коллекторного тока, соответствующие различному количеству прошедших от начала испытания импульсов, представлены на рис. 5. Осциллограммы соответствуют следующим условиям. В течение первых 2.3 млн импульсов несколько раз производилась подъюстировка лазера микровинтами с целью подбора наиболее оптимального режима (максимального полного тока и минимального времени пролета). При всех таких подъюстировках полный ток на коллекторы был близок к осциллограмме 1, а соотношение токов на различные коллекторы подобно приведенному на рис 4,б. Отметим, что при этом каждый лазерный луч попадал на новое место на зеркале. Затем для исследования эволюции интегральных характеристик потока плазмы в процессе наработки большого количества импульсов подъюстировка не производилась. Кривые 1-5 и 6-7 на рис. 5 как раз представляют осциллограммы полного суммарного тока коллекторной системы, соответствующие различному количеству импульсов и неизменном

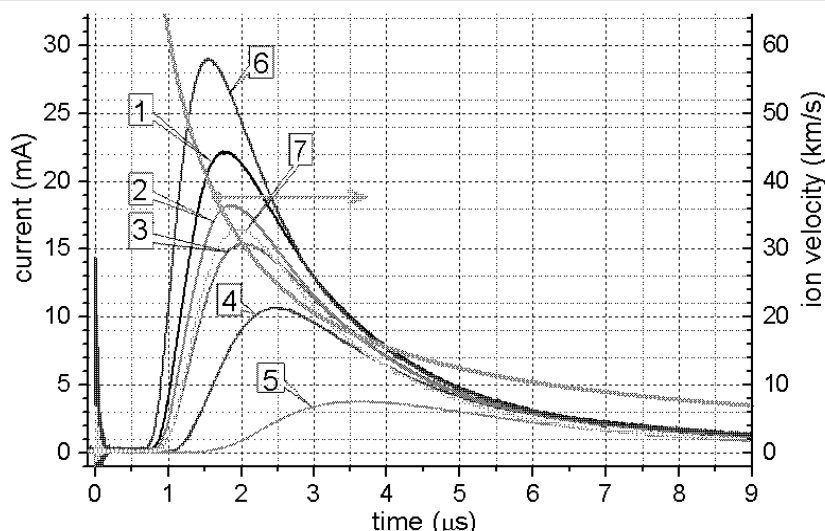


Рис. 5. Типичные осциллограммы полного (суммарного) ионного тока насыщения на коллекторы 1-5 при оптимальной юстировке (левая ось) на различных этапах в процессе испытания и диаграмма скорости ионов (правая ось). Количество импульсов от начала испытаний {от подъюстировки лазера}: 1- 2.3×10^6 {0}, 2- 2.84×10^6 { 5.4×10^5 }, 3- 3.68×10^6 { 1.38×10^6 }, 4- 4.52×10^6 { 2.22×10^6 }, 5- 5.78×10^6 { 3.48×10^6 }, 6- 9.03×10^6 {0}, 7- 10.29×10^6 { 1.26×10^6 }.

юстировочном положении. Кривые 1-5 представляют серию, полученную в промежуток от 2.3×10^6 до 3.48×10^6 импульсов, т.е., практически в начале испытаний. В этом случае можно считать что поверхность зеркала еще не покрыта продуктами абляции. Кривые 6-7 соответствуют новому месту на поверхности зеркала, причем ближе к концу испытаний (9.03×10^6 - 1.029×10^7 импульсов), т.е. когда поверхность алюминия предварительно покрыта продуктами абляции.

Объективные количественные характеристики- интегрированный за импульс электрический заряд в цепи коллекторной системы и средняя скорость ионов представлены в Таблице 1.

Как видно, в процессе работы при неизменной юстировке количество плазмы и скорость ее разлета значительно уменьшаются. Однако при переходе на "свежий" участок поверхности зеркала, на котором лазерного луча еще не было, параметры абляции не только не восстанавливаются, но могут даже возрасти. При этом, очевидно, что такой "свежий" участок был предварительно покрыт продуктами абляции. Максимальные параметры абляции достигались именно в конечной фазе испытаний ($N=9.03 \times 10^6$, рис.4, кривая 6 на рис. 5). При этом наиболее вероятная скорость ионов на осциллограмме суммарного тока коллекторной системы практически была близка к 28 км/с, что хорошо согласуется с достигнутой при использовании линзового фокусирующего элемента в начале испытаний, полученными как времяпролетным методом, так и методом энергоанализа. Амплитуда полного тока и суммарный заряд в цепи коллекторов с учетом углового размера коллектора также практически совпадает с этими величинами, полученными для линзовой систе-

Таблица 1.

Номер кривой	Импульсов от подъюстировки	Импульсов от начала испытаний	Суммарный заряд в цепи коллекторов, Кл	Средняя скорость ионов v_{av} , км/с
1	0	2.3×10^6	6.13×10^{-8}	24.5
2	5.4×10^5	2.84×10^6	5.25×10^{-8}	23.9
3	1.38×10^6	3.68×10^6	4.98×10^{-8}	22.5
4	2.22×10^6	4.52×10^6	3.61×10^{-8}	19.7
5	3.48×10^6	5.78×10^6	1.63×10^{-8}	14.7
6	0	9.03×10^6	6.91×10^{-8}	27.9
7	1.26×10^6	1.029×10^7	4.58×10^{-8}	23.6

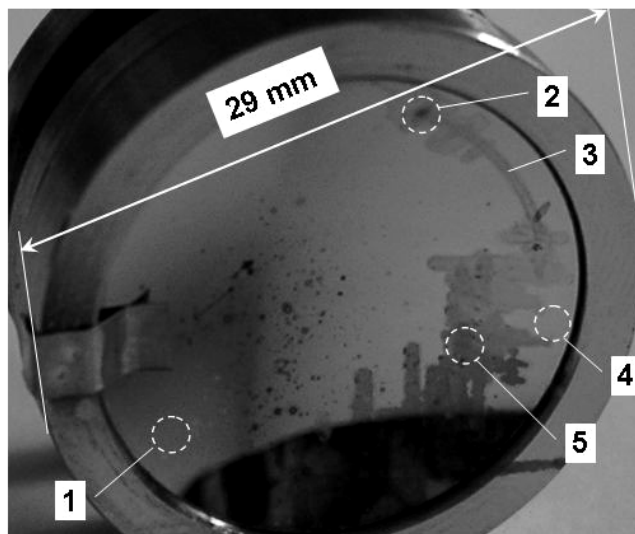


Рис. 5. Фотография зеркала после испытаний. Номерами обозначены области: 1- отсутствия осадка продуктов абляции, 2- область локализации луча в период от 2.3×10^6 до 3.48×10^6 импульсов, 3- след от перемещения луча (при вращении зеркала), 4- область отсутствия луча и осаждения продуктов абляции за все время испытаний, 5- область локализации луча в конечный период испытания.

мы.

Фотография зеркала после испытания представлена на рис. 6.

На поверхности зеркала отмечены отдельные характерные области. Цифрой 1 указана область, которая в процессе испытаний находилась вне прямой видимости абляционного факела и материал мишени не должен был попадать в эту часть поверхности зеркала. Цифрой 2 указана область попадания несфокусированного лазерного луча в период испытаний от 2.3×10^6 до 3.48×10^6 , когда юстировка лазера не менялась в начале испытаний. Цифрой 3 указана дорожка, оставленная при вращении линзы в процессе юстировки. Ширина дорожки составила 0.3-0.4 мм. Область 4 на всем протяжении испытаний находилась в прямой видимости и не подвергалась воздействию лазерного луча, поэтому была использована для исследования капельной фракции. Область 5 является местом последней юстировки (в конце испытаний), т.е. может служить образцом для исследования воздействия несфокусированного лазерного луча на осажденные на поверхности зеркала продукты абляции.

Детальный осмотр области 2 выявил нарушение отражающего покрытия настолько, что в центре имелось прозрачное, близкое по форме к кругу, пятно диаметром около 0.3 мм (слой алюминия отсутствовал). Это объясняет сильное ухудшение параметров абляции к концу серии импульсов $N=3.48 \times 10^6$. Данный факт напрямую говорит о том, что плотность мощности/энергии несфокусированного лазерного луча слишком велика и должна быть уменьшена.

Фотографии участков 4 и 5, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, представлены на рис. 6 и 7, соответственно. На первой из них присутствует большое количество микрокапель. Обращает на себя внимание тот факт, что диаметр большинства капель не превышает 0.5 мкм. Предположительно, механизм образования микрокапельной фракции связан прежде всего с прямой эмиссией капель под воздействием импульса отдачи. Кроме того, необходимо иметь в виду возможность образования кластеров за счет конденсации паров при адиабатическом расширении в процессе разлета плазмы [10].

Оценка общей массы рабочего тела, заключенного в каплях, в предположении изотропной эмиссии капель в телесный угол 2π sr, соответствующий полусфере, приводит к величине 1-1.5 мг, что составляет 20-30 % по отношению к весовому уносу.

На участке 5 присутствуют только наиболее крупные капли. Остальные, очевидно, или испаряются или ассоциируются с поверхностью алюминия под воздействием лазерного излучения. При этом, как уже говорилось выше, оптические свойства поверхности, такие как коэффициент отражения и шероховатость, по совокупности не ухудшаются по сравнению со свойствами чисто алюминиевой поверхности зеркала.

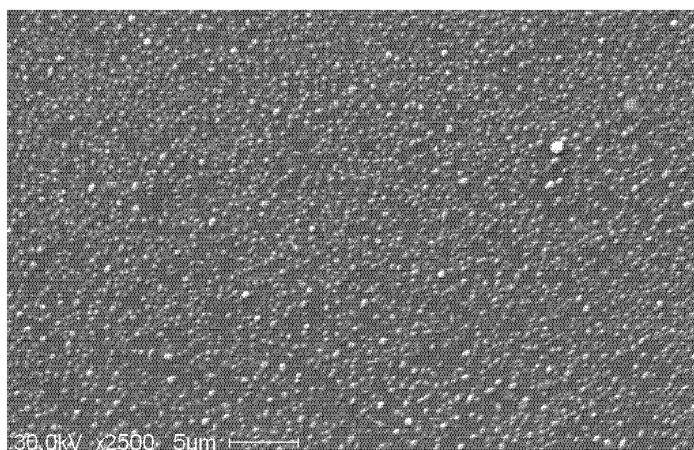


Рис. 6. Фотография поверхности зеркала в области 4 (см рис. 5) после испытаний.

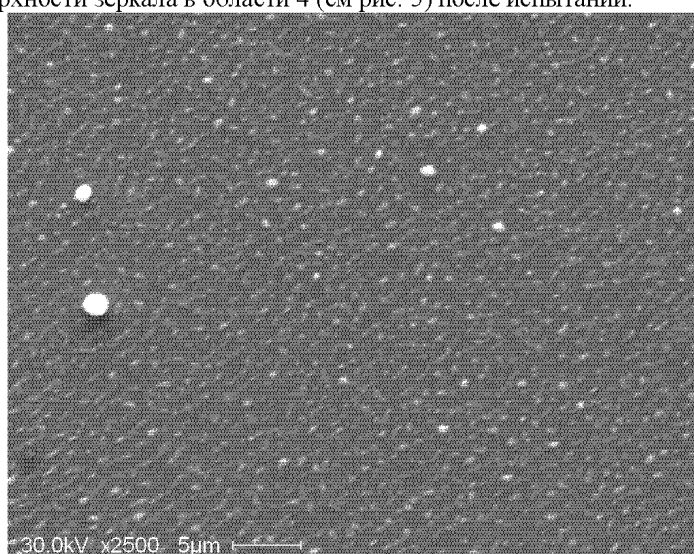


Рис. 7. Фотография поверхности зеркала в области 5 (см рис. 5) после испытаний.

В Таблице 2 представлены данные, отражающие элементный состав участков 1, 4 и 5. Для всех областей характерно присутствие кремния, свинца (стеклянная подложка), алюминия (материал напыления), и галлия (осажденные капли и пары). В области 5 содержание галлия намного ниже, чем в области 4. Это объясняется тем, что галлиевые капли (особенно мелкие, как говорилось выше) под действием лазерного луча испаряются в процессе работы. Более того, содержание алюминия по отношению к кремнию и в областях 1 и 4 составляет примерно 1:1. В области 5 это соотношение несколько уменьшается (до приблизительно 2:3). Это означает, что алюминиевое зеркальное покрытие, даже в свою очередь покрытое каплями и парами галлия, продолжает постепенно уноситься в процессе работы.

Таблица 2. Элементный состав приповерхностных слоев в выделенных областях зеркала, % ат.

Элемент	Область		
	1	4	5
<i>Ga</i>	04.69	25.16	06.92
<i>Al</i>	38.98	28.70	30.44
<i>Si</i>	35.40	29.61	44.82
<i>In</i>	07.19	06.58	07.54
<i>Pb</i>	13.74	09.95	10.27

Заключение

В работе проведено исследование экспериментального прототипа лазерно плазменного микродвигателя жидкометаллическим Ga-In рабочим телом и зеркально-оптическим элементом на основе покрытия алюминием для фокусировки лазерного излучения на поверхности мишени. Капельная фракция эрозии мишени исследована путем анализа осадка капель на поверхности зеркала в растровом электронном микроскопе.

Размер капель не превышает 0.5 мкм, эрозия в капельной фракции, восстановленная исходя из предположения изотропной эмиссии капель в полусферу, составляет величину 20-30% по отношению к весовой эрозии рабочего тела.

Покрытие поверхности зеркала продуктами абляции не ухудшает оптических свойств фокусирующего элемента, при этом основные параметры абляционной плазмы- содержание ионной компоненты и скорость разлета- близки к аналогичным параметрам при использовании линзовой системы фокусировки.

Вместе с тем, воздействие нефокусированного лазерного луча на поверхность зеркала приводит к постепенному испарению как материала покрытия зеркала, так и осевших на зеркале продуктов абляции. В этом аспекте, осаждение продуктов абляции на поверхности зеркала является положительным фактором, однако не улучшает ситуацию радикально. Для предотвращения испарения поверхности зеркала необходимо уменьшить плотность мощности/энергии лазерного излучения. Для этого целесообразно использовать следующую комбинацию линзовой и зеркальной оптики: лазерный луч вначале проходит через рассеивающую линзу и попадает в расширенном виде на собирающее зеркало, которое фокусирует его в узкую область на поверхности мишени. Разумеется, рассеяние целесообразно выбирать таким, чтобы на чистой поверхности зеркала порог абляции материала зеркала не достигался.

С точки зрения выбора материала зеркала, кроме алюминия, целесообразно использовать серебро, как материал с более высоким коэффициентом отражения в инфракрасной области спектра (спектральный коэффициент отражения серебра на длине волны 1000 нм составляет 0.97 против 0.9 для алюминия). Дополнительным положительным моментом является то, что серебро хорошо смачивается галлием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Phipps, M. Birkan, W. Bohn, H.-A. Eckel, H. Horisawa, T. Lippert, M. Michaelis, Y. Rezunkov, A. Sasoh, W. Schall, S. Scharring and J. Sinko, "Review: laser ablation propulsion," *J. Propulsion and Power*, Vol **26**, No. 4 (2010), pp. 609-637
2. Phipps C. R., Luke J. R., Laser plasma thruster: patent 6530212 USA / March 11, 2003.
3. L. Urech, T. Lippert, C.R. Phipps, and A. Wokaum, "Polymer ablation: From fundamentals of polymer design to laser plasma thruster", *Appl. Surf. Sci.* **253**, (2007), pp.6409-6415.
4. A. N. Chumakov et al, "Pulsed plasma thrusters based on solid-state lasers", Proc. SPIE Vol. 6735, 673510, (2007).
5. D. A. Gonzales and R. P. Baker, "Micropropulsion using a Nd:YAG microchip laser", Proc. SPIE Vol. 4760 (2002), pp. 752-765.
6. A. N. Chumakov, A. S. Grabtchikov, V. A. Orlovich, P. V. Shpak, N. A. Bosak, A. M. Petrenko, P. V. Chekan, P. N. Malevich, "Study of microchip laser use possibility in laser-plasma thrusters for space application", in *Proc of 7th Belarussian-Russian Workshop: Semiconductor lasers and systems*, 1-5 June 2009, Minsk, Belarus, pp.124-128.
7. T. Götz and M. Stuke, "Short-pulse UV laser ablation of solid and liquid metals: indium", *Appl. Phys. A* **64**, 539-543 (1997).
8. I. Zergioti and M. Stuke, "Short pulse UV laser ablation of solid and liquid gallium", *Appl. Phys. A* **67**, 391-395 (1998).
9. S. Popov, A. Panchenko, A. Batrakov, F. Ljubchenko and V. Mataibaev, "Experimental Study of the Laser Ablation Plasma Flow from the Liquid Ga-In Target", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. **39**, No. 6 (2011), pp. 1412-1417.
10. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

- разработан и изготовлен макет МСУ ЛПД с зеркальной фокусировкой лазерного излучения в рабочую область мишени, представляющей собой капилляр, соединённый с резервуаром, при этом капилляр и резервуар заполнены жидким галлий-индиевым сплавом;
- использование фокусирующего зеркала вместо фокусирующей линзы обеспечивает более стабильную работу МСУ при ресурсных испытаниях и более высокую плотность мощности лазерного излучения и, соответственно, более высокую интенсивность плазменного потока после длительной работы узла;
- положительный эффект достигнут благодаря отсутствию негативного эффекта запыления фокусирующего элемента продуктами абляции мишени;
- обнаружено травление отражающей поверхности зеркала вследствие высокой плотности мощности лазерного излучения на поверхности зеркала, достигающей амплитудного значения порядка 10^8 Вт/см², что потребовало осуществления медленного перемещения зеркала относительно лазерного луча в процессе ресурсных испытаний;
- испытание МСУ на ресурс $1.152 \cdot 10^7$ импульсов не выявило ухудшения параметров плазменного факела;
- капельная фракция эрозии мишени имеет узкое распределение капель по размерам, при этом средний диаметр капель имеет значение порядка 0.5 мкм.

На основании анализа результатов работы по теме «Плазма ЛПД» в целом, можно сделать следующие выводы и рекомендации по дальнейшим работам, направленным на создание опытно-промышленного образца ЛПД с МСУ на основе жидкого металла в качестве рабочего вещества:

- идея использования жидкого металла, в частности, галлий-индиевого сплава, является перспективной с точки зрения создания лазерно-плазменных двигателей нового поколения, не требующих использования механических систем подачи рабочего вещества в зону абляции;

- наилучшая стабильность работы МСУ достигается при зеркальной системе фокусировки лазерного излучения на мишень, при этом перед фокусировкой лазерный луч должен быть расширен до диаметра, обеспечивающего плотность мощности излучения на зеркале, много меньшую, чем порог абляции отражающего покрытия;

- плотность мощности лазерного излучения на мишени должна быть увеличена до 10^{10} Вт/см², при этом диаметр фокального пятна на мишени должен оставаться на уровне 100 мкм для длительности импульса лазерного излучения порядка 5 нс.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. M. Saha. On a Physical Theory of Stellar Spectra // Proceedings of the Royal Society of London. Series A.- 1921.- Volume 99.- Issue 697.- pp. 135–153.
2. Ralchenko, Yu., Kramida, A.E., Reader, J., 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.
3. 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.
4. 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.
5. А.Н. Зайдель. Таблицы спектральных линий.- М:Наука.- 1969.- с. 782.

6. A. Anders, Ion charge state distributions of vacuum arc plasmas: The origin of species // *Phys. Rev. E.* – 1997. – v. 55. – No. 1. – pp. 969–981.
7. D.A.Gonzales, and R.P.Baker, “Micropropulsion using a Nd:YAG microchip laser”, // *Proc. SPIE.* 2002. Vol.4760. P.752-765.
8. 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.
9. 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.
10. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.* 3-е изд., исправл.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.- 656 с.
11. 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.).
12. A.N. Chumakov, N.A. Bosak, A.M. Petrenko, M.V. Bogdanovich, A.I. Yenzhyeuski, 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).
13. C.R. Phipps, J. Luke. Laser plasma thruster // *Патент США US 6530212,* F02K 11/00, H05H 1/24.- 2003.
14. Чумаков А.Н., Босак Н.А., Петренко А.М., Рябцев Г.И., Богданович М.В., Енжиевский А.И., Безъязычная Т.В., Рябцев А.Г., Щемелев М.А., Красковский А.С. Лазерно-плазменный двигатель // *Патент РФ RU (11) 2338918(13) F02K 11/00 (2006.01).-* 2007.
15. 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.

16. 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.