
ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 535-34, 533.9.07

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, ФОРМИРУЕМОЙ НА ЖИДКОСТРУЙНЫХ МИШЕНЯХ

© 2024 г. В. Е. Гусева^{a,b,*}, М. С. Михайленко^a, А. Н. Нечай^a, А. А. Перекалов^a,
Н. Н. Салащенко^a, Н. И. Чхало^a

^aИнститут физики микроструктур Российской академии наук
Россия, 603087, Нижний Новгород, Академическая ул., 7

^bНациональный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского

Россия, 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

*e-mail: valeriegus@ipmras.ru

Поступила в редакцию 10.04.2023 г.

После доработки 30.05.2023 г.

Принята к публикации 20.07.2023 г.

Описан стенд, предназначенный для изучения эмиссионных свойств лазерной плазмы в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне (ЭУФ), формируемой на жидкоструйных мишенях. Для формирования струйной мишени используются импульсный клапан и капилляры различного диаметра. Для возбуждения лазерной плазмы применяется лазер Nd:YAG (длина волны 1064 нм, длительность импульса 11 нс, частота до 10 Гц, энергия импульса 500 мДж). Для исследования эмиссионных спектров используются зеркальный рентгеновский спектрометр, градуированный в абсолютных единицах, спектрометр видимого диапазона AuToGa-4000 и микроскоп, работающий в ЭУФ-диапазоне. Также предусмотрено фотографирование формируемых жидкостных струй. В статье приведены конструкция стенда и его основные параметры. Также даны результаты первых экспериментов по исследованию процессов истечения жидкости из различных сопел в вакуум.

DOI: 10.31857/S0032816224010117, EDN: FWELKC

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все больший интерес приобретает изучение коротковолнового, в частности экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения, что в значительной мере объясняется развитием технологий изготовления и методов диагностики многослойной оптики в этом спектральном диапазоне. Появилась возможность создания на основе многослойных зеркал новых дисперсионных элементов и изолирующей оптики дифракционного качества [1]. Ранее исследования в ЭУФ-диапазоне с применением многослойной оптики были связаны с задачами диагностики лабораторной и космической плазмы. В настоящее время исследования ЭУФ-излучения связаны с решением проблем коротковолновой проекционной

наноитографии [2] и исследованиями, связанными с изучением как природных, так и искусственных нанообъектов [3]. Данные исследования представляют интерес для физики наноструктур, биологии, медицины и открывают новые возможности для разработки различных наноустройств, катализаторов, биологически активных веществ и т.п.

К лабораторным источникам ЭУФ-излучения предъявляются следующие требования: высокая мощность, заданная полоса излучения и стабильность эмиссионных характеристик. В этой области активно применяются как рентгеновские трубки, так и различные плазменные источники. Рентгеновские трубки просты, надежны и удобны в работе, но, тем не менее, они имеют существенные недостатки,

такие как малая интенсивность и фиксированная узкая полоса излучения [4]. В плазменных источниках (как правило) используется либо разреженная плазма в стационарном режиме, либо плотная плазма в режиме импульсного возбуждения. Для импульсного возбуждения главным образом применяется лазерное излучение [5–8]. В настоящее время в качестве мишеней для импульсного возбуждения часто применяются газовые струи или массивные твердотельные объекты [9]. Однако и газоструйные, и твердотельные мишени имеют определенные недостатки. Типичные газовые струи имеют малую плотность, резко убывающую при удалении от среза сопла, что снижает интенсивность получаемого излучения [10], а использование в качестве мишени твердых тел сопровождается загрязнением оптических элементов продуктами эрозии, с чем приходится бороться [11].

Плотность мишени лазерно-плазменного источника является важным параметром, определяющим свойства самого источника излучения. Высокая плотность вещества в мишени обеспечивает более быстрое образование лазерного пробоя и формирование высокоионизованной плазмы, эффективно излучающей в коротковолновом диапазоне. Жидкоструйные мишени обладают большей плотностью, что позволяет достичь большей эффективности конвертации лазерного излучения в коротковолновое. Практическое удобство использования жидкоструйных источников заключается в простоте вакуумной откачки и возможности удаления области взаимодействия с лазерным пучком от среза сопла.

Ранее нами проводились исследования по сравнению интенсивностей излучения лазерной плазмы с использованием жидкоструйной мишени на спирте (C_2H_5OH) и газоструйной мишени на углекислом газе (CO_2) [12]. По результатам эксперимента установлено, что температура плазмы и интенсивность излучения при использовании жидкоструйной мишени больше, чем при использовании струи газа. Таким образом, можно сделать вывод, что лазерно-плазменные источники на жидкоструйных мишенях перспективны для дальнейших исследований.

Для проведения исследований источников ЭУФ-излучения с жидкоструйной мишенью

первоначально необходимо исследовать структуру различных жидкостных струй-мишеней, которые могут быть получены при использовании различных систем формирования струи и параметров истечения жидкости. От параметров струи-мишени зависит острота фокусировки лазерного излучения на струе жидкости и, соответственно, размеры, и другие характеристики зоны разряда. Также необходимо изучить струи различных жидкостей, имеющих разные плотности, давления и структуры, что влияет на интенсивность излучения плазмы.

В процессе сравнения различных жидкостных мишеней необходимо провести измерения эмиссионных спектров и абсолютной мощности излучения лазерной плазмы в ЭУФ-диапазоне. Все эти исследования можно провести на представленном исследовательском стенде.

2. КОНСТРУКЦИЯ СТЕНДА

Принцип работы стенда состоит в возбуждении струи жидкости импульсным лазерным излучением с последующим детектированием получаемого ЭУФ-излучения. Схема стенда представлена на рис. 1. Используется лазер Sollax T-II (Nd:YAG) 8. Рабочая длина волны лазера составляет 1064 нм, длительность импульса 11 нс, частота до 10 Гц. Энергия лазерного импульса 500 мДж. Лазерное излучение попадает на делительную пластинку 6, откуда часть излучения направляется в измеритель мощности 7, другая часть излучения отклоняется с помощью призмы 5 и, проходя через оптический ввод 4, направляется на линзу 2.

С помощью линзы 2 лазерное излучение фокусируется на струе жидкости, образуя зону разряда на жидкоструйной мишени 1. В зоне разряда создается лазерная плазма, которая излучает в ЭУФ-диапазоне. Высокая плотность мишени и, соответственно, образуемой на жидкоструйной мишени плазмы обеспечивает большие интенсивности регистрируемого ЭУФ-излучения по сравнению с теми, которые наблюдаются при использовании газоструйной мишени.

На выходе лазерного луча из зоны разряда излучение детектируется измерителем мощности 9. С помощью детектирования прошедшего

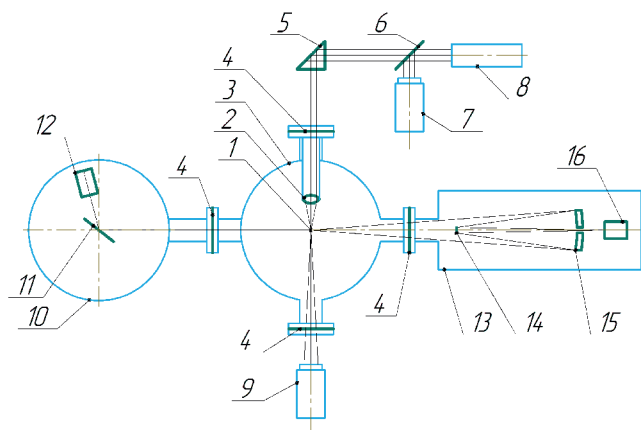


Рис. 1. Оптическая схема установки: 1 – зона разряда, 2 – фокусирующая линза, 3 – корпус установки, 4 – оптический ввод, 5 – отклоняющая призма, 6 – делительная пластинка, 7 – детектор мощности лазера, 8 – лазер Nd:YAG, 9 – измеритель мощности, 10 – ЭУФ-спектрометр, 11 – зеркало, 12 – детектор излучения, 13 – МР-микроскоп, 14 – выпуклое зеркало, 15 – вогнутое зеркало, 16 – детектор.

излучения измеряется поглощение лазерного излучения в мишени.

Исследовательский стенд позволяет регистрировать спектры излучения плазмы в ЭУФ-диапазоне с помощью зеркального спектрометра в видимом диапазоне с помощью спектрометра Augora-4000 и изображение лазерной искры в ЭУФ-диапазоне с помощью ЭУФ-микроскопа.

Спектр излучения в ЭУФ-диапазоне регистрировался с помощью зеркального спектрометра 10. Рентгеновское излучение на входе в спектрометр проходит через свободно висящий пленочный фильтр и попадает на многослойное рентгеновское зеркало (МРЗ) 11, используемое в данном спектрометре в качестве диспергирующего элемента. МРЗ относительно падающего пучка расположено под некоторым углом скольжения. Зеркало отражает излучение с определенной длиной волны, соответствующей условиям Вульфа–Брэгга, и направляет излучение на диафрагму. Диафрагма уменьшает угловую расходимость регистрируемого излучения, что повышает спектральное разрешение прибора. Далее излучение проходит через свободновисящий пленочный фильтр и попадает на детектор 12. Сканирование по спектру осуществляется путем поворота МРЗ и детектора относительно падающего пучка. Детектор поворачивается на удвоенный по сравнению

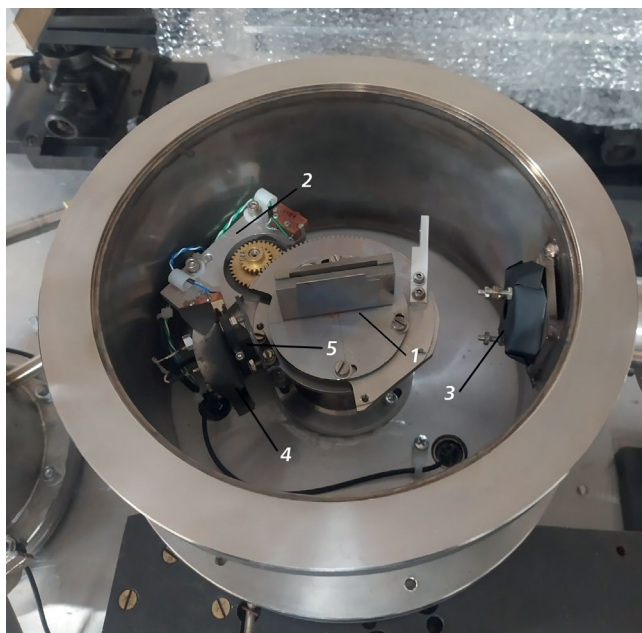


Рис. 2. Устройство зеркального спектрометра: 1 – многослойное рентгеновское зеркало, 2 – шаговый двигатель, 3 – входной пленочный фильтр, 4 – выходной пленочный фильтр, 5 – детектор.

с поворотом МРЗ угол с помощью шагового двигателя. Изображение спектрометра представлено на рис. 2. Подробнее применяемый зеркальный спектрометр и методика работы с ним описаны в работе [13].

Для получения спектра в видимом диапазоне используется спектрометр Augora-4000. Данный спектрометр с волоконным вводом излучения построен по классической симметричной схеме Черни–Тернера на базе дифракционной решетки. Спектральный диапазон от 200 до 1100 нм с разрешением до 0.08 нм.

Рентгеновское излучение плазмы может также наблюдаться ЭУФ-микроскопом 13 (рис. 1). Его основным элементом является двухзеркальный сферический объектив Шварцшильда с пятикратным увеличением. С его помощью можно получить геометрические размеры и пространственную структуру полученного лазерно-плазменного источника (искры) с разрешением 2.75 мкм. Рабочая длина волны микроскопа составляет 13.5 нм. С помощью замены МРЗ можно перестроить его работу на длину волны 11.3 нм. Излучение от лазерно-плазменного источника попадает на вогнутое зеркало 15 с внутренним диаметром 46 мм,

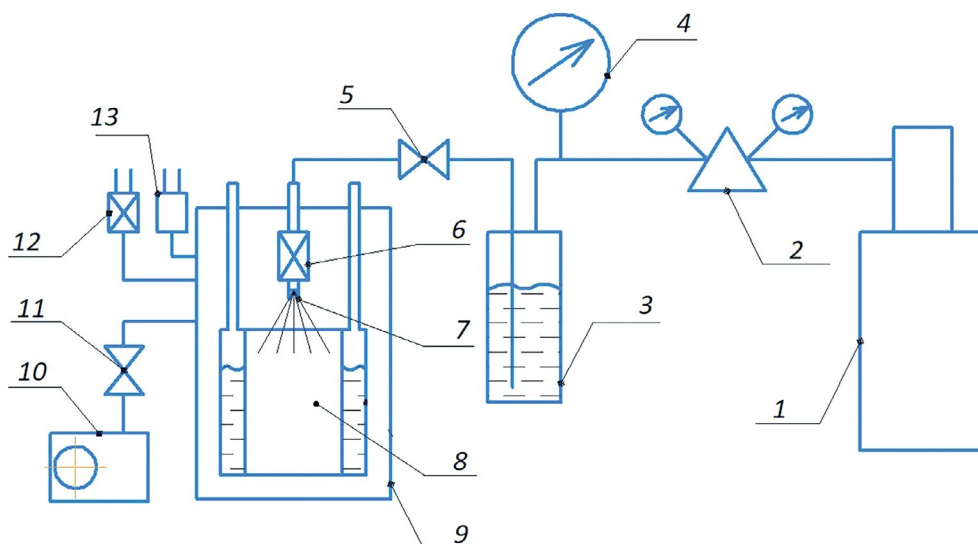


Рис. 3. Схема вакуумной откачки: 1 – баллон с газом, 2 – редуктор, 3 – объем с жидкостью, 4 – манометр, 5 – запорный клапан, 6 – форсунка, 7 – сопло, 8 – криогенный насос, 9 – корпус установки, 10 – форвакуумный насос, 11 – клапан, 12 – датчик ПМТ-2, 13 – датчик ПММ-32.

после чего отражается на выпуклое зеркало 14 диаметром 12 мм. Излучение, прошедшее через двухзеркальный объектив, фокусируется в плоскости детектора 16. Детектор представляет собой ПЗС-матрицу с чувствительным элементом размером $26 \times 29 \text{ мм}^2$. Перед и после двухзеркального объектива Шварцшильда установлены тонкопленочные абсорбционные фильтры. Данные фильтры предназначены для подавления длинноволнового фона (видимого и УФ-излучения). Многослойные рентгеновские зеркала, установленные в ЭУФ-микроскопе, обеспечивают высокое (более 40%) пропускание оптической системы, что способствует высокому временному разрешению прибора. Благодаря этому ЭУФ-микроскоп подходит для регистрации изображения за время одного лазерного импульса. Более подробно микроскоп и методика работы с ним описаны в работе [14].

Отдельно необходимо описать такие важные части стенда, как система подачи жидкости и система вакуумной откачки.

2.1. Система подачи жидкости

На рис. 3 изображена схема вакуумной откачки и подачи жидкости рассматриваемого исследовательского стенда. В стенде используется вытеснительная система подачи, в которой рабочую жидкость вытесняет газ, подаваемый под давлением.

Азот из баллона 1, проходя через редуктор 2, подается в объем 3, измерение давления осуществляется образцовым манометром 4. Подаваемый газ выдавливает исследуемую жидкость из объема 3. Далее жидкость по трубке, проходя запорный клапан 5, поступает в форсунку 6, на конце которой находится сопло 7.

Используется импульсная система подачи жидкости в вакуумный объем стенда, что обусловлено рядом проблем, возникающих при постоянном истечении. Так, при использовании систем постоянного истечения для обеспечения малых расходов необходимо использовать капилляры малого сечения. Вследствие этого, в случае жидкостных систем резко возрастает влияние поверхностных сил на процесс отрыва струи от среза капилляра, что приводит к неустойчивости положения струи в пространстве. Использование импульсных систем позволяет увеличить сечение сопел, что решает эту проблему, но требует использования быстродействующего клапана 6. К клапану предъявляется ряд важных требований, таких как быстрота коммутации струи, малые утечки в закрытом положении, надежность, большой ресурс и т. д. Также использование импульсных клапанов приводит к необходимости синхронизации с импульсным излучением лазера. В данном стенде используется форсунка Bosch 0 280 158 017 [15]. Управление клапаном

осуществляется специализированным блоком, позволяющим менять длительность открытия клапана и его частоту.

В качестве капилляров используются иглы или калиброванные отверстия. Так, мы использовали иглы с внутренним диаметром 0.26 мм (G26) и 0.159 мм (G30). Подобные системы формирования импульсной жидкостной струи: цилиндрическое сопло среднего диаметра (~200 мкм), на входе в которое создается умеренное давление (~5 бар), использовались в работах [16–18]. Закрепление игл на форсунке осуществляется пайкой. Фотография форсунки и капилляра в сборе представлена на рис. 4.

Вытеснительная система подачи жидкости является наиболее простой и вместе с тем надежной. Недостаток данной системы состоит в необходимости постоянного контроля за давлением газа, что обеспечивается манометром. Объем израсходованной жидкости определяется путем взвешивания расходного сосуда 3. Расход жидкости составляет примерно 60 мл/час. Время непрерывной работы стенда определяется возможностями криогенного насоса и составляет 4–5 часов работы.

2.2. Система вакуумной откачки

Откачка исследовательского стенда комбинированная, используются форвакуумный и криогенный насосы. Жидкость, истекающая из сопла, проходит зону лазерной искры и замерзает на поверхности криогенного конденсационного насоса 8 (рис. 3), что позволяет проводить откачку с высокими скоростями. Криогенный насос представляет собой два вложенных друг в друга медных цилиндра, спаянных у торцов и помещенных в вакуумную камеру (рис. 3). В качестве криоагента используется жидкий азот, который подается в пространство между цилиндрами. Рабочая жидкость замерзает на стенках цилиндров. После окончания работы исследовательского стенда проводится оттаивание рабочей жидкости и откачка ее форвакуумным насосом. Данная система сохраняет работоспособность при внезапном прорыве вакуума или разрушении капилляров.

Предварительная откачка стенда производится форвакуумным насосом 10 (рис. 3). Используется вакуумный насос Free Scroll Vacuum Pump модели ESVP-600. Насос поддерживает

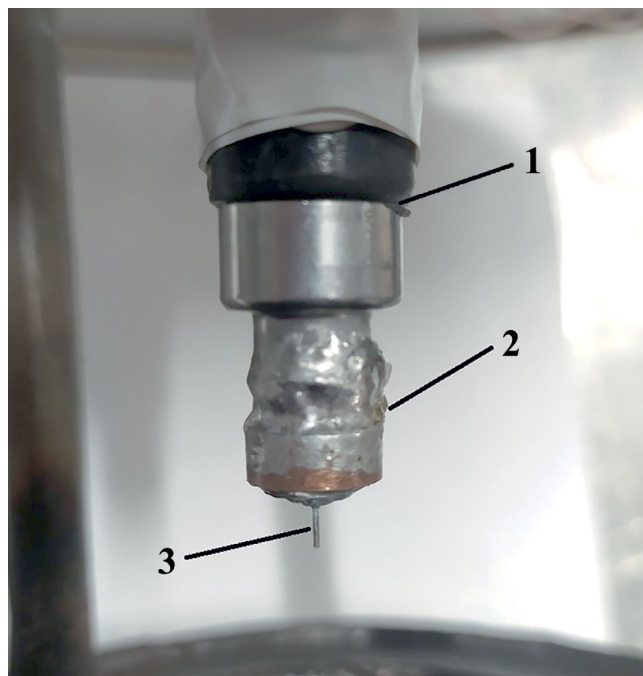


Рис. 4. Фото сопла: 1 – форсунка, 2 – крепеж, 3 – игла.

вакуум внутри установки, который измеряется с помощью датчиков ПМТ-2 - 12 и ПММ-32 - 13.

Комбинированная система откачки обусловлена ее относительной простотой и высокой скоростью откачки, что необходимо при работе с жидкоструйными или газоструйными мишенями. Достигаемый в камере вакуум порядка 10^{-1} Па. Недостатком системы является необходимость в регенерации после проведения эксперимента. Время непрерывной работы установки достигает 4–5 часов и определяется возможностями криогенного насоса. Такая система откачки более эффективна при работе с жидкостями, чем с газами, так как они имеют более низкую температуру кристаллизации, чем газы. В этом заключается основная специфика установки, что делает ее направленной на работу именно с жидкоструйными мишенями.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате серии экспериментов были установлены расходы жидкостной струи для различных используемых сопел, давлений, времен открытия клапана и различных рабочих жидкостей. Исследовались вода, спирты, углеводороды, галоген-углеводороды и другие соединения. Получено, что расход жидкостей можно варьировать в диапазоне 0.5–5 мл/мин.

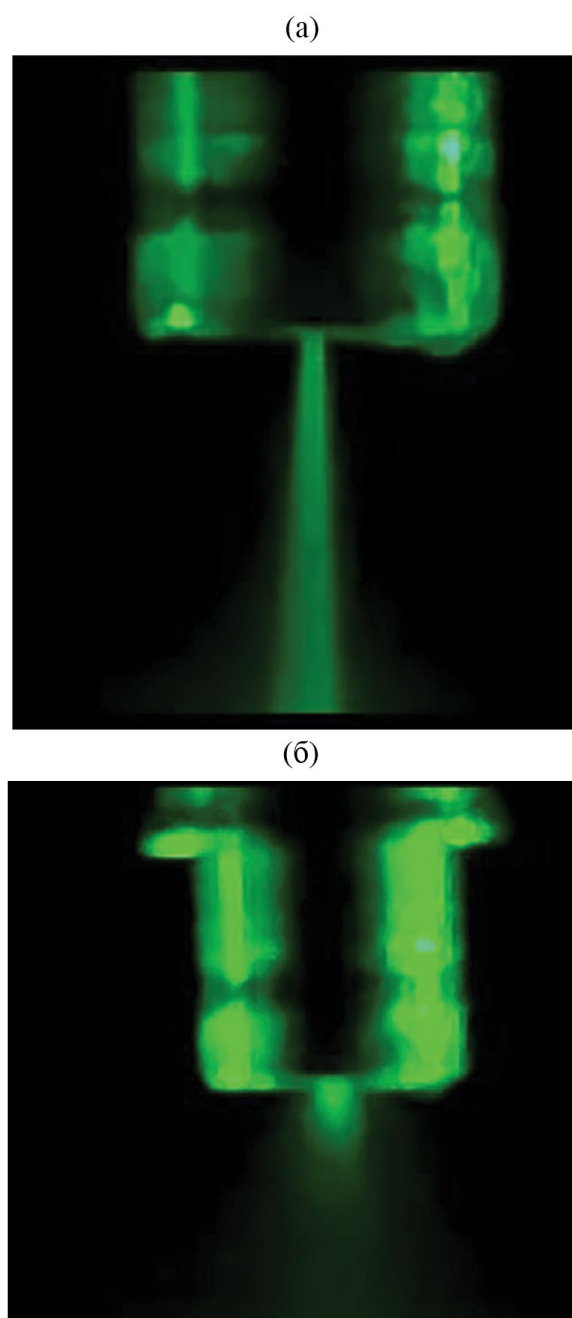


Рис. 5. Истечение изопропилового спирта в атмосферу через форсунку при $P = 4$ бар, $\alpha = 8.5^\circ$, $\tau = 800$ мкс (а) и в вакуум через форсунку при $P = 4$ бар, $\alpha = 35^\circ$, $\tau = 800$ мкс (б).

Проводились исследования структуры жидкой струи при истечении из штатного отверстия форсунки и через капилляр на базе игл G26 и G30. На рис. 5 изображены фото струи изопропилового спирта при истечении в атмосферу (рис. 5а) и в вакуум через штатное отверстие форсунки диаметром 250 мкм (рис. 5б). Жидкость подается при давлении 4 бар. Истечение жидкости

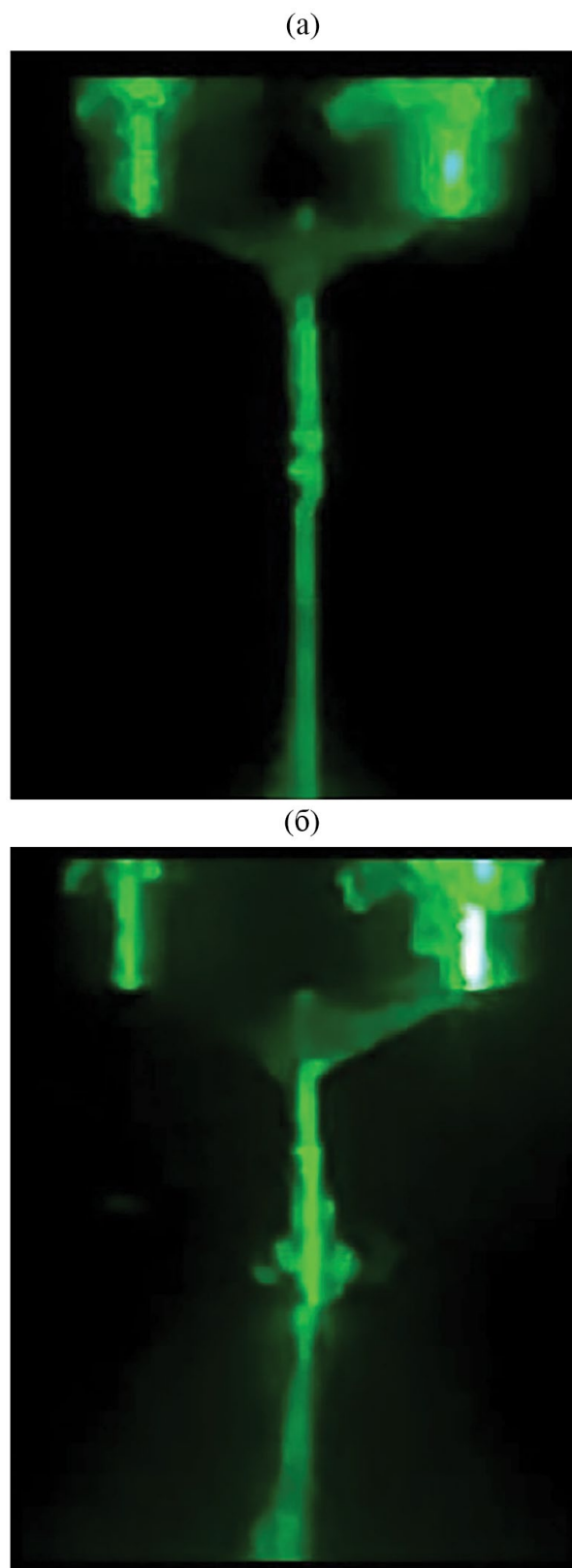


Рис. 6. Истечение изопропилового спирта в атмосферу через иглу при $P = 4$ бар, $\alpha = 2.5^\circ$, $\tau = 800$ мкс (а) и в вакуум через иглу при $P = 4$ бар, $\alpha = 11^\circ$, $\tau = 800$ мкс (б).

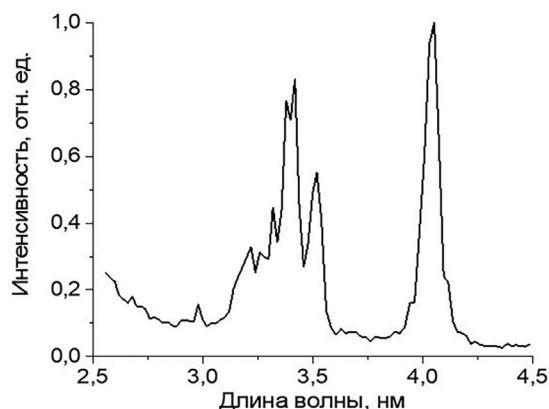


Рис. 7. Эмиссионный спектр изопропилового спирта в спектральном диапазоне 2.5–4.5 нм, полученный на зеркальном спектрометре.

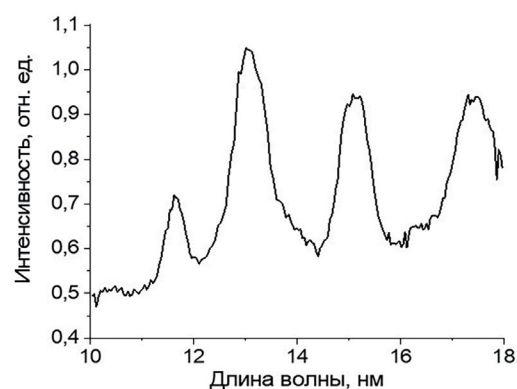


Рис. 8. Эмиссионный спектр изопропилового спирта в спектральном диапазоне 10–18 нм, полученный на зеркальном спектрометре.

— импульсное, длительность импульса 800 мкс. Углы раствора при истечении в атмосферу $\alpha = 8.5^\circ$, при истечении в вакуум $\alpha = 35^\circ$.

При истечении в вакуум угол раствора больше, чем при истечении в атмосферу, что обусловлено отсутствием внешнего давления. Однако при использовании игл в качестве сопел углы раствора при истечении и в атмосферу, и в вакуум значительно уменьшаются.

На рис. 6 изображены фото струи изопропилового спирта при истечении в атмосферу (рис. 6а) и в вакуум через иглу (рис. 6б). Жидкость подается при давлении 4 бар. Истечение жидкости — импульсное, длительность импульса 800 мкс. Угол раствора $\alpha = 2.5^\circ$ при истечении в атмосферу и $\alpha = 11^\circ$ при истечении в вакуум.

При использовании игл в качестве капилляров удастся добиться меньшего угла раствора струи, что обеспечивает большую плотность мишени и улучшает характеристики лазерной струи-мишени. Вместе с тем при использовании игл возрастает вероятность намерзания используемой рабочей жидкости на игле.

На стенде проводились исследования свойств лазерной плазмы, образуемой при возбуждении струи-мишени. Так, изучались эмиссионные спектры в видимом и ЭУФ-диапазонах. Регистрация спектров проводилась при возбуждении импульсным лазерным излучением. Параметры мишени следующие: давление на входе 4 бар, длительность импульса открытия форсунки около 100 мкс. На зеркальном

спектрометре использовались зеркало Cr/Sc и два фильтра Ti/Be.

На рис. 7 представлен эмиссионный спектр изопропилового спирта в спектральном диапазоне 25–45 А, полученный на зеркальном спектрометре. В спектре наблюдаются три интенсивные эмиссионные линии, соответствующие ионам углерода C^{+4} и C^{+5} . Линии в спектре достаточно узкие, благодаря высокому разрешению прибора.

На рис. 8 представлен спектр изопропилового спирта в спектральном диапазоне 100–200 А, полученный на зеркальном спектрометре. В данном спектральном диапазоне наблюдаются четыре яркие эмиссионные линии ионов кислорода O^{+4} и O^{+5} . В данном спектральном диапазоне линии спектра более широкие, что связано с ухудшением разрешения спектрометра.

Таким образом, на данном исследовательском стенде возможно проводить спектроскопические исследования лазерной плазмы, формируемой на жидкостных мишенях.

4. ВЫВОДЫ

Разработан и запущен в эксплуатацию стенд для исследования эмиссионных свойств жидкоструйных мишеней. При работе над данным стендом были решены проблемы подачи и откачки жидкости, поддержания необходимого уровня вакуума в зоне разряда, возникающие при работе с жидкоструйными мишенями. Проведен пробный запуск стенда, получены первые результаты исследования

жидкоструйных мишеней, возбуждаемых лазерным излучением. В дальнейшем на данной установке планируется проводить исследования, направленные на создание мощного источника ЭУФ-излучения.

Данный исследовательский стенд позволил определить расходы жидкостей при использовании различных систем формирования мишени. Были изучены структуры различных жидкоструйных мишеней, выявлены их преимущества и недостатки. Получены спектры лазерно-плазменного излучения на жидкоструйных мишенях в видимом и ЭУФ-диапазонах. Планируется дальнейшее активное использование и доработка исследовательского стенда в целях получения новых спектрометрических и гидродинамических данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ РАН (тема ГЗ: 0030-2022-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышева М.М., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И. // УФН. 2012. Т. 182. С. 727. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201207c.0727>
2. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N. // AIP Advances. 2013. V. 3. P. 2130.
3. Chao W., Harteneck B.D., Liddle J.A., Anderson E.H., Attwood D.T. // Nature. 2005. V. 435. P. 1210.
4. Бибишкин М.С., Забродин И.Г., Клюенков Е.Б., Салащенко Н.Н., Чехонадских Д.П., Чхало Н.И. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2003. № 2. С. 43.
5. Smirnov M.B., Becker W. // Phys. Rev. A. 2006. V. 74. P. 013201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.74.013201>
6. Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Golubev S.V., Lopatin A.Ya., Nechay A.N., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Tsybin N.N., Vodopyanov A.V., Yulin S. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. P. 221101. <https://doi.org/10.1063/1.5016471>
7. Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Lopatin A.Ya., Nechay A.N., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., Zuev S.Yu. // AIP Advances. 2018. V. 8. P. 105003. <https://doi.org/10.1063/1.5048288>
8. Демидов Р.А., Калмыков С.Г., Можаров А.М., Петренко М.В., Сасин М.Э. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 22. С. 1.
9. Виноградов А.В., Шляпцев В.Н. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. С.5. <https://doi.org/10.1070/QE1987v017n01ABEH0006346>
10. Fiedorowicz H., Bartnik A., Szczurek M., Daido H., Sakaya N., Kmetik V., Kato Y., Suzuki M., Matsumura M., Tajima J., Nakayama T., Wilhelm T. // Optics Communications. 1999. V. 163. № 1–3. P. 103. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00100-5](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00100-5)
11. Jansson P.A.C., Hansson B.A.M., Hemberg O., Oten-dal M., Holmberg A., de Groot J., Hertz H.M. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. № 13. P. 2256. <https://doi.org/10.1063/1.1690874>
12. Гусева В.Е., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И. // Нанопизика и наноэлектроника. 2021. Т. 1. С. 393.
13. Водопьянов А.В., Гарахин С.А., Забродин И.Г., Зуев С.Ю., Лопатин А.Я., Нечай А.Н., Пестов А.Е., Перекалов А.А., Плешков Р.С., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Смертин Р.М., Уласевич Б.А., Чхало Н.И. // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. С. 700.
14. Антюшин Е.С., Ахсахалян А.А., Зуев С.Ю., Лопатин А.Я., Малышев И.В., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н., Торопов М.Н., Уласевич Б.А., Цыбин Н.Н., Чхало Н.И., Соловьев А.А., Стародубцев М.В. // ЖТФ. 2022. Т. 92. С. 1202. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.08.52784.80-22>
15. Гусева В.Е., Корепанов М.А., Королева М.Р., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И. // ПТЭ. 2023. № 4. С. 145. <https://doi.org/10.31857/S0032816223030217>
16. Hansson B.A.M., Hertz H.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. P. 3233. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/23/004>
17. Hansson B.A.M., Hemberg O., Hertz H.M., Berglund M., Choi H.-J., Jacobsson B., Janin E., Mosesson S., Ry-mell L., Thoresen J., Wilner M. // Rev. Sci. Instr. 2004. V. 75. P. 2122. <https://doi.org/10.1063/1.1755441>
18. Fogelqvist E., Kördel M., Selin M., Hertz H.M. // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 174902. <https://doi.org/10.1063/1.4935143>