

УДК 535-32

МОДУЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ КЛАСТЕРНЫХ ПУЧКОВ ИНЕРТНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗОВ

© 2019 г. А. Н. Нечай^{1, *}, А. А. Перекалов^{1, 2}, Н. И. Чхало¹,
Н. Н. Салашенко¹, И. Г. Забродин¹, И. А. Каськов¹, А. Е. Пестов¹

¹Институт физики микроструктур РАН, 603087 Нижний Новгород, Россия

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

*E-mail: nechay@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 12.01.2019 г.

После доработки 07.02.2019 г.

Принята к публикации 23.02.2019 г.

Рассматривается модульная установка, предназначенная для формирования и исследования кластерных пучков инертных и молекулярных газов. Приведены результаты первых экспериментов по изучению эмиссионных свойств кластерных пучков в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне при возбуждении лазерным излучением или электронными пучками. В качестве мишеней используются кластерные пучки инертных и молекулярных газов различного размера, структуры и состава. Представлены эмиссионные спектры углекислоты, полученные при лазерном возбуждении, проведена идентификация наблюдаемых линий.

Ключевые слова: кластерные пучки, экстремальное ультрафиолетовое излучение, эмиссионные спектры, лазерная искра, рентгеновский спектрометр-монокроматор.

DOI: 10.1134/S0207352819090099

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются исследования в области коротковолнового, в частности экстремального, ультрафиолетового излучения (ЭУФ), что в значительной мере определяется развитием технологии изготовления и методов диагностики многослойной оптики для этого диапазона. В частности, появилась возможность создания на основе многослойных зеркал новых дисперсионных элементов и изображающей оптики дифракционного качества [1]. Ранее исследования в ЭУФ-диапазоне с применением многослойной оптики были связаны с задачами диагностики лабораторной и космической плазмы, решением проблем коротковолновой проекционной нанолитографии [2]. В настоящее время появляются новые области приложений, связанных с изучением структуры и упорядочения нанообъектов (как природных, так и искусственных) [3]. Новые приложения представляют интерес для биологии, супрамолекулярной химии, физики наноструктур, а также открывают новые возможности для разработки катализаторов, биологически активных веществ, наноустройств.

К лабораторным источникам коротковолнового излучения предъявляются следующие требования: высокая мощность, широкая полоса излучения и стабильность эмиссионных характеристик. В настоящее время активно используются как рентгеновские трубки, так и различные плазменные источники. Рентгеновские трубки просты, надежны и удобны в работе, но, тем не менее, они характеризуются существенными недостатками, к которым относятся 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. В качестве мишеней для импульсного возбуждения могут выступать газовые струи или массивные твердотельные объекты [5]. Для импульсного возбуждения главным образом применяется лазерное излучение [6–9]. Можно отметить, что типичные газоструйные мишени имеют малую плотность, резко спадающую при удалении от среза сопла, что снижает эмиссионные свойства плазмы [10], а применение твердотельных мишеней сопровождается загрязнением

оптических элементов продуктами эрозии, с чем приходится бороться [11].

Существенное улучшение характеристик источников излучения может быть достигнуто при переходе к кластерным газовым мишеням. Под термином “кластер” понимают объединение нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельная единица, обладающая определенными свойствами. В более узком смысле кластером называют конгломерат атомов размером 10–500 нм. Кластеры рассматриваются как самостоятельные физические объекты, начиная с 80-х, когда было показано наличие эффекта “магических чисел”, проявляющегося в периодическом изменении свойств кластеров в зависимости от их размера [12]. Для кластеров характерно большое количество поверхностных атомов, которые и определяют его необычные свойства. Получили развитие такие направления исследований кластеров, как структурные, термодинамические, оптические и магнитные [12].

Использование кластеров в качестве мишеней импульсного лазерно-плазменного источника позволяет в некоторой степени решить проблему нестабильности мишени, связанную с эрозией поверхности твердотельной мишени при лазерном воздействии, так как для каждого последующего импульса пучок кластеров представляет собой новую мишень. Кластеры представляют собой нанообъекты, плотность которых сравнима с твердотельной, что позволяет получать большую ионизацию образующейся плазмы по сравнению с традиционной газовой мишенью [13]. Особый интерес представляет использование в качестве мишеней сложных многослойных кластеров, что может существенно изменить процессы возбуждения и релаксации плазмы и, следовательно, увеличить интенсивности эмиссионных спектров.

Ранее проводились исследования эмиссионных свойств кластеров ряда инертных газов при возбуждении их электронными пучками [14]. Было показано, что кластерная мишень обладает особенностями в эмиссионных спектрах по сравнению с газовыми мишенями. Эмиссия из кластеров при возбуждении импульсным лазерным излучением исследовалась в ряде работ [13, 15, 16], в которых основное внимание уделялось возбуждению кластеров лазерными импульсами малой длительности (порядка десятков фемтосекунд), и практически, не изучалось влияние на эмиссию свойств самих кластеров — их размера, концентрации, структуры. Эти вопросы представляют большой научный интерес, в частности, подобные исследования позволят получить новые данные по динамике формирования лазерной искры в кластерном пучке. Полученные результаты мо-

гут быть применены при конструировании новых источников ЭУФ-излучения.

В настоящей работе описана установка для проведения исследований эмиссионных свойств кластерных пучков с различными размерами, структурой и концентрацией кластеров в области экстремального ультрафиолета при возбуждении кластеров лазерным излучением или электронными пучками.

ОБЩАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ КЛАСТЕРНЫХ ПУЧКОВ

Принципы создания описываемой исследовательской установки были изложены в работе [17]. Установки для формирования кластерных пучков характеризуются жесткими требованиями по откачке газовых струй, что достигается применением криогенных насосов, охлаждаемых жидким водородом. В случае использования импульсных газовых сопел значительно снижаются требования к откачной системе, которая, как правило, представлена одним—двумя турбомолекулярными насосами. Однако, применение импульсного клапана исключает работу с газами при криогенных температурах, что препятствует получению пучков с большими размерами кластеров и большой долей кластеризованного вещества. Отдельно можно отметить, что использование турбомолекулярных насосов затрудняет проведение исследований эмиссионных свойств молекулярных газов, в состав которых входят химически активные элементы (галогены). Это связано с различными скоростями откачки молекулярных газов и легких галогенопроизводных, образующихся в лазерной искре, что приводит к быстрой коррозии оптических элементов установок.

Получение кластеров возможно с помощью множества различных методов [12], в настоящей работе для получения кластеров был выбран метод конденсации кластеров в сверхзвуковой расширяющейся струе, как наиболее простой, производительный и управляемый метод. Течение конденсирующегося газа в сверхзвуковом сопле показано на рис. 1. Установка оснащена коническим сверхзвуковым газовым соплом, что позволяет проводить исследования газов при низких температурах на входе в сопло и, следовательно, с большим размером кластеров и большой долей конденсата на выходе сопла. Использование криогенных систем откачки предоставляет возможность исследовать молекулярные газы, в состав которых входят химически активные элементы.

Подаваемый газ с температурой T_0 и давлением P_0 разгоняется в конфузальной части сопла и

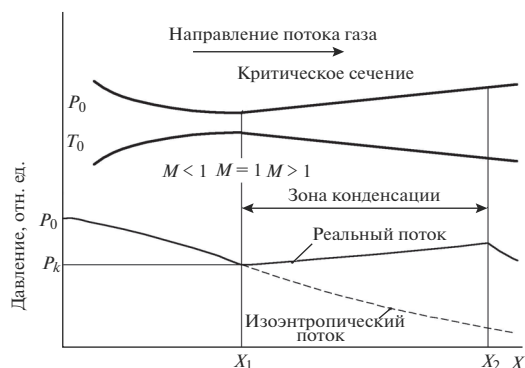


Рис. 1. Схематическое изображение процесса конденсации газа в сверхзвуковом сопле. P_0, T_0 – давление и температура газа на входе в сопло, P_k – начальное давление в зоне конденсации, M – число Маха.

достигает скорости звука ($M = 1$) в критическом сечении. Далее, при течении газа в диффузорной части сопла происходит дальнейшее ускорение газа, его расширение и падение температуры потока. При течении конденсирующегося газа начинается процесс кластерообразования, сопровождающийся ростом давления и температуры потока за счет выделения тепла конденсации. Процессы образования кластеров в большинстве случаев заканчиваются до выходного сечения сопла.

Истечение конденсирующегося газа в сопле является весьма сложным процессом, и задача определения параметров кластерного пучка, выходящего из сопла, полностью не решена до сих пор. Практически для оценки размеров кластеров при истечении газа из конических сверхзвуковых сопел используются эмпирические соотношения Хагены [18, 19], связанные с геометрическими характеристиками сопла, давлением, температурой и родом газа на входе в сопло.

Основной эмпирический параметр Хагены Γ^* определяется из соотношения

$$\Gamma^* = (P_0 T_0^{-2.2875}) \left(\frac{0.74d}{\text{tg}\alpha} \right)^{0.85} K, \quad (1)$$

где d – диаметр критического сечения сопла (мкм), 2α – угол раствора конусного сопла (обычно близкий к 10°), K – эмпирическая константа, определяющая род газа, например, для ксенона $K = 5500$, для криптона $K = 2890$, для аргона $K = 1650$, для углекислоты $K = 3660$, для метана $K = 2360$ [14].

Для кластеров с числом атомов $N > 1000$ ат./кл применяется второе соотношение Хагены:

$$N = 1.64 \times 10^{-4} (\Gamma^*)^{1.8}. \quad (2)$$

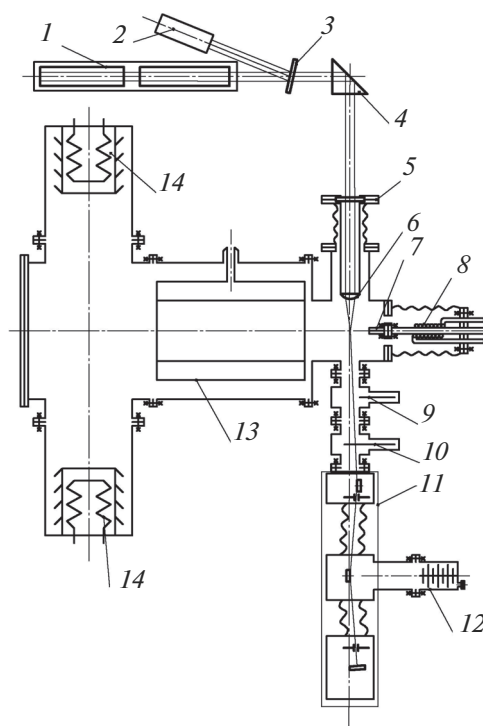


Рис. 2. Установка для исследования свойств атомно-кластерных пучков: 1 – лазер, 2 – детектор мощности излучения, 3 – делительная пластинка, 4 – призма, 5 – оптический ввод, 6 – линза, 7 – сопло, 8 – теплообменник, 9 – вакуумный затвор, 10 – диафрагма, 11 – РСМ-500, 12 – турбомолекулярный насос, 13 – криоконденсационный насос, 14 – криосорбционный насос.

Таким образом, основой описываемой установки, принципиальная схема которой представлена на рис. 2, является способ получения кластеров методом истечения конденсирующегося газа из конического сверхзвукового сопла в вакуум при наличии мощной откачной системы, позволяющей эффективно откачивать газ, не сконденсированный в кластеры. Установка включает в себя несколько принципиальных модулей: систему формирования кластерной струи, систему вакуумной откачки, систему лазерного возбуждения, систему диагностики ЭУФ-излучения.

Работа установки осуществляется следующим образом. Исследуемый газ при заданном давлении подается в теплообменник 8 (рис. 2), где приобретает необходимую температуру при охлаждении газообразным азотом с заданной температурой. Далее газ поступает в коническое сверхзвуковое сопло 7, при истечении из которого в вакуумный объем образуются кластеры. Кластерный пучок откачивается криоконденсационным 13 и криосорбционными насосами 14. Излучение лазера 1 попадает на делительную пластинку 3, откуда малая часть излучения подается на детектор мощно-

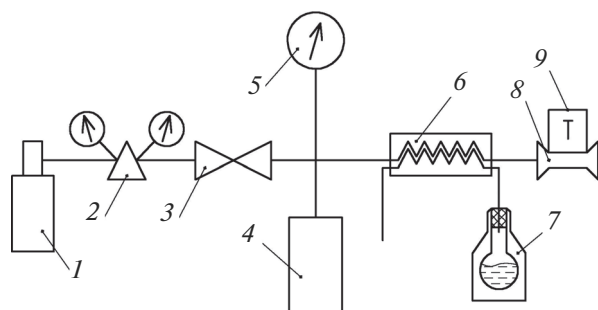


Рис. 3. Схема системы кондиционирования газа: 1 – баллон с газом, 2 – редуктор, 3 – игольчатый вентиль, 4 – мерный объем, 5 – образцовый манометр, 6 – теплообменник, 7 – сосуд Дьюара, 8 – сопло, 9 – термодатчик.

сти излучения 2. Основная часть излучения, проходя призму 4 и оптический ввод 5, попадает на линзу 6. В фокусе короткофокусной линзы 6 лазерное излучение вызывает пробой и образование плазмы в кластерной струе, полихроматическое ЭУФ-излучение которой, проходя электропневматический вакуумный затвор 9 и диафрагму, либо свободновисящую пленку 10 попадает на входное зеркало спектрометра-монохроматора РСМ-500. Затем монохроматическое ЭУФ-излучение детектируется импульсным детектором. Откачка РСМ-500 осуществляется отдельным турбомолекулярным насосом 12. При необходимости вместо лазера устанавливается электронная пушка.

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ КЛАСТЕРНОЙ СТРУИ

Формирование кластерной струи осуществляется с помощью конических сверхзвуковых газовых сопел с двумя критическими сечениями, в нашем случае размером 145 и 230 мкм. Газовое сопло с критическим сечением 230 мкм изготовлялось сверлением медного цилиндра с последующим впаиванием в корпус сопла. Измеренные параметры сопла следующие: критическое сечение 230 мкм, длина 5 мм, угол раствора 9° . Газовое сопло с критическим сечением 145 мкм изготовлялось электрохимическим осаждением меди на алюминиевую форму с последующим растворением алюминия. Далее получившийся цилиндр впрыскивался в корпус сопла. Измеренные параметры сопла следующие: критическое сечение 145 мкм, длина 5 мм, угол раствора 10° .

Газовое сопло закрепляется на трехкоординатной системе позиционирования, позволяющей перемещать сопло относительно точки фокуса оптической системы. Таким образом, имеется возможность изучать эмиссию излучения на различных расстояниях от среза сопла и при смеще-

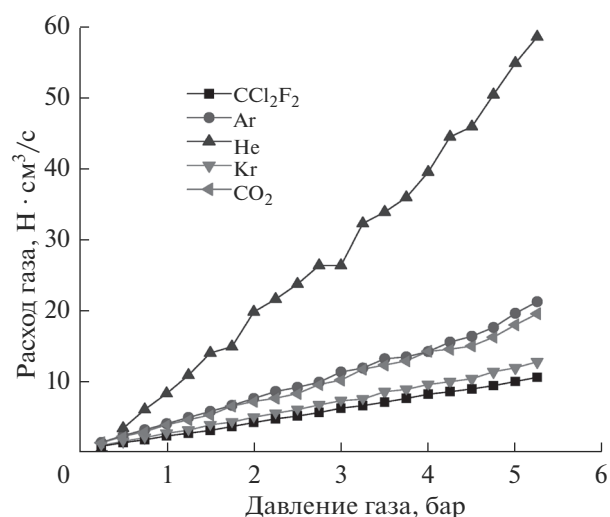


Рис. 4. Измеренные зависимости расхода газа от давления для разных газов при использовании сопла с критическим сечением 145 мкм.

нии оси струи относительно точки оптической фокусировки лазерного излучения.

Для формирования кластеров заданного размера газ перед подачей в сопло должен приобрести заданную температуру и давление. Схема системы кондиционирования газа приведена на рис. 3. Работа системы осуществляется следующим образом: давление газа на входе в сопло регулируется редуктором и игольчатым вентилем ВТР-4, измерение давления осуществляется образцовым манометром МТИ 1216. Для измерения расхода газа через сопло закрывается игольчатый вентиль и измеряется время истечения газа из специального мерного объема. На рис. 4 приведены зависимости расхода газа от давления для сопла с критическим сечением 145 мкм. Точность измерений составляла 5%. Видно, что расходы газа весьма велики и достигают ~ 20 нормальных $\text{см}^3/\text{с}$, что требует мощных систем откачки.

Температура газа, подаваемого в сопло, регулируется путем охлаждения или (при необходимости) нагрева газообразным криоагентом (азотом) при переменном расходе, что позволяет плавно регулировать температуру в диапазоне 140–350 К. Газообразный криоагент образуется путем испарения жидкого азота с помощью электрического нагревателя регулируемой мощности, а затем криоагент по теплоизолированному трубопроводу подается в теплообменник, закрепленный на сопле. Медная поверхность теплообменника лабиринтного типа впрыскивается в корпус из нержавеющей стали. Диаметр теплообменника составляет 34 мм, высота – 32 мм, с торцов расположены крепежи под уплотнение CF16. Температура газа измерялась с помощью термодатчика

Pt1000, закрепленного непосредственно на сопле. Можно отметить, что конструкция теплообменника показала свою высокую эффективность для столь малого занимаемого объема. Так, охлаждение до 140 К осуществлялось за время порядка одного часа.

С помощью соотношений (1) и (2) были сделаны оценки зависимости размера кластеров от давления и температуры газа на входе в коническое сверхзвуковое сопло с критическим сечением 145 мкм и углом раскрытия 10°. Из полученных зависимостей, представленных на рис. 5, видно, что при используемых комбинациях давления и температуры углекислоты на входе в сопло можно проводить исследования кластеров размерами 700–35000 молекул/кластер. Для исследования кластерных пучков меньшего размера применяется подогрев газа. Исследование кластеров большего размера не представляется возможным вследствие замерзания газа в сопле.

Наряду с простыми газами в установке возможна работа с газовыми смесями, что позволяет существенно изменять параметры кластерных пучков (размер и концентрацию кластеров) и даже формировать кластеры сложной структуры, например, многослойные [20].

СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ

Система откачки установки (дифференциальная, комбинированная) осуществляется с помощью криогенных и турбомолекулярных насосов. Вакуумный объем установки разделен на объем камеры формирования кластеров и объем спектрометра-монохроматора РСМ-500. Такое разделение объемов позволяет проводить исследования эмиссии ЭУФ-излучения как инертных, так и агрессивных газов. В объеме камеры основной поток газа откачивается криогенным конденсационным насосом с высокими скоростями откачки. Изготовленный специально для установки насос представляет собой известную конструкцию: два вложенных друг в друга цилиндра, спаянных у торцов, помещенных в вакуумную камеру. Жидкий криоагент подается в пространство между цилиндрами. При использовании в качестве криоагента жидкого азота насос может эффективно откачивать высококипящие газы, такие как ксенон, вода, фреоны и другие. Использование изготовленного насоса позволяет эффективно капсулировать в слое намораживаемого льда агрессивные газы, образующиеся при возбуждении лазерным излучением молекулярных газов, таких как фтор, хлор, бром, кислород. Для проверки работоспособности откачной системы в установку подавались фтор-хлорсодержащие фреоны, на струях которых формировалась лазерная искра. После проведения подобных эксперимен-

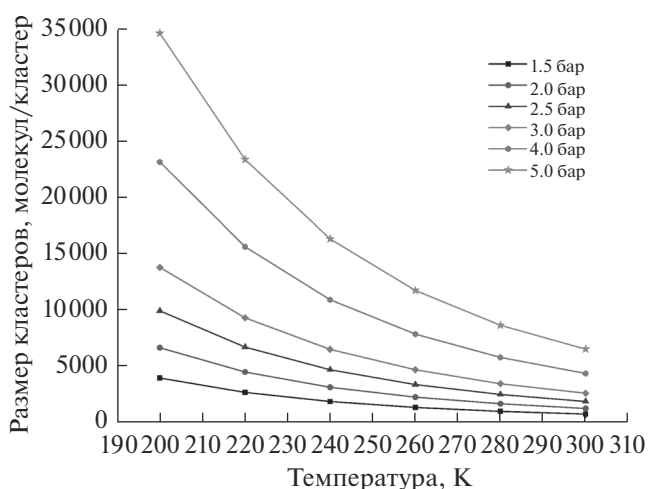


Рис. 5. Зависимости размера кластеров от давления и температуры углекислоты на входе в сопло с критическим сечением 145 мкм и углом раскрытия 10°.

тов никаких признаков коррозии на использовавшемся оборудовании обнаружено не было. Газы, не сконденсировавшиеся на криоконденсационном насосе, эффективно откачиваются двумя криоадсорбционными насосами марки КВ 250-3.2 (меньшей производительности), последовательно расположенными за криоконденсационным насосом.

Использование криоадсорбционных насосов в паре с криоконденсационным обусловлено тем, что при длительной работе криоконденсационного насоса возможны скачки давления из-за испарения части сконденсировавшегося газа и необходимостью регенерации криоконденсационного насоса. Использование турбомолекулярных насосов вместо криоконденсационных признано нецелесообразным в связи с усложнением установки, так как в этом случае требуется установка дополнительных быстродействующих затворов большого диаметра. Кроме того, турбомолекулярные насосы имеют меньшую производительность по сравнению с криоадсорбционными насосами.

Вторая часть откачиваемого объема представляет собой объем спектрометра-монохроматора РСМ-500, для откачки которого применен турбомолекулярный насос НВТ-100 производительностью 100 л/с. В монохроматоре применен тарельчатый сильфон большого удлинения, что позволяет иметь вакуум в приборе на уровне 9×10^{-4} Па. Вакуумные объемы установки соединены через вакуумный клапан с пневмоприводом. Для снижения нагрузки на откачную систему РСМ-500 между вакуумными объемами установлена металлическая диафрагма с отверстием 2×10 мм. Наличие диафрагмы является обязательным услови-

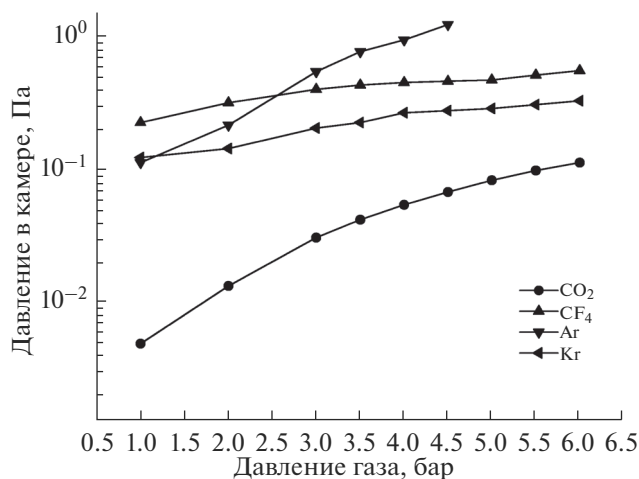


Рис. 6. Вакуум в объеме камеры установки в зависимости от давления и рода газа, подаваемого в сопло с критическим сечением 145 мкм.

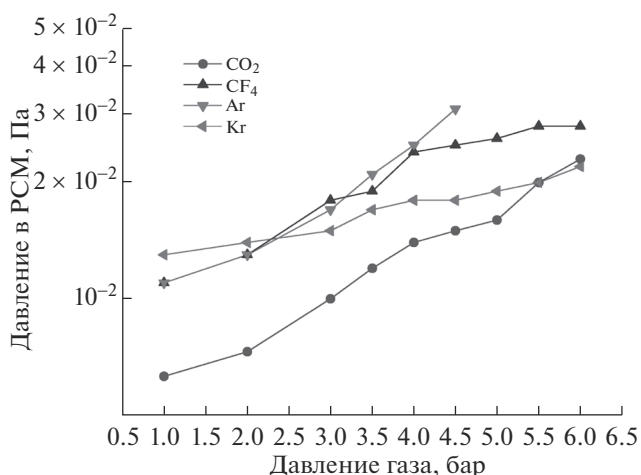


Рис. 7. Вакуум в объеме РСМ-500 в зависимости от давления и рода газа, подаваемого в сопло с критическим сечением 145 мкм.

ем работы установки. Типичные значения вакуума в частях установки в зависимости от давления и рода газа, подаваемого в сопло, приведены на рис. 6, 7. Измерения проведены для сопла сечением 145 мкм при комнатной температуре. Из приведенных рисунков видно, что вакуум в объеме РСМ-500 зависит от рода газа и процессов конденсации газа в сопле. Датчик, проводивший измерения в РСМ-500, устанавливался во входной камере, откачка осуществлялась через камеру решетки, при этом вакуум в камере детектора был существенно выше представленного и достаточен для применения детекторов на основе двух микроканальных пластин шевронного типа (марка детектора ВЭУ-7).

При неразвитой конденсации газа образующаяся сверхзвуковая струя характеризуется малым углом раскрытия и практически весь объем подаваемого газа откачивается криоадсорбционными и криоконденсационными насосами. При развитой конденсации газа образующаяся сверхзвуковая струя характеризуется большим углом раскрытия и большими рассеянными потоками, что приводит к ухудшению вакуума в объеме РСМ-500. Данный эффект особенно заметен при сравнении истечения CO₂ и Ar, либо при истечении CO₂ с разной температурой на входе в сопло.

Таким образом, на практике было получено подтверждение работоспособности принятой откачной системы при использовании больших расходов газа (до 20 нормальных см³/с) на входе в сопло, что позволяет получать и исследовать большие массовые потоки кластеров. Уменьшить влияние остаточных газов в камере на давление в объеме РСМ-500 позволяет применение свобод-

новисящей пленки Mo/ZrSi₂ толщиной 48 нм для разделения вакуумных объемов.

СИСТЕМА ЛАЗЕРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Для возбуждения атомно-кластерной струи применяется лазер SolarIII LF117 Nd:YAG со следующими параметрами: длина волны 1064 нм, энергия импульса лазера до 0.4 Дж, длительность импульса 11 нс, частота до 10 Гц. Лазерное излучение направляется на делитель пучка, откуда часть излучения отражается на приемник излучения ИМО-2, что позволяет непрерывно контролировать мощность лазерного излучения. После делителя пучка лазерное излучение попадает в вакуумную камеру сквозь оптический вакуумный ввод и фокусируется с помощью короткофокусной линзы с фокусным расстоянием 45 мм и расчетным размером фокусного пятна порядка 66 мкм.

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ЭУФ ИЗЛУЧЕНИЯ

Работу рентгенооптической части установки можно рассмотреть на схеме, приведенной на рис. 8. При фокусировке лазерного излучения на пучке кластеров происходит оптический пробой, сопровождающийся образованием плазменного облака из многократно ионизированных ионов. Плазменное облако является источником ЭУФ-излучения, которое направляется на входное зеркало спектрометра-монохроматора РСМ-500 2 с радиусом кривизны 4 м. Далее излучение проходит свободновисящий фильтр Mo/ZrSi₂ 3, входную щель 4, разлагается в спектр сферической дифракционной решеткой 5 с радиусом кривизны 3 м, проходит коллиматорную щель 6, выходную щель 7

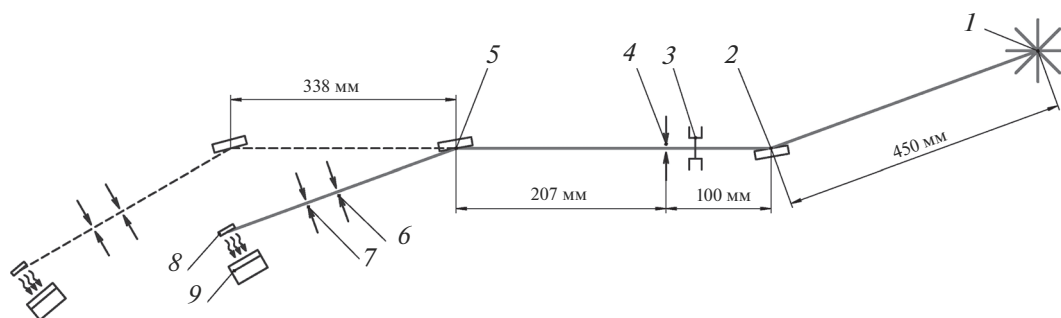


Рис. 8. Рентгенооптическая схема установки: 1 – лазерная искра, 2 – входное зеркало РСМ-500, 3 – свободновисящий фильтр, 4 – входная щель, 5 – дифракционная решетка, 6 – коллиматорная щель, 7 – выходная щель, 8 – фотокаатод, 9 – ВЭУ-7.

и попадает на фотокаатод 8, покрытый слоем CsJ. Вылетающие из фотокаатода электроны детектируются приемником 9 типа ВЭУ-7. В процессе проведения спектральных исследований различные элементы спектрометра-монохроматора перемещаются в соответствии с условиями фокусировки по кругу Роуланда.

Детектирование ЭУФ-излучения осуществляется в импульсном режиме. Запуск системы детектирования осуществляется тактовым импульсом, приходящим с системы управления лазером. Во время подачи лазерного импульса происходит генерация ЭУФ-излучения, которое, в свою очередь, выбивает электроны из фотокаатода, покрытого слоем CsJ. Электроны попадают на детектор ВЭУ-7, формируя выходной потенциал, который записывается в устройство выборки-хранения, откуда передается в АЦП и далее в компьютер. Процессы записи сигнала и его обработки занимают время порядка микросекунд. За время между лазерными импульсами, порядка десятой се-

кунды, система детектирования релаксирует к первоначальному состоянию. Питание системы детектирования батарейное, что позволяет избавиться от влияния импульсных помех. Такая логика работы системы позволяет детектировать ЭУФ-излучения малой длительности в широком диапазоне интенсивностей, вплоть до единичных фотонов.

Спектральное разрешение спектрометра-монохроматора РСМ-500 определялось из измерений полуширины нулевого порядка при возбуждении углекислоты импульсным лазерным излучением. Полученный спектр нулевого порядка приведен на рис. 9. Полуширина нулевого порядка и (соответственно) разрешение составляет 0.04 нм.

На установке были проведены исследования эмиссионных спектров углекислоты, что подтвердило работоспособность концепции и оборудования, применяемого в составе установки. Для градуировки спектрометра-монохромато-

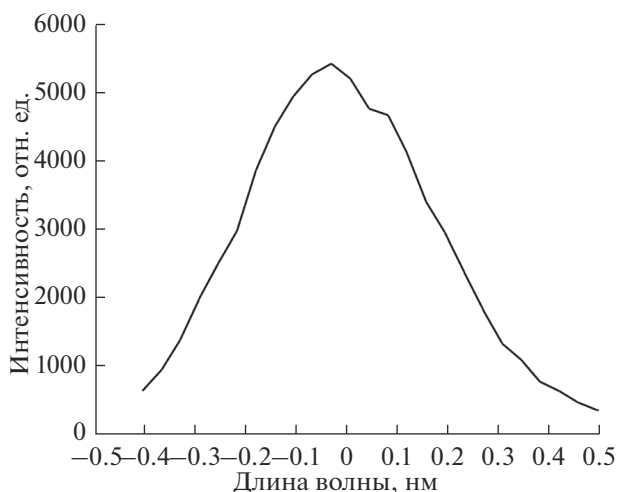


Рис. 9. Нулевой порядок при импульсном лазерном возбуждении углекислоты.

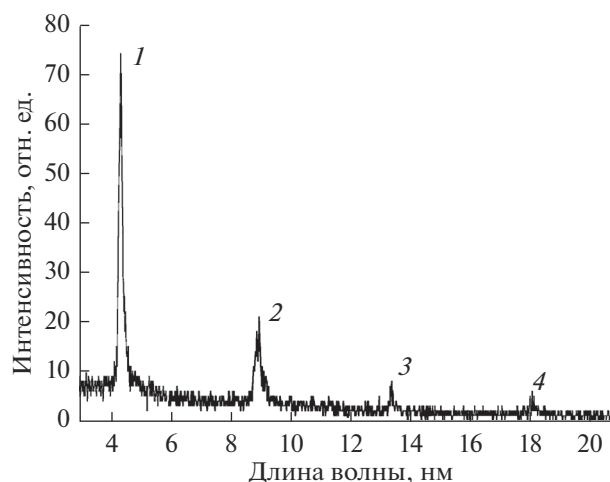


Рис. 10. Измеренные эмиссионные линии углерода при возбуждении электронным пучком твердотельной мишени.

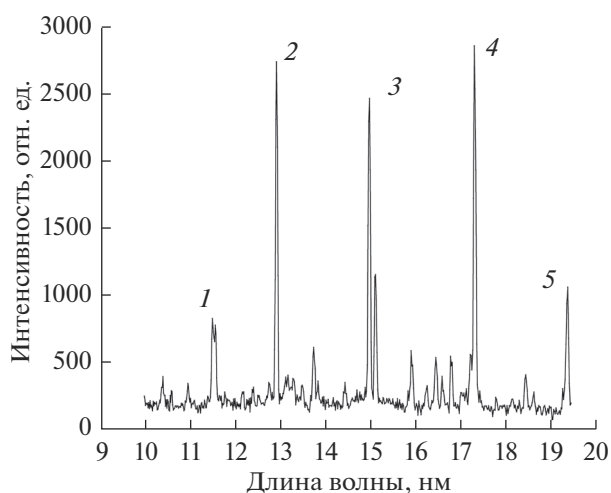


Рис. 11. Измеренный эмиссионный спектр углекислоты при импульсном лазерном возбуждении.

ра РСМ-500 необходимо установить связь между координатой микрометрического винта, перемещающего решетку и детектор, и регистрируемой длиной волны. Для этого проводилась съемка известных спектров, в частности, были выбраны эмиссионные спектры углерода при возбуждении электронным пучком твердотельной мишени и углекислого газа при возбуждении лазерным излучением. Данные спектры обладают хорошо известными и однозначно идентифицированными по длинам волн эмиссионными линиями. Полученные спектры приведены на рис. 10, 11.

На эмиссионном спектре углерода при возбуждении электронным пучком (рис. 10) видна эмиссионная линия углерода, расположенная при 4.47 нм и три порядка этой линии расположенные при 8.94, 13.41, 17.88 нм.

На эмиссионном спектре углекислоты при импульсном лазерном возбуждении (рис. 11) виден ряд эмиссионных линий, соответствующих переходам в ионах кислорода пяти- и шестикратной ионизации. Из наблюдаемых линий для целей градуировки можно выделить следующие: 1 – длина волны 11.58 нм, переход $1s^22s-1s^24p$ ион O^{6+} , 2 – длина волны 12.98 нм, переход $1s^22p-1s^24d$ ион O^{6+} , 3 – длина волны 15.01 нм, переход $1s^22s-1s^23p$ ион O^{6+} , 4 – длина волны 17.31 нм, переход $1s^22p-1s^23d$ ион O^{6+} , 5 – длина волны 19.3 нм, переход $1s^22s2p-1s^22s3d$ ион O^{5+} .

Таким образом, в результате измерений получен набор эмиссионных линий с известными длинами волн и координатами микрометрического винта для каждой линии. Координата микрометрического винта z связана с регистрируемой длиной волны следующим соотношением:

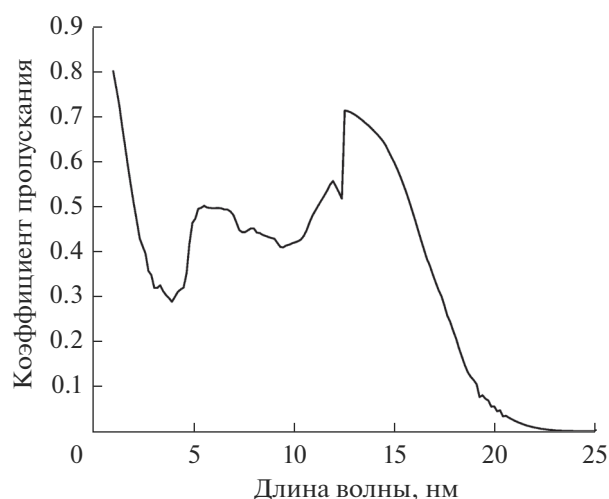


Рис. 12. Коэффициент пропускания свободновисящей пленки $Mo/ZrSi_2$.

$$\lambda = 10^7 \frac{1}{mp} \left(\cos \varphi - \sqrt{1 - \left(\frac{2(N_0 - z) + x_0}{R} \right)^2} \right),$$

где: λ – длина волны, m – порядок дифракции, p – число штрихов решетки на мм, φ – угол падения излучения на решетку, N_0 – координаты нулевого порядка по микрометрическому винту, x_0 – расстояние от входной щели до дифракционной решетки, расположенной в нулевом порядке дифракции, R – эффективный радиус кривизны решетки. Однако, требуется определить конкретные параметры величин p , φ , R . Используя известный набор эмиссионных линий с известными длинами волн и координатами микрометрического винта, для каждой линии данные параметры были найдены и определена аналитическая взаимосвязь между величинами z и λ .

В установке используется оптика скользящего падения, что приводит к значительным интенсивностям фонового сигнала, принимаемого детектором ВЭУ-7. Большая часть фонового сигнала формируется за счет рассеянного УФ-излучения и заряженных частиц, генерируемых лазерно-плазменным источником ЭУФ-излучения. Для снижения фонового сигнала на входе спектрометра-монокроматора РСМ-500 устанавливается свободновисящая пленка $Mo/ZrSi_2$ с толщинами слоев $15/25\text{\AA}$ (число слоев 12), которая является спектральным фильтром и защитой от частиц различной природы. В ЭУФ-диапазоне пленка обладает известным коэффициентом пропускания (рис. 12), удовлетворительным для длин волн короче <20 нм.

Спектрометр-монокроматор РСМ-500 позволяет проводить только относительные измерения интенсивности эмиссионных линий. Абсолютные измерения интенсивности излучения прово-

дятся с помощью отдельного прибора – квантометра, описанного в работе [21]. Вакуумированный квантометр состоит из набора сменных рентгеновских свободновисящих фильтров, достаточно прозрачных в ЭУФ-диапазоне и фильтрующих фоновое излучение инфракрасного, видимого, ультрафиолетового диапазона, и двухзеркального монохроматора, позволяющего выделить необходимую спектральную полосу в ЭУФ-диапазоне. Приемником излучения служит фотодиод типа SPD-100UV, градуированный в абсолютных единицах. Квантометр позволяет производить измерения интенсивности ЭУФ-излучения в абсолютных единицах в спектральной полосе, задаваемой двухзеркальным монохроматором. За счет выбора материала зеркал, используемых в монохроматоре, и углов падения можно проводить измерения в любой необходимой спектральной полосе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и введена в эксплуатацию установка для проведения исследований эмиссионных свойств кластерных пучков при возбуждении импульсным лазерным излучением, либо электронными пучками в спектральном диапазоне 1–50 нм. Спектральный диапазон определяется сменными дифракционными решетками спектрометра-монохроматора РСМ-500.

Изготовлен и испытан ряд конических сверхзвуковых сопел с диаметром критического сечения 230 и 145 мкм. Изучены расходные характеристики сопел для различных газов и при различных температурах газа на входе в сопло. Показано, что на установке можно проводить исследования при расходах газов вплоть до 25 нормальных см³/с.

Развита методика получения кластеров различного размера в струе в зависимости от рода газа, давлений и температур газа на входе в сопло. Размер кластеров можно менять непрерывно при неизменных экспериментальных условиях. Экспериментально показано, что для углекислоты возможно получение кластеров в диапазоне 700–35000 молекул/кластер.

Имеется возможность проводить исследования эмиссии излучения из различных точек газовой струи, что обеспечивается системой позиционирования сопла.

Имеется возможность проводить исследования эмиссионных свойств твердотельных мишеней при возбуждении импульсным лазерным излучением либо электронными пучками.

Планируется дальнейшее дополнение установки системой ионизации и ускорения кластерного пучка с целью проведения экспериментов по

изучению взаимодействия ускоренных кластерных пучков с поверхностью твердого тела.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ 17-12-227 и РФФИ 19-02-00081.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышева М.М. и др. // УФН. 2012. Т. 182. № 7. С. 727.
2. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N. // AIP Advances. 2013. V. 3. № 8. P. 082130.
3. Chao W. et al. // Nature. 2005. V. 435. № 7046. P. 1210.
4. Бибишукин М.С. и др. // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2003. № 2. С. 43.
5. Виноградов А.В., Шляпцев В.Н. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 1. С. 5.
6. Smirnov M.B., Becker W. // Phys. Rev. A. 2006. V. 74. № 1. P. 013201.
7. Chkhalo N.I., Garakhin S.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. № 22. P. 221101.
8. Chkhalo N.I., Garakhin S.A. et al. // AIP Advances. 2018. V. 8. № 10. P. 105003.
9. Демидов Р.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 22. С. 1.
10. Fiedorowicz H. et al. // Optics Communications. 1999. V. 163. № 1–3. P. 103.
11. Jansson P.A.C. et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. № 13. P. 2256.
12. Суздальев И.П. // Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига, 2006. С. 592.
13. Крайнов В.П., Смирнов М.Б. // УФН. 2000. Т. 170. № 9. С. 969.
14. Gnatchenko E.V., Nechay A.N., Tkachenko A.A. // Phys. Rev. A. 2009. V. 80. № 2. P. 022707.
15. Faenov A.Y., Magunov A.Y., Pikuz A.I., Skobelev T.A., Blasco I.Y. // AIP Conference Proceedings. – AIP. 2003. V. 652. № 1. P. 404.
16. Parra E. et al. // Phys. Rev. E. 2000. V. 62. № 5. P. R5931.
17. Нечай А.Н., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И. // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2017. № 5. С. 17.
18. Hagen O.F. // Surface Science. 1981. V. 106. № 1. P. 101.
19. Hagen O.F., Obert W. // J. Chem. Phys. 1972. V. 56. № 5. P. 1793.
20. Данильченко А.Г. и др. // ФНТ. 2011. Т. 37. № 6. С. 670.
21. Chkhalo N.I., Golubev S.V. et al. // J. Micro/Nanolith. MEMSMOEMS. 2012. V. 11. P. 021123.

Modular Device for the Formation and Study of Cluster Beams of Inert and Molecular Gases

**A. N. Nechay, A. A. Perekalov, N. I. Chkhalo, N. N. Salashchenko, I. G. Zabrodin,
I. A. Kaskov, A. Ye. Pestov**

The article discusses a modular unit designed for the formation and study of cluster beams of inert and molecular gases. The results of the first experiments to study the emission properties of cluster beams in the extreme ultraviolet range when excited by laser radiation or electron beams are presented. Cluster beams of inert and molecular gases of various sizes, structures, and compositions are used as targets. The carbon dioxide emission spectra obtained by laser excitation are presented, and the observed lines are identified.

Keywords: cluster beams, extreme ultraviolet radiation, emission spectra, laser spark, X-ray spectrometer-monochromator.