

## Исследования лазерной плазмы на основе струйных кластерных мишеней

© А.Н. Нечай, В.Е. Гусева, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,  
603087 Афонино, Кстовский р-он, Нижний Новгород, Россия  
e-mail: nechay@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 29 мая 2026 г.

В окончательной редакции 29 мая 2026 г.

Принято к публикации 29 мая 2026 г.

Приведены результаты исследований струйного лазерно-плазменного источника экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ) на базе конического сверхзвукового сопла. В качестве мишени использовались атомно-кластерные и молекулярно-кластерные струи инертных и молекулярных газов. Экспериментально показано увеличение эмиссии ЭУФ излучения при увеличении количества кластеризованного вещества в струе. Проводилось сравнение интенсивности ЭУФ излучения при использовании кластеризованных мишеней, полученных различными способами — путем повышения давления и понижения температуры газа на входе в сопло.

**Ключевые слова:** кластерные струйные мишени, лазерная плазма, лазерно-плазменный источник.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63617.197-26

### Введение

Исследование лазерной плазмы на основе кластерных струйных мишеней по сравнению с исследованиями лазерной плазмы на газо- и жидкоструйных мишенях имеет ряд особенностей. Кластеризация газа при его истечении из сопел приводит как к формированию кластеров в струе, так и к перестройке структуры струи, с образованием плотного ядра потока и разреженной „юбки“ из газа, отклоняющейся на большой угол относительно оси сопла. Получение значительного количества кластеров при истечении из сверхзвуковых сопел требует либо высоких давлений, либо низких температур газа на входе в сопло [1].

В большинстве работ для управления размерами и количеством кластеров, формирующихся при истечении газа из сверхзвукового сопла, используется изменение давления на входе в сопло [1]. Такое решение при его простоте неоднозначно, так как с ростом давления пропорционально увеличиваются и расход газа, и концентрация частиц в зоне лазерной искры, что приводит к сложностям выделения чисто кластерных эффектов. Вместе с тем управление размерами кластеров возможно путем изменения температуры газа на входе в сопло, что требует более сложного аппаратного оформления, малоприменимо для импульсных сопел, но вместе с тем позволяет получать кластеры в более широком диапазоне размеров при практически неизменных расходах газа.

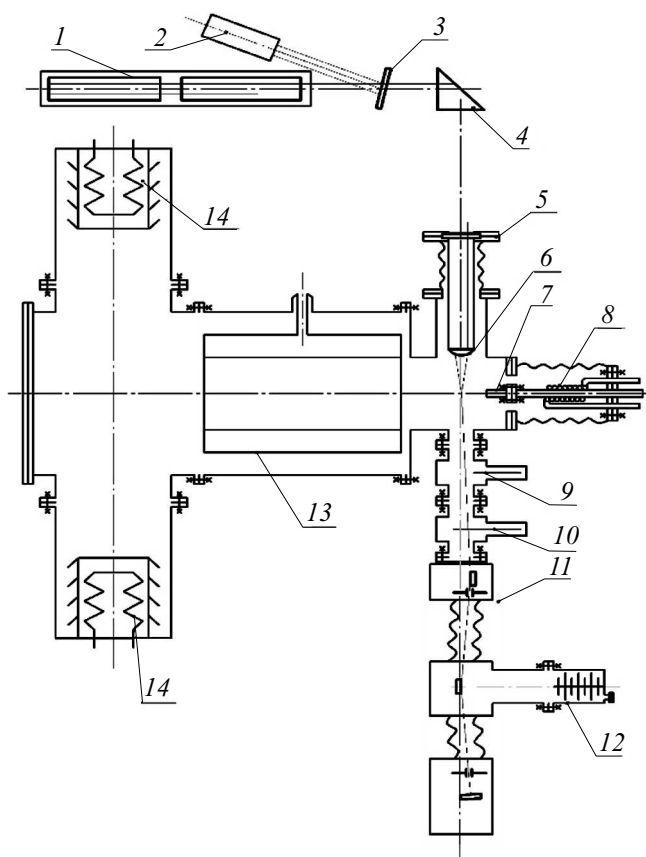
В настоящей работе проводится описание экспериментов, проведенных с использованием кластерных струй постоянного истечения, используемых в качестве мишеней для лазерно-плазменного источника излучения.

### 1. Исследовательская установка и методики проведения измерений кластерных мишеней

#### 1.1. Схема исследовательской установки

Для проведения экспериментов по исследованию эмиссионных свойств лазерной плазмы, образованной при лазерном возбуждении кластерных струй, использовалась исследовательская установка, описанная в [2], схема которой представлена на рис. 1.

Работа установки осуществляется следующим образом. Излучение лазера 1 попадает на делительную пластинку 3, откуда малая часть излучения подается на детектор мощности излучения 2. Основная часть излучения, проходя призму 4 и оптический ввод 5, попадает на линзу 6 и фокусируется на мишени. Исследуемый газ при заданном давлении подается в теплообменник 8, 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 формируется кластерная мишень. Откачка камеры осуществляется криоконденсационным 13 и криосорбционными 14 насосами. В фокусе короткофокусной линзы 6 лазерное излучение вызывает пробой и образование плазмы, полихроматическое ЭУФ (экстремально ультрафиолетовое) излучение которой, проходя электропневматический вакуумный затвор 9 и диафрагму, либо свободновисящую пленку 10, попадает на входное зеркало спектрометра-монокроматора РСМ-500 11. За выходной щелью спектрометра монохроматическое излучение регистрировалось импульсным приемником излучения на основе фотокатода, покрытого слоем CsJ, и детектора



**Рис. 1.** Схема исследовательской установки: 1 — лазер, 2 — датчик мощности лазерного излучения, 3 — делительная пластинка, 4 — призма, 5 — оптический ввод лазерного излучения, 6 — линза, 7 — сопло, 8 — теплообменник, 9 — вакуумный затвор, 10 — диафрагма, 11 — монохроматор РСМ-500, 12 — турбомолекулярный насос, 13 — криоконденсационный насос, 14 — криосорбционный насос.

ВЭУ-7. Откачка РСМ–500 осуществляется отдельным турбомолекулярным насосом 12.

## 1.2. Сопла, используемые для формирования кластерных мишеней

В проводимых экспериментах для получения кластерных струй на вход сопла подавался охлажденный газ. В данном случае применение механических клапанов для формирования импульсных потоков газа затруднено, поэтому использовалась схема с постоянным истечением газа. Так как возможности откачных систем ограничены, использовалось коническое сопло диаметром критического сечения  $145\text{ }\mu\text{m}$ , на входе в которое создается умеренное давление газа ( $< 5\text{ bar}$ ). Такая система позволяет получать кластерные струи различного размера и концентрации кластеров в зависимости от температуры газа на входе в сопло.

Малый диаметр сопел и соответственно существенное трение газа о стенки сопла подавляют процесс образования кластеров, поэтому работа в кластерном

режиме должна вестись при охлаждении до температур весьма близких к температуре конденсации газа при используемом давлении.

Расстояние от среза сопла до лазерной искры для всех экспериментов составляло  $300\text{ }\mu\text{m}$ . Диаметр газоструйной мишени для малых расстояний от среза сопла можно принять равным диаметру выходного отверстия сопла, составлявшего  $\sim 850\text{ }\mu\text{m}$ .

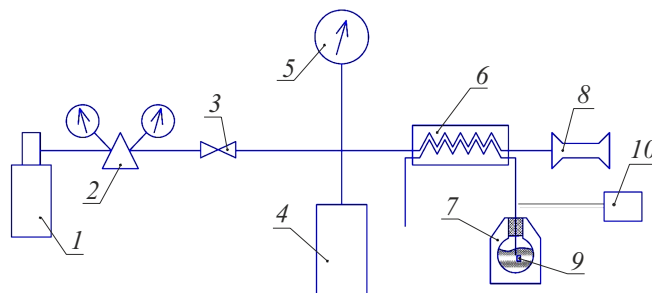
## 1.3. Система газового питания сопла

Для подачи газа нужного давления и температуры на вход в сопло использовалась система кондиционирования, приведенная на рис. 2.

Газ из баллона 1 поступает в двухступенчатый редуктор 2, откуда через игольчатый регулировочный вентиль 3 подается в теплообменник 6, установленный в вакуумном объеме установки. На торец теплообменника устанавливается коническое сопло 8. Образцовый манометр 5 и измерительный объем объемом  $100\text{ cm}^3$  4 предназначены для точного измерения давления в системе и измерения расхода газа через используемое сопло.

Охлаждение теплообменника 6 осуществляется газообразным азотом. Газообразный азот получается при испарении жидкого азота в сосуде Дьюара 7 с помощью электрического нагревателя 9. Управление температурой теплообменника осуществляется изменением расхода газообразного азота при изменении мощности электрического нагревателя, управляемого блоком питания 10. В такой схеме возможно охлаждение теплообменника до температуры  $\sim 140\text{ K}$ .

Для измерения температуры газа на корпусе сопла закреплен датчик температуры Pt-1000. Данный датчик представляет собой платиновый резисторный датчик температуры, базовое значение сопротивления при  $273\text{ K}$  составляет  $1000\text{ }\Omega$ . При изменении температуры сопротивление датчика изменяется по известному закону, рабочий диапазон температур составляет от  $70$  до  $650\text{ K}$ .



**Рис. 2.** Принципиальная схема системы газового питания: 1 — баллон с газом, 2 — редуктор, 3 — регулировочный вентиль, 4 — измерительный объем, 5 — манометр, 6 — теплообменник, 7 — сосуд Дьюара, 8 — сопло, 9 — нагревательный элемент, 10 — блок питания.

#### 1.4. Система вакуумной откачки

Система откачки установки при использовании кластерных мишеней дифференциальная, комбинированная, осуществляется с помощью криогенных и турбомолекулярных насосов. Откачка объема установки ведется двумя криосорбционными насосами марки КВ 250-3.2. Для откачки РСМ-500 применен турбомолекулярный насос НВТ-100 производительностью 100 л/с. Вакуумные объемы установки соединены через быстродействующий вакуумный клапан с пневмоприводом.

Для уменьшения остаточного давления в объеме РСМ-500 при проведении исследований кластерных пучков в районе пневмоклапана устанавливалась разделительная мембрана из свободновисящей многослойной пленки. Материал данной пленки выбирается из спектроскопических соображений и одновременно служит спектральным фильтром. При установке данного разделителя объемов вакуум в объеме РСМ-500 составлял  $\sim 10^{-3}$  Па и не зависел от вакуума в объеме камеры, который мог меняться в диапазоне  $10^{-3}$ –50 Па. Данное решение показало себя очень удобным при исследовании кластерных мишеней.

#### 1.5. Система лазерного возбуждения

Для возбуждения кластерной струи использовался лазер NL300 Series Nd:YAG Laser со следующими параметрами: длина волны 1064 nm, энергия импульса лазера 0.8 J, паспортная длительность импульса 5.2 ns, частота до 10 Hz. Лазерное излучение фокусируется на газовую мишень с помощью линзы с фокусным расстоянием 45 mm. Размер лазерной искры при наблюдении на длине волны 11.2 nm для различных газовых мишеней несколько различен [3]. Для использованных в настоящей работе сопел размер искры определялся шириной искры и диаметром кластерной мишени, ориентировочно составляя  $200 \times 850 \mu\text{m}$ .

#### 1.6. Методика получения кластеров и определения их размера

Получение кластерных струй возможно с помощью множества различных методов [4], при проведении данных исследований был выбран метод конденсации кластеров в сверхзвуковой расширяющейся струе как наиболее простой, производительный и управляемый метод. Течение конденсирующегося газа в сверхзвуковом сопле качественно показано на рис. 3.

Подаваемый газ с давлением  $P_0$  и температурой  $T_0$  разгоняется в конфузурной части сопла и достигает скорости звука  $M = 1$  в критическом сечении. При течении газа в диффузурной 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

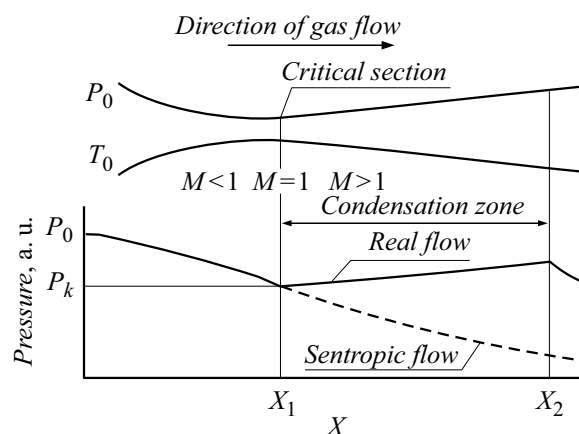


Рис. 3. Схематическое изображение процесса конденсации газа в сверхзвуковом сопле.  $P_0, T_0$  — давление и температура газа на входе в сопло,  $P_k$  — начальное давление в зоне конденсации,  $M$  — число Маха.

счет выделения тепла конденсации. Процессы образования кластеров, как правило, заканчиваются до выходного сечения сопла. В экспериментах использовались технологически простые конические сверхзвуковые сопла, не имеющие конфузурной части и обладающие коническим профилем в диффузурной части.

Истечение конденсирующегося газа в сопле является весьма сложным процессом, и задача определения параметров кластерного пучка, выходящего из сопла, полностью не решена до сих пор. На практике для оценки размеров кластеров при истечении газа из конических сверхзвуковых сопел используются эмпирические соотношения Хагены [1,5], связанные с геометрическими характеристиками сопла, давлением, температурой и родом газа на входе в сопло. Первоначально определяется эмпирический параметр Хагены  $\Gamma^*$ , равный

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

где  $d$  — диаметр критического сечения сопла ( $145 \mu\text{m}$ ),  $2\alpha$  — угол раствора конусного сопла ( $12^\circ$ ),  $K$  — константа, определяющая род газа (константы Хагены для  $\text{Ar} = 1650$ ,  $\text{Kr} = 2890$ ,  $\text{CO}_2 = 3660$ ,  $\text{Xe} = 5500$ ,  $\text{CHF}_3 = 3650$ ,  $\text{Ne} = 185$ ,  $\text{N}_2 = 528$ ,  $\text{CH}_4 = 2360$  [6]).

Для кластеров с  $N > 1000$  atoms/cluster использовалось второе соотношение Хагены:

$$N = 1.64 \cdot 10^{-4} \Gamma^{*1.8}.$$

Для конических сопел с критическим сечением  $340 \mu\text{m}$  проводилась экспериментальная проверка соотношений Хагены [7], показавшая удовлетворительное соответствие размеров наблюдаемых кластеров расчетным. Исследования кластерных пучков проводились во множестве работ, например, в работе [8]. Вместе с тем эмпирические соотношения Хагены не учитывают ряд процессов, протекающих при истечении газа из сопла, в

частности, трение газа о стенки сопла. Соответственно для сопел малого сечения возможны существенные отклонения в размерах фактически получаемых кластеров в меньшую сторону от расчетных. Также соотношения Хагены малоприменимы в случае истечения газовых смесей.

Расчет доли конденсата в кластеризующемся потоке газа является весьма сложной задачей и в настоящей работе не проводился. Качественно считалось, что доля конденсата пропорциональна размеру кластеров в струе.

Таким образом, в процессе проведения работы исследовались три режима работы: „газовый“, „кластерный при повышенном давлении“, „кластерный при пониженной температуре“. Во всех режимах присутствовали кластеры, отличался только их размер и концентрация. Считалось что в „газовом“ режиме концентрация кластеров пренебрежимо мала, в „кластерном при повышенном давлении“ концентрация кластеров выше, но не оказывает существенного влияния на наблюдаемые процессы, в „кластерном при пониженной температуре“ концентрация кластеров высока и оказывает существенное влияние на процессы образования лазерной искры. Проводились измерения расхода газа в различных режимах истечения. Для применяемых сопел расход газа пропорционален давлению и практически не зависит от температуры газа на входе в сопло.

### 1.7. Система детектирования мягкого рентгеновского и ЭУФ излучения

Для исследования эмиссионных спектров ЛПИ (лазерно-плазменный источник) на основе кластерных струй различных газов использовался спектрометр-монокроматор РСМ-500. РСМ-500 это рентгеновский спектрометр — монокроматор, в котором в качестве диспергирующего элемента используется сферическая дифракционная решетка скользящего падения. В процессе работы входная щель прибора неподвижна, решетка и выходная щель движутся линейно и поворачиваются по своей оси таким образом, чтобы все время находиться на круге фокусировки. Перемещение всех подвижных элементов осуществляется шаговым двигателем, регистрация спектров осуществляется в координатах ходового микрометрического винта, далее пересчитываемых в длины волн либо энергию квантов [9].

Детектирование ЭУФ-излучения осуществляется в импульсном режиме. Запуск системы детектирования производится тактовым импульсом, приходящим с системы управления лазером. В качестве приемника излучения в РСМ-500 использовался фотокатод, покрытый слоем CsI. Во время подачи лазерного импульса происходит генерация ЭУФ-излучения, которое, в свою очередь, выбивает электроны из фотокатода, покрытого слоем CsI. 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

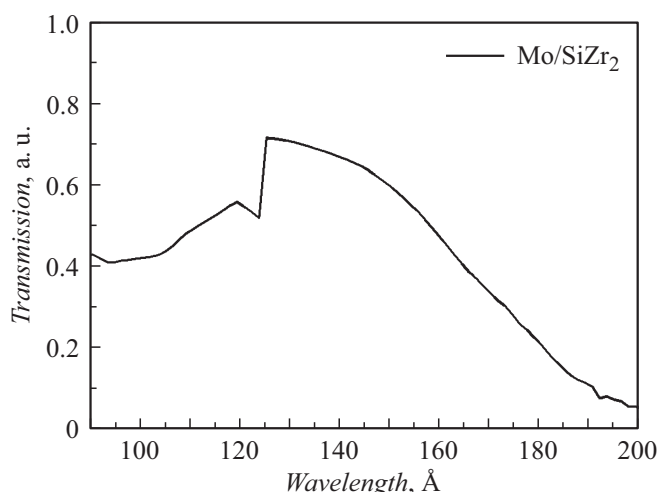


Рис. 4. Спектральная зависимость пропускания свободного пленочного фильтра Mo/ZrSi<sub>2</sub>, использованного в эксперименте.

занимают время порядка микросекунд. За время между лазерными импульсами, порядка десятой секунды, система детектирования релаксирует к первоначальному состоянию.

При проведении исследований кластерных струй с соплами непрерывного действия в камере источника излучения наблюдалось повышенное давление, что требовало обязательного разделения объемов камеры источника и РСМ-500 с помощью свободного пленочного фильтра Mo/ZrSi<sub>2</sub>, который также играет роль спектрального фильтра, выделяющего ЭУФ-излучение. Зависимость пропускания от длины волны для данного фильтра приведена на рис. 4. За счет использования данного фильтра снижается уровень шумов на полученных спектрах.

В связи с малыми давлениями исследуемых газов на входе в сопло и соответственно малыми концентрациями частиц в зоне образования лазерной искры данные измерения характеризуются относительно низкой интенсивностью излучения. Соответственно для увеличения интенсивности излучения проводилось раскрытие щелей спектрометра, в результате которого спектральное разрешение составило 0.6 Å.

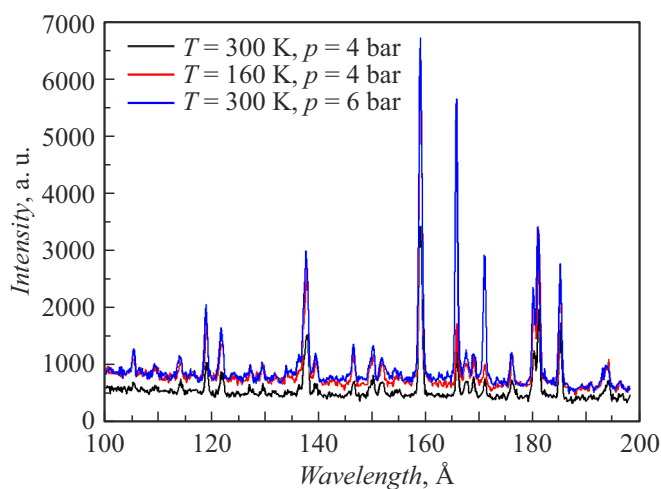
## 2. Результаты исследований кластерных мишеней

### 2.1. Кластерные мишени аргона

Аргон является низкокипящим газом ( $T_b = 88$  К). При используемых параметрах холодного газа на входе в сопло ( $T = 160$  К,  $p = 4$  bar) конденсация не будет сильно развита. Тем не менее небольшое количество кластеров и изменение распределения концентрации частиц в струе газа в результате процессов кластерообразования может оказать влияние на формирование лазерной

**Таблица 1.** Относительные интенсивности некоторых линий аргона при различных размерах кластеров в струйной мишени

| Длина волны, Å | Ион    | Переход               | Интенсивность, а.е.                     |                                             |                                          |
|----------------|--------|-----------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|
|                |        |                       | 300 K, 4 bar<br>$N = 800$ atoms/cluster | 160 K, 4 bar<br>$N = 10\,000$ atoms/cluster | 300 K, 6 bar<br>$N = 1700$ atoms/cluster |
| 113.9          | ArVII  | $2p^6 3s^2 - 3s 7p$   | 260                                     | 370                                         | 370                                      |
| 120.0          | ArVIII | $2p^6 3s - 2p^6 5p$   | 545                                     | 1020                                        | 1270                                     |
| 123.0          | ArVIII | $2p^6 3p - 2p^6 6d$   | 410                                     | 630                                         | 900                                      |
| 138.4          | ArVIII | $2p^6 3p - 2p^6 5d$   | 1020                                    | 1995                                        | 2055                                     |
| 158.9          | ArVIII | $2p^6 3s - 2p^6 4p$   | 2945                                    | 5410                                        | 5970                                     |
| 165.5          | ArX    | $2s^2 2p^5 - 2s 2p^6$ | 800                                     | 1080                                        | 4900                                     |
| 166.6          | ArVII  | $3s 3p - 3s 5s$       | 260                                     | 390                                         | 530                                      |
| 170.6          | ArX    | $2s^2 2p^5 - 2s 2p^6$ | 310                                     | 365                                         | 2195                                     |
| 175.5          | ArVII  | $2p^6 3s^2 - 3s 4p$   | 300                                     | 580                                         | 525                                      |
| 179.4          | ArVIII | $2p^6 3p - 2p^6 4d$   | 810                                     | 1460                                        | 1730                                     |
| 180.2          | ArVIII | $2p^6 3p - 2p^6 4d$   | 1532                                    | 2681                                        | 2773                                     |
| 184.3          | ArVIII | $2p^6 3d - 2p^6 5f$   | 1299                                    | 1725                                        | 2139                                     |

**Рис. 5.** Эмиссионные спектры кластерной мишени аргона.

плазмы. Также для сравнения интенсивностей излучения при различных параметрах газа на входе в сопло проводились дополнительные исследования эмиссионных спектров аргона при температуре 300 K и давлении газа 4 и 6 бар. Эмиссионные спектры кластерной мишени аргона приведены на рис. 5.

Видно, что при развитой кластеризации вид спектра не изменяется и соответствует спектру газоструйной мишени. Вместе с этим наблюдается рост интенсивности спектральных линий. Для удобства сравнения значения интенсивностей отдельных линий аргона приведены в табл. 1. Расшифровка линий проводилась в соответствии с [10–14].

В табл. 1 видно, что в кластерном режиме работы, обусловленном понижением температуры, ( $N = 10\,000$  atoms/cluster) по сравнению с газоструйным режимом работы ( $N = 800$  atoms/cluster) рост интенсивности линий в среднем для ионов ArVII составляет 1.6 раз, ArVIII составляет 1.8 раз, ArX составляет 1.3 раз. Наблюдается существенное увеличение интенсивности эмиссионных линий ионов аргона с низкой степенью ионизации (ArVII, ArVIII). Переход в низкотемпературный режим кластеризации позволяет увеличить интенсивность излучения линий в среднем примерно в 1.5 раза при том же расходе газа.

В случае кластерного режима работы, обусловленного повышенным давлением ( $N = 1700$  atoms/cluster), по сравнению с газоструйным режимом работы ( $N = 800$  atoms/cluster) рост интенсивности линий в среднем для ионов ArVII составляет 1.7 раз, ArVIII составляет 2 раза, ArX составляет 6.4 раз. Наблюдается значительное увеличение интенсивности эмиссионных линий ионов аргона с высокой степенью ионизации, особенно — ArX.

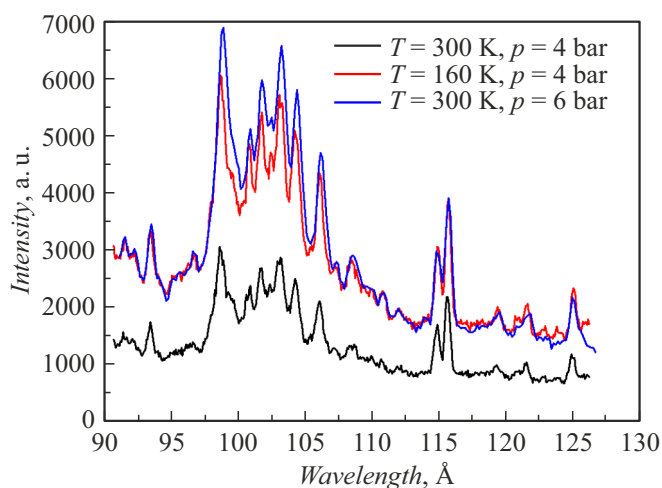
Таким образом, мишени на основе кластерных струй аргона, полученные при охлаждении газа или при увеличении давления газа на входе в сопло, не эквивалентны. Описание кластерных струй из аргона с помощью только среднего размера кластеров не полно.

## 2.2. Кластерные мишени криптона

Криптон является среднекипящим газом ( $T_b = 120$  K). При используемых параметрах холодного газа на входе

**Таблица 2.** Относительные интенсивности некоторых линий криптона при различных размерах кластеров в струйной мишени

| Длина волны, Å | Ион    | Переход               | Интенсивность, а.е.                       |                                              |                                           |
|----------------|--------|-----------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                |        |                       | 300 K, 4 bar,<br>$N = 2100$ atoms/cluster | 160 K, 4 bar,<br>$N = 28\,000$ atoms/cluster | 300 K, 6 bar,<br>$N = 4500$ atoms/cluster |
| 91.8           | KrX    | $3p^63d^9-3p^63d^84p$ | 400                                       | 940                                          | 950                                       |
| 99.0           | KrX    | $3p^63d^9-3p^63d^84p$ | 1950                                      | 3690                                         | 4480                                      |
| 100.2          | KrX    | $3p^63d^9-3p^63d^84p$ | 1300                                      | 2630                                         | 2820                                      |
| 101.4          | KrX    | $3p^63d^9-3p^63d^84p$ | 1650                                      | 3200                                         | 3730                                      |
| 103.2          | KrX    | $3p^63d^9-3p^63d^84p$ | 1800                                      | 3550                                         | 4420                                      |
| 104.0          | KrX    | $3p^63d^9-3p^63d^84p$ | 1100                                      | 2300                                         | 2700                                      |
| 114.9          | KrIX   | $3d^{10}-3d^94p$      | 850                                       | 1410                                         | 1380                                      |
| 115.7          | KrIX   | $3d^{10}-3d^94p$      | 1350                                      | 2220                                         | 2310                                      |
| 121.5          | KrVIII | $4p-3d^94p^2$         | 250                                       | 490                                          | 430                                       |
| 124.7          | KrVIII | $4s-3d^94s4p$         | 350                                       | 780                                          | 770                                       |

**Рис. 6.** Эмиссионные спектры кластерной мишени криптона.

в сопло ( $T = 160$  K,  $p = 4$  bar) конденсация будет достаточно развита. Значительное количество кластеров и изменение распределения концентрации частиц в струе газа в результате процессов кластерообразования должно оказывать существенное влияние на формирование в ней лазерной плазмы. Также для сравнения интенсивностей излучения при различных параметрах газа на входе в сопло проводились дополнительные исследования эмиссионных спектров криптона при температуре 300 K и давлении газа 4 и 6 bar. Эмиссионные спектры кластерной мишени криптона приведены на рис. 6.

Видно, что при кластеризации мишени вид спектра не изменяется и соответствует спектру газоструйной мишени. Наблюдается рост интенсивности спектральных линий. Для удобства сравнения значения интенсивности

отдельных линий криптона приведены в табл. 2. Расшифровка линий проводилась в соответствии с [10,11,15].

В табл. 2 видно, что в кластерном режиме работы, обусловленном снижением температуры ( $N = 28\,000$  atoms/cluster), по сравнению с газоструйным режимом работы ( $N = 2100$  atoms/cluster) рост интенсивности линий в среднем для ионов KrVIII составляет 1.8 раз, KrIX составляет 1.6 раз, KrX составляет 2 раза. Наблюдается существенное увеличение интенсивности эмиссионных линий ионов криптона с некоторым опережением роста интенсивности линий ионов KrX. Переход в низкотемпературный режим кластеризации позволяет увеличить интенсивность линий в среднем примерно в 1.8 раз при том же расходе газа.

В случае кластерного режима работы, обусловленного повышенным давлением ( $N = 4500$  atoms/cluster), по сравнению с газоструйным режимом работы ( $N = 2100$  atoms/cluster) рост интенсивности линий ионов в среднем для KrVIII составляет 2.2 раза, KrIX составляет 1.7 раз, KrX составляет 2.3 раза. Наблюдается значительное увеличение интенсивности эмиссионных линий атомов криптона со всеми степенями ионизации.

Таким образом, мишени на основе кластерных струй криптона, полученные при охлаждении газа или при увеличении давления газа на входе в сопло, также не эквивалентны.

### 2.3. Результаты исследований кластерных струй ксенона

Ксенон является высококипящим газом ( $T_b = 165$  K). При используемых параметрах холодного газа на входе в сопло ( $T = 190$  K,  $p = 4$  bar) конденсация будет весьма развита. Значительное число кластеров и изменение распределения концентрации частиц в струе газа в резуль-

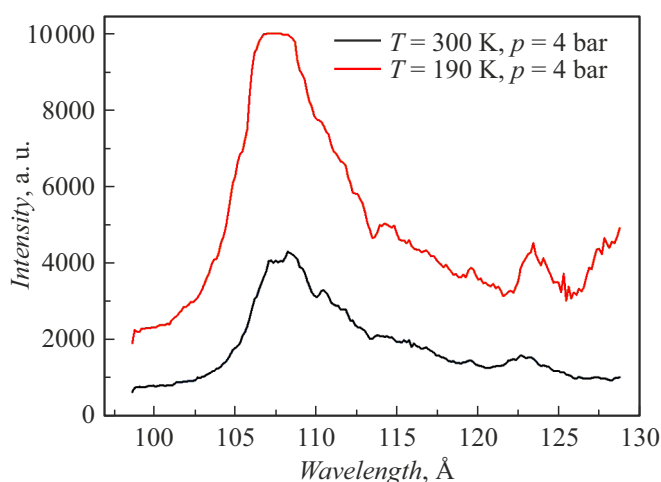


Рис. 7. Эмиссионные спектры кластерной мишени ксенона.

тате процессов кластерообразования должны оказывать существенное влияние на формирование лазерной плазмы. Эмиссионные спектры кластерной мишени ксенона приведены на рис. 7.

Видно, что при кластеризации вид спектра не изменяется и в целом соответствует спектру газоструйной мишени. Наблюдается рост интенсивности спектральных полос. Размер кластеров ксенона при параметрах газа на входе в сопло  $T = 300$  K,  $p = 4$  bar составляет  $N = 6800$  atoms/cluster, а при  $T = 190$  K,  $p = 4$  bar составляет  $N = 44\,000$  atoms/cluster. Из рис. 7 можно видеть средний рост интенсивности эмиссии в 2.5 раза при опережающем росте линий с малой степенью ионизации.

Сильное самопоглощение в ксеноновых мишенях и изменение формы струйной мишени ксенона при его истечения с ростом доли кластеров заставляют с осторожностью относиться к оценкам интенсивности. Исследования конденсирующихся струй ксенона необходимо проводить в условиях малого остаточного давления в камере, для чего необходима специализированная установка с мощной откачной системой.

## 2.4. Результаты исследований кластерных струй углекислоты

Углекислота является высокикипящим газом ( $T_{sub} = 195$  K). При используемых параметрах холодного газа на входе в сопло ( $T = 220$  K,  $p = 4$  bar) конденсация будет весьма развита. Значительное число кластеров и изменение распределения концентрации частиц в струе газа в результате процессов кластерообразования должны оказывать существенное влияние на формирование лазерной плазмы. Также для сравнения интенсивностей излучения при различных параметрах газа на входе в сопло проводились дополнительные исследования эмиссионных спектров углекислоты при температуре 300 K и давлении газа 4 и 6 bar. Эмиссионные спектры кластерной мишени углекислоты приведены на рис. 8.

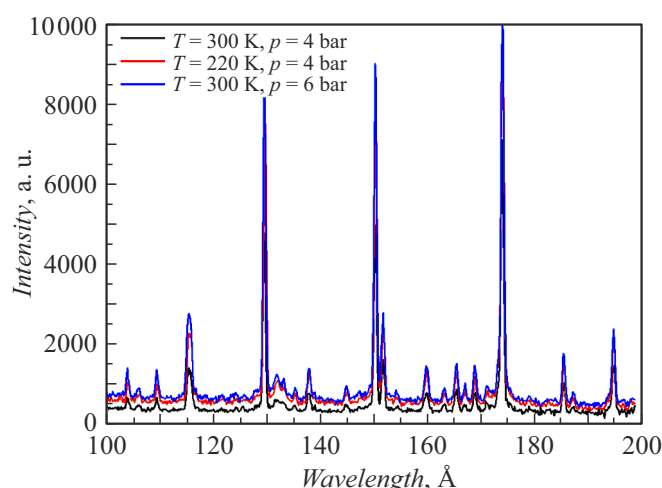


Рис. 8. Эмиссионные спектры кластерной мишени углекислоты.

Видно, что при кластеризации вид спектра не изменяется и соответствует спектру газоструйной мишени. Наблюдается рост интенсивности спектральных линий. Для удобства сравнения значения интенсивности отдельных линий углекислоты приведены в табл. 3. Расшифровка линий проводилась в соответствии с [10,11,16,17].

В табл. 3 видно, что при кластерном режиме работы, обусловленном снижением температуры ( $N = 11\,800$  molecules/cluster), по сравнению с газоструйным режимом работы ( $N = 3300$  molecules/cluster) рост интенсивности линий в среднем для ионов OV составляет 1.6 раз, OVI составляет 1.5 раз. Наблюдается существенное увеличение интенсивности эмиссионных линий ионов кислорода, примерно одинаковое для ионов с различной ионизацией. Переход в низкотемпературный режим кластеризации позволяет увеличить интенсивность излучения линий примерно в 1.5 раза при том же расходе газа.

В случае кластерного режима работы при повышенном давлении ( $N = 6800$  molecules/cluster) по сравнению с газоструйным режимом работы ( $N = 3300$  molecules/cluster) рост интенсивности линий в среднем для ионов OV составляет 1.8 раз, OVI составляет 1.7 раз. Наблюдается значительное увеличение интенсивности эмиссионных линий ионов кислорода с различной степенью ионизации.

Таким образом, мишени на основе кластерных струй углекислоты, полученных при охлаждении газа или при увеличении давления газа на входе в сопло, не эквивалентны. Описание кластерных струй из углекислоты с помощью только среднего размера кластеров не полно.

## 2.5. Результаты исследований кластерных струй азота

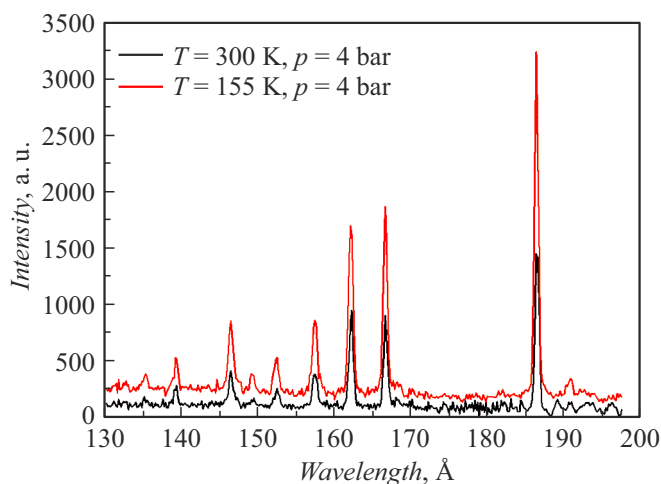
Азот является низкикипящим газом ( $T_b = 77$  K). При используемых параметрах холодного газа на входе в

**Таблица 3.** Относительные интенсивности некоторых линий углекислоты при различных размерах кластеров в струйной мишени

| Длина волны, Å | Ион | Переход     | Интенсивность, a.u.                       |                                              |                                           |
|----------------|-----|-------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                |     |             | 300 K, 4 bar,<br>$N = 3300$ atoms/cluster | 220 K, 4 bar,<br>$N = 11\,800$ atoms/cluster | 300 K, 6 bar,<br>$N = 6800$ atoms/cluster |
| 115.8          | OVI | $2s-4p$     | 1330                                      | 1720                                         | 2150                                      |
| 116.4          | OVI | $2p-5d$     | 1280                                      | 1700                                         | 2150                                      |
| 129.8          | OVI | $2p-4d$     | 4420                                      | 7310                                         | 8485                                      |
| 138.1          | OV  | $2s2p-2s5d$ | 400                                       | 800                                          | 790                                       |
| 150.1          | OVI | $2s-3p$     | 4670                                      | 7800                                         | 8460                                      |
| 151.5          | OV  | $2s2p-2s4d$ | 1290                                      | 2050                                         | 2220                                      |
| 158.9          | OV  | $2p^2-2p4d$ | 470                                       | 805                                          | 890                                       |
| 162.6          | OV  | $2p^2-2p4d$ | 190                                       | 250                                          | 330                                       |
| 164.6          | OV  | $2s2p-2p3p$ | 550                                       | 770                                          | 940                                       |
| 165.0          | OV  | $2p^2-2p4d$ | 200                                       | 330                                          | 470                                       |
| 168.0          | OV  | $2s2p-2p3p$ | 480                                       | 680                                          | 945                                       |
| 173.1          | OVI | $2p-3d$     | 6810                                      | 9380                                         | 9440                                      |
| 184.0          | OVI | $2p-3s$     | 720                                       | 1140                                         | 1260                                      |
| 193.0          | OV  | $2s2p-2s3d$ | 1150                                      | 1835                                         | 1880                                      |

сопло ( $T = 155$  K,  $p = 4$  bar) конденсация будет мало развита. Малое число кластеров в струе газа должны оказывать малое влияние на формирование лазерной плазмы. Эмиссионные спектры кластерной мишени азота приведены на рис. 9.

Видно, что при кластеризации вид спектра не изменяется и соответствует спектру газоструйной мишени. Наблюдается рост интенсивности спектральных линий. Для удобства сравнения значения интенсивности отдельных

**Рис. 9.** Эмиссионные спектры кластерной мишени азота.

линий азота приведены в табл. 4. Расшифровка линий проводилась в соответствии с [10,11].

В табл. 4 видно, что при кластерном режиме работы, обусловленном снижением температуры ( $N = 1450$  molecules/cluster), по сравнению с газоструйным режимом работы ( $N = 100$  molecules/cluster) рост интенсивности линий в среднем для ионов NV составляет 2 раза. Наблюдается увеличение интенсивности эмиссионных линий ионов азота. Видно, что переход в низкотемпературный режим кластеризации позволяет увеличить среднюю интенсивность излучения линий примерно в 2 раза при том же расходе газа.

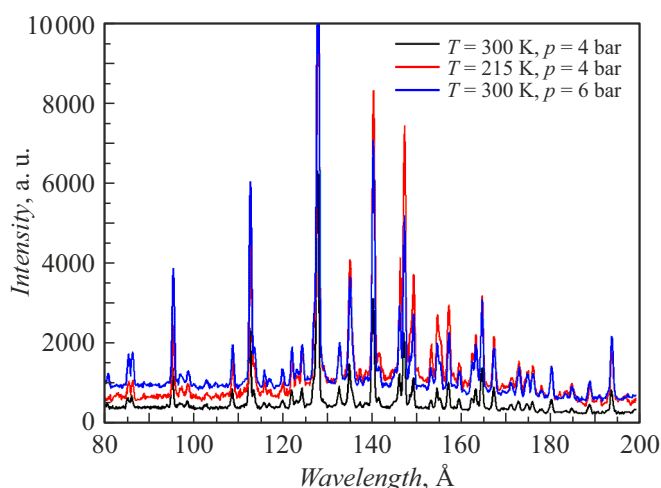
Исследования эмиссионных спектров лазерной плазмы на основе мишени азота при повышенных давлениях не проводились в связи со сложностями организации откачки.

## 2.6. Результаты исследований кластерных струй трифторметана

Трифторметан является высококипящим газом ( $T_b = 190$  K). При используемых параметрах холодного газа на входе в сопло ( $T = 215$  K,  $p = 4$  bar) конденсация будет весьма развита. Большое число кластеров и изменение распределения концентрации частиц в струе газа в результате процессов кластерообразования должны оказывать сильное влияние на формирование лазерной плазмы. Для сравнения интенсивностей

**Таблица 4.** Относительные интенсивности некоторых линий азота при различных размерах кластеров в струйной мишени

| Длина волны, Å | Ион | Переход | Интенсивность, а.е.                      |                                           |
|----------------|-----|---------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                |     |         | 300 K, 4 bar,<br>$N = 100$ atoms/cluster | 155 K, 4 bar,<br>$N = 1450$ atoms/cluster |
| 140.3          | NV  | $2s-6p$ | 176                                      | 286                                       |
| 147.4          | NV  | $2s-5p$ | 305                                      | 613                                       |
| 150.2          | NV  | $2p-8d$ | 166                                      | 157                                       |
| 153.1          | NV  | $2p-7d$ | 147                                      | 306                                       |
| 158.1          | NV  | $2p-6d$ | 294                                      | 647                                       |
| 162.5          | NV  | $2s-4p$ | 857                                      | 1494                                      |
| 166.9          | NV  | $2p-5d$ | 812                                      | 1663                                      |
| 186.1          | NV  | $2p-4d$ | 1332                                     | 3038                                      |

**Рис. 10.** Эмиссионные спектры кластерной мишени трифторметана.

излучения при различных параметрах газа на входе в сопло проводились дополнительные исследования эмиссионных спектров трифторметана при температуре 300 К и давлении газа 4 и 6 бар. Эмиссионные спектры линий трифторметана приведены на рис. 10.

Видно, что при кластеризации вид спектра не изменяется и соответствует спектру газоструйной мишени. Наблюдается рост интенсивности спектральных линий. Для удобства сравнения значения интенсивности отдельных линий трифторметана приведены в табл. 5. Расшифровка линий проводилась в соответствии с [10,11,18].

В табл. 5 видно, что при кластерном режиме работы, обусловленном низкой температурой ( $N = 12\,600$  molecules/cluster), по сравнению с газоструйным режимом работы ( $N = 3200$  molecules/cluster) рост интенсивности линий в среднем для ионов FV составляет 4.9 раз, FVI составляет 2.9 раз, FVII составляет 1.9 раз. Наблюдается существенное увеличение ин-

тенсивности эмиссионных линий ионов фтора с низкой степенью ионизации (FV, FVI).

В случае кластерного режима работы при повышенном давлении ( $N = 8600$  atoms/cluster) по сравнению с газоструйным режимом работы ( $N = 3200$  atoms/cluster) рост интенсивности линий в среднем для ионов FV составляет 2.7 раз, FVI составляет 2.3 раз, FVII составляет 2.1 раза. Наблюдается увеличение интенсивности эмиссионных линий ионов фтора с малой степенью ионизации.

Таким образом, мишени на основе кластерных струй трифторметана, полученные при охлаждении газа или при увеличении давления газа на входе в сопло, не эквивалентны.

## Выводы

В результате проведенных исследований лазерной плазмы на кластеризованных мишенях получены следующие результаты:

1. Измерены спектры инертных и молекулярных газов при различных способах кластеризации и различном размере кластеров. При использовании кластеризованных мишеней наблюдаемые эмиссионные спектры соответствуют эмиссионным спектрам газоструйных мишеней.

2. При кластеризации, обусловленной снижением температуры газа на входе в сопло, получен рост интенсивности излучения для всех газов. Увеличение интенсивности линий в среднем для ионов аргона составило 1.5 раза; для криптона 1.8 раза; для ксенона 2.5 раза; для углекислоты 1.5 раза; для азота 3 раза; для трифторметана 3 раза.

4. Мишени на основе кластерных струй, полученных при охлаждении газа или при увеличении давления газа на входе в сопло, не эквивалентны. Описание кластерных струй с помощью только среднего размера кластеров не полно. Необходимо учитывать локальные

**Таблица 5.** Относительные интенсивности некоторых линий трифторметана при различных размерах кластеров в струйной мишени

| Длина волны, Å | Ион    | Переход                                                                        | Интенсивность, а.е.                            |                                                  |                                                |
|----------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                |        |                                                                                | 300 К, 4 бар,<br><i>N</i> = 3200 atoms/cluster | 215 К, 4 бар,<br><i>N</i> = 12 600 atoms/cluster | 300 К, 6 бар,<br><i>N</i> = 8600 atoms/cluster |
| 85.8           | FVII   | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> –1s <sup>2</sup> 5 <i>d</i>                         | 235                                            | 420                                              | 800                                            |
| 86.4           | FVII   | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> –1s <sup>2</sup> 5 <i>s</i>                         | 200                                            | 440                                              | 840                                            |
| 95.7           | FVII   | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> –1s <sup>2</sup> 4 <i>d</i>                         | 970                                            | 1790                                             | 2940                                           |
| 108.9          | FVI    | 2s2 <i>p</i> –2s4 <i>d</i>                                                     | 460                                            | 940                                              | 1040                                           |
| 112.94         | FVII   | 1s <sup>2</sup> 2 <i>s</i> –1s <sup>2</sup> 3 <i>p</i>                         | 1975                                           | 3970                                             | 5120                                           |
| 122.1          | FVI    |                                                                                | 430                                            | 900                                              | 960                                            |
| 124.4          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2s2 <i>p</i> –1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> 3 <i>d</i>            | 470                                            | 1095                                             | 990                                            |
| 127.8          | FVII   | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> –1s <sup>2</sup> 3 <i>d</i>                         | 5880                                           | 9100                                             | 9030                                           |
| 132.5          | FVI/FV |                                                                                | 500                                            | 970                                              | 1010                                           |
| 134.8          | FVII   | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> –1s <sup>2</sup> 3 <i>s</i>                         | 1050                                           | 3050                                             | 2640                                           |
| 139.9          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2s2 <i>p</i> –1s <sup>2</sup> 2 <i>s</i> 3 <i>d</i>            | 2690                                           | 7280                                             | 6080                                           |
| 146.0          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> <sup>2</sup> –1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> 3 <i>d</i> | 800                                            | 3080                                             | 2020                                           |
| 147.0          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> <sup>2</sup> –1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> 3 <i>d</i> | 1830                                           | 6390                                             | 4255                                           |
| 148.7          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> <sup>2</sup> –1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> 3 <i>d</i> | 700                                            | 2660                                             | 1800                                           |
| 152.5          | FV     |                                                                                | 190                                            | 940                                              | 530                                            |
| 153.8          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2s2 <i>p</i> –1s <sup>2</sup> 2 <i>s</i> 3 <i>s</i>            | 530                                            | 1725                                             | 1140                                           |
| 156.2          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2s2 <i>p</i> –1s <sup>2</sup> 2 <i>s</i> 3 <i>d</i>            | 675                                            | 1995                                             | 1430                                           |
| 161.5          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> <sup>2</sup> –1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> 3 <i>s</i> | 290                                            | 870                                              | 810                                            |
| 163.1          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> <sup>2</sup> –1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> 3 <i>d</i> | 520                                            | 1340                                             | 1220                                           |
| 163.5          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> <sup>2</sup> –1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> 3 <i>d</i> | 1050                                           | 2340                                             | 2360                                           |
| 167.4          | FVI    | 1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> <sup>2</sup> –1s <sup>2</sup> 2 <i>p</i> 3 <i>s</i> | 570                                            | 1350                                             | 1130                                           |
| 180.0          | FVII   | 1s <sup>2</sup> 3 <i>p</i> –1s <sup>2</sup> 10 <i>d</i>                        | 320                                            | 770                                              | 790                                            |
| 188.5          | FVII   | 1s <sup>2</sup> 3 <i>d</i> –1s <sup>2</sup> 9 <i>p</i>                         | 220                                            | 480                                              | 460                                            |
| 194.8          | FVII   | 1s <sup>2</sup> 3 <i>d</i> –1s <sup>2</sup> 8 <i>p</i>                         | 590                                            | 1680                                             | 1550                                           |

концентрации газа и долю конденсата для изучения взаимодействия кластерных струй и лазерного излучения накачки.

5. Для увеличения интенсивности излучения струйных мишеней в первую очередь необходимо увеличивать давление газа на входе в сопло. Кластеризация мишени за счет понижения температуры газа менее эффективна, чем увеличение давления на входе в сопло и должна использоваться при невозможности увеличения давления газа на входе в сопло.

Финансирование работы

Работа была выполнена в рамках Государственного задания FFUF-2024-0022 и гранта РНФ № 21-72-30029-П

в части разработки и изготовления системы детектирования МР и ЭУФ излучения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] O.F. Hagen. Surface Science, **106** (1–3), 101 (1981).

[2] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало, Н.Н. Салашенко, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, А.Е. Пестов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **9**, 83 (2019).

- [3] А.Н. Нечай, В.Е. Гусева, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **95** (7), 1289 (2025).
- [4] И.П. Суздалев. *Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов* (Комкнига, М., 2006)
- [5] O.F. Hagena, W. Obert. *J. Chem. Phys.*, **56** (5), 1793 (1972).
- [6] R.A. Smith, T. Ditmire, J.W.G. Tisch. *Rev. Sci. Instrum.*, **69** (11), 3798 (1998). DOI: 10.1063/1.1149181
- [7] А.Г. Данильченко, С.И. Коваленко, В.Н. Самоваров. *Письма в ЖТФ*, **34** (23), 87 (2008).
- [8] А.Е. Иешкин, А.Б. Толстогузов, Н.Г. Коробейщиков, В.О. Пеленович, В.С. Черныш. *УФН*, **192** (7), 722 (2022). DOI: 10.3367/UfNr.2021.06.038994
- [9] Т. М. Зимкина, В.А. Фомичев. *Ультрамягкая рентгеновская спектроскопия* (Ф.В., 1971), 132 с.
- [10] *NIST Atomic Spectra Database*, (Gaithersburg, 2009–2019) <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>.
- [11] R.L. Kelly, L.P. Palumbo. Naval Research Laboratory, 7599 (1973).
- [12] E.B. Saloman. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **39**, 033101 (2010). DOI: 10.1063/1.3337661
- [13] B.C. Fawcett, A. Ridgeley, G.E. Bromage. *Phys. Scripta*, **18** (5), 315 (1978).
- [14] B.C. Fawcett, A.H. Gabriel, B.B. Jones, N.J. Peacock. *Proceed. Phys. Society*, **84** (2), 257 (1964).
- [15] E.B. Saloman. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **36** (1), 215 (2007). DOI: 10.1063/1.2360986
- [16] S. Kranzusch, K. Mann. *Optics Commun.*, **200** (1–6), 223 (2001). DOI: 10.1016/S0030-4018(01)01639-X
- [17] K. Bergmann, G. Schriever, O. Rosier, M. Müller, W. Neff, R. Lebert. *Appl. Optics*, **38** (25), 5413 (1999). DOI: 10.1364/AO.38.005413
- [18] B. Edlén. *Zeitschrift für Physik*, **94** (1), 47 (1935).