

01

Эмиссионные спектры молекулярных газов CHF_3 , CCl_2F_2 , SF_6 в диапазоне 3–20 нм при импульсном лазерном возбуждении с использованием различных газовых струй в качестве мишеней

© В.Е. Гусева¹, А.Н. Нечай²✉, А.А. Перекалов², Н.Н. Салащенко², Н.И. Чхало²

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

² Институт физики микроструктур РАН, 603087 Нижний Новгород, Россия

✉ e-mail: nechay@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 28.09.2021 г.

В окончательной редакции 21.10.2021 г.

Принята к публикации 01.11.2021 г.

Исследованы эмиссионные спектры молекулярных газов CHF_3 , CCl_2F_2 , SF_6 при возбуждении импульсным лазерным излучением. Использовался лазер Nd:YAG, $\lambda = 1064$ нм, $\tau = 5$ нс, $E_{\text{pulse}} = 0.8$ Дж. Исследован спектральный диапазон 3–20 нм. Для формирования атомарно-кластерного пучка использовались капилляр диаметром $d = 500$ мкм и сверхзвуковые конические сопла с $d_{\text{cr}} = 145$ мкм, $2\alpha = 12^\circ$, $L = 5$ мм и $d_{\text{cr}} = 450$ мкм, $2\alpha = 11^\circ$, $L = 5$ мм. Получены эмиссионные спектры для различных газовых мишеней, проведена расшифровка полученных спектров и определены ионы, излучающие в данном спектральном диапазоне. Проведено сравнение интенсивностей линий при использовании различных систем формирования мишеней.

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

DOI: 10.21883/OS.2022.02.51986.2771-21

Введение

В настоящее время активно развиваются исследования в области коротковолнового, в частности, мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения (МР и ЭУФ). Ранее исследования в МР и ЭУФ диапазонах с применением многослойной оптики были связаны с диагностикой лабораторной и космической плазмы [1], проблемами коротковолновой проекционной литографии [2]. В настоящее время на первый план выходят лабораторные приложения с использованием техники МР и ЭУФ диапазонов. В частности, это исследования, связанные с изучением структуры и упорядочения нанобъектов как природного, так и искусственного происхождения. В данном направлении можно выделить рентгеновскую микроскопию и исследования структуры многослойных нанопленок [3,4].

В лабораторных целях наибольшее применение нашли плазменные источники, в том числе такие, в которых плазма создается за счет импульсного лазерного излучения (лазерно-плазменные источники (ЛПИ)) [5–7]. В качестве мишеней для импульсного возбуждения используются газовые струи [5,8], твердотельные [9,10] и замороженные газовые мишени [11,12].

Ранее нами проводились исследования эмиссионных свойств инертных газов при использовании различных систем формирования газовых мишеней [13–15]. В данной работе эти исследования продолжены, исследова-

лись эмиссионные свойства молекулярных газов, включающих фтор, хлор и серу.

Исследовательская установка

Для исследований использовалась установка, подробно описанная в работе [16]. Работа установки осуществляется следующим образом. Исследуемый газ поступает в коническое сверхзвуковое сопло, при истечении из которого в вакуумный объем формируется газовая мишень. Откачка проводится криоконденсационным и криоадсорбционными насосами. Излучение лазера направляется на короткофокусную линзу, в фокусе которой происходит пробой и образование плазмы. Полихроматическое МР и ЭУФ излучение плазмы, проходя через свободновисящий рентгеновский фильтр, направляется на входное зеркало спектрометра-монохроматора РСМ-500. Затем монохроматическое МР и ЭУФ излучение детектируется импульсным детектором.

Для возбуждения газовой струи использовался лазер NL300 Series Nd:YAG Laser со следующими параметрами: длина волны 1064 нм, энергия импульса лазера 0.8 Дж, длительность импульса 5.2 нс, частота до 10 Гц. Лазерное излучение фокусируется на газовую мишень с помощью линзы с фокусным расстоянием 45 мм. Расчетный диаметр фокусного пятна составляет 66 мкм. Используется свободновисящий фильтр Mo/ZrSi₂ с толщинами слоев в бислое 1.5/2.5 нм, число бислоев 12.

Также свободностоящий фильтр является и защитой от частиц различной природы, образующихся в процессе работы источника МР и ЭУФ излучения.

Для регистрации эмиссионных спектров использовался спектрометр-монокроматор РСМ-500. Радиус кривизны входного зеркала составляет 4 м, решетки 3 м, число штрихов 600 lines/mm. Использованные сферические зеркала и решетки были изготовлены из стекла К-8 с нанесением золотого покрытия. Данные зеркала и решетки поставлялись в комплекте с прибором РСМ-500. Спектральное разрешение прибора, измеренное на L -краях поглощения кремниевое и алюминиевое и K -крае бериллиевого свободностоящих фильтров, а также по полуширине нулевого порядка, составляло 0.04 nm. Для используемых решетки и зеркала исследуемый диапазон длин волн составлял 3–20 nm.

Для формирования газоструйных мишеней использовались следующие сопла: малое сверхзвуковое коническое сопло с $d_{cr} = 145 \mu\text{m}$, $2\alpha = 12^\circ$, $L = 5 \text{ mm}$, большое сверхзвуковое коническое сопло с $d_{cr} = 450 \mu\text{m}$, $2\alpha = 11^\circ$, $L = 5 \text{ mm}$ и капилляр диаметром $d = 500 \mu\text{m}$. Данные системы формирования газовой струи имеют следующие особенности.

Конусное сверхзвуковое сопло малого критического сечения ($d_{cr} = 145 \mu\text{m}$) формирует направленную сверхзвуковую струю газа. При подаче охлажденного газа либо газа под большим давлением формируется узконаправленный кластерный пучок с большой долей конденсата в нем. Данные сопла могут использоваться при различных температурах и давлениях подаваемого газа при наличии откачных систем приемлемой мощности ($\sim 1000 \text{ l/s}$). Как правило, данные сопла используются для формирования кластерных пучков при постоянном режиме истечения газа и удобны при использовании лазерных систем с высокой частотой повторения импульсов.

Конусное сверхзвуковое сопло большого критического сечения ($d_{cr} = 450 \mu\text{m}$) также формирует направленную сверхзвуковую струю газа. Но большое критическое сечение приводит к большим расходам газа, что при откачных системах приемлемой мощности ($\sim 1000 \text{ l/s}$) требует использования импульсного клапана. В свою очередь использование быстродействующих импульсных клапанов ограничивает диапазоны давлений, а особенно — диапазоны температур газов на входе в сопло, и не позволяет получить кластерные пучки с большим размером кластеров. Также использование импульсных клапанов приводит к необходимости применения лазерных систем с невысокой $\sim 10 \text{ Hz}$ частотой повторения импульсов.

Капилляр большого сечения $d = 500 \mu\text{m}$ характеризуется звуковым режимом истечения газа и формирует газовое облако с практически изотропным разлетом газа во все стороны от среза капилляра. Используемый большой диаметр капилляра приводит к большим расходам газа, что при откачных системах приемлемой мощности ($\sim 1000 \text{ l/s}$) также требует использования импульсного

клапана. Вместе с тем данная система формирования газоструйной мишени самая простая и надежная.

Газовые струи, формируемые в процессе истечения из конических сопел в вакуум, в общем случае имеют сложную пространственную структуру, определяемую параметрами газа на входе в сопло и геометрическими параметрами сопел. Особенно сложны задачи описания атомно-кластерных струй, формирующихся при истечении конденсирующегося газа из сверхзвуковых сопел в вакуум. Газодинамический расчет структуры подобной атомно-кластерной мишени весьма трудоемок и является отдельной задачей. В нашей работе на основании [5] принято, что концентрация частиц в газовых струях составляет $\sim 10^{19} \text{ mol/cm}^3$.

Результаты

Исследования газоструйных мишеней на основе CHF_3

Трифторметан CHF_3 — тяжелый молекулярный газ с малой реакционной способностью в условиях эксперимента, характеризующийся линейчатым эмиссионным спектром с высокоинтенсивными линиями в МР и ЭУФ областях спектра. Простота откачки, удовлетворительные термодинамические свойства и доступность делают CHF_3 одной из наиболее перспективных газовых мишеней. Фтор в качестве мишеней для ЛПИ МР и ЭУФ излучения ранее исследовался в [17,18].

На рис. 1 приведены эмиссионные спектры CHF_3 , измеренные при использовании капилляра и конусного сопла критическим сечением $450 \mu\text{m}$ при следующих параметрах газа: давление газа на входе в сопло 3 bar, температура газа 300 K.

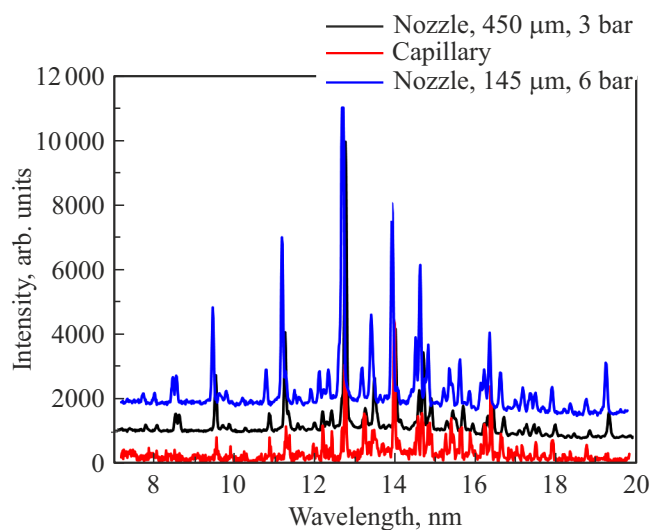


Рис. 1. Эмиссионные спектры мишеней из CHF_3 при использовании в качестве источника струи капилляра, конусного сопла с $d_{cr} = 450 \mu\text{m}$ и конусного сопла с $d_{cr} = 145 \mu\text{m}$.

Исследованный спектральный диапазон составил 3–20 nm. Интенсивность излучения приведена в относительных единицах. Виден ряд интенсивных линий в диапазоне 8–20 nm, сформированных переходами на ионах F V, F VI, F VII. Линии ионов углерода в исследованном спектральном диапазоне не наблюдаются. Из рисунка видно, что использование сверхзвукового сопла с $d_{\text{ср}} = 450 \mu\text{m}$ приводит к существенному перераспределению интенсивностей эмиссионных линий фтора с ростом интенсивностей линий при высоких степенях ионизации (F VII). Для коротких длин волн наблюдается увеличение шумовой составляющей, возникающей вследствие особенностей используемого спектрального прибора.

Расшифровка наблюдаемых линий проводилась в соответствии с [19–21] при сравнении спектров, измеренных на различных мишенях и приведена в табл. 1. Ряд линий наблюдался в соответствии с [21], но соответствующие им переходы установить не удалось.

Относительные интенсивности линий для спектров, измеренных при использовании газовых мишеней CHF_3 , формируемых при истечении из различных сопел, приведены в табл. 2. Интенсивности линий нормировались на линию 12.78 nm (F VII), что позволило нивелировать изменение концентраций ионов фтора в зоне разряда из-за различной газодинамики струйных мишеней. В данной таблице концентрация частиц в зоне лазерной искры по косвенным признакам увеличивается в ряду капилляр–сопло 145 μm (3 bar)–сопло 450 μm (3 bar)–сопло 145 μm (6 bar). Точный расчет концентраций не проводился, так как является весьма сложной задачей газодинамики, связанной с конденсацией в сверхзвуковых струях газа.

Из данных, приведенных в табл. 2, можно сделать следующие выводы.

При увеличении концентрации частиц в зоне разряда наблюдается относительный рост линий, соответствующих ионам высоких степеней ионизации (F VII), что соответствует росту температуры плазмы. Изменение относительных интенсивностей линий достаточно велико, до 8 раз. Вместе с тем наблюдаемое изменение температуры плазмы не приводит к появлению ионов фтора с другими степенями ионизации. Это можно объяснить тем, что для формирования ионов F VIII недостаточно мощности используемой лазерной системы.

Наиболее высокая температура плазмы наблюдается при использовании сопла с критическим сечением 145 μm при давлении 6 bar. Высокие концентрации частиц в зоне разряда и высокие температуры плазмы в этом случае можно объяснить высокой температурой конденсации CHF_3 и соответственно образованием конденсата в струе при истечении газа в вакуумный объем.

Отдельно проводился эксперимент по исследованию охлажденных струй CHF_3 . Было получено, что эмиссионные спектры для сопла 145 μm при охлаждении газа на входе в сопло ($T = 216 \text{ K}$, $p = 3 \text{ bar}$) практически идентичны эмиссионным спектрам, получаемым

Таблица 1. Эмиссионные линии ионов фтора в спектре мишени CHF_3

Длина волны, nm	Интенсивность, rel. units	Ион	Переход
7.83	180	F VII	$1s^2 2s - 1s^2 5p$
8.12	180	F VII	$1s^2 2p - 1s^2 6d$
8.58	510	F VII	$1s^2 2p - 1s^2 5d$
8.64	490	F VII	$1s^2 2s - 1s^2 4p$
9.57	1700	F VII	$1s^2 2p - 1s^2 4d$
9.73	170	F VII	$1s^2 2p - 1s^2 4s$
9.91	200	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2s 5d$ [21]
10.89	550	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2s 4d$
11.294	3050	F VII	$1s^2 2s - 1s^2 3p$
11.298	600	F VII	$1s^2 2s - 1s^2 3p$
11.47	230	F VI	$1s^2 2s^2 - 1s^2 2p 3s$
11.6	130	F VI	$1s^2 2p^2 - 1s^2 2p 4d$ [21]
12.01	250	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2p 3p$ [21]
12.21	600	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2p 3p$ [21]
12.31	220	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2p 3p$
12.44	560	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2p 3d$
12.69	1000	F VI	$1s^2 2s^2 - 1s^2 2p 3p$
12.78	8900	F VII	$1s^2 2p - 1s^2 3d$
13.25	650	F V	$1s^2 2s 2p^2 - 1s^2 2s 2p 4d$ [21]
13.48	1590	F VII	$1s^2 2p - 1s^2 3s$
13.70	100	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2s 3d$
13.99	3100	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2s 3d$
14.59	1200	F VI	$1s^2 2p^2 - 1s^2 2p 3d$
14.68	2350	F VI	$1s^2 2p^2 - 1s^2 2p 3d$
14.87	900	F VI	$1s^2 2p^2 - 1s^2 2p 3d$
15.25	300	F V	$1s^2 2s^2 2p - 1s^2 2s 2p 3p$ [21]
15.38	750	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2s 3s$
15.45	300	F VI	$1s^2 2p^2 - 1s^2 2p 3d$
15.62	750	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2s 3d$
15.85	310	F V	$1s^2 2s 2p^2 - 1s^2 2s 2p 3d$
16.15	310	F VI	$1s^2 2p^2 - 1s^2 2p 3s$
16.31	550	F VI	$1s^2 2p^2 - 1s^2 2p 3d$
16.35	980	F VI	$1s^2 2p^2 - 1s^2 2p 3s$
16.74	580	F VI	$1s^2 2s^2 2p - 1s^2 2s^2 3d$
17.12	150	F V	$1s^2 2p^3 - 1s^2 2p^2 3d$
17.31	350	F VI	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2s 3s$
17.5	350	F VII	$1s^2 3s - 1s^2 9p$
17.59	170	F V/F VI	—
17.86	400	F V	$1s^2 2p^3 - 1s^2 2p^2 3d$
18.48	160	F VII	$1s^2 3p - 1s^2 9d$
18.83	250	F VI	$1s^2 2p^2 - 1s^2 2p 3s$
19.48	800	F VII	$1s^2 3d - 1s^2 8p$

при повышенном давлении ($T = 300 \text{ K}$, $p = 6 \text{ bar}$), что свидетельствует о развитом процессе конденсации в обоих случаях.

Исследования газоструйных мишеней на основе SF_6

Гексафторид серы SF_6 — тяжелый молекулярный газ с малой реакционной способностью в условиях экспе-

Таблица 2. Относительные интенсивности линий ионов фтора в спектре мишени CHF_3 при использовании различных систем формирования мишеней

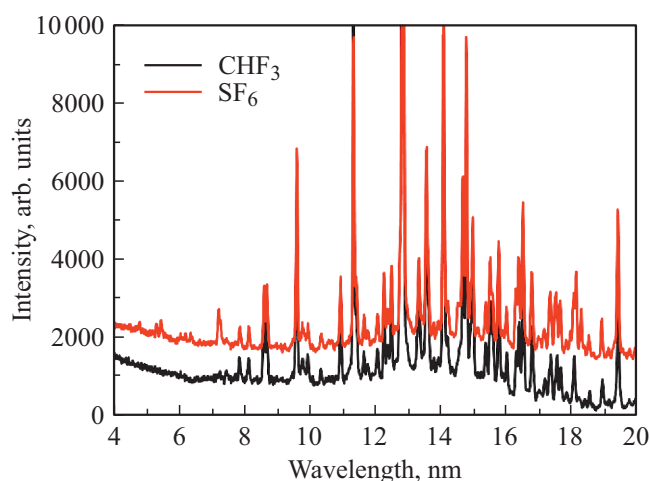
Длина волны, nm	Ион	Интенсивность для различных мишеней			
		Капилляр 500 μm , 3 bar	Сопло 450 μm , 3 bar	Сопло 145 μm , 3 bar	Сопло 145 μm , 6 bar
9.57	F VII	0.26	0.19	0.17	0.33
10.89	F VI	0.25	0.06	0.08	0.11
11.294	F VII	0.36	0.34	0.34	0.57
12.21	F VI	0.36	0.07	0.07	0.11
12.44	F VI	0.31	0.07	0.08	0.11
12.78	F VII	1.00	1.00	1.00	1.00
13.25	F V	0.46	0.08	0.08	0.11
13.48	F VII	0.28	0.18	0.18	0.29
13.99	F VI	1.46	0.35	0.46	0.67
14.6	F VI	0.43	0.14	0.14	0.22
14.7	F VI	0.46	0.27	0.31	0.47
14.87	F VI	0.36	0.11	0.12	0.20
15.25	F V	0.24	0.03	0.03	0.06
15.38	F VI	0.41	0.07	0.09	0.13
15.62	F VI	0.31	0.09	0.11	0.16
16.15	F VI	0.15	0.04	0.05	0.09
16.31	F VI	0.36	0.06	0.09	0.14
16.35	F VI	0.77	0.10	0.18	0.26
16.74	F VI	0.26	0.06	0.10	0.12
17.86	F V	0.22	0.04	0.06	0.09
18.83	F VI	0.17	0.02	0.04	0.05
19.48	F VII	0.08	0.09	0.10	0.17

римента, характеризующийся линейчатым эмиссионным спектром с высокоинтенсивными линиями в МР и ЭУФ областях спектра. Простота откачки, удовлетворительные термодинамические свойства и доступность также делают SF_6 весьма перспективной газовой мишенью. В качестве мишеней для ЛПИ МР и ЭУФ излучения данный газ исследовался в [22,23].

На рис. 2 приведены эмиссионные спектры CHF_3 и SF_6 , измеренные при использовании конусного сопла критическим сечением 450 μm при следующих параметрах газа: давление на входе в сопло 3 bar, температура газа 300 К.

Исследованный спектральный диапазон составил 3–20 nm. Интенсивность излучения приведена в относительных единицах. Виден ряд интенсивных линий в диапазоне 8–20 nm, сформированных переходами на ионах F V, F VI, F VII. На данном фоне в диапазоне 4–7 nm и ~ 18 nm присутствует ряд линий ионов серы S VII и S VIII. Линии ионов углерода отсутствуют. Для коротких длин волн наблюдается увеличение шумовой составляющей, возникающей вследствие особенностей используемого спектрального прибора.

Из сравнения спектров CHF_3 и SF_6 был выделен ряд линий, которые соответствуют ионам серы. Стоит особо отметить, что в диапазоне 11–17 nm возможно наличие интенсивных линий ионов серы, которые не были выделены из-за наложения на линии ионов

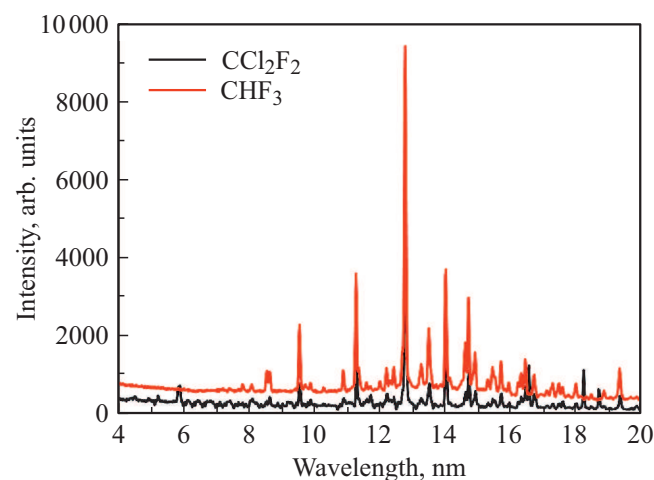
**Рис. 2.** Эмиссионные спектры мишеней из SF_6 и CHF_3 при использовании в качестве источника струи конусного сопла с $d_{cr} = 450 \mu\text{m}$.

фтора. Расшифровка наблюдаемых линий проводилась в соответствии с [19,20,24] и приведена в табл. 3. Расшифровка столкнулась с рядом трудностей, так как эмиссионные спектры серы в МР и ЭУФ диапазоне сравнительно мало изучены. Линии 15, 17.96, 18.1 nm, обладающие сравнительно большой интенсивностью, не идентифицированы.

Таблица 3. Эмиссионные линии ионов серы при возбуждении мишени SF_6

Длина волны, nm	Интенсивность, rel. units	Ион	Переход
4.64	200	S VIII	$2s^2 2p^5 - 2s^2 2p^4 4s$
5.14	300	S VIII	$2s^2 2p^5 - 2s^2 2p^4 3d$
5.30	400	S VIII	$2s^2 2p^5 - 2s^2 2p^4 3d$
6.18	200	S VIII	$2s^2 2p^5 - 2s^2 2p^4 3s$
6.33	300	S VIII	$2s^2 2p^5 - 2s^2 2p^4 3s$
7.20	900	S VII	$2s^2 2p^6 - 2s^2 2p^5 3s$
7.26	600	S VII	$2s^2 2p^6 - 2s^2 2p^5 3s$
15.16	400	*	*
18.16	2100	*	*
18.31	1200	*	*

*Примечание.** Излучающие ионы и переходы, соответствующие данным эмиссионным линиям, установить не удалось.

**Рис. 3.** Эмиссионные спектры мишеней из CCl_2F_2 и CHF_3 при использовании в качестве источника струи конусного сопла с $d_{cr} = 450 \mu\text{m}$.

Исследования газоструйных мишеней на основе CCl_2F_2

Дихлордифторметан CCl_2F_2 — тяжелый молекулярный газ с малой реакционной способностью в условиях эксперимента, характеризующийся линейчатым эмиссионным спектром с высокоинтенсивными линиями в МР и ЭУФ области спектра. Простота откачки, удовлетворительные термодинамические свойства и доступность делают CCl_2F_2 одной из интересных газовых мишеней. В качестве мишеней для ЛПИ МР и ЭУФ излучения данный газ, насколько известно авторам, не исследовался.

На рис. 3 приведены эмиссионные спектры CHF_3 и CCl_2F_2 , измеренные при использовании конусного сопла критическим сечением $450 \mu\text{m}$ при следующих параметрах газа: давление на входе в сопло 3 бар, температура газа 300 К.

Таблица 4. Эмиссионные линии ионов хлора

Длина волны, nm	Интенсивность, rel. units	Ион	Переход
4.46	100	Cl VIII	$2p^6 - 2p^5 4s$
4.95	60	Cl VIII	$2p^6 - 2p^5 3d$
5.29	140	Cl VIII	$2p^6 - 2p^5 3d$
5.87	400	Cl VIII	$2p^6 - 2p^5 3s$
16.57	1100	Cl VIII	$2p^6 3s - 2p^5 4p$
18.25	1000	Cl VIII	$2p^6 3p - 2p^5 4d$
18.64	500	Cl VIII	$2p^6 3p - 2p^5 4d$

Исследованный спектральный диапазон составил 3–20 nm. Интенсивность излучения приведена в относительных единицах. Виден ряд интенсивных линий в диапазоне 8–20 nm, сформированных переходами на ионах F V, F VI, F VII. На данном фоне в диапазоне 6–7 nm и 16–19 nm присутствует ряд линий ионов хлора. Линии ионов углерода отсутствуют. Для коротких длин волн наблюдается увеличение шумовой составляющей, возникающей вследствие особенностей используемого спектрального прибора.

Из сравнения спектров CHF_3 и CCl_2F_2 был выделен ряд линий, которые соответствуют линиям хлора Cl VIII. Стоит особо отметить, что в диапазоне 11–17 nm возможно наличие интенсивных линий ионов хлора, которые не были выделены из-за наложения на линии ионов фтора. Расшифровка наблюдаемых линий проводилась в соответствии с [19,20,25] и приведена в табл. 4.

Интересно проследить относительные изменения интенсивности линий фтора при использовании в качестве мишени трех различных газов: CHF_3 , CCl_2F_2 , SF_6 . Данные результаты представлены в табл. 5. В таблице все интенсивности линий нормированы на интенсивность линии 13.99 nm (F VII), что позволяет учесть разную концентрацию ионов фтора в зоне разряда. Из представленной таблицы можно сделать следующие выводы.

При переходе от CHF_3 к CCl_2F_2 и SF_6 не наблюдается выраженного роста интенсивности линий, соответствующих ионам в высоких степенях ионизации (F VII).

Для одних и тех же линий при переходе от CHF_3 к CCl_2F_2 наблюдаются изменения относительной интенсивности эмиссионных линий. Данные изменения невелики, до 0.3 раз. В случае перехода от CHF_3 к SF_6 изменения относительной интенсивности эмиссионных линий более существенны — до 2 раз. Данные изменения говорят о том, что параметры лазерной плазмы, полученной на мишенях CHF_3 , CCl_2F_2 и SF_6 , весьма близки между собой.

Выводы

В данной работе исследованы эмиссионные спектры лазерно-плазменного источника с газоструйными мишенями из различных молекулярных газов. Данные

Таблица 5. Относительные интенсивности линий ионов фтора при использовании различных фторсодержащих соединений в качестве мишеней

Длина волны, nm	Ион	Интенсивность для различных мишеней		
		CHF ₃ Сопло 450 μm, 3 bar	CCl ₂ F ₂ Сопло 450 μm, 3 bar	SF ₆ Сопло 450 μm, 3 bar
9.57	F VII	0.60	0.45	0.66
11.294	F VII	0.97	0.81	0.95
12.21	F VI	0.30	0.31	0.34
12.44	F VI	0.30	0.22	0.36
12.78	F VII	2.61	2.46	–
13.48	F VII	0.58	0.45	0.67
13.99	F VI	1.00	1.00	1.00
14.59	F VI	0.47	0.33	0.59
14.68	F VI	0.80	0.63	0.95
14.87	F VI	0.40	0.34	0.49
15.38	F VI	0.30	0.24	0.38
15.62	F VI	0.34	0.31	0.42
16.35	F VI	0.38	0.41	0.53
19.48	F VII	0.29	0.29	0.50

мишени формировались с помощью различных сопел при различных давлениях газа на входе в сопло.

1) Получены эмиссионные спектры излучения ЛПИ при использовании различных газовых мишеней с различными фторсодержащими молекулярными газами. Проведена расшифровка полученных спектров и определены ионы, излучающие в данном спектральном диапазоне. Линии фтора в спектрах газовых мишеней различной структуры при различных давлениях газа на входе в сопло не претерпевают больших изменений. Максимальная степень ионизации, достигаемая в нашем эксперименте, составила F VII. Что касается серы и хлора, регистрируемые эмиссионные спектры характеризуются малым числом линий, отвечающих этим элементам, и соответственно малоинформативны. Максимальные степени ионизации, достигаемые в нашем эксперименте, составили S VIII, Cl VIII.

2) Определены изменения эмиссионных спектров при использовании различных сопел, формирующих струи различной структуры при различных давлениях газов на входе в сопла. Обнаружено, что при росте концентрации частиц в зоне образования искры наблюдается рост интенсивности эмиссионных линий, соответствующих ионам высоких степеней ионизации, и соответственно рост температуры плазмы. Вместе с тем максимальная степень ионизации остается прежней. Также при росте концентраций газа в зоне разряда происходит перераспределение интенсивностей линий для излучающего иона одной степени ионизации. Таким образом, используя газовые мишени различной структуры и варьируя давление на входе, можно изменять интенсивность отдельных эмиссионных линий в широких пределах. Для качественного изменения спектров необходим резкий рост числа частиц в зоне разряда, который возможен

как за счет увеличения давлений на входе в сопло, так и за счет увеличения критического сечения сопел. Для повышения температуры плазмы и интенсивности излучения, при минимизации требований к системе откачки оптимально использование сопел малого сечения при большом давлении газа на входе в сопло [26]. Подобный результат также ожидается при переходе к жидкостным мишеням [27].

3) При использовании в качестве мишеней различных фторсодержащих газов, в частности, при переходе от CHF₃ к CCl₂F₂, не наблюдается существенных изменений относительных интенсивностей линий, соответствующих ионам фтора. При переходе от CHF₃ к SF₆ не наблюдается сильных изменений вида эмиссионного спектра, формируемого ионами фтора, но наблюдается относительный рост интенсивности отдельных эмиссионных линий. Таким образом, при использовании различных фторсодержащих газовых мишеней имеется возможность существенно изменить интенсивности отдельных линий, формируемых ионами фтора.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Госзадания № 0030-2021-0022 и при поддержке гранта РФФИ 20-02-00364.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.В. Кузин, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко. Известия РАН. Сер. физ., **75** (1), 88 (2011).

- [2] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. *AIP Adv.*, **3** (8), 082130 (2013).
- [3] М.М. Барышева, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. *УФН*, **182** (7), 727 (2012).
- [4] И.В. Мальшев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **1**, 3 (2019).
- [5] M. Suzuki, H. Daido, I.W. Choi, W. Yu, K. Nagai, T. Norimatsu, H. Fiedorowicz. *Phys. Plasm.*, **10** (1), 227 (2003).
- [6] M.B. Smirnov, W. Becker. *Phys. Rev. A*, **74** (1), 013201 (2006).
- [7] N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, S.V. Golubev, A.Ya. Lopatin, A.N. Nechay, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.N. Tsybin, A.V. Vodopyanov, S. Yulin. *Appl. Phys. Lett.*, **112** (22), 221101 (2018).
- [8] H. Fiedorowicz, A. Bartnik, M. Szczurek, H. Daido, N. Sakaya, V. Kmetik, T. Wilhein. *Opt. Commun.*, **163** (1–3), 103 (1999).
- [9] Y. Tao, M.S. Tillack, K.L. Sequoia, R.A. Burdt, S. Yuspeh, F. Najmabadi. *Appl. Phys. Lett.*, **92** (25), 251501 (2008).
- [10] T. Higashiguchi, T. Otsuka, N. Yugami, W. Jiang, A. Endo, B. Li, G. O'Sullivan. *Appl. Phys. Lett.*, **99** (19), 191502 (2011).
- [11] K. Fukugaki, S. Amano, A. Shimoura, T. Inoue, S. Miyamoto, T. Mochizuki. *Rev. Sci. Instr.*, **77** (6), 063114 (2006).
- [12] B.A. Hansson, O. Hemberg, H.M. Hertz, M. Berglund, H.J. Choi, B. Jacobsson, M. Wilner. *Rev. Sci. Instr.*, **75** (6), 2122 (2004).
- [13] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало. *Опт. и спектр.*, **129** (2), 146 (2021).
- [14] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало. *Опт. и спектр.*, **129** (3), 266 (2021).
- [15] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко. *Опт. и спектр.*, **129** (6), 755 (2021).
- [16] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, А.Е. Пестов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **9**, 83 (2019).
- [17] B. Abel, J. Assmann, M. Faubel, K. Gäbel, S. Kranzusch, E. Lugovoj, C. Peth. *J. Appl. Phys.*, **95** (12), 7619 (2004).
- [18] D.J. Pegg, P.M. Griffin, H.H. Haselton, R. Laubert, J.R. Mowat, R.S. Thoe, I.A. Sellin. *Phys. Rev. A*, **10** (3), 745 (1974).
- [19] R.L. Kelly, L.J. Palumbo. *Atomic and ionic emission lines below 2000 angstroms-hydrogen through krypton* (Naval Research Lab, Washington DC, 1973).
- [20] *NIST Atomic Spectra Database*, Gaithersburg, 2009–2019. <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>
- [21] B. Edlén. *Z. Phys.*, **94** (1–2), 47 (1935).
- [22] R.E. LaVilla. *J. Chem. Phys.*, **57** (2), 899 (1972).
- [23] H. Fiedorowicz, A. Bartnik, Z. Patron, P. Parys. *Laser and Particle Beams*, **12** (3), 471 (1994).
- [24] L.I. Podobedova, D.E. Kelleher, W.L. Wiese. *J. Phys. and Chem. Ref. Data*, **38** (2), 171 (2009).
- [25] H.G. Berry, J. Desesquelles, K.T. Cheng, R.M. Schectman. *Phys. Rev. A*, **18** (2), 546 (1978).
- [26] M. Müller, T. Mey, J. Niemeyer, M. Lorenz, K. Mann. *AIP Conf. Proc.*, **1764** (1), 030003 (2016).
- [27] B.A.M. Hansson, H.M. Hertz. *J. Phys. D*, **37** (23), 3233 (2004).