

01 Эмиссионные спектры жидкоструйных мишеней гексана C_6H_{14} , дихлорметана CH_2Cl_2 , бромистого метилена CH_3Br в диапазоне 4–20 нм при импульсном лазерном возбуждении

© В.Е. Гусева¹, А.Н. Нечай^{2,¶}, 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 10.12.2021 г.

В окончательной редакции 28.02.2022 г.

Принята к публикации 01.03.2022 г.

Исследованы эмиссионные спектры жидких гексана C_6H_{14} , дихлорметана CH_2Cl_2 , бромистого метилена CH_3Br в диапазоне 4–20 нм при возбуждении импульсным лазерным излучением. Использовался лазер Nd:YAG, $\lambda = 1064$ нм, $\tau = 5.2$ нс, $E_{\text{pulse}} = 0.8$ Дж. Для формирования жидкостно-капельной струи использовалась форсунка с отверстием диаметром 225 мкм, работающая в импульсном режиме. Получены эмиссионные спектры данных жидкоструйных мишеней, проведена расшифровка полученных спектров и определены ионы, излучающие в данном спектральном диапазоне.

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

DOI: 10.21883/OS.2022.07.52717.3022-22

Введение

Ранее нами исследовались эмиссионные свойства газоструйных источников экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) и мягкого рентгеновского (МР) излучения при возбуждении импульсным лазерным излучением [1–3]. Данные источники излучения при всем их удобстве характеризуются малыми плотностями вещества в зоне образования лазерной искры. Также для газоструйных лазерно-плазменных источников излучения (ЛПИ) ряд химических элементов затруднительно ввести в реакционный объем, так как необходимо использовать газообразные соединения. Для решения проблемы была разработана оригинальная система ввода исследуемых веществ в реакционный объем в виде импульсной жидкостной (капельной) струи. Это позволило увеличить плотность вещества в зоне образования лазерной искры, расширить круг изучаемых химических элементов и значительно снизить нагрузку на откачную систему. В данной работе исследовались жидкостные струи гексана C_6H_{14} , дихлорметана CH_2Cl_2 , бромистого метилена CH_3Br .

Исследовательская установка

Для исследований использовалась установка, подробно описанная в [4]. Работа установки осуществляется следующим образом. Исследуемая жидкость поступает в форсунку Bosch 0 280 158 017, установленную непосредственно в вакуумном объеме. На торце форсунки

расположены четыре отверстия диаметром 225 мкм, три из которых были запаяны, а эксплуатировалось только четвертое. Откачка данной системы значительно упрощена по сравнению с откачкой газоструйного источника излучения и может проводиться только криоконденсационным насосом, охлаждаемым жидким азотом. Излучение лазера направляется на короткофокусную линзу, в фокусе которой располагается факел распыляемой жидкости. В факеле жидкости происходит лазерный пробой и образование плазмы. Полихроматическое МР и ЭУФ излучение плазмы проходит через спектрометр-монокроматор РСМ-500 и 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 следования импульсов 10 Гц. Лазерное излучение фокусируется на жидкостную мишень с помощью линзы с фокусным расстоянием 45 мм. Расчетный диаметр фокусного пятна составляет 66 мкм. На входе в РСМ-500 установлен свободностоящий фильтр Mo/ZrSi₂ с толщинами слоев в би-слое 1.5/2.5 нм, число би-слоев 12. Свободностоящий фильтр подавляет видимое и ВУФ излучение плазмы и является защитой от частиц различной природы, образующихся в процессе работы источника МР и ЭУФ излучения.

При проведении измерений на РСМ-500 нами использовались сферическое зеркало ($R = 4$ м) и решетка ($R = 3$ м, 600 lines/mm), изготовленные из стекла К8 с

золотым покрытием. Исследуемый диапазон длин волн составлял 4–20 nm. Спектральное разрешение прибора, измеренное на L-краях поглощения Si и Al и K-крае Be свободновисящих фильтров, а также по полуширине нулевого порядка, составляло 0.04 nm.

Капельно-жидкостные струи, формируемые в процессе истечения из форсунки в вакуум, в общем случае имеют сложную пространственную структуру, определяемую термодинамическими свойствами и параметрами жидкости, подаваемой через форсунку. В процессе истечения одновременно происходит ряд процессов, таких как дробление жидкостной струи, вскипание жидкости в вакууме и ее замерзание. Расчет структуры подобной струи весьма трудоемок и не проводился, тем не менее можно утверждать, что в зоне формирования лазерной искры присутствуют капли (кристаллы) жидкости плотностью порядка $\sim 10^{24}$ mol/cm³.

Результаты

Исследования жидкостных мишеней на основе гексана

Гексан C₆H₁₄ — насыщенный углеводород, прозрачная, легкоподвижная, легколетучая, малотоксичная жидкость с малой реакционной способностью в условиях эксперимента. Простота откачки, удобные термодинамические свойства и доступность делают гексан отличной жидкостной мишенью. В качестве мишеней для ЛПИ источника МР и ЭУФ излучения гексан, насколько нам известно, ранее не исследовался.

Исследовалась гексановая мишень при следующих параметрах жидкости: давление на входе в сопло 4 bar, температура 300 К. Эмиссионных линий ионов углерода в спектральном диапазоне 4–20 nm при использовании гексана не обнаружено. Причина в том, что вероятность излучения ионов углерода C V и C VI, получаемых при возбуждении гексановой мишени, в области 4–20 nm, весьма мала, значительно более вероятно рекомбинационное излучение ионов углерода в районе „водного окна прозрачности“ 2.8–4 nm. Гексан является удобной жидкостью-носителем, которая может быть использована как растворитель для проведения исследований эмиссионных спектров различных химических соединений, что проверялось экспериментально.

Исследования жидкостных мишеней на основе CH₂Cl₂

Дихлорметан CH₂Cl₂ — прозрачная, легкоподвижная, легколетучая, малотоксичная жидкость с малой реакционной способностью в условиях эксперимента. Простота откачки, удобные термодинамические свойства и доступность делают CH₂Cl₂ хорошей жидкостной мишенью. В качестве мишеней для ЛПИ источника МР и ЭУФ излучения дихлорметан, насколько нам известно, ранее не исследовался.

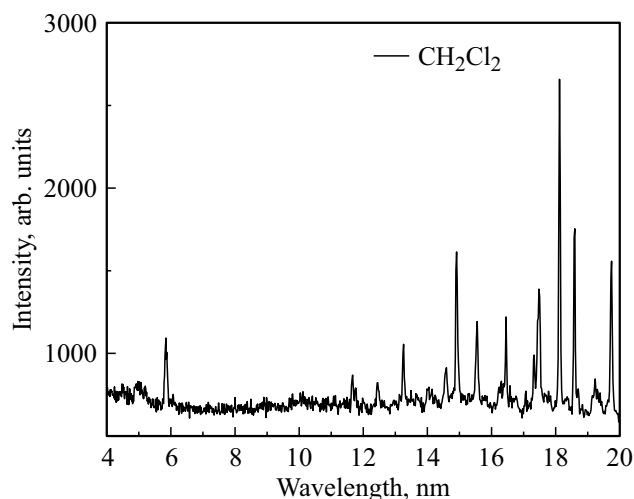


Рис. 1. Эмиссионные спектры при использовании в качестве мишени жидкостной струи дихлорметана CH₂Cl₂.

На рис. 1 приведены эмиссионные спектры CH₂Cl₂, измеренные при использовании форсунки с одним отверстием диаметром 225 μm при следующих параметрах жидкости: давление на входе в сопло 4 bar, температура 300 К. Исследованный спектральный диапазон составил 4–20 nm. Интенсивность излучения приведена в относительных единицах. Виден ряд интенсивных линий в диапазоне 4–20 nm, сформированных переходами на ионах C IV и C III. Линии ионов углерода в исследованном спектральном диапазоне не наблюдаются. Для коротких длин волн наблюдается увеличение шумовой составляющей, возникающей вследствие особенностей используемого спектрального прибора. Абсолютные значения интенсивности МР и ЭУФ излучения при использовании данной мишени планируется измерить позднее.

Расшифровка наблюдаемых линий проводилась в соответствии с [5–9] при сравнении спектров, измеренных на различных мишенях, и приведена в табл. 1 в приложении.

Исследования жидкостных мишеней на основе CH₃Br

Бромистый метилен CH₃Br — прозрачная, легкоподвижная, легколетучая, малотоксичная жидкость, весьма эффективный растворитель с малой реакционной способностью в условиях эксперимента. Простота откачки, удовлетворительные термодинамические свойства и доступность делают CH₃Br удовлетворительной жидкостной мишенью. Недостатком бромистого метилена является склонность к замерзанию струи при истечении в вакуум. В качестве мишеней для ЛПИ источника МР и ЭУФ излучения бромистый метилен, насколько нам известно, ранее не исследовался.

На рис. 2 приведены эмиссионные спектры CH₃Br, измеренные при использовании форсунки с одним от-

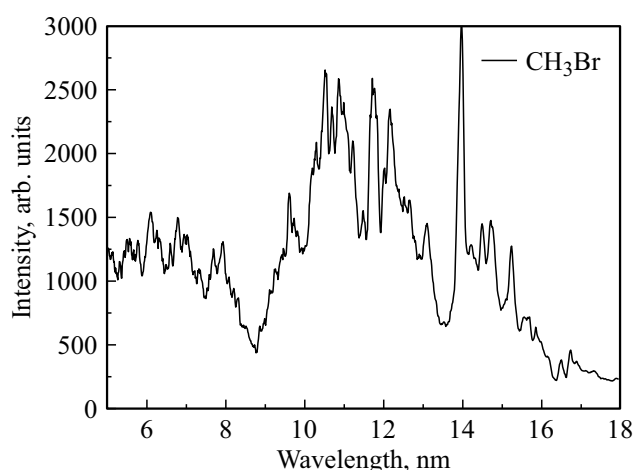


Рис. 2. Эмиссионные спектры при использовании в качестве мишени жидкостной струи бромистого метилена CH_3Br .

вертием диаметром $225 \mu m$ при следующих параметрах жидкости: давление на входе в сопло 4 bar, температура 300 К.

Исследованный спектральный диапазон составил 5–18 nm. Интенсивность излучения приведена в относительных единицах. Виден ряд интенсивных полос и линий в диапазоне 5–18 nm, сформированных переходами на ионах Br X, Br IX, Br VIII, Br VII. Спектр качественно соответствует спектру при возбуждении криптона. Линии ионов углерода в исследованном спектральном диапазоне не наблюдаются. Для коротких длин волн наблюдается увеличение шумовой составляющей, возникающей вследствие особенностей используемого спектрометра-монохроматора РСМ-500. Абсолютные значения интенсивности МР и ЭУФ излучения при использовании данной мишени планируется измерить позднее.

Расшифровка наблюдаемых линий проводилась в соответствии с [10,11] при сравнении спектров, измеренных на различных мишенях, и приведена в табл. 2 в приложении. Для ряда линий соответствующие им переходы установить не удалось.

Выводы

В данной работе исследованы эмиссионные спектры ЛПИ с жидкостными мишенями из гексана C_6H_{14} , дихлорметана CH_2Cl_2 , бромистого метилена CH_3Br . Данные жидкостно-капельные мишени формировались при распылении форсункой в вакуумной камере. Проведена расшифровка полученных спектров и определены ионы, излучающие в данном спектральном диапазоне.

При возбуждении жидкоструйных мишеней из гексана эмиссионных линий углерода не обнаружено, что позволяет использовать его в экспериментах как инертный носитель для растворения в нем и введения в реакционный

объем галогенов, халькогенов и ряда других химических элементов.

При возбуждении жидкоструйных мишеней из дихлорметана идентифицированы эмиссионные линии ионов Cl VIII, Cl VII. Установлено, что дихлорметан может быть с успехом использован как рабочая жидкость для ЛПИ.

При возбуждении жидкоструйных мишеней из бромистого метилена обнаружены эмиссионные линии ионов Br X, Br IX, Br VIII, Br VII. Установлено, что бромистый метилен может быть ограниченно пригоден как рабочая жидкость ЛПИ.

Финансирование работы

Поддержано НЦМУ „Центр фотоники“, при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-906.

Таблица 1. Таблица эмиссионных линий CH_2Cl_2

Длина волны, nm	Интенсивность в максимуме	Ион	Переход
5.0	800	Cl VIII	$2p^6 - 2p^5 3d$
5.85	1100	Cl VIII	$2p^6 - 3s$
11.66	860	Cl VII	$3s - 7p$
11.76	790	Cl VIII	$2p^5 3s - 2p^5 6p$
12.44	820	Cl VIII	$2p^5 3s - 2p^5 5p$
13.31	1050	Cl VII	$3s - 6p$
14.04	800	Cl VII	$3p - 8d$
14.6	900	Cl VII	$3p - 7d$
14.94	1600	Cl VII	$3s - 5p$
15.58	1200	Cl VII	$3p - 6d$
16.23	800	Cl VII	$3p - 6s$
16.28	830	Cl VII	$3p - 6s$
16.57	1200	Cl VIII	$2p^5 3s - 2p^5 4p$
16.71	800	Cl VIII	$2p^5 3s - 2p^5 4p$
17.4	1100	Cl VII	$3p - 5d$
17.46	1400	Cl VII	$3p - 5d$
18.25	2650	Cl VIII	$2p^5 3p - 2p^5 4d$
18.63	1750	Cl VIII	$2p^5 3p - 2p^5 4d$
18.78	780	Cl VIII	$2p^5 3p - 2p^5 4d$
19.13	850	Cl VII	$3p - 5s$
19.64	1550	Cl VII	$3s - 4p$

Таблица 2. Таблица эмиссионных линий CH_3Br

Длина волны, nm	Интенсивность в максимуме	Ион	Переход
5.05	1300	Br X/Br VIII*	*
5.6	1500	Br X/Br VIII*	*
5.8	1400	Br X/Br VIII*	*
6.1	1700	Br X/Br VIII*	*
6.35	1600	Br X/Br VIII*	*
6.61	1500	Br X/Br VIII*	*
6.8	1700	Br VIII	$3d^{10} - 3d^9 8f$
6.95	1700	Br VIII	$3d^{10} - 3d^9 8f$
7.04	1600	Br VIII	$3d^{10} - 3d^9 7f$
7.35	1200	Br VIII	$3d^{10} - 3d^9 6f$
7.7	1350	Br VIII	$3d^{10} - 3d^9 5f$
7.93	1400	Br VIII	$3d^{10} - 3d^9 5f$
8.3	1100	*	*
9.08	950	Br VIII	$3d^{10} - 3d^9 4f$
9.61	1900	Br X*	$3d^8 - (3d^7 4p + 3p^5 3d^9)?$
10.30	2200	Br X	$3d^8 - (3d^7 4p + 3p^5 3d^9)$
10.53	2900	Br IX/Br X*	$3d^9 - 3p^5 3d^{10}$ или $3d^8 - (3d^7 4p + 3p^5 3d^9)$
10.7	2400	Br X	$3d^8 - (3d^7 4p + 3p^5 3d^9)$
10.86	2900	Br IX	$3d^9 - 3d^8 4p$
11.21	2400	Br X	$3d^8 - (3d^7 4p + 3p^5 3d^9)$
11.48	1650	Br IX	$3d^9 - 3d^8 4p$
11.66	2600	Br IX	$3d^9 - 3d^8 4p$
11.75	3200	Br IX	$3d^9 - 3d^8 4p$
11.8	2700	Br IX	$3d^9 - 3d^8 4p$
12.01	2000	Br IX	$3d^9 - 3d^8 4p$
12.15	2500	Br IX	$3d^9 - 3d^8 4p$
12.65	1700	Br VIII	*
13.1	1600	Br VIII	*
13.89	2100	Br VIII	$3d^{10} - 3d^9 4p$
13.99	3200	Br VIII	$3d^{10} - 3d^9 4p$
14.25	1350	Br VIII	$3d^{10} - 3d^9 4p$
14.5	1500	Br VII	*
14.72	1500	Br VII	$3d^{10} 4s - 3d^9 4s 4p$
15.25	1300	Br VII	*

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

- [1] А.Н. Нечай, А. А. Перекалов, Н. Н. Салашенко, Н. И. Чхало. Опт. и спектр., **129** (2), 146 (2021).
- [2] А.Н. Нечай, А. А. Перекалов, Н. Н. Салашенко, Н. И. Чхало. Опт. и спектр., **129** (3), 266 (2021).
- [3] А.Н. Нечай, А. А. Перекалов, Н. И. Чхало, Н. Н. Салашенко. Опт. и спектр., **129** (6), 755 (2021).
- [4] 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).
- [5] NIST Atomic Spectra Database, Gaithersburg, 2009–2019. <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>.
- [6] C. Jurén, J. Fremberg, B. Fawcett. Phys. Scr., **30** (4), 260 (1984).
- [7] C. Jurén. Phys. Scr., **36** (5), 776 (1987).
- [8] H.G. Berry, J. Desesquelles, K. T. Cheng, R. M. Schectman. Phys. Rev. A, **18** (2), 546 (1978).
- [9] V. Kaufman, B. Edlén. J. Phys. Chem. Ref. Data, **3** (4), 825 (1974).
- [10] Y.N. Joshi, A. Nencioni, T.A.M. van Kleef. JOSA B, **2** (10), 1650 (1985).
- [11] Y.N. Joshi, T.A.M. Van Kleef. Phys. Scr., **23** (3), 249 (1981).