

04.01

## Наблюдение лазерной искры на скачке уплотнения в газоструйной мишени

© А.Н. Нечай<sup>1</sup>, А.А. Перекалов<sup>1,2</sup>, Н.И. Чхало<sup>1</sup>, Н.Н. Салащенко<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия<sup>2</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

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

Поступило в Редакцию 30 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 18 июня 2019 г.

Принято к публикации 18 июня 2019 г.

При конструировании мощных лазерно-плазменных источников экстремального ультрафиолетового излучения с газовой струей в качестве мишени актуальной является проблема деградации газовых сопел. Деградация наблюдается из-за недостаточного удаления зоны образования лазерной искры от среза сопла. Предложено кардинальное решение этой проблемы за счет формирования лазерной искры на скачках уплотнения, формируемых при торможении сверхзвуковой струи газа. На подобном скачке уплотнения получена лазерная искра и проведены измерения интенсивности эмиссионного излучения.

**Ключевые слова:** экстремальное ультрафиолетовое излучение, деградация газовых сопел, скачки уплотнения, лазерная искра.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.19.48310.17862

В настоящее время в лабораторных исследованиях применяются газоструйные лазерно-плазменные источники экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения [1–4]. В качестве мишени в таких источниках излучения выступает струя газа, на которую вблизи среза сопла фокусируется лазерное излучение. Подобные газовые мишени удобны, не загрязняют оптические элементы, работоспособны в течение длительного времени.

При переходе к более мощным источникам накачки, а именно при возбуждении газовой мишени мощными лазерными либо электронными пучками, наблюдается эрозия сопла. Разрушение сопла приводит к загрязнению оптических элементов и ограничивает время непрерывной работы источника излучения. Для решения данной проблемы необходимо найти способ удаления лазерной искры от среза сопла, что сводится к нахождению способа формирования плотной газовой мишени вдали от среза сопла.

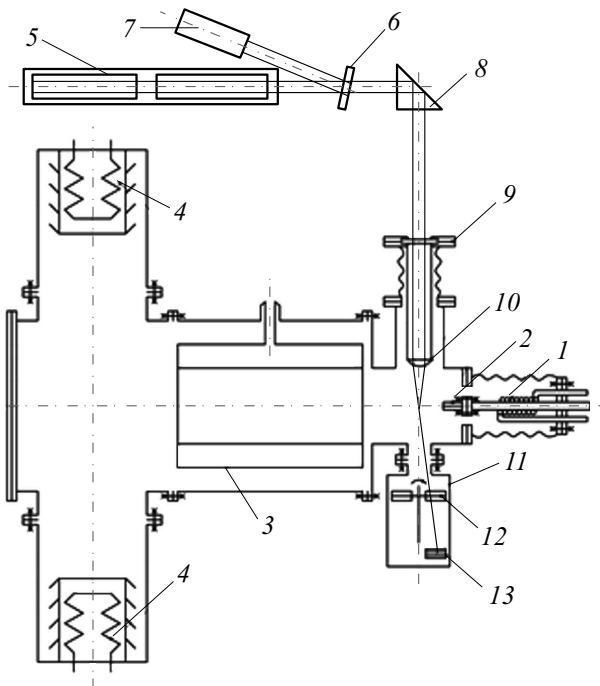
Существует ряд способов отодвинуть зону разряда от среза сопла: увеличение давления газа на входе в сопло; использование двойных сопел; использование струй жидкости [5–7]. Данные способы либо не позволяют значительно (на сантиметры) удалить зону разряда, либо приводят к нестабильной подаче вещества в зону искры. До сих пор не рассматривался еще один способ получения плотных газовых мишеней — формирование скачков уплотнения при торможении сверхзвуковой струи газа. Данные скачки уплотнения характеризуются достаточно большими плотностями и могут быть удалены на произвольное расстояние от среза сопла [8].

Наиболее простым способом формирования подобных скачков уплотнения является истечение сверхзвуковой

газовой струи в объем с остаточным газом. При подобном истечении формируется система ударных волн, образующих бочку Маха [8]. Одно основание бочки Маха образовано срезом сверхзвукового сопла, второе — прямым скачком уплотнения (диск Маха), а боковая поверхность образована висячим скачком уплотнения. В зависимости от режима истечения в диске Маха достигаются различные плотности газа, в том числе сравнимые с плотностями на срезе сопла [9].

Таким образом, можно ожидать, что в скачках уплотнения, в частности на диске Маха, будут достигаться плотности газа, достаточные для пробоя лазерным излучением и эффективной эмиссии ЭУФ-излучения из этой зоны.

Исследования проводились на установке, представленной на рис. 1. Исследуемый газ подается в теплообменник 1, где приобретает необходимую температуру. Далее газ поступает в коническое сверхзвуковое сопло 2. При этом на некотором расстоянии от сопла формируется диск Маха, его удаление определяется давлением остаточного газа. Перемещая сопло, можно изменить положение диска Маха относительно точки фокусировки лазерного излучения и приемников излучения. Таким образом, проводились измерения интенсивности ЭУФ-излучения при образовании искры в различных частях струи и непосредственно в диске Маха. Газовая струя откачивается криоконденсационным 3 и криоадсорбционными 4 насосами. Излучение лазера 5, проходя призму 8 и оптический ввод 9, попадает на линзу 10. Малая часть излучения пластинкой 6 направляется в детектор мощности 7. В фокусе линзы 10 лазерное излучение вызывает пробой и образование плазмы. Излучение



**Рис. 1.** Установка для исследования свойств атомно-кластерных пучков. Пояснения в тексте.

плазмы направляется в квантометр *11*, представляющий собой набор сменяемых полосовых фильтров *12* и фотодиод SPD-100UV *13*, градуированный в абсолютных единицах [10]. Полосовые фильтры представляют собой свободно висящие пленки из различных материалов: Ве, Al и др. Посредством замены фильтров можно выделить необходимую спектральную полосу как в видимом, так и в ЭУФ-диапазоне, а использование фотодиода позволяет провести исследования при любом давлении в приборе. Использовалось коническое сверхзвуковое сопло с критическим сечением  $145\ \mu\text{m}$  и длиной  $5\ \text{mm}$ . Подавался криптон, давление газа на входе в сопло составляло  $4\ \text{bar}$ , температура  $300\ \text{K}$ , остаточное давление в камере  $15\ \text{Pa}$ . Возбуждение осуществлялось лазером Solar TP LF117 Nd:YAG ( $\lambda = 1064\ \text{nm}$ , энергия импульса  $0.3\ \text{J}$ , длительность импульса  $11\ \text{ns}$ , частота  $1\ \text{Hz}$ ).

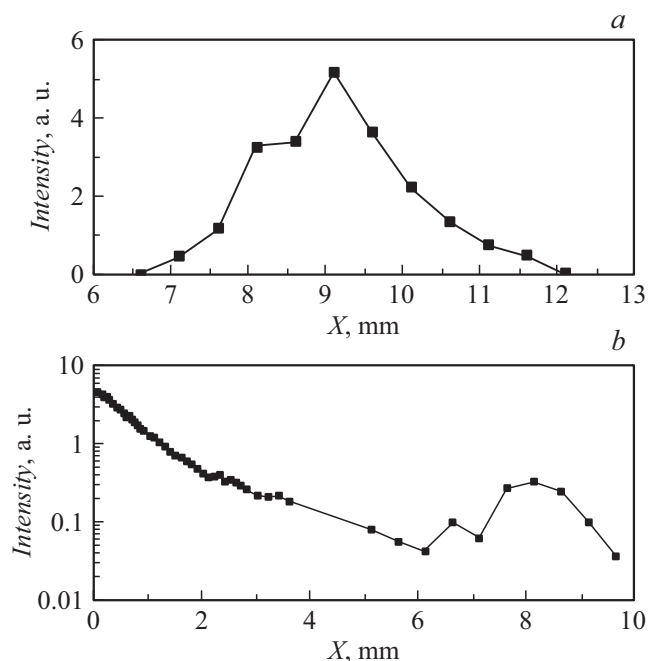
На рис. 2, *a* приведена интенсивность излучения лазерной искры в видимом диапазоне в зависимости от расстояния между лазерной искрой и срезом сопла. Лазерная искра наблюдается на расстояниях  $7\text{--}11\ \text{mm}$ . Максимум интенсивности расположен на расстоянии  $9\ \text{mm}$  от среза сопла. Асимметрия профиля интенсивности, по-видимому, связана с асимметрией распределения давления газа вблизи диска Маха. Наблюдаемое удаление зоны разряда полностью снимает вопросы деградации источника газовой струи при работе с мощными источниками накачки.

На рис. 2, *b* приведена зависимость интенсивности ЭУФ-излучения при удалении лазерной искры от среза сопла. Измерения проводились с помощью квантометра,

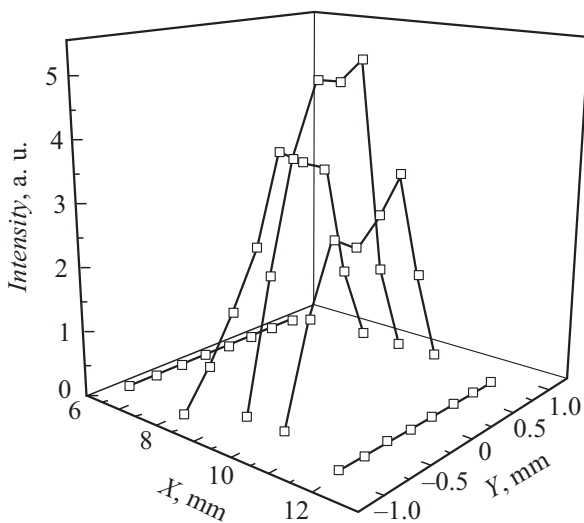
фильтром служила пленка Ве. Видно, что генерация ЭУФ-излучения присутствует. Интенсивности наблюдаемого излучения были малы, что связано с тем, что наблюдение искры осуществлялось с торца диска Маха. Генерируемое ЭУФ-излучение проходит часть пути через скачок уплотнения, в котором имеют место большая концентрация частиц и поглощение ЭУФ-излучения. В камере поддерживалось достаточно высокое остаточное давление криптона, что в сочетании с большой длиной пути ЭУФ-излучения также сильно снижает его интенсивность. Таким образом, генерируемое в искре ЭУФ-излучение испытывает сильное поглощение, что и приводит к столь низким значениям наблюдаемого сигнала.

На рис. 3 приведены измеренные значения интенсивности лазерной искры в видимом диапазоне в зависимости от положения искры. В эксперименте положение лазерного пучка фиксировалось, а сканирование осуществлялось при перемещении сопла. Ось *X* соответствует удалению от среза сопла, ось *Y* — удалению искры от оси струи. Видно, что зона, в которой наблюдается разряд, имеет вид диска диаметром  $2\ \text{mm}$  и толщиной  $3\ \text{mm}$ . Наибольшая интенсивность излучения имеет место вблизи оси газовой струи.

Таким образом, зона устойчивого разряда соответствует диску Маха и следующей за ним зоне повышенного давления. Гидродинамика формирования данных скачков уплотнения достаточно хорошо изучена [11]. Использованное решение для получения скачков уплотнения не является оптимальным, так как требует высокого



**Рис. 2.** *a* — интенсивность излучения в видимой области спектра в зависимости от удаления лазерной искры от среза сопла; *b* — зависимость интенсивности ЭУФ-излучения при удалении лазерной искры от среза сопла.



**Рис. 3.** Интенсивность излучения лазерной искры в видимой области спектра в зависимости от положения искры относительно сопла.

остаточного давления в камере установки. Для использования скачков уплотнения в качестве мишеней необходимы другие технические решения, например использование расположенных под углом сверхзвуковых сопел. В таком случае скачок уплотнения будет формироваться в месте пересечения газовых струй. Вместе с тем это решение несет определенные трудности при откачке газа, вводе лазерного излучения и выводе ЭУФ-излучения.

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Получена лазерная искра на скачке уплотнения, формирующемся при сверхзвуковом истечении газа в камеру с остаточным давлением. Использование скачка уплотнения в качестве мишени позволит удалить лазерную искру на значительное расстояние от среза сопла, что полностью предотвратит его эрозию.

2. Измерена интенсивность эмиссионного излучения в различных точках газовой струи. Лазерная искра наблюдается в диске диаметром 2 мм и толщиной 3 мм, что соответствует ожидаемым размерам диска Маха.

3. Зарегистрирована эмиссия ЭУФ-излучения при формировании лазерной искры на диске Маха. Таким образом, подтверждено, что лазерная искра, формируемая на скачке уплотнения, может служить источником ЭУФ-излучения. Для практического применения требуется формирование таких мишеней, в которых отсутствует сильное „самопоглощение“ генерируемого на скачке плотности ЭУФ-излучения.

### Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда 17-12-01227.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Bartnik A., Fiedorowicz H., Wachulak P., Fok T. // *Laser Particle Beams*. 2018. V. 36. N 3. P. 286–292.
- [2] Борисевичус Д.А., Забродский В.В., Калмыков С.Г., Сасин М.Э., Сейсян Р.П. // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43. В. 1. С. 53–60.
- [3] Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Golubev S.V., Lopatin A.Ya., Nechay A.N., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Tsybin N.N., Vodopyanov A.V., Yulin S. // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 112. N 22. P. 221101.
- [4] Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Lopatin A.Ya., Nechay A.N., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., Zuev S.Yu. // *AIP Adv.* 2018. V. 8. N 10. P. 105003.
- [5] Rakowski R., Bartnik A., Fiedorowicz H., De Dortan F.D.G., Jarocki R., Kostecki J., Wachulak P. // *Appl. Phys. B*. 2010. V. 101. N 4. P. 773–789.
- [6] Komori H., Ueno Y., Hoshino H., Ariga T., Soumagne G., Endo A., Mizoguchi H. // *Appl. Phys. B*. 2006. V. 83. N 2. P. 213–218.
- [7] Schultz C.K.A., Kantsyrev V.L., Safronova A.S., Moschella J.J., Wiewior P., Shlyapitseva V.V., Cooper M.C. // *Phys. Plasmas*. 2016. V. 23. N 10. P. 101207.
- [8] Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Наука, 1978. 569 с.
- [9] Korobeishchikov N.G., Skovorodko P.A., Kalyada V.V., Shmakov A.A., Zarvin A.E. // *AIP Conf. Proc.* 2014. V. 1628. N 1. P. 885–892.
- [10] Chkhalo N.I., Golubev S.V., Mansfeld D., Salashchenko N.N., Sjmaenok L.A., Vodopyanov A.V. // *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*. 2012. V. 11. N 2. P. 021123.
- [11] Гинзбург И.П. *Аэрогазодинамика: краткий курс*. М.: Высш. шк., 1966. 404 с.