

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.9.07, 533.59

СИСТЕМА ЦИРКУЛЯЦИИ ГАЗА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОСТРУЙНОЙ МИШЕНИ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА

© 2025 г. В. Е. Гусева^{a,*}, А. Н. Нечай^a, А. А. Перекалов^a, Н. И. Чхало^a

^aИнститут физики микроструктур Российской академии наук
Россия, 607680, Нижний Новгород, ул. Академическая, 7

* e-mail: valeriegus@ipmras.ru

Поступила в редакцию 11.09.2024 г.

После доработки 14.11.2024 г.

Принята к публикации 29.11.2024 г.

Описаны конструкция и принцип работы системы циркуляции газа, используемого в качестве мишени для газоструйного лазерно-плазменного источника. Необходимость подобной системы обусловлена стремлением уменьшить потребление газа при сохранении производительности источника излучения. Циркуляционная система позволяет использовать один и тот же объем газа в качестве мишени многократно. В статье приведена конструкция системы, также даны результаты пробной эксплуатации и оценки герметичности сконструированной системы и времени работы на одной заправке газа.

DOI: 10.31857/S0032816225020127, EDN: GKNNXW

1. ВВЕДЕНИЕ

Достаточно давно в лабораторной практике применяется экстремальное ультрафиолетовое (ЭУФ) излучение как в метрологических (рефлектометрия), так и в исследовательских (диагностика слоистых структур) целях [1, 2]. Сравнительно новым приложением является разработка источника ЭУФ-излучения для использования в литографических целях [3, 4]. Лазерно-плазменные источники излучения (ЛПИ) являются наиболее перспективными лабораторными источниками излучения в спектральном ЭУФ-диапазоне, позволяющими получать излучение высокой интенсивности [5].

В настоящее время проводится разработка ЛПИ для отечественного литографа на основе ксеноновой струйной мишени, работающего на длине волн 11.2 нм. Ранее проводилось достаточно большое количество исследований, посвященных измерению коэффициента конверсии лазерного излучения в ЭУФ на данной длине волн [6–9]. В работе [10] было показано, что производительность ЭУФ-литографа

с ксеноновым источником излучения, работающего на длине волн около 11 нм, может превышать производительность литографии на длине волны 13.5 нм, использующей мишени на основе олова. Литография на длинах волн вблизи 11 нм стала возможна благодаря прогрессу технологий в области напыления Ве-содержащих многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) [11, 12]. Дополнительным аргументом для использования газоструйных мишней является сравнительно малое загрязнение используемой оптики.

Использование газоструйной мишени в ЛПИ подразумевает сравнительно большие расходы газа, при этом газ, откачанный вакуумными насосами из объема установки, сбрасывается в выхлопную магистраль. Данное обстоятельство влечет за собой существенные расходы, так как ксенон весьма дорог. Существуют несколько путей снижения расхода рабочего газа. Например, возможно использование импульсных клапанов [13–16], однако частоты срабатывания импульсных клапанов ограничены, что делает невозможным их использование вместе с высокочастотными лазерами с частотой следования

импульсов порядка 1 кГц. Также можно уменьшить количество подаваемого в камеру ксенона при использовании сопел постоянного истечения малого диаметра [17]. Однако использование сопел малого сечения ухудшает формирование газовой струи и приводит к падению концентрации частиц в зоне образования лазерной искры [18]. Таким образом, для литографического применения ЛПИ с газоструйной мишенью неизбежны большие расходы ксенона, достигающие 1–15 нормальных см³/с [19]. В данной работе мы предлагаем использовать систему циркуляции рабочего газа для источника ЭУФ-излучения. Использование данной системы позволит существенно снизить расход газа, используемого в качестве мишени.

В статье представлены результаты разработки и аprobации системы циркуляции рабочего газа в установке, предназначеннной для формирования ЛПИ на газоструйной мишени. Описаны режимы работы системы рециркуляции и ее характеристики.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Подача газа в ЛПИ осуществляется под давлением порядка 10 бар через коническое сопло с критическим сечением 500 мкм [18]. Сопло формирует сверхзвуковую струю газа, на которую фокусируется лазерное излучение, это излучение вызывает пробой в струе. Выпущенный газ при этом откачивается турбомолекулярными

насосами (ТМН), что позволяет поддерживать необходимый уровень остаточного давления в вакуумной камере. В разработанной циркуляционной системе откачиваемый газ собирается и заново подается на вход в сопло. Дополнительно система циркуляции должна обеспечивать хранение газа и предварительное вакуумирование системы.

Схема системы циркуляции газа представлена на рис. 1. При работе системы предусмотрено трехступенчатое сжатие газа по основной циркуляционной петле: камера 1; ТМН НВТ 1000 (Искитим) 3; спиральный форвакуумный насос ESVP600 5; мембранный компрессор KM-24.OLD10-NEW (Remeza) 9; сопло 2 (см. рис. 1). Дополнительно в системе предусмотрена вспомогательная петля откачки с помощью форвакуумного насоса 5 со сбросом газов в атмосферу через вакуумный клапан 6. Проектирование системы осложнено тем, что запорная арматура высокого давления не является вакуум-плотной, а вакуумные клапаны не рассчитаны на работу при давлении выше примерно 1 бар избыточного давления. Так, при увеличении давления выше примерно 1 бар происходит повреждение вакуумных клапанов. Данные технические недочеты были скомпенсированы конструктивным решением, а именно, соединением байпасной линии с форвакуумным баллоном напрямую без использования клапанов.

На схеме указаны рабочая камера 1 с коническим сверхзвуковым соплом 2, откачиваемая

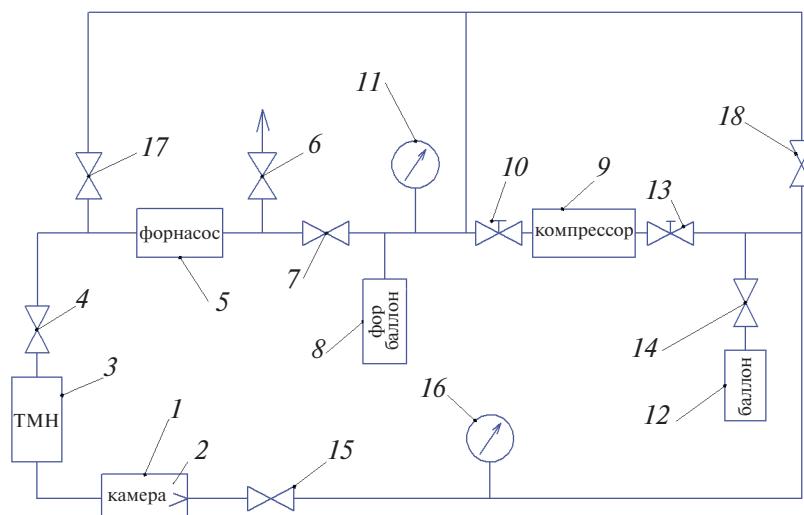


Рис. 1. Схема разработанной циркуляционной системы: 1 – камера источника излучения, 2 – коническое сопло, 3 – турбомолекулярный насос, 4 – вакуумный клапан, 5 – форвакуумный насос, 6 – вакуумный клапан в атмосфере, 7 – вакуумный клапан, 8 – форвакуумный баллон, 9 – мембранный компрессор, 10 – управляемый клапан, 11 – мановакуумметр, 12 – накопительный баллон, 13 – управляемый клапан, 14 – ручной вентиль высокого давления, 15 – вентиль точной регулировки, 16 – мановакуумметр, 17 – вакуумный клапан, 18 – вентиль высокого давления.

ТМН высокой производительности 3. На выходе ТМН расположен вакуумный клапан 4, защищающий ТМН при исчезновении питания. Также через вакуумный клапан 4 ТМН откачивается форвакуумным насосом 5. При выходе из форвакуумного насоса газ может быть направлен в атмосферу при открытии вакуумного клапана 6 и перекрытии клапана 7. При открытии клапана 7 с закрытым клапаном 6 осуществляется набор газа в форвакуумный баллон 8, исполняющий роль ресивера низкого давления. Далее газ направляется на вход компрессора 9, при этом ресивер 8 позволяет согласовать работу форвакуумного насоса 5 и компрессора 9, переводя компрессор в повторно-кратковременный режим работы. Элементы конструкции, описанные выше, составляют секцию системы,ирующую при низких давлениях. Контроль за давлением в этой части системы осуществляется с помощью мановакуумметра 11.

Используемый форвакуумный насос герметичен по входу и достаточно газоплотен по выходу при закрытом газобалластном устройстве. Используемый мембранный компрессор является газоплотным, но не вакуум-плотным, что приводит к потере рабочего газа при утечках. Для уменьшения данных потерь мембранный насос с двух сторон отсекается клапанами с автоматическим управлением 10 и 13. С помощью мембранного компрессора 9 рабочий газ компримируется в баллон 12, являющийся ресивером высокого давления. На входе в баллон 12 установлен запорный вентиль 14. Из баллона газ поступает в сопло 2 через вентиль точной регулировки 15. Давление в этой части системы, работающей при высоких давлениях, контролируется с помощью манометра 16.

Для проведения откачки системы и подготовки к работе имеется возможность вакуумирования частей системы за счет использования байпасной магистрали с вакуумным клапаном 17 и вентилем 18. Байпасная магистраль специально подключена на вход форвакуумного баллона без использования регулирующей арматуры. При такой схеме в байпасной линии всегда будет поддерживаться такое же давление, как в форвакуумном баллоне, а подтекание газа при закрытом вентиле 18 не приведет к разрушению вакуумного клапана 17, поскольку объем форвакуумного баллона существенно больше, чем объем магистрали между вентилями 18 и 15. В случае отсечения байпасной магистрали

от форвакуумного баллона в результате подтеканий вентиля 18 через длительное время произойдет смятие сильфона вакуумного клапана 17 с его дальнейшим разрушением и прорывом газа в высоковакуумную часть установки.

3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Работа представленной системы может осуществляться в нескольких режимах – основном режиме циркуляции газа, режиме откачки вакуумной камеры и режиме откачки системы.

Наибольшие требования к уровню вакуума в установке предъявляются к камере источника, поэтому важный вспомогательный режим эксплуатации циркуляционной системы – режим откачки вакуумной камеры, который необходим для первоначального достижения вакуума порядка 10^{-3} Па перед запуском установки в основном режиме. При работе в данном режиме камера источника излучения 1 откачивается ТМН 3, далее остаточные газы через вакуумный вентиль 4 откачиваются форвакуумным насосом 5. При этом байпасный клапан 17 остается закрытым. После форвакуумного насоса остаточные газы через клапан 6 сбрасываются в атмосферу. Вакуумный вентиль 7 при этом закрыт.

Режим откачки системы необходим, чтобы исключить наличие остатков газа в частях системы, задействованных при работе в основном циркуляционном режиме. Это особенно необходимо при работе с более чем одним сортом газа. Для осуществления работы установки в данном режиме используется байпасная магистраль системы. При откачке системы вакуумные клапаны 4 и 7 закрываются, открываются байпасный клапан 17 и вентили высокого давления 14 и 18. Также открыт клапан 6, через который осуществляется выход остаточных газов в атмосферу. При работе форвакуумного насоса осуществляется откачка байпасной магистрали, баллонов 8 и 12 и мембранныго компрессора 9. Контроль откачки осуществляется по мановакуумметру 11.

Основной режим эксплуатации циркуляционной системы, при осуществлении которого происходит работа ЛПИ, представляет наибольший интерес. Необходимо, чтобы газ после взаимодействия с лазерным излучением оперативно откачивался и, проходя некоторый путь внутри установки, заново подавался в вакуумную камеру через сопло. В данном режиме камера источника

излучения 1 откачивается ТМН 3, далее через вакуумный вентиль 4 рабочий газ откачивается форвакуумным насосом 5. При этом байпасный клапан 17 остается закрытым. После форвакуумного насоса через вакуумный клапан 7 и управляемый клапан 10 газ подается на вход мембранный компрессора 9, при этом вентиль 6 закрыт. На входе мембранный компрессора расположен ресивер низкого давления 8. Мембранный компрессор компримирует газ в баллон высокого давления 12, откуда газ, регулируемый по манометру 16, через вентиль точной регулировки 15 подается к соплу 2.

4. ПРОБНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Была проведена пробная эксплуатация системы циркуляции газа. В качестве рабочего газа из соображений экономии использовался аргон. По результатам пробной эксплуатации были выявлены места утечек и натекания, а также оценено общее удобство работы с системой.

Первоначально система была собрана с использованием пластиковых соединительных трубок различных диаметров с зажимными соединениями с помощью гаек, также вместо управляемых клапанов 10 и 13 использовался обратный клапан на выходе из компрессора. После первого запуска было выявлено большое количество течей, делающих невозможной длительную эксплуатацию установки. Натекание газа в установку в выключенном состоянии составило примерно 5 г за час работы системы. Необходимо было провести поиск технических решений, ликвидирующих или уменьшающих проблему утечек и натекания стороннего газа в систему.

При модернизации системы была проведена замена трубопроводов на медные, все зажимные соединения были заменены пайкой. Для уменьшения утечек также была предпринята установка дополнительных вентилей с автоматическим управлением, отсекающих мембранный компрессор со стороны высокого 13 и низкого 10 давлений (см. рис. 1).

После модернизации системы циркуляции газа были повторно проведены измерения натекания и утечек в системе. Общий объем системы циркуляции составил 5140 см^3 . Секции низкого и высокого давлений, разделяемые компрессором и камерой, откачали до $5 \cdot 10^{-2}$ бар, после чего

в течение трех недель наблюдалось изменение давления в выключенной системе. За 500 ч давление в системе поднялось до $5.3 \cdot 10^{-2}$ бар. Таким образом, за час работы установки масса стороннего газа, попавшего в объем циркуляционной системы, составила примерно 300 мг (т. е. примерно 0.01%). Видно, что натекание в системе незначительное, что обеспечивает чистоту и малые потери рабочего газа, а также позволяет работать месяцы без повторной предварительной откачки системы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана, собрана и введена в работу система циркуляции газа, используемого в качестве импульсной струйной мишени для лазерно-плазменного источника излучения. Была проведена пробная эксплуатация системы, также была продемонстрирована ее работоспособность. Описаны как основной циркуляционный, так и вспомогательные (откачка вакуумной камеры, откачка системы) режимы работы. Продемонстрирована высокая герметичность системы, что гарантирует малые потери рабочего газа и его чистоту. При условии использования одного рода газа сконструированная система может работать месяцы без повторной откачки системы.

Данная конструкция системы подачи газа позволяет многократно использовать рабочий газ в качестве мишени ЛПИ, что дает возможность расходовать дорогостоящие газы более рационально и экономно. Таким образом, использование систем циркуляции газа дает дополнительное преимущество для развития ЭУФ-литографии с использованием ЛПИ на газоструйной мишени.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Создание системы циркуляции было выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-62-00068). Вакуумная система была сделана в рамках государственного задания FFUF-2024-0022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gullikson E.M., Underwood J.H., Batson P.C., Nikitin V. // J. X-ray Sci. Technol. 1992. V. 3. № 4. P. 283. <https://doi.org/10.3233/XST-1992-3402>

2. Бибушкин М.С., Забродин И.Г., Клюенков Е.Б., Салащенко Н.Н., Чехонадских Д.П., Чхало Н.И. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. Т. 2. С. 43.
3. Chkhalo N.I., Garakin S.A., Lopatin A.Ya. et al. // AIP Advances. 2018. V. 8. № 10. P. 105003. <https://doi.org/10.1063/1.5048288>
4. Ахсалян А.Д., Клюенков Е.Б., Лопатин А.Я. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. Т. 1. С. 5.
5. Абраменко Д.Б., Анциферов П.С., Астахов Д.И. // УФН. 2019. Т. 189. С. 323. <https://ufn.ru/ru/articles/2019/3/k/>
6. Guseva V.E., Nechay A.N., Perekalov A.A., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I. // Appl. Phys. B. 2023. V. 129. P. 155. <https://doi.org/10.1007/s00340-023-08095-8>
7. Kalmykov S.G., Butorin P.S., Sasin M.E. // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. P. 103301. <https://doi.org/10.1063/1.5115785>
8. Kubiak G.D., Bernardez II L.J., Krenz K.D. // Proc. SPIE. 1998. V. 3331. P. 81. <https://doi.org/10.1117/12.309560>
9. Butorin P.S., Zadiranov Y.M., Zuev S.Y., Kalmykov S.G., Polkovnikov V.N., Sasin M.E., Chkhalo N.I. // Tech. Phys. 2018. V. 63. P. 1507. <https://doi.org/10.1134/S1063784218100080>
10. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N. // AIP Adv. 2013. V. 3. P. 082130. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4820354>
11. Bajt S. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2000. V. 18. P. 557. <https://doi.org/10.1116/1.582224>
12. Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Gusev S.A. et al. // Opt. Express. 2018. V. 26. P. 33718. <https://doi.org/10.1364/OE.26.033718>
13. Болдарев А.С., Гасилов В.А., Левашов В.Е., Медников К.Н., Пирожков А.С., Пирожкова М.С., Рагозин Е.Н. // КЭ. 2004. Т. 34. № 7. С. 679.
14. Kranzusch S., Mann K. // Opt. Commun. 2001. V. 200. P. 223. [https://doi.org/10.1016/s0030-4018\(01\)01639-x](https://doi.org/10.1016/s0030-4018(01)01639-x)
15. Holburg J., Müller M., Mann K., Wieneke S. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2019. V. 37. P. 031303. <https://doi.org/10.1116/1.5089201>
16. Каправов В.Г., Корде Р., Левашов В.Е., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. // КЭ. 2002. Т. 32. № 2. С. 149.
17. Shields H., Fornaca S.W., Petach M.B., Michaelia, M., McGregor R.D., Moyer R.H., Pierre R.J.S. // Proc. SPIE. 2002. V. 4688. <https://doi.org/10.1117/12.472266>
18. Гусева В.Е., Корепанов М.А., Королева М.Р., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И. // ПТЭ. 2023. № 4. С. 145.
19. Нечай А.Н., Перекалов А.А., Чхало Н.И., Салащенко Н.Н. // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 11. С. 1656. <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.11.48324.131-19>