



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H05G 2/00 (2025.01)

(21)(22) Заявка: 2024131265, 17.10.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.10.2024

Дата регистрации:
03.03.2025

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.10.2024

(45) Опубликовано: 03.03.2025 Бюл. № 7

Адрес для переписки:

603950, г. Нижний Новгород, Бокс-120, ул.
Ульянова, 46, ИПФ РАН, патентная группа

(72) Автор(ы):

Веселов Алексей Павлович (RU),
Сидоров Александр Васильевич (RU),
Водопьянов Александр Валентинович (RU),
Преображенский Евгений Игоревич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение "Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики им. А.В.
Гапонова-Грехова Российской академии
наук" (ИПФ РАН) (RU)

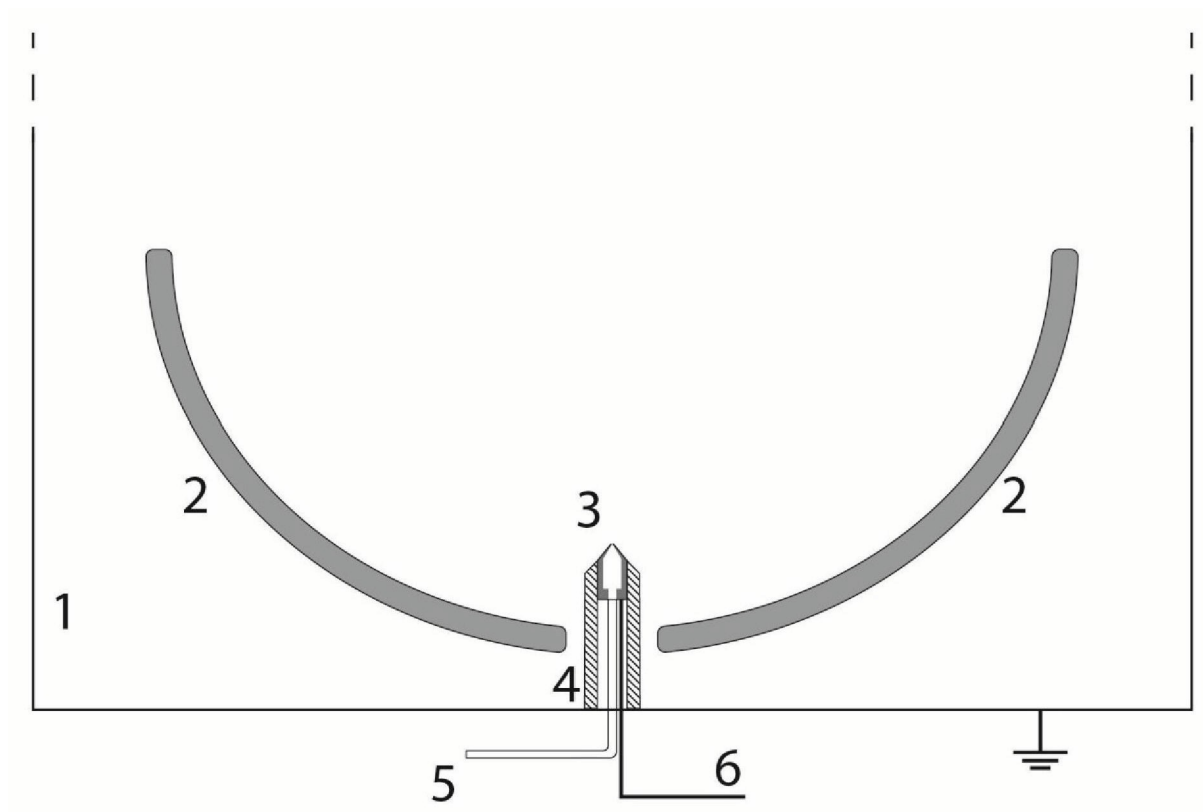
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2633726 C1, 17.10.2017. RU
2523445 C2, 20.07.2014. RU 2808771 C1,
05.12.2023. WO 03085707 A1, 16.01.2003. US
8558202 B1, 15.10.2013. US 7605385 B2, 20.10.2009.
US 7671349 B2, 02.03.2010. Y. MOSTAFA,
Production of 13,5 nm light with 5% conversion
efficiency from 2 mm laser-driven tin
microdroplet plasma, Appl. Phys. Lett., 4
December 2023.

(54) Генератор экстремального ультрафиолетового излучения на основе разряда, поддерживаемого высоким постоянным напряжением в резконеоднородном потоке газа

(57) Реферат:

Изобретение относится к области источников, предназначенных для генерации вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения в плазме газового разряда. Технический результат - возможность регулировать эмиссионные параметры плазмы путем варьирования таких параметров, как давление газа в напуске сопла и напряжения на нем, упрощение конструкции источника. Генератор излучения с длиной волны 11,2 нм $\pm 1\%$ из плазмы разряда в газе ксенон содержит расположенное внутри вакуумной камеры сопло системы газонапуска с характерным поперечным размером меньше

миллиметра, формирующее «точечный» источник экстремального ультрафиолетового излучения, расположенный в фокусе Брэгговского зеркала. Сопло системы газонапуска выполнено с заостренным металлическим концом, находящимся вблизи фокуса Брэгговского зеркала. Заостренный конец сопла соединен с высоковольтным проводом, обеспечивающим возможность подачи на него высокого постоянного напряжения, достаточного для возникновения и поддержания разряда вблизи среза сопла, непосредственно в области резко неоднородного перепада давления. 1 ил.





FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
H05G 2/00 (2025.01)

(21)(22) Application: **2024131265, 17.10.2024**

(24) Effective date for property rights:
17.10.2024

Registration date:
03.03.2025

Priority:

(22) Date of filing: **17.10.2024**

(45) Date of publication: **03.03.2025** Bull. № 7

Mail address:

**603950, g. Nizhnij Novgorod, Boks-120, ul.
Ulyanova, 46, IPF RAN, patentnaya gruppa**

(72) Inventor(s):

**Veselov Aleksei Pavlovich (RU),
Sidorov Aleksandr Vasilevich (RU),
Vodopianov Aleksandr Valentinovich (RU),
Preobrazhenskii Evgenii Igorevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov
Institute of Applied Physics of the Russian
Academy of Sciences (IAP RAS) (RU)**

(54) **GENERATOR OF EXTREME ULTRAVIOLET RADIATION BASED ON DISCHARGE MAINTAINED BY HIGH CONSTANT VOLTAGE IN HIGHLY INHOMOGENEOUS GAS FLOW**

(57) Abstract:

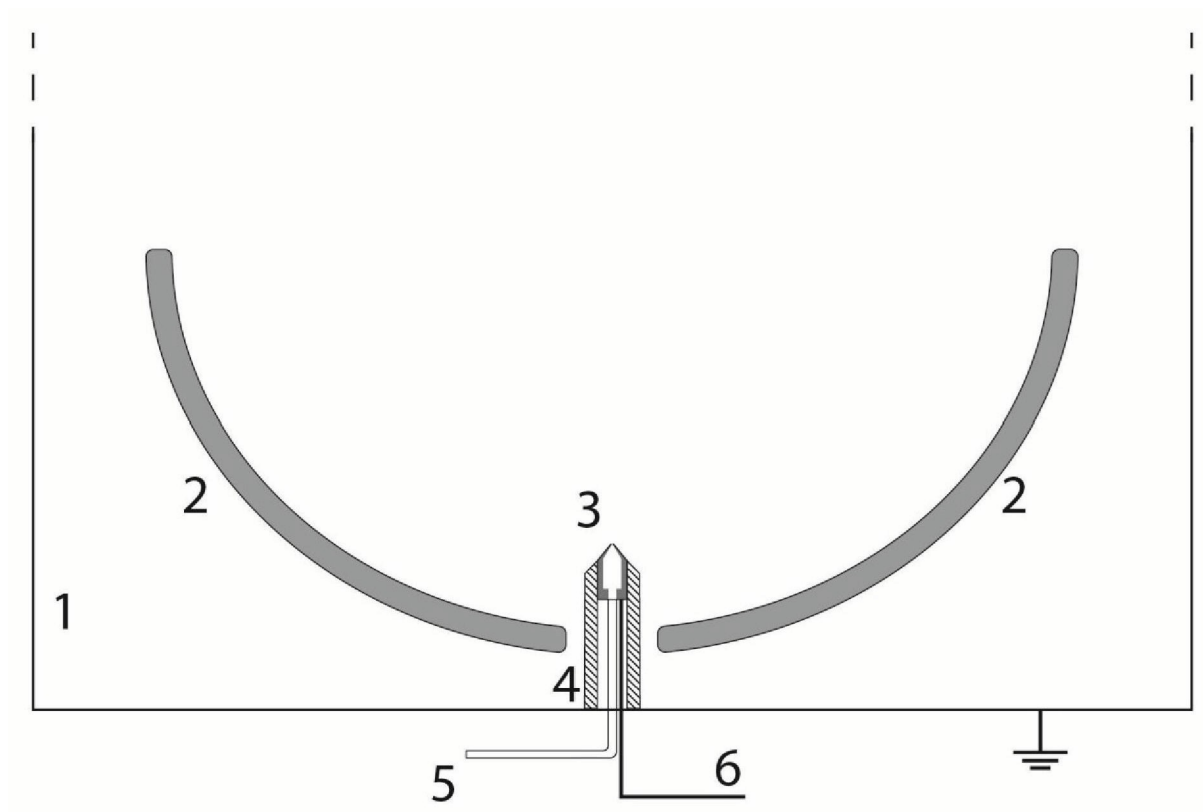
FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to sources intended for generation of vacuum ultraviolet (VUV) radiation in gas discharge plasma. Generator of radiation with wavelength of 11.2 nm $\pm 1\%$ of discharge plasma in xenon gas contains a nozzle of a gas inlet system located inside a vacuum chamber with a characteristic transverse dimension less than a millimetre, which forms a "point" source of extreme ultraviolet radiation, which is located at the focus of the Bragg mirror. Nozzle of the gas injection system is made with a pointed metal end located near the focus of the Bragg mirror.

Sharpened end of the nozzle is connected to a high-voltage wire, which provides the possibility of supplying it with high constant voltage, which is sufficient for occurrence and maintenance of a discharge near the nozzle edge, directly in the area of sharply inhomogeneous pressure drop.

EFFECT: possibility to control emission parameters of plasma by varying such parameters as gas pressure in nozzle inlet and voltage on it, simplification of source design.

1 cl, 1 dwg



Изобретение относится к области создания источника вакуумного ультрафиолетового излучения (ВУФ). Подобные источники могут быть востребованы в ряде приложений, например, таких как литографические установки.

В последнее время наблюдается быстрое развитие технологий, связанных с усложнением строения как передовых процессоров, так и микропроцессорных сборок. Данное развитие объясняется растущими потребностями в вычислительных мощностях как на специализированных кластерах, сконструированных для обучения нейросетей (<https://www.ibm.com/think/topics/cluster-computing>), так и в бытовых микропроцессорах, получивших широкое применение на автоматизированных производствах, в автомобилях и прочих бытовых приборах (Ramesh K. et. al. «Design of Fault-Tolerant Automotive Gateway Architecture Using MC9S12XDP512 Microcontroller Device», *Energies* 2023, 16(16), 5923; <https://doi.org/10.3390/en16165923>).

Беспрецедентная динамика развития микроэлектроники, которую можно было наблюдать в течение последних 50 лет в первую очередь связана с непрерывным уменьшением минимальных размеров элементов микросхем. До некоторого времени прогресс здесь обеспечивался усовершенствованиями фотолитографии, использовавшей часть видимого, ультрафиолетовый и ближний вакуумно-ультрафиолетовый диапазоны электромагнитного излучения. Тем не менее, возможности оптических схем ограничиваются дифракционным пределом, и предельная величина разрешения согласно критерию Рэлея пропорциональна длине волны излучения. Поэтому логичным выглядит переход вглубь вакуумно-ультрафиолетового диапазона (ВУФ) - к экстремальному ультрафиолетовому излучению (ЭУФ). Возникающие при этом трудности связаны в первую очередь с отсутствием прозрачных материалов для данного диапазона длин волн и необходимостью создания эффективных источников излучения в нем.

Отсутствие необходимых оптически прозрачных материалов вынуждает переходить, в частности, к зеркальной оптике, что в свою очередь ведет к заметному снижению числовой апертуры объектива и соответствующему падению разрешающей способности.

Все это обращает внимание к волновым процессам в дальнем ВУФ диапазоне, так называемом экстремальном ультрафиолетовом, где в последнее время достигнут заметный прогресс при создании отражательных оптических элементов и высокоэффективных источников излучения. Одним из ключевых моментов здесь можно считать создание зеркал, обладающих весьма высоким коэффициентом отражения в диапазоне экстремального ультрафиолетового излучения. Для этого используется многослойное брэгговское покрытие на атомарно-гладкой поверхности массивной подложки с заданной кривизной. До недавнего времени считалось, что безальтернативными зеркалами для ЭУФ-литографии являются системы на основе молибден-кремниевых (Mo/Si) слоев, так как для них были получены самые большие коэффициенты отражения излучения в ЭУФ диапазоне (на уровне 74% в диапазоне $13,5 \pm 1$ нм).

В связи с этим требования, предъявляемые к источнику излучения, состоят в том, чтобы он был точечным (с размером на уровне 1 мм) и генерировал излучение в диапазоне $13,5 \pm 1$ нм с мощностью в несколько сотен ватт (вплоть до 1 кВт), так как при уменьшении мощности время засветки растет, следовательно, уменьшается и производительность установки.

К настоящему времени существует множество методов генерации ВУФ излучения, различающихся как способом генерации излучения, так и параметрами самого излучения (Bakshi V. «EUV sources for lithography», SPIE press, 2006, vol. 149).

Стоит отметить, что, ВУФ излучение может быть получено множеством способов,

начиная от его генерации обычным дуговым разрядом, до генерации его на синхротроне.

Тем не менее, в настоящее время наиболее эффективным источником ВУФ/ЭУФ представляется линейчатое излучение многозарядных ионов, генерируемых в плазме разряда, поддерживаемого электромагнитным полем.

5 Безусловно, генерация ВУФ возможна и вовсе без использования плазмы вещества, например, на синхротронных установках (Guiseppe Dattoli et. al. «Extreme Ultraviolet (EUV) Sources for Lithography based on Synchrotron Radiation», Technik und Umwelt Wissenschaftliche Berichte FZKA 6606). Генерируемый пучок ВУФ излучения при этом
10 получается узконаправленным, а мощность и его длина волны может плавно перестраиваться. Однако, синхротрон - это дорогостоящая установка колоссальных размеров, количество которых может ограничиваться единицами в пределах одной страны. Тем самым никакое массовое применение их в качестве источников излучения для литографов невозможно.

В настоящее время среди всех источников ВУФ излучения необходимые свойства
15 имеет лишь источник, основанный на распылении капель олова мощными импульсами ИК лазера. Данный источник излучения отличается от источников других типов, когда необходимо получить излучение с длиной волны 13,5 нм и высоким коэффициентом преобразования энергии из лазерного подогревающего импульса в энергию излучения необходимого спектрального диапазона (данный КПД достигает величины 5%) (Y. Mostafa et. al. «Production of 13,5 nm light with 5% conversion efficiency from 2 μ m laser-driven tin microdroplet plasma». Appl. Phys. Lett. 4 December 2023; 123 (23): 234101. <https://doi.org/10.1063/5.0174149>).

В источниках, основанных на испарении капель олова, ВУФ излучение генерируется следующим образом. Микроскопическая капля олова инжектируется внутрь вакуумной
25 камеры, затем, по достижении области фокуса высокоотражающего многослойного рентгеновского зеркала, на каплю попадает мощное сфокусированное излучение CO₂ лазера. Данное излучение поглощается сначала жидким оловом, а затем и плазмой олова. При этом в спектре такого разряда наблюдаются линии излучения, отвечающие линиям излучения многозарядных ионов. В частности, излучение на длине волны 13,5
30 нм генерируется в основном многозарядными ионами Sn⁸⁺-Sn¹⁰⁺ (Z. Bouza, et. al. «EUV spectroscopy of Sn⁵⁺ -Sn¹⁰⁺ ions in an electron beam ion trap and laser-produced plasmas», J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 53 (2020) 195001 (10 pp)), (Yaqing Gao et. al. «The wide spectral range characteristics and dynamic evolution of laser-produced tin plasmas», Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol.326, Nov. 2024, 109120).

У данной конструкции, которая подробно описана в патенте US 7671349 «Laser produced plasma EUV light source» (МПК H04H 1/04, публ. 02.03.2010 г.), возможно выделить несколько недостатков. Первый из них - это быстрое загрязнение
35 фокусирующих зеркал оловом. За пределами разрядной области многозарядные ионы быстро рекомбинируют, нейтралы осаждаются тонким слоем олова как на стенках, так и на дорогостоящих зеркалах. При круглосуточном использовании установки, время использования одного зеркала оказывается равным двум неделям. В последующем зеркало не подлежит восстановлению и его попросту утилизируют. Вторым недостатком - это дорогостоящая система синхронизации капель олова и лазерных импульсов. Для
40 того, чтобы обеспечить высокую среднюю мощность ВУФ излучения, микроскопические капли должны иметь частоту следования 50 кГц и более. Аналогичную частоту следований должны иметь и лазерные импульсы. При этом, предельный диаметр перетяжки пучка составляет всего лишь 500 мкм, в то время как диаметр капли составляет всего 30 мкм, что осложняет юстировку, настройку и синхронизацию

устройства (Oscar O Versolato «Physics of laser-driven tin plasma sources of EUV radiation for nanolithography», 2019, Plasma Sources Sci. Technol. 28 083001).

Из-за указанных недостатков внедрение ЭУФ литографии на длине волны $\lambda=13,5$ нм в широкомасштабное промышленное производство до сих пор еще задерживается (см., например, H.J. Levinson. «Proc.Int. Workshop on EUV Lithography», CXRO, LBNL, Berkeley, CA, June 13-16, 2016, p. 1. <https://www.euvlitho.com/2016/P1.pdf>). Особенно опасным является попадание осколков олова на шаблон/маску, что приводит к воспроизводству бракованных структур в интегральных схемах.

Известное изобретение и использование многочисленных специальных приемов защиты оптического тракта не привели к радикальному решению проблемы. Это вынудило обратиться к сверхзвуковым газовым струям тяжелого инертного газа ксенона. Применение в качестве мишени инертного газа в общем решает проблему загрязнений. Наиболее опасное положение в источнике занимает коллекторное зеркало, находящееся в максимальной близости от мишени конвертора. Только на нем в случае газовой струи ксенона еще регистрируется некоторая коррозия, вызванная бомбардировкой высокоэнергичными ионами и атомами инертного газа, ограничивающая срок службы. Существеннее, однако, что во имя борьбы с загрязнениями приходится жертвовать коэффициентом конверсии, так как эффективность излучения ксенона на длине волны 13,5 нм существенно меньше чем у олова. Поэтому концепция использования оловянной плазмы в качестве источника ЭУФ-излучения для проекционной литографии в какой-то момент стала доминирующей.

Около десяти лет назад в качестве альтернативы 13,5 нм была выдвинута идея о переводе ЭУФ литографии на длину волны $\lambda=11,2$ нм с использованием в источнике излучения ксеноновой газовой мишени (N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, AIP Advances 3, 082130 (2013). DOI: 10.1063/1.4820354). Как уже указывалось выше, источник с ксеноновой газовой мишенью впервые предложен для EUV-литографии с $\lambda=13,5$ нм еще в 90-х годах (H. Fiedorowicz, A. Bartnik, Z. Patron, P. Parys. Appl. Phys. Lett. 62, 2778, 1993), однако, мощность его излучения была слишком низка из-за малого коэффициента конверсии греющего излучения в ЭУФ-излучение на длине волны 13,5 нм, и от него пришлось отказаться.

По оценкам авторов (N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. AIP Advances 3, 082130, 2013. DOI: 10.1063/1.4820354) предложенная ими идея будет иметь успех, потому что в спектре излучения ксенона интенсивность на $\lambda=11,2$ нм может превосходить в 4-5 и более раз интенсивность на $\lambda=13,5$ нм. Тем не менее, по вышеуказанным причинам до недавних пор литография на $\lambda=11,2$ нм считалась невозможной из-за отсутствия эффективных интерференционных зеркал на эту длину волны. Но к настоящему времени в ИФМ РАН уже созданы первые в мире образцы Mo/Be-зеркал, пригодных для работы на $\lambda=11,2$ нм (S.A. Bogachev, N.I. Chkhalo, S.V. Kuzin, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, S.V. Shestov, S.Y. Zuev. Appl. Optics. 55, 2126, 2016. DOI: 10.1364/AO.55.002126). А зеркала на основе Ru/Be могут оказаться еще более эффективными (N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. AIP Advances 3, 082130, 2013. DOI: 10.1063/1.4820354). Все это смогло вдохнуть новую жизнь в концепцию точечного источника ЭУФ-излучения для проекционной литографии на основе плазмы многозарядных ионов ксенона.

Возможно, логичным было бы предположение о том, что необходимо разрабатывать источник с еще более меньшими длинами волн. Это помогло бы перейти еще более меньшему техпроцессу, который в настоящее время определяется дифракционным пределом. Однако помимо самого источника, необходимо создание зеркал, способных отражать излучение со столь малой длиной волны. Существующие зеркала являются

Брэгговскими (высокий коэффициент отражения в них достигается за счет отражения от периодической структуры четвертьволновых пленок), поэтому зеркала из различных материалов имеют свой собственный узкий спектральный диапазон, в котором коэффициент отражения максимален. Поэтому зеркала, пригодные для отражения одной длины волны ВУФ излучения, не годятся для использования в установках с источником с другой длиной волны. Поэтому наличие рентгеновских зеркал также накладывает ограничение на источник излучения. Одними из перспективных зеркал считаются зеркала с максимумом отражения на длинах волн 9-12 нм (R.A. Shaposhnikov et. al. «Highly reflective Ru/Sr multilayer mirrors for wavelengths 9-12 nm», Optics Letters Vol.47, Issue 17, pp.4351-4354, 2022). Поэтому источников с длиной волны менее 9 нм ближайшее время ожидать не приходится, в то время как создание литографа с источником на длине волны 11,2 нм кажется вполне осуществимым.

Однако при переходе к разряду в газе Хе возникают следующие трудности, в отличие от капель олова газ при попадании в вакуумную камеру мгновенно расширяется. В то же время для эффективной генерации ВУФ излучения необходима концентрация плазмы на уровне 10^{16} - 10^{17} см⁻³. Для достижения подобной плотности плазмы, в области разряда должна достигаться как минимум сравнимая концентрация нейтралов газа. При этом квант света с длиной волны 13,5 нм имеет энергию 93 эВ и как следствие имеет большое сечение ионизации. Поэтому при концентрации нейтралов порядка 10^{16} - 10^{17} см⁻³, данное излучение имеет длину свободного пробега порядка 1-10 мм, что не позволяет излучению распространиться от разряда до подложки.

Поэтому, очевидным кажется создание неких специфических условий разряда, при которых повышенное фоновое давление будет наблюдаться лишь в области разряда, а вне его - пониженное фоновое давление. Подобное было сделано в патенте RU 2633726 «Устройство получения направленного экстремального ультрафиолетового излучения с длиной волны 11,2 нм $\pm 1\%$ для проекционной литографии высокого разрешения» (МПК H05G 2/00, G03F 7/20, публ. 17.10.2017 г.). В нем разряд возникал и поддерживался в сверхзвуковой струе ксенона, расположенной в фокусе параболического зеркала. Струя ксенона истекала из сопла с диаметром менее миллиметра в вакуумную камеру с фоновым давлением порядка 10^{-3} торр. В качестве источника греющего излучения был выбран гиротрон. Связано это с тем, что реализуемое давление газа в струе достигает порядка 0,1-1 атм, что является оптимальным давлением для пробоя частотами от 300 ГГц до 1 ТГц. В данном частотном диапазоне единственными компактными и мощными источниками излучения являются лишь гиротроны. Мощные лазерные источники попросту не годятся для подобных приложений, так как лазерное излучение при подобных давлениях имеет малый коэффициент поглощения излучения газом.

К недостаткам конструкции, выбранной в качестве прототипа и описанной в патенте RU 2633726, относится то, что разряды во всех частотных диапазонах имеют тенденцию к распространению. А именно, перед фронтом плазмы создаются специфические условия либо за счет прогрева нейтрального газа, либо за счет возбуждения нейтралов ультрафиолетом, пришедшего из-за фронта плазмы. Тем самым, проводимость нейтрального газа в прифронтной области увеличивается, что влечет за собой увеличение поглощения излучения в прифронтной области и скорому пробоя в новой области. Поэтому, во время приходящих импульсов греющего излучения, разряд может перестать иметь форму шара, а начать вытягиваться вдоль пучка излучения гиротрона. К недостаткам данной конструкции можно отнести и то, что передовые мощные гиротроны, как правило, имеют импульсный режим работы, и как следствие

нестабильную мощность, что негативным образом сказывается как на поддержании разряда, так и на требуемом спектральном составе эмиссионного спектра. Более того, было показано, что в случае плазменного источника ВУФ излучения для эффективной засветки фоторезиста плазма должна обладать либо высокой плотностью для эффективного излучения, либо иметь относительно большое время жизни. А именно, должно выполняться условие $n\tau > 10^9 \text{ см}^{-3} \text{ с}$, где n - концентрация плазмы, τ - время жизни плазмы.

Также к недостатку конструкции, описанной в патенте RU 2633726, относится малый КПД трансформации мощности излучения гиротрона в спектральную мощность линии 11,2 нм. Экспериментально было показано, что данный КПД составил менее 1%, а связано это было с тем, что за время импульса гиротрона порядка 20 мкс в плазме не успевают образоваться ионы с большим зарядовым числом (Sidorov A.V. et. al.

«Applications of the gas discharge sustained by the powerful radiation of THz gyrotrons», Journal of Physics Conference Series 1400(7): 077032, DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077032).

Несмотря на то, что производство промышленных гиротронов с частотами порядка десятка гигагерц было уже давно налажено, каждый гиротрон с частотами 300 ГГц 1 ТГц является уникальным. Более того, для обеспечения их стабильной работы требуются мощные сверхпроводящие электромагниты, а высокоточные источники питания представляют из себя крупногабаритные стойки. Поэтому литограф, где в качестве источника греющего излучения используется гиротрон, требует для своего содержания отдельное выделенное помещение.

Задачей, на решение которой направлено настоящее изобретение, является разработка относительно дешевого, компактного и конструктивно простого устройства, позволяющего генерировать излучение с длиной волны 11,2 нм из плазмы разряда в газе ксенон, поддерживаемого постоянным высоким напряжением (порядка 1 кВ и выше) вблизи газовой мишени с резко неоднородным перепадом давления.

Технический результат в предлагаемом устройстве достигается за счет того, что разработанный генератор излучения с длиной волны 11,2 нм $\pm 1\%$ из плазмы разряда в газе ксенон так же, как и генератор-прототип содержит расположенное внутри вакуумной камеры сопло системы газонапуска с характерным поперечным размером меньше миллиметра, формирующее «точечный» источник экстремального ультрафиолетового излучения, расположенный в фокусе Брэгговского зеркала. Новым является то, что сопло системы газонапуска выполнено с заостренным металлическим концом, находящимся вблизи фокуса Брэгговского зеркала, при этом заостренный конец сопла соединен с высоковольтным проводом, обеспечивающим возможность подачи на него высокого постоянного напряжения (как положительного, так и отрицательного), достаточного для возникновения и поддержания разряда вблизи среза сопла, непосредственно в области резко неоднородного перепада давления.

Изобретение поясняется чертежом, на котором представлена схема разработанного генератора излучения с длиной волны 11,2 нм $\pm 1\%$ из плазмы разряда в газе ксенон.

Генератор излучения с длиной волны 11,2 нм $\pm 1\%$ из плазмы разряда в газе ксенон, поддерживаемого постоянным высоким напряжением вблизи газовой мишени с резко неоднородным перепадом давления, содержит заземленную разрядную вакуумную камеру 1 с установленным внутрь высокоотражающим Брэгговским зеркалом 2, металлизированное заостренное сопло 3 с диаметром отверстия менее 1 мм, расположенное в фокусе Брэгговского зеркала 2 и установленное на изолирующей подставке 4. К соплу 3 подведена трубка напуска газа 5 и заизолированный высоковольтный провод 6 с возможностью подачи высокого напряжения, достаточного

для инициации и поддержания разряда. Необходимые параметры плазмы достигаются путем подстройки давления в трубке напуска газа 5, а также напряжения, подаваемого на высоковольтный провод 6.

Разработанный источник ВУФ излучения работает следующим образом.

5 Разрядную вакуумную камеру 1 предварительно откачивают с помощью системы откачки до давления не хуже 10^{-6} торр. Затем, в трубку напуска газа 5 подается газ ксенон, одновременно с этим в камере 1 должно поддерживаться давление на уровне 10^{-3} торр. На металлическое сопло 3 с диаметром отверстия менее миллиметра подается газ с давлением до 4 атм. За счет малости диаметра отверстия сопла 3 исходящий в
10 вакуум поток газа является молекулярным, тем самым достигается равномерный разлет газа в телесный угол 2π . Это позволяет формировать вблизи заостренного металлического конца сопла 3 газовую мишень с резко неоднородным перепадом давления. На заостренное металлическое сопло 3 по изолированному высоковольтному проводу 6 подается напряжение (порядка 1 кВ и выше), достаточное для возникновения
15 пробоя. Из-за конфигурации сопла 3 вблизи его заостренного края возникает область усиленного электрического поля. Первичные электроны, присутствующие в окружающем газе, за счет естественной радиации захватываются и ускоряются во внешнем электрическом поле. Набрав энергию ионизации, они могут столкнуться и ионизовать
20 нейтральный атом, выбив еще один электрон. Число электронов растет в геометрической прогрессии, тем самым формируется электронная лавина. При достаточном количестве ионизованных частиц, достигших анода, разряд переходит в самоподдерживающийся режим.

При достаточной концентрации ионов и высокоэнергетичных электронов возможны
25 и их столкновения, что приводит к образованию ионов большей кратности. Спектр излучения, при этом, смещается в ВУФ область спектра.

Особенностью работы предлагаемого источника ВУФ излучения по сравнению с прототипом из патента RU 2633726 является то, что для ускорения и нагрева электронов используется не электрическое поле волны излучения гиротрона, а усиленное постоянное
30 поле на острие сопла, что позволяет отказаться от дорогих источников греющего излучения в пользу компактных и дешевых высоковольтных генераторов постоянного тока.

Существенным отличием предлагаемого устройства от известных является то, что параметры плазмы, с точки зрения эмиссионного спектра, могут быть легко изменены
35 и подобраны, как за счет изменения давления в напуске сопла, так и за счет изменения напряжения на металлическом сопле. Повышая напряжение, возможно ускорять темп набора электроном энергии. Варьируя давление можно как увеличивать геометрические размеры области повышенной концентрации частиц, так и оптимизировать ее параметры для генерации ионов необходимой кратности. Это возможно благодаря тому, что в
40 разрядах постоянного давления возможно введение неких законов подобия, а именно параметра E/p , где E локальное электрическое поле, p локальное давление, который по факту определяет частоту ионизации, возбуждения, среднюю энергию электронов и прочее, а в глобальном смысле определяет все локальные параметры плазмы.

Размеры разрядной области при этом оказываются порядка диаметра отверстия сопла. Происходит это, потому что при низком фоновом давлении порядка долей торр, формирование газовой струи не наблюдается, а реализуется равномерный разлет газа в телесный угол 2π сразу за срезом сопла (А.В. Сидоров и др., «Газовые мишени для точечного источника вакуумного и экстремального ультрафиолетового излучения, поддерживаемого сфокусированным электромагнитным излучением», Журнал

технической физики, 2024, том 94, вып. 7, DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58335.135-24).

Таким образом, разработанный генератор излучения благодаря позволяющему получить газовую мишень с резко неоднородным перепадом давления соплу с заостренным металлическим концом, соединенным с высоковольтным проводом, обеспечивающим возможность подачи на него высокого постоянного напряжения, позволяет реализовать и поддерживать точечный разряд в газе ксенон, с геометрическими размерами менее миллиметра, в эмиссионном спектре которого будут присутствовать линии с длиной волны 11,2 нм. При этом разработанный генератор является относительно известных устройств более дешевым, компактным и конструкционно простым.

(57) Формула изобретения

Генератор излучения с длиной волны 11,2 нм $\pm 1\%$ из плазмы разряда в газе ксенон, содержащий расположенное внутри вакуумной камеры сопло системы газонапуска с характерным поперечным размером меньше миллиметра, формирующее «точечный» источник экстремального ультрафиолетового излучения, расположенный в фокусе Брэгговского зеркала, отличающийся тем, что сопло системы газонапуска выполнено с заостренным металлическим концом, находящимся вблизи фокуса Брэгговского зеркала, при этом заостренный конец сопла соединен с высоковольтным проводом, обеспечивающим возможность подачи на него высокого постоянного напряжения, достаточного для возникновения и поддержания разряда вблизи среза сопла, непосредственно в области резко неоднородного перепада давления.

1

