

Источник света с высокой яркостью излучения на длине волны 13.5 нм

В.М.Борисов, К.Н.Кошелев, А.В.Прокофьев, Ф.Ю.Хаджийский, О.Б.Христофоров

Представлены результаты исследований по разработке высокояркостного источника излучения экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазона, предназначенного для использования в проекционной ЭУФ литографии, для инспекции литографических масок, в ЭУФ метрологии и др. Новые подходы к созданию источника света на основе Z-пинча в ксеноне позволили достичь максимальной для данного типа источников яркости излучения вблизи плазмы $130 \text{ Вт}(\text{мм}^2 \cdot \text{ср})^{-1}$ в 2%-ной спектральной полосе с центром на длине волны 13.5 нм, отвечающей максимуму отражения многослойных Mo/Si-зеркал. В этой спектральной полосе мощность излучения достигает 190 Вт в телесный угол 2π ср при частоте следования импульсов 1.9 кГц и вводимой в разряд электрической мощности 20 кВт.

Ключевые слова: ЭУФ источник, яркость излучения, длина волны 13.5 нм, ЭУФ литография, Z-пинч, ксенон, разрядная плазма.

1. Введение

Современная проекционная литография, позволяющая создавать структуры с размерами элементов менее десятков нанометров при крупномасштабном производстве интегральных схем (ИС) – одна из наиболее широко применяемых в настоящее время нанотехнологий. Развитие коммерчески оправданной проекционной литографии нового поколения основано на использовании источников экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения с длиной волны 13.5 нм, отвечающей максимуму отражения многослойных Mo/Si-зеркал [1, 2].

В первых ЭУФ нанолитографах, работавших в тестовых режимах, использовались разрядные источники излучения с $\lambda = 13.5$ нм на основе Z-пинча в ксеноне [3].

Хотя в настоящее время для крупномасштабного производства ИС нового поколения использование разрядных источников ЭУФ излучения не планируется, проблема их развития и совершенствования по-прежнему актуальна. Одно из перспективных применений разрядных источников ЭУФ излучения связано с инспекцией литографических масок. Производство бездефектных масок и их диагностика в течение всего времени эксплуатации играют важнейшую роль в технологии производства ИС, поскольку при наличии дефектов маски они проецируются на кремниевую подложку с фоторезистом, делая ее непригодной для использования.

Маски для ЭУФ литографии имеют подложку с многослойным зеркальным покрытием, отражающим на длине волны 13.5 нм, поверхность которого наносится топологический рисунок из материала, поглощающего на этой же длине волны. В соответствии со структурой маски различают несколько типов ее дефектов, требующих различных видов контроля: дефекты на подложке (substrate inspection), дефекты в многослойном отражающем покрытии (blank inspection) и дефекты на топологическом рисунке (pattern inspection). Для обнаружения и регистрации дефектов необходимо проводить сканирование маски предпочтительно актиническим излучением, длина волны которого совпадает с рабочей длиной волны нанолитографа. Для этих целей требуется создание прибора на основе ЭУФ источника с высокой яркостью, $B_{13.5} = 30\text{--}100 \text{ Вт}(\text{мм}^2 \cdot \text{ср})^{-1}$, в спектральной полосе около 13.5 нм (13.5 ± 0.135 нм), отвечающей полосе отражения многослойных зеркал, и малой величиной геометрического фактора, или этендю, $E = S\Omega = 10^{-2}\text{--}5 \times 10^{-4}$, где S – площадь источника в мм^2 , Ω – телесный угол вывода или сбора излучения в стерadians. При этом каждый вид инспекции требует своих значений параметров $B_{13.5}$ и E . Создание такого прибора и его ключевого элемента – высокояркостного актинического источника для инспекции ЭУФ масок – входит в приоритеты развития ЭУФ литографии.

Над созданием источников для диагностики литографических ЭУФ масок в мире работают несколько компаний и научных команд, имеющих различные подходы к решению этой проблемы.

В соответствии с одним из таких подходов в источнике для инспекции ЭУФ масок, разрабатываемом Federal Institute of Technology (Швейцария), используется лазерная плазма атомов Sn, получаемая при воздействии излучения Nd:YAG-лазера на капли жидкого олова [4]. Разработчики планируют довести яркость своего источника $B_{13.5}$ до $\sim 200 \text{ Вт}(\text{мм}^2 \cdot \text{ср})^{-1}$. Одной из проблем на пути достижения этой цели является обеспечение пространственной стабильности плазмы, чему может препятствовать временной джиттер между каплями и их боковое смещение. Кроме этого, проблемой источника на

В.М.Борисов, А.В.Прокофьев, О.Б.Христофоров. ООО «ЭУФ Лабс», Россия, 142191 Троицк, Москва, Сиреневый бульв., 1, ФГУП «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкинских, вл. 12; e-mail: khristofor@triniti.ru

К.Н.Кошелев. ООО «ЭУФ Лабс», Россия, 142191 Троицк, Москва, Сиреневый бульв., 1, Институт спектроскопии РАН, Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Физическая, 5; e-mail: kkoshelev4@gmail.com

Ф.Ю.Хаджийский. ООО «ЭУФ Лабс», Россия, 142191 Москва, Троицк, Сиреневый бульв., 1; e-mail: khadfedor@gmail.com

основе Sn-плазмы может быть большое количество присутствующих в ней загрязняющих продуктов.

Другие подходы к созданию высокоярких источников ЭУФ излучения основаны на использовании газоразрядной Xe-плазмы. Так, в разработанном Energetiq Technology Inc. (США) источнике используется индукционный, или безэлектродный, Z-пинч в ксеноне. Максимальная достигнутая яркость $B_{13.5}$ составляет $\sim 8 \text{ Вт}(\text{мм}^2 \cdot \text{ср})^{-1}$, что пока ниже требуемой [5]. При этом пинч образуется в керамической SiC-втулке с диаметром отверстия около 3 мм, что требует ее периодической замены из-за достаточно сильной эрозии [6].

В работе [7] предложен подход, основанный на суммировании излучения от нескольких источников на основе капиллярного разряда. Недостатками этого подхода могут быть сложность источника и большая эрозия материала керамической стенки капилляра, ограничивающая ресурс работы.

Одно из достижений в области создания источников для актинической инспекции связано с получением яркости $B_{13.5} = 12.9 \text{ Вт}(\text{мм}^2 \cdot \text{ср})^{-1}$ в компактном высокоярком газоразрядном источнике, разработанном Fraunhofer Institute for Laser Technology (ФРГ) [8]. Его особенностью является использование разрядной системы с полым катодом, что снижает эрозию, повышая надежность источника и его ресурс.

Кроме актуальных применений для инспекции литографических масок, относительно простые и компактные высокояркие ЭУФ источники на основе Z-пинча в ксеноне могут использоваться для мини-ЭУФ сканеров малой производительности, а также в ЭУФ метрологии.

К областям применения газоразрядных ЭУФ источников, в частности с K α в качестве плазмообразующего вещества, относятся микроскопия и томография биологических объектов в спектральном диапазоне прозрачности воды (от 2.4 до 4.4 нм) [9].

Другое перспективное применение связано с использованием потоков импульсной высокотемпературной плазмы и высокоэнергетических фотонов, генерируемых разрядом пинчового типа, для обработки поверхностей материалов [10].

В настоящей работе представлены результаты исследования и разработки для указанных применений мощного высокояркого ЭУФ источника на основе модифицированного Z-пинча в ксеноне с бескерамической разрядной системой. Работа является одним из направлений исследований по созданию мощных разрядных источников ЭУФ излучения на основе Xe- и Sn- плазмы, ведущихся нами в последние годы [11–16], в том числе в кооперации с Xtreme Technologies GmbH (ФРГ), Ushio Corp. (Япония), EPPRA SAS (Франция) и ASML (Нидерланды).

Данная публикация – первая из цикла работ, посвященных созданию и исследованию трех типов высокоярких ЭУФ источников на основе разрядной плазмы, лазерно-индуцированной разрядной плазмы в системе с жидкометаллическими электродами и лазерной плазмы жидкометаллических мишеней.

2. Разрядная система ЭУФ источника

На рис.1 представлена схема разрядной системы источника на основе модифицированного Z-пинча в ксеноне, в которой не используется керамический изолятор, устанавливаемый обычно в разрядной области между ка-

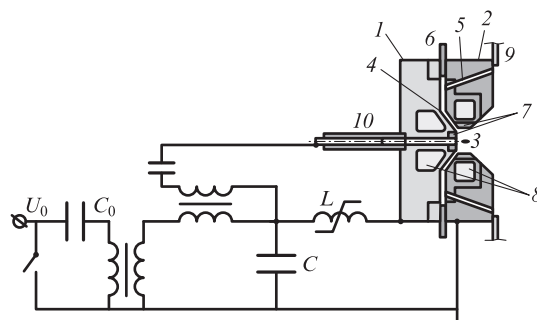


Рис.1. Схема ЭУФ источника на основе Z-пинча с бескерамической электродной системой.

тодом 1 и анодом 2. В разрядном промежутке, функционирующем при давлении около 50 мТор, соответствующем левой ветви кривой Пашена для газов, пробой предпочтительно происходит по более длинному пути, и это позволяет использовать в качестве изолятора между катодом и анодом щелевой зазор 4, расположенный на периферии разрядной области. Щелевой зазор 4 через ряд отверстий 5 соединен с откачиваемой вакуумной камерой 9, что в совокупности с изолятором 6, находящимся на большом удалении от области разряда, обеспечивает надежную изоляцию между анодом и катодом источника.

Таким образом, в разработанной конструкции отсутствует наиболее критический в плане эрозии раздельный керамический изолятор, при этом эрозии подвержен только металл электродов. Для минимизации эрозии медные катод 1 и анод 2 снабжены вольфрамовыми вставками 7 и эффективно охлаждаются с помощью протока воды 8. Пространственный угол вывода излучения, определяемый конфигурацией заземленного электрода 2, составлял 1.84 ср.

Рабочий газ (ксенон) подается через центральное отверстие катода. На внутренней поверхности керамической трубки 10 из нитрида кремния (Si_3N_4) осуществляется предыонизация. Выход газа из электродной системы и вывод излучения осуществляются в вакуумную камеру 9, оснащенную двумя турбонасосами.

3. Генерация разрядной плазмы

Для создания сильноточного Z-пинча разряда с высокой, до 2 кГц, частотой следования импульсов использовалась схема питания с магнитным сжатием импульса накачки. Схема импульсного питания обеспечивала ввод энергии в разряд в диапазоне 7.5–21 Дж/имп. при амплитуде токового импульса от 36 до 59 кА.

В системе импульсного питания (рис.1) используется импульсный трансформатор, позволяющий иметь на нагрузке оптимальное напряжение, которое отличается от оптимального рабочего напряжения коммутатора, а также осуществлять ввод энергии в разряд одиночным униполярным токовым импульсом. На рис.2 представлены типичные осциллограммы напряжения U на импульсно заряжаемой емкости C , подсоединенной к электродам через магнитный ключ L , и разрядного тока I .

Для эффективного излучения в спектральном диапазоне вблизи $\lambda = 13.5 \text{ нм}$ плазма должна иметь электронную температуру 20–30 эВ. Генерация высокотемпературной плазмы в схеме рис.1 реализуется следующим образом. При подаче высокого ($\sim 6 \text{ кВ}$) напряжения на предыонизатор зажигается скользящий разряд по внутренней поверхности

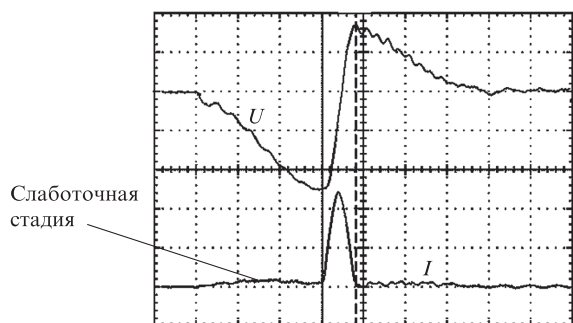


Рис.2. Осциллограммы напряжения U на импульсно заряжаемой емкости C и разрядного тока I (инвертирована) с амплитудными значениями -5 кВ и -50 кА соответственно. Масштаб временной шкалы 500 нс/дел.

керамической трубки 10 . Между плазмой скользящего разряда предыонизатора и заземленным электродом 2 , а затем между высоковольтным электродом 1 и заземленным электродом 2 зажигается предварительный, относительно слаботорочный (до 5 кА) разряд (рис.2), ограничиваемый током утечки заряда импульсно заряжаемого конденсатора C через магнитный ключ L в виде малоиндуктивного одновиткового насыщаемого дросселя. Вследствие скин-эффекта в процессе импульсного предразряда длительностью 1.5 мкс формируется расширяющаяся осесимметричная токово-плазменная оболочка, которая выходит во внеосевую часть разрядной области. Расширение этой оболочки прекращается у щелевого зазора 4 , препятствующего ее дальнейшему распространению и ограничивающего разрядную область, поскольку ширина щелевого зазора значительно меньше длины свободного пробега электронов в газе, и ионизация в зазоре отсутствует. После срабатывания магнитного ключа L (см. рис.1) реализуется сильноточная стадия разряда пинчового типа, длительность которой составляет 400 нс (рис.2). Происходит сжатие созданной в процессе предварительного разряда токово-плазменной оболочки магнитным полем протекающего по ней тока разряда пинчового типа и ее удержание на оси разрядной области в течение короткого времени. Плазменный пинч, образующийся на оси разрядной области, испускает коротковолновое излучение. Характерная длительность импульса излучения на длине волны 13.5 нм составляла 50 нс по полувысоте импульса и 200 нс – по уровню $1/e^2$.

Генерация разрядной плазмы в источнике ЭУФ излучения на основе модифицированного Z-пинча с применением предыонизации, слаботорочного предимпульса и возбуждения униполярным импульсом разрядного тока улучшает стабильность ЭУФ излучения от импульса к импульсу, обеспечивает возможность получения в нем малой области излучающей плазмы и достижения высокой яркости, повышает эффективность источника.

4. Эффективность и мощность ЭУФ источника

Регистрация энергии $E_{13.5}$ и мощности $P_{13.5}$ ЭУФ излучения в спектральной полосе 13.5 ± 0.135 нм выполнялась с помощью измерителя, включающего в себя два Mo/Si-зеркала и фотодиод AXUV-100 с фильтром, отсекающим УФ и видимое излучения. Измеритель калибровался по эталонному измерителю (Xtreme Technologies), калиброванному на синхротроне. На основании измерений эффективность конверсии (Conversion Efficiency) $CE_{13.5}$ вы-

числялась как отношение энергии, излучаемой в спектральной полосе 13.5 ± 0.135 нм в телесный угол 2π ср, к вводимой в разряд электрической энергии E_{in} . Величина $CE_{13.5}$ зависела прежде всего от давления ксенона, которое регулировалось газовым натекателем (стандартное натекание $40-80$ см³/мин).

По измерениям интенсивности ЭУФ излучения на расстоянии $l \approx 1.2$ м от плазмы Z-пинча при оптимальном давлении ксенона $CE_{13.5} = 0.43\%$.

Для $l \approx 0.82$ м измеренное значение $CE_{13.5}$ увеличивалось до 0.54% . Это обусловлено значительным уменьшением поглощения ЭУФ излучения в ксеноне при установке измерителя на меньшем расстоянии от плазмы. При этом измеренное давление Хе в вакуумной камере составило ~ 0.88 Па (6.6 мТор).

Одно из измерений на расстоянии от плазмы $l \approx 0.82$ м выполнено при размещении измерителя в трубке длиной 0.6 м, продуваемой гелием, поглощение ЭУФ излучения которым было незначительным. Измеренное значение $CE_{13.5}$ в этом случае увеличивалось до 0.71% . Расчетная оценка эффективности конверсии в непосредственной близости от плазмы дает $CE_{13.5} \approx 0.9\%$.

При измерениях энергии ЭУФ излучения на двух различных расстояниях от плазмы наблюдалось заметное уменьшение его поглощения в вакуумной камере с повышением, в частности, от 10 до 1800 Гц частоты следования импульсов. При этом измеренные значения $CE_{13.5}$ для $f = 1800$ Гц были выше, чем для $f = 10$ Гц. Это объяснялось образованием в разрядной области при $f = 1800$ Гц пробки горячего газа, уменьшающей выход в вакуумную камеру ксенона, что снижало поглощение ЭУФ излучения на его пути ($l = 1.2$ м) к измерителю.

Данные результаты показывают, что из-за значительного поглощения ксеноном излучения на длине волны 13.5 нм в непосредственной близости от плазмы эффективность конверсии $CE_{13.5}$ и мощность ЭУФ излучения $P_{13.5}$ источника в два раза выше, чем $CE_{13.5}$ и $P_{13.5}$, измеренные на расстоянии 1.2 м от источника. Как следует из экспериментов, одна из эффективных мер повышения $CE_{13.5}$ состоит в уменьшении отверстия анода, через которое ксенон поступает в вакуумную камеру, что допустимо при использовании источника для таких применений, как актиническая инспекция или метрология.

Далее, если не оговорено особо, приводятся значения $CE_{13.5}$, $E_{13.5}$ и $P_{13.5}$ ЭУФ источника, полученные в результате прямых измерений на расстоянии 1.2 м от плазмы.

На рис.3 для режима работы источника с $f = 1000$ Гц представлена зависимость $CE_{13.5}$ от E_{in} . Видно, что максимальные значения $CE_{13.5}$ достигаются в широком (от 9.5 до 16 Дж/имп.) диапазоне вводимой в разряд электрической энергии, которая варьировалась изменением за-

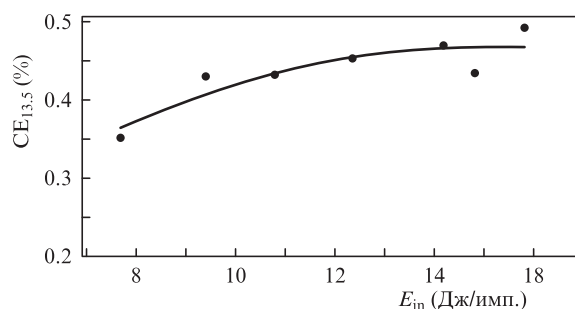


Рис.3. Зависимость эффективности конверсии $CE_{13.5}$ от вводимой в разряд энергии E_{in} при $f = 1000$ Гц.

рядного напряжения источника питания. Это свидетельствует о возможности эффективного поддержания стабилизированной мощности ЭУФ в долговременном режиме за счет его управления зарядным напряжением.

На рис.4 представлена зависимость мощности ЭУФ излучения от вводимой в разряд мощности $P_{in} = E_{in}f$ в непрерывном режиме: каждому отмеченному значению P_{in} соответствовало 5×10^6 импульсов. Для максимального уровня вводимой мощности $P_{in} = 20.7$ кВт при $f = 1.9$ кГц в непрерывном режиме получена максимальная средняя мощность ЭУФ излучения в телесный угол 1.8 ср, составившая 34.7 Вт: $P_{13.5} = 34.7$ Вт(1.8 ср) $^{-1}$. В пересчете на пространственный угол 2π ср мощность источника составляет 118.5 Вт(2π ср) $^{-1}$ при прямом измерении на расстоянии 1.2 м от источника. С учетом измеренного погло-

щения в ксеноне в непосредственной близости от плазмы мощность ЭУФ излучения достигает 190 Вт(2π ср) $^{-1}$.

5. Размеры излучающей плазмы и яркость ЭУФ источника

Для оптимизации ЭУФ источника экспериментально определялись его размеры при различных конфигурациях электродной системы и условиях возбуждения разряда. Регистрация изображения и определение размеров области плазмы, излучающей в ЭУФ диапазоне, осуществлялись с помощью камеры-обскуры с диафрагмой диаметром 100 мкм. Камера-обскура снабжена фильтром из Zr-фольги толщиной 200 нм (для отсеивания видимого и УФ излучений), цифровой ПЗС-матрицей, на которую для преобразования ЭУФ излучения в детектируемый видимый свет нанесен фосфоресцирующий слой, и программным обеспечением. Схема регистрации позволяла получать изображение как единичного импульса, так и наложенное или усредненное изображение нескольких импульсов, следующих с $f \leq 1000$ Гц. Для одновременного измерения продольного и поперечного размеров ЭУФ источника камера-обскура устанавливалась под достаточно большим (36.5°) углом к оси источника.

Как показали измерения, размеры изображения зависят от геометрии разряда, давления ксенона и вводимой в разряд электрической энергии. Для оптимизированной

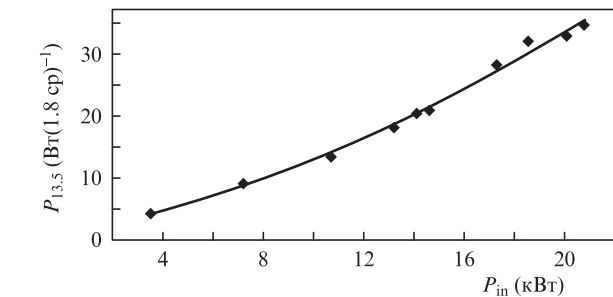


Рис.4. Зависимость мощности ЭУФ излучения источника в непрерывном режиме от вводимой в разряд мощности.

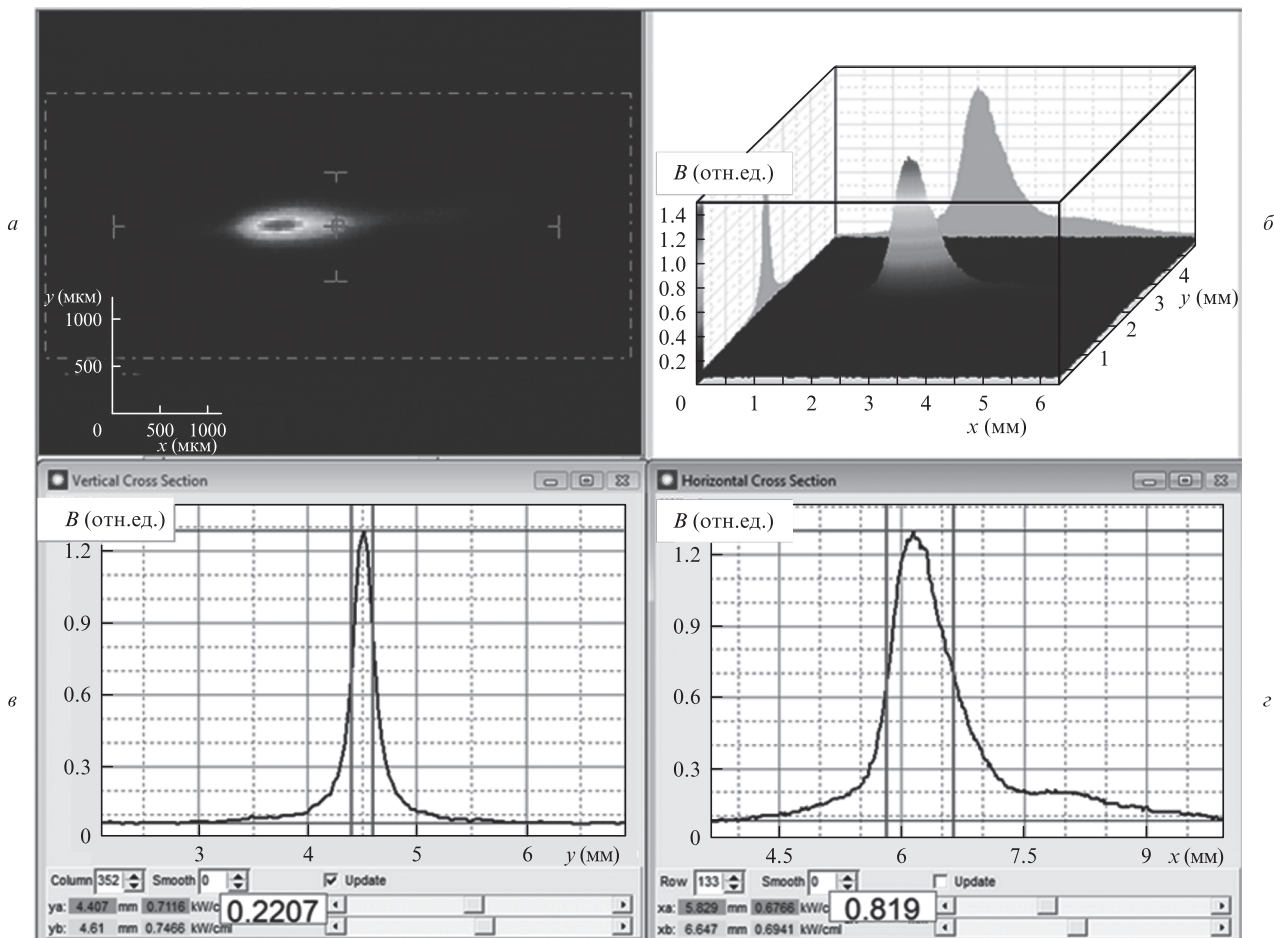


Рис.5. Усредненное по 10 импульсам при $f = 1000$ Гц изображение излучающей в ЭУФ диапазоне ксенонной плазмы, полученное под углом 36.5° к оси источника (а), и соответствующие распределения яркости B – трехмерное (б) и по двум взаимно-перпендикулярным направлениям (в, г).

геометрии электродов (см. рис.1) и оптимального давления ксенона на рис.5 представлено изображение ЭУФ источника, полученное под углом $\sim 36.5^\circ$ к оси, и профили его яркости B для суперпозиции 10 последовательных импульсов при $f = 1000$ Гц и $E_{in} = 9.6$ Дж/имп. В соответствии с данными рис.5 усредненный по 10 импульсам поперечный размер был определен как 0.22 мм по уровню яркости 1/2 и 0.53 мм по уровню $1/e^2$; продольные размеры были равны соответственно 1.4 и 2.8 мм. Размеры излучателя достаточно хорошо согласуются с требованиями, предъявляемыми к источнику для ЭУФ литографии.

Измерения с усреднением по различному количеству импульсов (от 2 до 20) показали высокую пространственную стабильность области плазмы, излучающей в ЭУФ диапазоне.

Измерения под разными углами к оси z дали следующие значения силы излучения в полосе 13.5 ± 0.135 нм при $l = 1.2$ м и $f = 1000$ Гц: 7.2 Вт/ср (40°), 7.2 Вт/ср (20°), 7.12 Вт/ср (7°) и 6.5 Вт/ср (0°). Эти результаты свидетельствуют о близком к изотропному угловом распределении интенсивности ЭУФ излучения.

Пиковое значение яркости B_{peak} на оси источника, как и в [8], определялось следующим образом:

$$B_{peak} = \frac{CE_{13.5}fE_{in}}{\zeta\pi r_{1/2}^2},$$

где

$$\zeta = \frac{2 \int_0^\infty f(r) dr}{r_{1/2}^2}$$

– коэффициент нормированного ($f(0) = 1$) профиля яркости источника; $r_{1/2}$ – его радиус по уровню 1/2.

Для измеренных на оси источника значений $r_{1/2} = 0.11$ мм, $\zeta = 3.9$, $CE_{13.5} = 0.39\%$ при $f = 1000$ Гц и $E_{in} = 9.6$ Дж яркость ЭУФ источника $B_{peak} = 40.2$ Вт/(мм²·ср)⁻¹. Затраты на получение яркости $B_{peak}/(fE_{in})$ в спектральном диапазоне 13.5 ± 0.135 нм составляют 4.2 Вт/(кВт·мм²·ср)⁻¹.

В соответствии с этим согласно оценкам B_{peak} для реализованного режима работы с вводимой мощностью 20 кВт составляет ~ 85 Вт/(мм²·ср)⁻¹ на расстоянии 1.2 м от плазмы или около 135 Вт/(мм²·ср)⁻¹ в непосредственной близости от нее.

6. Характеристики источника в долговременном режиме работы

Исследования показали, что источник с бескерамической электродной системой (см. рис.1) при оптимизированных условиях обладает рядом с высокой пространственной также и высокой энергетической стабильностью. В четырехчасовом тесте с непрерывным режимом работы при средней вводимой мощности 9.6 кВт и $f = 1000$ Гц относительная нестабильность σ энергии импульсов ЭУФ излучения находилась в пределах 2.2%–1.5%.

Благодаря использованию высокоэффективного водяного охлаждения источник выдерживал многочасовую непрерывную работу с вводимой электрической мощностью до $P_{in} = 21$ кВт без оплавления электродов.

Тем не менее время непрерывной работы источника ограничено эрозией электродов и, в первую очередь, эрозией катода, имеющего меньшую по сравнению с анодом поверхность вблизи центрального осевого отверстия,

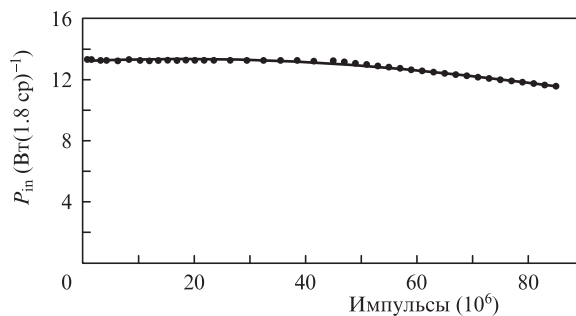


Рис.6. Зависимость мощности излучения источника от числа импульсов в непрерывном режиме при вводимой мощности 10.5 кВт и $f = 1100$ Гц.

подверженную экстремально высокой тепловой нагрузке. В результате геометрия катода из-за эрозии изменяется быстрее, чем анода.

В процессе непрерывной работы ЭУФ источника с $f = 1.7$ кГц и $E_{in} = 8.2$ Дж/имп. после 0.8×10^8 импульсов эрозия катода с диаметром осевого отверстия 5 мм, определенная взвешиванием до и после испытаний, составила 0.4×10^{-7} г/имп. (0.4×10^{-5} г/Кл). Замена только катода приводила к восстановлению параметров источника. На рис.6 показана зависимость мощности излучения источника в течение теста с вводимой мощностью 10.5 кВт при $f = 1100$ Гц. Видно, что мощность сохраняется неизменной на протяжении первых 50×10^6 импульсов, а затем в результате эрозии электродов снижается на 13% в течение следующих 40×10^6 импульсов. При этом центр пинча смещается к катоду приблизительно на 1 мм.

Подобные исследования показали, что для поддержания выходных параметров ЭУФ источника неизменными необходима замена по меньшей мере рабочей части катода примерно через каждые 50×10^6 импульсов. Возможность такой быстрой смены электродных узлов и их восстановления для последующей эксплуатации обеспечивает разработанная конструкция источника с бескерамической электродной системой и щелевой вакуумной изоляцией между электродами.

7. Подавление потока корпускулярного излучения

Поскольку наряду с излучением из области разряда генерируется поток загрязняющих частиц (debris), между источником излучения и оптическим коллектором размещают систему его защиты от корпускулярного излучения. Система защиты оптического коллектора, или DMT (Debris Mitigation Tool), включает в себя комбинацию одной или двух ловушек из фольги и буферного газа. В качестве буферного газа, эффективно замедляющего атомы и ионы, обычно используют аргон или гелий, а также водород при давлении в несколько паскаль.

Преимуществом разработанной электродной системы (см. рис.1) является отсутствие керамического изолятора между анодом и катодом, который может давать наибольшее количество загрязнений. Однако особенности конструкции, связанные с использованием вместо разделительной керамики щелевой изоляции, оставляли открытым вопрос о возможности эффективного применения DMT с буферным газом.

Проведенные в этой связи исследования показали, что энергетические и пространственные характеристики ЭУФ источника не ухудшаются при установке охлаждаемой ло-

втушки из фольги, аналогичной использовавшейся в [3] с защитным газом аргоном. Высокие средняя мощность и яркость источника сохранялись при введении вблизи анода потока Ar. Было показано, что вакуумная изоляция между катодом и анодом работоспособна вплоть до давления аргона 10 Па, превышающего давление защитного газа, достаточное для эффективного использования ДМТ.

Кроме этого в работе источника был обнаружен эффект, зависящий от давления газа и влияющий на характер распространения потока загрязняющих частиц из зоны плазмообразования. При высоких давлениях, оптимальных для работы источника, наблюдаемый эффект состоял в том, что более 50% эродирующего материала электродов возвращалось на анод и осаждалось на торцевой нерабочей части анода. Данный эффект несомненно способствует защите коллекторной оптики от загрязнений.

8. Заключение

Проведенные исследования по разработке высокояркого источника ЭУФ излучения на основе Z-пинча в ксеноне продемонстрировали достижение мощности излучения $P_{13.5} = 34.7 \text{ Вт} \cdot (1.8 \text{ ср})^{-1}$ на расстоянии $l = 1.2 \text{ м}$ от плазмы при $P_{\text{in}} = 20.7 \text{ кВт}$, $f = 1.9 \text{ кГц}$ в непрерывном режиме. По данным измерений поглощения ЭУФ излучения в ксеноне, мощность источника в непосредственной близости от плазмы в пересчете на пространственный угол $2\pi \text{ ср}$ достигает $\sim 190 \text{ Вт} \cdot (2\pi \text{ ср})^{-1}$. В соответствии с известными данными [3] этого достаточно для поддержания мощности ЭУФ излучения 10–20 Вт в промежуточном фокусе.

Пиковая яркость ЭУФ источника, измеренная на расстоянии $l = 1.2 \text{ м}$ от плазмы, при $P_{\text{in}} = 9.6 \text{ кВт}$ составила $40.2 \text{ Вт} \cdot (\text{мм}^2 \cdot \text{ср})^{-1}$, а для реализованного режима работы с вводимой мощностью 20 кВт она достигла $\sim 8 \text{ Вт} \cdot (\text{мм}^2 \cdot \text{ср})^{-1}$.

Полученные значения яркости являются наивысшими для газоразрядных источников ЭУФ излучения. Это определяет перспективность их использования для активной (на $\lambda = 13.5 \text{ нм}$) инспекции ЭУФ масок, в ЭУФ метрологии, а также в микроскопии и томографии биологических объектов.

За счет формирования модифицированного Z-пинча с применением предыонизации, слаботочного предимпульса и возбуждения униполярным импульсом разрядного тока улучшаются пространственная и энергетическая стабильности ЭУФ источника. Он характеризуется малым ($1.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{ср}$) геометрическим фактором, что отвечает требованиями, предъявляемыми к источнику для ЭУФ литографии, указывая на возможность его использования в ЭУФ сканере небольшой производительности.

Использование бескерамической разрядной системы уменьшает поток загрязняющих частиц из области плазмообразования, а следовательно, повышает надежность и ресурс источника. Показаны возможности высокоэффективной работы источника в сочетании с ловушкой из фольги или ДМТ, а также развития новых методов подавления корпускулярного излучения разряда, основанных на использовании электромагнитных полей и контролируемых газовых и плазменных потоков, которые могут стать дополнением к существующим методам.

Для поддержания неизменных выходных параметров ЭУФ источника его конструкция должна предусматривать возможность быстрой замены электродного узла, необходимой примерно через каждые 50×10^6 импульсов

из-за электродной эрозии, что достаточно легко реализуемо в разработанной конструкции с щелевой изоляцией между электродами.

Полученные результаты согласуются с данными работы [8] о перспективности развития для актинической инспекции высокоярких ЭУФ источников на основе Z-пинча в ксеноне.

В то же время нами исследуются другие подходы, лишённые недостатка, связанного с ограниченным ресурсом электродной системы газоразрядных ЭУФ источников. В последующих публикациях мы планируем представить результаты работ по созданию и исследованию высокоярких ЭУФ источников – во-первых, на основе плазмы лазерно-индуцированного разряда между жидкометаллическими электродами и, во-вторых, на основе лазерной плазмы жидкометаллических мишеней.

Авторы выражают благодарность доктору Уве Штамму, вице-президенту ASML, за инициирование работы и Вивеку Бакши, президенту EUV Litho Inc. (США), за проявленный интерес к работе.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по Соглашению №14.579.21.0004 от 05.06.2014 г. на выполнение прикладных научных исследований в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Разработка актинического источника излучения для инспекции наноструктур в области нано- и микроэлектроники» (уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57914X0004). Работа также поддержана РФФИ (грант №12-08-00528-а).

- Banine V., Yakunin A., Glushkov D. *Proc. Intern. Workshop Extreme Ultraviolet Sources* (Dublin, Ireland, 13–15 November 2010).
- Chkhalo N.I., Salashchenko N.N. *Proc. Intern. Workshop EUV and Soft X-Ray Sources* (Dublin, Ireland, 3–7 November 2013).
- Stamm U., Kleinschmidt J., Bolshukhin D., Borisov V.M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6151**, 190 (2006).
- Rollinger B., Gambino N., Giovannini A., Bozinova L., Alickaj F., Hertig K., Abhari R.S., Abreau F. *Proc. Intern. Workshop EUV and Soft X-Ray Sources* (Dublin, Ireland, 3–7 November 2013).
- Gustafson D. *Proc. 2011 Intern. Workshop EUV Lithography* (Maui, Hawaii, 13–17 June 2011).
- Gustafson D., Horne S.F., Besen M.M., Smith D.K., Partlow M.J., Blackborow P.A. *Proc. Intern. Workshop EUV and Soft X-Ray Sources* (Dublin, Ireland, 8–11 October 2012).
- Zakharov S. *Proc. Intern. Workshop EUV and Soft X-Ray Sources* (Dublin, Ireland, 3–7 November 2013).
- Benk M., Bergmann K. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, **11** (2), 021106 (2012).
- Zakharov V., Zakharov S. *Proc. Intern. Workshop EUV and Soft X-Ray Sources* (Dublin, Ireland, 3–7 November 2013).
- Борисов В.М., Кузьменко В.А., Христофоров О.Б. *Инженерная физика*, **4**, 34 (2014).
- Borisov V., Eltsov A., Ivanov A., Khristoforov O., et al. *J. Phys. D Appl. Phys.*, **37**, 3254 (2004).
- Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Иванов А.С., Кирюхин Ю.Б., Мищенко В.А., Прокофьев А.В., Христофоров О.Б. *Квантовая электроника*, **39** (10), 967 (2009).
- Borisov V., Eltsov A., Ivanov A., Khristoforof O., et al., in *Ref. EUV Sources for Lithography* (Washington: SPIE Press, 2006, p.407).
- Борисов В.М., Борисова Г.Н., Виноходов А.Ю., Захаров С.В., Иванов А.С., Кирюхин Ю.Б., Мищенко В.А., Прокофьев А.В., Христофоров О.Б. *Квантовая электроника*, **40** (8), 720 (2010).
- Banine V.Ye., Koshelev K.N., Swinkels G.H.P.M. *J. Phys. D Appl. Phys.*, **44**, 253001-1-18 (2011).
- Banine V.Ye., Koshelev K.N., Swinkels G.H.P.M. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, **11** (2), 021112-1-6 (2012).