

ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ЭУФ ЛИТОГРАФИИ

Источник ЭУФ лазерно-индуцированного излучения высокой яркости на основе оловянной плазмы с неограниченным ресурсом электродов

А.Ю.Виноходов, В.М.Кривцун, А.А.Лаш, В.М.Борисов, О.Ф.Якушев, К.Н.Кошелев

Исследованы характеристики источника лазерно-индуцированного излучения экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазона, которое получено в разряде между двумя струями жидкого олова, и продемонстрирована возможность создания на его основе источника ЭУФ излучения высокой яркости для использования в технологиях инспекции масок для проекционной ЭУФ литографии. Получена средняя эффективность конверсии электрической энергии в излучение спектрального диапазона 13.5 ± 0.135 нм, равная примерно $2\%/2\pi$ ср, с размером излучающей плазмы 0.2×0.35 мм. Продемонстрирована возможность создания источника ЭУФ излучения с яркостью около $200 \text{ Вт}/(\text{мм}^2 \cdot \text{ср})$.

Ключевые слова: источник излучения ЭУФ диапазона, ЭУФ литография, плазма, разряд, лазер, струя жидкого олова, яркость источника.

1. Введение

Основная тенденция развития промышленного производства полупроводников состоит в последовательном уменьшении характеристического размера элементов микросхем и, следовательно, в увеличении плотности транзисторов на интегральной схеме. В массовом производстве микросхем используется метод оптической проекционной литографии. В обозримом будущем этому методу нет альтернативы, так как другие виды литографических процессов (рентгенолитография, электронно-лучевая и ионно-лучевая литографии), хотя и обладают высокой разрешающей способностью, не могут обеспечить достаточную производительность при массовом производстве микросхем. В настоящее время оптическая литография, использующая в качестве источников излучения эксимерный ArF-лазер ($\lambda = 193$ нм), достигла предела оптического разрешения $R = k_1 \lambda / \text{NA}$, где k_1 – литографический коэффициент, зависящий от применяемого фоторезиста и технологического процесса, а NA – числовая апертура объектива литографа. Даже использование технологий иммерсионной литографии и двойного экспонирования в традиционной оптической литографии не позволяет получать структуры с разрешением менее 22 нм. Общеизвестно [1, 2], что дальнейшее развитие проекционной литографии для массового производства микросхем связано с использованием в ней источников ЭУФ излучения

с $\lambda \leq 13.5$ нм, в частности плазменных источников, как на основе электроразрядной плазмы (DPP-источники) [3, 4], так и на основе лазерной плазмы (LPP-источники) [3, 5]. Рабочим веществом во всех типах плазменных источников ЭУФ излучения могут служить Xe, Sn, эвтектические сплавы на основе Sn и Li. Литографы, использующие плазменные источники ЭУФ излучения обоих типов, уже созданы и работают в тестовом режиме. Хотя в соревновании этих двух типов источников при массовом производстве микросхем в настоящее время выигрывают LPP-источники, однако DPP-источники также находят свое применение в ЭУФ литографии. В частности, на их основе разрабатываются измерительные комплексы, предназначенные для инспекции масок, они используются для тестирования и контроля элементов оптической системы: зеркал, фоторезистов.

Общая тенденция, наблюдающаяся в ЭУФ литографии, состоит в переходе от диагностики готовых микросхем и их дальнейшей выбраковки к диагностике масок [6]. Дефекты маски, как ее многослойного покрытия, так и топологического рисунка, нанесенного на ней, в основном вызваны осаждающимися в процессе изготовления маски наночастицами размером 10–50 нм, которые искажают нанесенную отражательную структуру и способствуют появлению дефектов печати на микросхемах, тем самым делая непригодным для дальнейшего использования фоторезист, прошедший весь технологический цикл. К дефектности масок предъявляются очень высокие требования: не более одного дефекта нанометрового масштаба на несколько сотен квадратных сантиметров. Доля стоимости масок повышается с увеличением оптического разрешения и составляет в настоящее время почти 50% от стоимости готового фоторезиста [7]. Для производства одной микросхемы требуется набор из 20–60 масок. Одна ошибка при изготовлении одной маски может стоить нескольких миллионов долларов. В то же время стоимость диагностического комплекса для инспекции масок будет составлять около 5 млн. долларов, т. е. выявление всего нескольких дефектных масок окупит стоимость комплекса для инспекции масок. Стоимость производства одной ма-

А.Ю.Виноходов, А.А.Лаш. ООО «ЭУФ Лабс», Россия, 142190 Москва, Троицк, Сиреневый б-р, 1; e-mail: avinokhod@gmail.com, lashrnd@gmail.com

В.М.Кривцун, К.Н.Кошелев. ООО «ЭУФ Лабс», Россия, 142190 Москва, Троицк, Сиреневый б-р, 1; Институт спектроскопии РАН, Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Физическая, 5

В.М.Борисов. АО ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиных, 1

О.Ф.Якушев. «ЭУФ Лабс», Россия, 142190 Москва, Троицк, Сиреневый б-р, 1; Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 19 августа 2014 г.

ски для ЭУФ литографии составляет 100–300 тыс. долларов. По минимальным оценкам рынок таких масок к 2020 г. может составить 500 млн. долларов. Поэтому наличие инструментов для инспекции масок является одним из ключевых факторов успеха технологии ЭУФ литографии.

Основным элементом комплекса для инспекции масок является источник ЭУФ излучения высокой яркости с длиной волны 13.5 нм. Для различных технологий масочной инспекции требуются источники яркостью от 50 до примерно 1000 Вт/(мм²·ср), излучающие в диапазоне $\lambda = 13.5 \pm 0.135$ нм, и значением этендую собирающей оптической системы примерно $10^{-3} - 10^{-4}$ мм²·ср (этендую определяется как произведение площади источника на телесный угол, в котором собирается его излучение). В настоящее время наибольших успехов в создании источника ЭУФ излучения высокой яркости для инспекции масок добилась компания Adlyte Ltd [8], использующая LPP-метод получения ЭУФ излучения. В качестве мишени в источнике использовались капли олова диаметром 60 мкм, частота генерации капель составляла более 6 кГц. Была получена средняя яркость источника ЭУФ излучения 350 Вт/(мм²·ср). Однако достигнутая стабильность энергии импульсов ЭУФ излучения от импульса к импульсу (относительное среднеквадратичное отклонение $\sigma = 3\%$) была значительно хуже, чем требуется. Необходимо также отметить яркостный ЭУФ источник производства компании Ushio Inc. на основе лазерно-индуцированной разрядной оловянной плазмы [9]. Средняя яркость источника составила 180 Вт/(мм²·ср) при частоте следования разрядных импульсов 10 кГц, однако стабильность энергии от импульса к импульсу была всего 6.6%. Другим существенным недостатком этого типа источников является эрозия электродов, ограничивающая ресурс их работы, и значительный уровень корпускулярных продуктов плазмохимических реакций. Источник компании Energetiq [10] создан на основе безэлектродной разрядной плазмы в ксеноне. К его недостаткам относится очень низкая (менее 10 Вт/(мм²·ср)) яркость, а также плохая пространственная стабильность излучающей плазмы, к достоинствам – незначительный уровень продуктов плазмохимических реакций. Таким образом, в настоящее время задача создания источника ЭУФ излучения высокой яркости на длине волны 13.5 нм для масочных инспекций в ЭУФ литографии пока не решена.

Помимо яркости, стабильности и малого размера излучающей плазмы одним из основных требований к таким источникам является ресурс их работы. В источниках ЭУФ излучения на основе лазерной плазмы наиболее слабым звеном, ограничивающим ресурс их работы, является сопельный узел, посредством которого формируются капли рабочего вещества. В электроразрядных источниках таким элементом являются электроды, срок службы которых из-за их эрозии обычно ограничен примерно 10^8 разрядными импульсами. Поэтому разработка лазерно-индуцированного источника ЭУФ излучения с электродами, обладающими практически неограниченным сроком службы, представляет несомненный научный и практический интерес. В настоящей работе электродами разрядной системы служат струи жидкого олова, которое циркулирует в замкнутом контуре с помощью насоса. Подобный метод организации разряда был использован нами ранее в работе [11], где рабочим веществом был эвтектический сплав Ga–Sn с атомным содержанием олова 8.5% и температурой плавления 20.5 °С, что позволяло

работать при комнатной температуре. В такой конструкции электродной системы происходит непрерывное обновление рабочей поверхности электродов (места фокусировки излучения инициирующего лазера, а значит, и разряда), тем самым снимается проблема эрозии электродов. Максимально достигнутое значение коэффициента конверсии электрической энергии в излучение (СЕ) диапазона $\lambda = 13.5 \pm 0.135$ нм составило 1.3%/2 π ср. Однако использование в качестве рабочего вещества сплава, содержащего Ga, повлекло за собой значительные технологические трудности, связанные, прежде всего, с агрессивностью Ga, что не позволяло рассчитывать на использование такого источника ЭУФ излучения в технологиях ЭУФ литографии. В данной статье мы продолжили исследования лазерно-индуцированного электроразрядного источника ЭУФ излучения со струйными жидкометаллическими электродами, но в качестве рабочего вещества вместо эвтектического сплава Ga–Sn использовали 100% Sn. Во-первых, использование Sn позволило увеличить СЕ, во-вторых, корпускулярные продукты плазмохимических реакций от оловянной плазмы не столь агрессивны, как от галлиевой плазмы, и существуют технологии их нейтрализации. Таким образом, подобный источник мог бы использоваться в технологиях ЭУФ литографии, в частности в диагностических комплексах инспекции масок.

2. Экспериментальная установка

Основной особенностью данного источника ЭУФ излучения, во многом предопределяющей его конструктивные решения и отличающей его от описанного в [11], является то, что температура рабочего вещества – олова, непрерывно циркулирующего по замкнутому контуру, – должна поддерживаться в диапазоне 260–300 °С. На рис. 1 и 2 показаны функциональная схема и фотография источника, сделанная со стороны фронтального фланца с расположенными на нем диагностическими патрубками. Источник представлял собой многокомпонентную физиче-

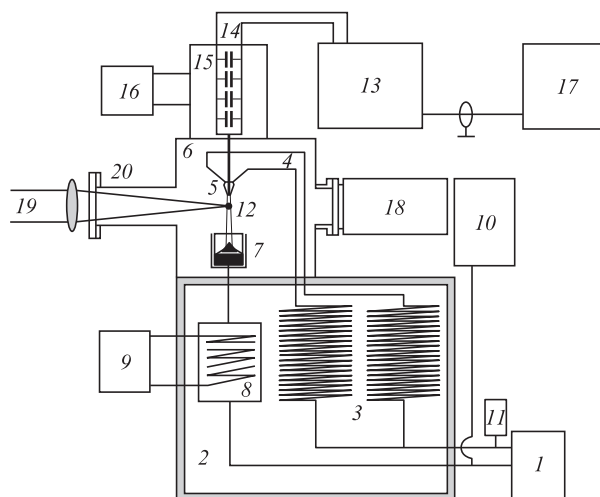


Рис. 1. Функциональная схема ЭУФ источника: 1 – центробежный насос; 2 – термостат; 3 – блокирующие дроссели; 4 – подающие трубки; 5 – сопла; 6 – вакуумная камера; 7 – коллектор олова; 8 – масляный теплообменник; 9, 16 – водяные теплообменники; 10 – напорный бак; 11 – датчик давления; 12 – струи олова; 13 – импульсная система накачки разряда; 14 – разрядный конденсатор; 15 – масляный бак; 17 – высоковольтный выпрямитель; 18 – турбомолекулярный насос; 19 – лазерный пучок; 20 – узел ввода лазерного излучения.

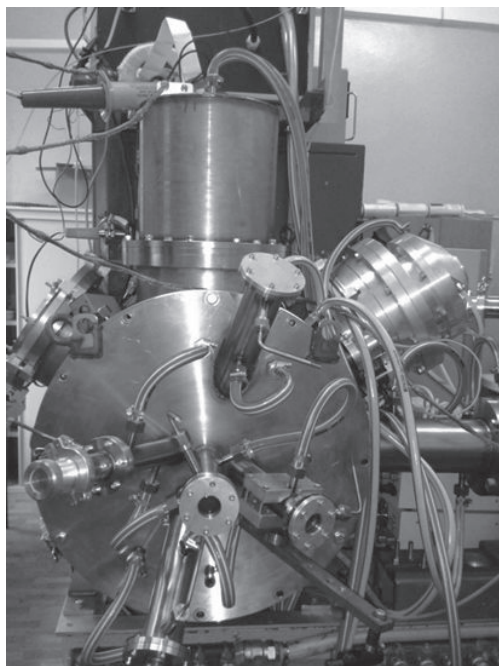


Рис.2. Фотография источника ЭУФ излучения со стороны диагностического фланца вакуумной камеры.

скую установку, состоящую из нескольких систем: системы прокачки жидкого олова, включающей специально разработанный насос; системы разогрева контура прокачки жидкого олова и насоса; системы электропитания и возбуждения разряда; оптической системы, включающей иницирующий лазер; газо-вакуумной системы; системы охлаждения и диагностики ЭУФ излучения.

Система прокачки жидкого олова включала в себя: центробежный насос 1; термостат 2; блокирующие дроссели 3; подающие трубки 4; сопла 5, размещенные в вакуумной камере 6; коллектор олова 7 с установленным внутри него рассекателем струй; масляный теплообменник 8, соединенный с водяным теплообменником 9; напорный бак 10; датчик давления 11. В системе использовался один контур прокачки олова, в котором есть как высоковольтная, так и заземленная часть. Электрическая изоляция между ними осуществлялась путем использования импульсной зарядки, блокирующих дросселей 3 с индуктивностью $L \approx 100$ мкГн и рассекателей струй в коллекторе олова. В дальнейшем из-за сильного разбрызгивания олова эта конструкция коллектора была заменена на конструкцию с керамическим коллектором большой длины, что позволяло струям олова фрагментироваться раньше, чем они достигали дна коллектора. Большая часть элементов системы располагалась в термостате, в котором поддерживалась температура примерно 260–300 °С. Прокачка олова по контуру осуществлялась с помощью специально разработанного центробежного насоса с приводом от магнитной муфты и керамическими подшипниками скольжения [12]. В качестве теплового барьера между магнитами муфты и расплавленным оловом использовался вакуумный промежуток, где поддерживалось давление около 10^{-2} мбар. На рис.3 показана зависимость скорости струй олова (12, рис.1) от угловой скорости вращения электродвигателя насоса при использовании турбины диаметром 60 мм. Видно, что максимальная достигнутая скорость двух струй олова диаметром 2 мм каждая составила 9 м/с при угловой скорости вращения

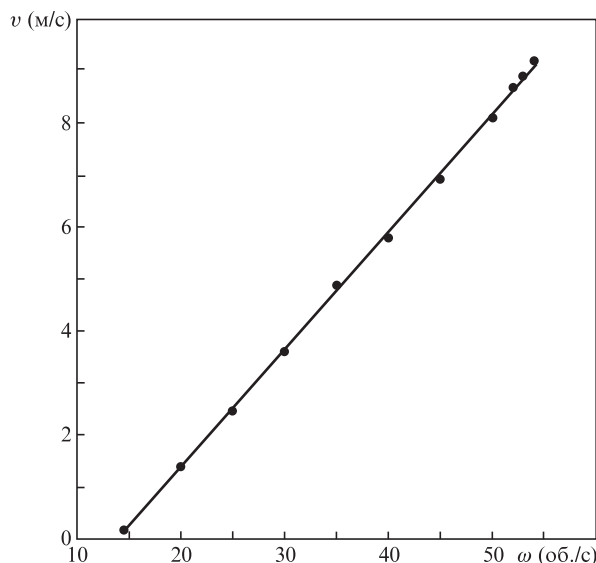


Рис.3. Зависимость скорости двух струй олова диаметрами 2 мм от скорости вращения электродвигателя насоса (турбина диаметром 60 мм).

турбины 53 об./с. Проверенный ресурс работы насоса на жидком олове составил несколько сотен часов. Следует отметить, что в настоящее время мы разработали и испытали насос для прокачки легкоплавких металлов и высокотемпературных (до 400 °С) агрессивных сред, способный обеспечивать выходное давление до 8 атм, а скорость струй до 15 м/с. Предполагается использование этого насоса и в экспериментах с LPP-источниками ЭУФ излучения высокой яркости, где с его помощью будет создаваться струя жидкого металла, являющегося мишенью для сфокусированного лазерного излучения. В экспериментах с лазерно-индуцированным источником использовались сопла с различным поперечным сечением: круглые диаметрами 2 и 3 мм, прямоугольные размерами 2.5×1 и 10×0.3 мм, а также их комбинации.

В источнике ЭУФ излучения применялась импульсная система накачки разряда (13, рис.1), работа которой основана на двойной емкостной перезарядке конденсаторов. Малоиндуктивная сборка конденсаторов 14, состоящая из керамических конденсаторов (Murata), помещалась в бак 15, через который прокачивалось масло, осуществляющее их охлаждение. Масло с помощью насоса поступало в водяной теплообменник 16. Коммутация схемы возбуждения разряда осуществляется с помощью IGBT-модулей. Основные параметры схемы возбуждения (емкость $C = 0.67$ мкФ, зарядное напряжение $U_{dis} = 4$ кВ, время зарядки разрядного конденсатора $\Delta t = 4$ мкс, индуктивность разрядного контура $L = 12.5$ нГн) позволяли получить амплитуду разрядного тока I_{dis} до 26 кА. Максимальная частота следования импульсов возбуждения разряда f_{max} в данных экспериментах составляла 4 кГц и ограничивалась мощностью высоковольтного выпрямителя 17, хотя импульсная часть схемы возбуждения была способна обеспечить долгосрочную работу при $f = 8$ кГц. Но уже при $f = 4$ кГц происходила подсадка зарядного напряжения из-за ограниченной мощности используемого нами высоковольтного выпрямителя, так что вводимая в разряд энергия E в этом случае составляла 3.4 Дж, тогда как $E = 4.8$ Дж при $f < 1$ кГц.

Корпус вакуумной камеры 6 и все диагностические патрубки имели двойные стенки, между которыми про-

качивалась вода, что позволяло эффективно отводить тепло и долговременно работать при высоких частотах следования без риска перегреть и разгерметизировать вакуумную камеру, которая откачивалась турбомолекулярным насосом 18 до давления 10^{-5} мбар. Для защиты диагностических приборов и узла ввода лазерного пучка от продуктов плазменных реакций в соответствующие патрубки с помощью натекаателей подавался аргон, так что рабочее давление в камере составляло 10^{-4} мбар.

Для разогрева всех элементов системы прокачки жидкого олова использовались различные типы нагревателей: кварцевые, ленточные, хомутовые, а также нагревательный кабель в нержавеющей корпусе (последний использовался в вакуумной камере). Нагреватели, расположенные на высоковольтной части системы, во время подачи высокого напряжения отключались от источников питания с помощью масляного размыкателя. Нагреватели питались от регулируемых источников, что позволяло поддерживать стабильную температуру всех элементов системы прокачки олова. Контроль температуры осуществлялся терморезисторами и ПИД-регуляторами. Всего использовалось 16 каналов контроля температуры элементов системы прокачки жидкого олова.

Пучок лазерного излучения 19 вводился в вакуумную камеру через узел ввода 20, в котором смонтировано устройство защиты входного окна от загрязнений потоком аргона. Для инициирования разряда использовались два различных Nd:YAG-лазера. Лазеры имели следующие параметры: первый – энергия в импульсе $E_{\text{las}} = 80$ мДж (на мишени), длительность импульса $\tau_{\text{FWHM}} = 25$ нс, плотность мощности излучения $P = 1.6 \times 10^9$ Вт/см² (при использовании фокусирующей линзы с $F = 62$ см), $f_{\text{max}} = 100$ Гц; второй – $E_{\text{las}} = 25$ мДж (на мишени), $\tau_{\text{FWHM}} = 90$ нс, $P = 10^8$ Вт/см² (при $F = 62$ см), $f_{\text{max}} = 10$ кГц. В то же время при использовании линзы с $F = 31$ см удалось увеличить плотность мощности второго лазера до 2.3×10^8 Вт/см². Таким образом, плотности мощности сфокусированного лазерного излучения у этих лазеров различались в 16 раз. Излучение лазера проходило через телескоп, который позволял получить параллельный лазерный пучок диаметром 40 мм, затем – два диэлектрических зеркала и фокусирующую линзу и через узел ввода вакуумной камеры фокусировалось на заземленную струю олова, являющуюся катодом разрядной системы.

Система охлаждения источника включала в себя водяное охлаждение корпуса вакуумной камеры, блока IGBT в схеме импульсной зарядки и масляных теплообменников, а также масляное охлаждение разрядных конденсаторов, насоса и теплообменника системы прокачки олова. Водяное охлаждение осуществлялось проточной водопроводной водой, масляное – по замкнутым контурам с помощью центробежных насосов.

Диагностика ЭУФ излучения включала в себя измерение спектральных, временных, энергетических и пространственных характеристик источника, которое проводилось через патрубки, расположенные на переднем фланце вакуумной камеры (рис.2). Для измерения энергии импульса и его формы использовались калиброванный (абсолютно) «медленный» фотодиод AXUV-100 (емкостью $C = 10$ нФ) с напыленным на его рабочую поверхность Mo/Si-фильтром и «быстрый» фотодиод AXUV-HS5 ($C = 0.04$ нФ). Дополнительная спектральная фильтрация в канале осуществлялась с помощью многослойного Mo/Si-зеркала. Спектральная полоса пропускания канала состав-

ляла $\Delta\lambda = 12.7-13.2$ нм. Кроме того, измерения энергии импульсов ЭУФ излучения проводились по другой методике: по известному калибровочному коэффициенту фотодиода AXUV-100 без напыленного фильтра, равному 0.19 К/Дж, измерялась энергия импульса во всем ЭУФ диапазоне, учитывались спектральные зависимости коэффициента пропускания фильтра и коэффициента отражения зеркала, после чего вычислялась энергия ЭУФ сигнала в диапазоне $\lambda = 13.5 \pm 0.135$ нм. Измерение размеров излучающей в ЭУФ диапазоне плазмы проводилось с помощью CCD-камеры CS-8300 (TELI) и камеры-обскуры ($\varnothing 100$ мм) через циркониевый фильтр со спектральной полосой пропускания $\Delta\lambda = 5-21$ нм. Спектр излучения плазмы измерялся с помощью спектрографа скользящего падения (спектральный диапазон $\Delta\lambda = 3-60$ нм, разрешение $\lambda/\delta\lambda = 300$), в котором использовалась дифракционная решетка 600 штр./мм и щель шириной 40 мкм. Для диагностики состояния поверхности струй применялась фотосъемка с малой длительностью вспышки. В качестве источника света использовались вспышка лампы длительностью около 10 мкс и импульсы излучения второй гармоники Nd:YAG-лазера ($\lambda = 532$ нм) длительностью 30 нс.

3. Результаты

3.1. Влияние плотности мощности лазерного излучения на параметры ЭУФ излучения

В оловянной плазме эффективная генерация излучения в области около 13.5 нм осуществляется на переходах ионов $\text{Sn}^{+10}-\text{Sn}^{+12}$ при следующих параметрах плазмы: электронная температура примерно 50 эВ, концентрация электронов приблизительно 10^{19} см³, средний заряд ионов около 10. Одним из методов получения плазмы с такими параметрами является пинчевание вакуумного разряда в лазерной плазме олова, которая предварительно создается с требуемыми параметрами (плотность, температура, диаграмма направленности разлета плазмы) излучением иницирующего лазера. На рис.4 представлены осциллограммы напряжения на разрядном конденсаторе, импульса ЭУФ излучения, измеренного «медленным» фотодиодом, производной по времени разрядного тока и импульса иницирующего лазера. На рис.5 приведены осциллограммы напряжения на разрядном конденсаторе и импульса ЭУФ излучения, зарегистрированного «быстрым» фотодиодом. Площадь осциллограммы импульса ЭУФ излучения, зарегистрированного «медленным» фотодиодом,

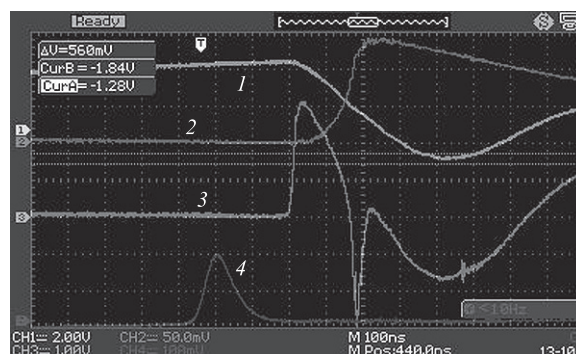


Рис.4. Осциллограммы напряжения на разрядном конденсаторе 1; импульса ЭУФ излучения 2, зарегистрированного «медленным» фотодиодом; производной разрядного тока 3; импульса иницирующего лазера 4.

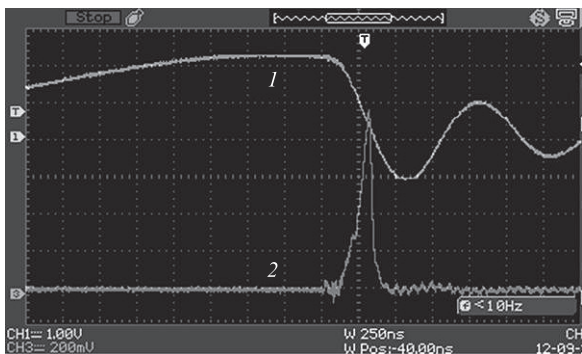


Рис.5. Осциллограммы напряжения на разрядном конденсаторе 1 и импульса ЭУФ излучения 2, зарегистрированного «быстрым» фотодиодом.

позволяет вычислить энергию импульса ЭУФ излучения, в то время как сигнал от «быстрого» фотодиода регистрирует форму этого импульса. Как видно из рис.4, электрический пробой межэлектродного промежутка происходит примерно через 200 нс после максимума импульса инициирующего лазера, что соответствует скорости гидродинамического разлета лазерной плазмы около 10^6 см/с. Через 150 нс после пробоя межэлектродного промежутка при максимуме разрядного тока разряд пинчуется, о чем свидетельствует особенность на осциллограмме (см. кривая 3, рис.4), и развивается импульс ЭУФ излучения, длительность которого составляет менее 100 нс по уровню половинной интенсивности (см. кривая 2, рис.5).

Эксперименты по измерению энергии излучения в диапазоне $\lambda = 13.5 \pm 0.135$ нм и размеров излучающей в ЭУФ диапазоне плазмы показали, что при использовании инициирующих Nd:YAG-лазеров с различной плотностью мощности излучения результаты сильно различались. Среднее значение SE при $f = 1$ кГц и использовании лазера с $P = 10^8$ Вт/см² не превышало $1\%/2\pi$ ср, а при $P = 2.3 \times 10^8$ Вт/см² составляло не более $1.3\%/2\pi$ ср. В то же

время при использовании лазера с $P = 1.6 \times 10^9$ Вт/см² удалось достичь $SE \approx 2\%/2\pi$ ср. Также при использовании этих лазеров сильно различаются размеры излучающей плазмы. На рис.6,а, б представлены изображения плазмы при использовании лазеров с $P = 1.6 \times 10^9$ и 10^8 Вт/см² соответственно. Видно, что при $P = 1.6 \times 10^9$ Вт/см² излучающая плазма имеет размеры по половине интенсивности 0.2×0.35 мм и сосредоточена только в катодной области, тогда как при $P = 10^8$ Вт/см² изображение плазмы больше распределено по межэлектродному пространству и его размеры увеличиваются до 0.7×0.7 мм. Кроме того, анализ полученных изображений показывает, что в случае, соответствующем рис.6,а, 1 мм³ плазмы излучает 95% всей излучаемой ЭУФ энергии, т.е. практически вся ЭУФ энергия излучается из области пинчевания (в случае рис.6,б – только 35%). На рис.6,в показана сумма изображений для 20 импульсов при $f = 1$ кГц и $P = 10^8$ Вт/см². Пространственная нестабильность местоположения излучающей плазмы от импульса к импульсу приводит к уширению ее суммарного размера у катода примерно до 2 мм. Так как яркость источника излучения пропорциональна средней мощности излучения и обратно пропорциональна площади излучающей плазмы, то из вышеизложенных результатов следует, что для создания источника ЭУФ излучения высокой яркости на основе лазерно-индуцированной плазмы необходимо использовать лазер с плотностью мощности не менее 10^9 Вт/см². Кроме того, при больших площадях излучающей плазмы нельзя получить малые значения этенду.

3.2. Импульсно-периодический режим работы источника

На рис.7 показаны последовательности импульсов напряжения, ЭУФ излучения и лазерной энергии, полученные при различной частоте следования импульсов и постоянном энерговкладе в разряд 3 Дж. В этих экспериментах использовался лазер с $P = 2.3 \times 10^8$ Вт/см² и катодная

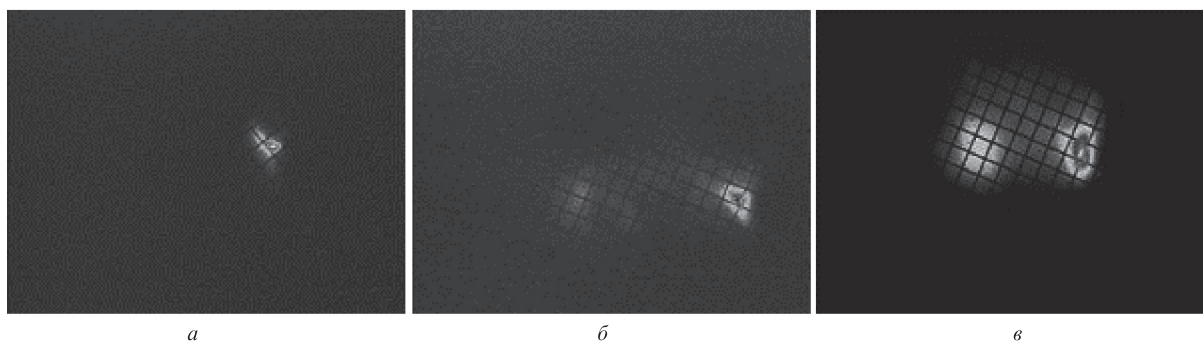


Рис.6. Изображения излучающей в ЭУФ диапазоне плазмы при использовании инициирующих лазеров с $P = 1.6 \times 10^9$ (а) и 10^8 Вт/см² (б), а также сумма изображений для 20 инициирующих импульсов лазера с $P = 10^8$ Вт/см² и $f = 1$ кГц (в). Размер ячейки сетки 0.4×0.4 мм.

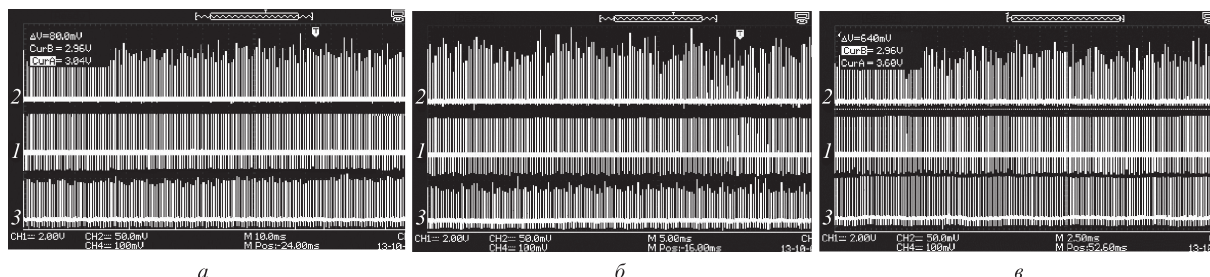


Рис.7. Последовательности импульсов напряжения 1, ЭУФ излучения 2 и лазерной энергии 3 при $f = 1$ (а), 2 (б) и 4 кГц (в).

струи олова с поперечным сечением $10 \times 0.3 \text{ мм}^2$. Следует отметить, что при $f \geq 4 \text{ кГц}$ из-за конструктивных особенностей данного иницирующего лазера энергия его генерации несколько больше, а ее стабильность от импульса к импульсу лучше, чем при меньших частотах следования импульсов. Как видно из рис.7, уровень ЭУФ сигнала, а значит, и СЕ почти не меняются по крайней мере до $f = 4 \text{ кГц}$, но при этом необходимо учитывать, что с повышением частоты следования необходимо было увеличивать и скорость протока оловянных струй: скорость струй олова при $f = 1 \text{ кГц}$ составляла 3.5 м/с ; при $f = 2 \text{ кГц}$ – 6 м/с , при $f = 4 \text{ кГц}$ – 8 м/с . Таким образом, правомерна экстраполяция, что на данном типе источника ЭУФ излучения при наличии лазера с $P \approx 10^9 \text{ Вт/см}^2$, с частотой следования импульсов более 4 кГц и при использовании более мощного высоковольтного выпрямителя достижима яркость в диапазоне $\lambda = 13.5 \pm 0.135 \text{ нм}$ не менее $200 \text{ Вт/мм}^2 \text{ ср.}$

Другим важным параметром источников ЭУФ излучения высокой яркости, применимых в диагностических комплексах инспекции масок, является стабильность ЭУФ сигнала от импульса к импульсу. Для последовательностей импульсов на рис.7 относительное среднеквадратичное отклонение $\sigma = 13\%$ (а), 21% (б) и 18% (в), что, конечно, недостаточно для диагностического источника ЭУФ излучения. Проведенные исследования показали, что стабильность ЭУФ сигнала от импульса к импульсу в нашем источнике определяется главным образом состоянием поверхности олова в месте фокусировки излучения иницирующего лазера. Известно, что лазерная плазма в основном разлетается по нормали к поверхности, на которую сфокусировано лазерное излучение, поэтому даже небольшие отклонения поверхности олова от плоскости в пределах пятна фокусировки пучка приводят к изменению как направления разлета плазмы, так и ее концентрации, а значит, и к различным условиям формирования тока разряда, что не может не сказываться на энергетических характеристиках ЭУФ излучения. Скоростное фотографирование струи олова подтвердило это положение. На рис.8 показан негатив фотографии струи олова с сечением $10 \times 0.3 \text{ мм}$ при ее скорости 9 м/с , полученный в свете вспышки рассеянного излучения Nd:YAG-лазера. Темные структуры на фотографии – это места, которые наиболее сильно отражают лазерное излучение, т.е. эти структуры имеют выпуклый рельеф на поверхности струи. На рис.8 показаны также сфокусированное лазерное пятно и

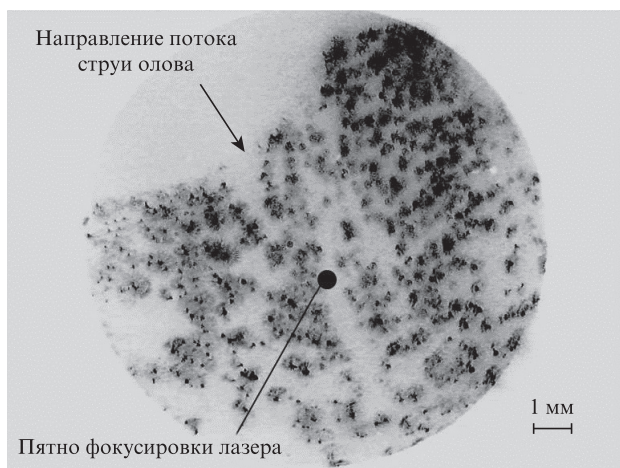


Рис.8. Фотография (негатив) струи олова сечением $10 \times 0.3 \text{ мм}$ в свете вспышки Nd:YAG-лазера ($v = 9 \text{ м/с}$).

направление потока олова. Видно что диапазон характерных размеров неоднородностей на поверхности плоской струи составляет $0.1 - 1 \text{ мм}$, в этом же диапазоне находится диаметр фокусного пятна лазера (примерно 0.5 мм). Вероятней всего, в условиях турбулентного потока ($Re \approx 1300 - 3800$) наблюдающиеся на поверхности струи неоднородности связаны с возникновением турбулентных микровихрей, размеры и количество которых зависят от многих факторов: шероховатости стенок канала и выходной лопатки, профиля выходного отверстия, смачиваемости материала сопла жидким оловом, размеров и формы поперечного сечения струи и т.д. Учитывая нестационарность характера возникновения неоднородностей, а значит, и попадания на них сфокусированного лазерного излучения, понятна природа возникновения нестационарного ЭУФ сигнала. При небольших скоростях струи ($3 - 4 \text{ м/с}$) на ее поверхности наблюдалось меньшее количество неоднородностей, с увеличением скорости струи их количество увеличивалось, что подтверждает результаты измерений стабильности сигнала от импульса к импульсу, представленные на рис.7. Из испытанных конфигураций струй лучшие результаты, прежде всего по стабильности ЭУФ сигнала, получены при использовании катодной струи с поперечным сечением $10 \times 0.3 \text{ мм}$. В то же время конфигурация анодной струи не столь критична по отношению к стабильности ЭУФ сигнала. Поэтому основным направлением дальнейших исследований данного источника ЭУФ излучения с целью улучшения стабильности ЭУФ сигнала при высоких частотах следования импульсов должно стать нахождение условий формирования струй олова с минимальным количеством неоднородностей на их поверхностях.

Была исследована зависимость величины ЭУФ сигнала от скорости струй. Эксперименты проводились при $f = 4 \text{ кГц}$. Были получены последовательности импульсов ЭУФ сигнала при различных скоростях струй. На рис.9 приведены зависимости от скорости струй олова средней энергии импульсов ЭУФ излучения и ее относительного среднеквадратичного отклонения. Видно, что рост средней энергии ЭУФ сигнала наблюдался до $v = 6 \text{ м/с}$, после чего она практически не менялась. При $v = 6 \text{ м/с}$ и $f = 4 \text{ кГц}$

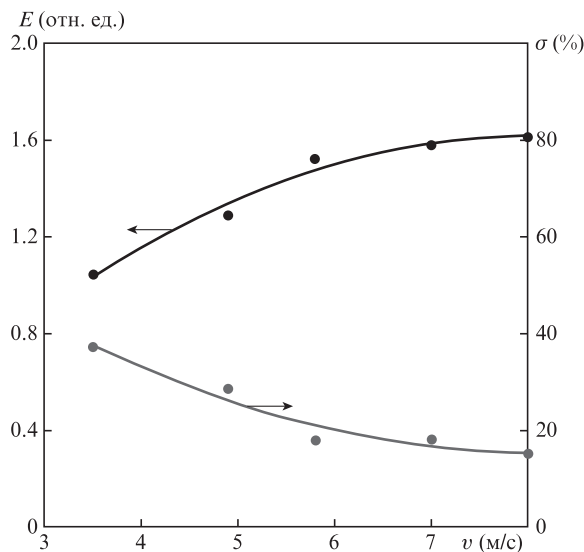


Рис.9. Зависимости от скорости струй олова средней энергии импульсов ЭУФ излучения и ее относительного среднеквадратичного отклонения ($f = 4 \text{ кГц}$).

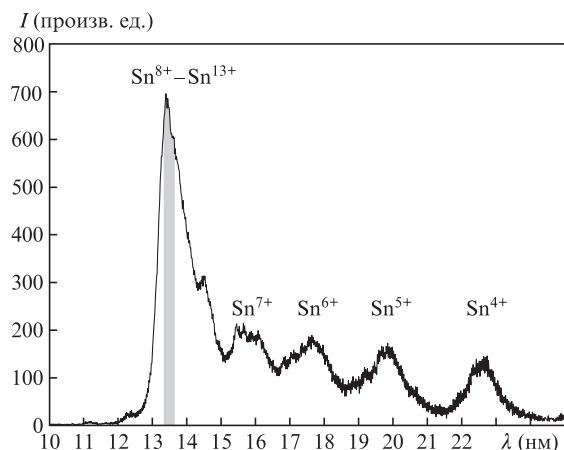


Рис.10. Спектр оловянной плазмы источника ЭУФ излучения.

расстояние S между соседними пятнами фокусировки импульсов лазерного излучения на поверхности струи будет равно 1.5 мм. Для того чтобы пятна фокусировки соседних лазерных импульсов не накладывались, необходимо выполнение условия $S/d \geq 3$ (d – диаметр фокального пятна). Экстраполируя полученные результаты на частоты следования импульсов, превышающие 4 кГц, можно предположить, что для $f = 8$ кГц необходима скорость струи не менее 12 м/с, а для $f = 16$ кГц – 24 м/с. Такие скорости струй соответствуют давлению на выходе насоса 5.2 и 21 атм соответственно.

3.3. Спектр оловянной плазмы

На рис.10 представлен спектр излучающей в ЭУФ диапазоне оловянной плазмы, который получен при использовании лазера с $P = 1.6 \times 10^9$ Вт/см², а также рабочий диапазон проекционной ЭУФ литографии ($\lambda = 13.5 \pm 0.135$ нм), и показано соответствие пиков на спектре ионам олова. Видно, что в излучение указанного диапазона вносят свой вклад ионы олова от Sn^{8+} до Sn^{13+} . Из спектра на рис.10 можно оценить отношение энергии, излучающейся в диапазоне $\lambda = 13.5 \pm 0.135$ нм, к энергии, излучающейся во всем ЭУФ диапазоне (в нашем случае оно составляет 1/9).

4. Заключение

В результате проведенной работы создан новый тип лазерно-индуцированных электроразрядных источников на основе оловянной плазмы, излучающих в ЭУФ диапазоне на длине волны $\lambda \approx 13.5$ нм. Особенностью данного источника, отличающей его от электроразрядных лазерно-индуцированных плазменных источников других типов, является то, что он обладает практически неограниченным ресурсом работы электродов, в качестве которых используются струи жидкого олова, циркулирующего в источнике по замкнутому контуру с помощью специально разработанного центробежного насоса. Для инициирования разряда в источнике использовался Nd:YAG-лазер, излучение которого фокусировалось на одну из струй. Система импульсного питания разряда, синхронизированная с импульсами инициирующего лазера, осу-

ществляла накачку разряда по малоиндуктивному разрядному контуру. Технологии, которые разработаны и исследованы при создании источника, могут быть использованы в различных применениях проекционной ЭУФ литографии, в частности при создании ЭУФ источника для диагностических комплексов, предназначенных для инспекции масок. При использовании инициирующего лазера с плотностью мощности около 10^9 Вт/см² получена эффективность конверсии в ЭУФ излучение примерно $2\%/2\pi$ ср и размер излучающей плазмы приблизительно 0.2×0.35 мм. Продемонстрировано, что энергетические параметры ЭУФ излучения сохраняются по меньшей мере до частоты следования импульсов 4 кГц. Показано, что в диапазоне $\lambda = 13.5 \pm 0.135$ нм достижима энергетическая яркость созданного ЭУФ источника около 200 Вт/(мм²·ср) и более. Выявлены физические факторы, определяющие стабильность энергии ЭУФ излучения от импульса к импульсу в данном типе источников, и определен метод, позволяющий ее улучшить при высоких частотах следования.

Создан центробежный насос для системы прокачки жидкого олова, обеспечивающий скорость струй олова до 15 м/с. Создана надежная импульсная схема возбуждения разряда с вкладом в разряд до 4 Дж и максимальной частотой следования 8 кГц.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению № 14.579.21.0004 (уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57914X0004).

1. *EUV source for Lithography*. Ed. by V.Bakshi (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006).
2. Attwood D. *Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation* (Cambridge: Cambridge University Press, 2007).
3. Banine V.Y., Koshelev K.N., Swinkels G.H.P.M. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 253001 (2011).
4. 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).
5. Brandt D.C., Fomenkov I.V., Farrar N.R., La Fontaine B., Myers D.W., Brown D.J., Ershov A.I., Sandstrom R.L., Vaschenko G.O., Böwering N.R., Das P., Fleurov V., Zhang K., Srivastava S.N., Ahmad I., Rajyaguru C., De Dea S., Dunstan W.J., Baumgart P., Ishihara T., Simmons R., Jacques R., Bergstedt R., Wittak C., Rafac R., Grava J., Schafgans A., Tao Y., Hoffman K., Ishikawa T., Evans D., Rich S., Boumen R., Meiling H., Peeters R., Kazinczi R., Harned N. *Int. EUVL Symp.* (Toyama, Japan, 2013).
6. Tchikoulaeva A., Miyai H., Suzuki T., Takehisa K., Kusunose H., Yamane T., Terasawa T., Watanabe H., Inoue S., Mori I.J. *Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS*, **13** (2), 023010-1-9 (2014).
7. Seidel P. *Int. EUVL Symp.* (Sapporo, Japan, 2007).
8. Rollinger B., Gambino N., Giovannini A.Z., Bozinova L.S., Alicakaj F., Hertig K., Abhari R.S. *Proc. SPIE Int. Soc Opt. Eng.*, **9048**, 90482K1-9 (2014).
9. Teramoto Y., Santos B., Mertens G., Kops R., Kops M., Küpper F., Niimi G., Yabuta H., Nagano A., Yokoyama T., Yoshioka M., Shirai T. *Proc. SPIE Int. Soc Opt. Eng.*, **9048**, 904813-1-8 (2014).
10. Partlow M.J., Besen M.M., Blackborow P.A., Collins R., Gustafson D., Horne S.F., Smith D.K. *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS*, **11** (2), 021105 (2012).
11. Koshelev K., Krivtsov V., Ivanov V., Yakushev O., Chekmarev A., Koloshnikov V., Snegirev E., Medvedev V. *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS*, **11** (2), 021103-1-6 (2012).
12. Yakushev O.F., Vinokhodov A.Yu., Koshelev K.N., Krivtsov V.N. *Instrum. Exp. Tech.*, **58** (6), 820 (2015).