

Мощный источник света в экстремальном УФ диапазоне (13.5 нм)

В.М.Борисов, Г.Н.Борисова, А.Ю.Виноходов, С.В.Захаров, А.С.Иванов, Ю.Б.Кириухин, В.А.Мищенко, А.В.Прокофьев, О.Б.Христофоров

Приводятся характеристики разрядного источника излучения в спектральной полосе 13.5 ± 0.135 нм, предназначенного для использования в EUV (Extreme Ultra Violet) сканере. Излучение генерируется в разрядной плазме в парах олова, которая создается между вращающимися дисковыми электродами при иницировании разряда сфокусированным лазерным излучением. Достигнут вклад электрической мощности в плазму ~ 63 кВт при частоте следования импульсов до 7 кГц. Мощность EUV излучения в спектральной полосе 13.5 ± 0.135 нм составила около 1000 Вт в пересчете на угол 2π ср. Приводится сравнение результатов расчетного моделирования с экспериментом.

Ключевые слова: EUV источник, EUV литография, плазма, разряд, лазер.

1. Введение

Для промышленного EUV сканера требуется средняя мощность излучения в спектральной полосе 13.5 ± 0.135 нм не менее 1 кВт/2π ср, при этом излучающий объем плазмы должен быть достаточно мал, с характерными линейными размерами ~ 1 мм [1, 2]. Источник и система сбора излучения должны обладать большим ресурсом ($\sim 10^{11}$ импульсов) и высокой надежностью.

Наиболее мощные источники EUV излучения в настоящее время используют плазму ионов олова Sn V–Sn XIV, многочисленные 4d–4f, 4p–4d и 4d–5p переходы которых лежат в диапазоне длин волн вблизи 13.5 нм. Для получения таких многозарядных ионов необходимо нагреть плазму олова до температуры 20–40 эВ [1–3].

В лазерных источниках EUV излучения такая горячая плазма создается непосредственно при облучении оловосодержащей мишени лазерным излучением высокой интенсивности. В разрядно-плазменных источниках лазерное излучение также используется, но его энергия на порядок меньше и используется только для создания облака паров олова у одного из электродов, покрытого слоем олова. Нагрев плазмы до необходимого ионизационного состояния олова происходит за счет ввода энергии в разряд от конденсаторной батареи и магнитного сжатия плазмы.

Фирмы Philips Extreme UV GmbH и XTREME Technologies GmbH, являющиеся ведущими компаниями по созданию разрядно-плазменных источников для EUV литографии, разработали EUV источник с уровнем мощности 170 Вт/2π ср и ресурсом не менее 10^8 импульсов [2]. К настоящему времени ими также построен источник сле-

дующего поколения, на котором продемонстрирована возможность достижения 420 Вт/2π ср при вводимой в разряд мощности 19 кВт [4]. Из работ [2, 4] следует, что в разряд вводится небольшая энергия (менее 3 Дж/имп.), а получение EUV мощности, требуемой для промышленного сканера, осуществляется в основном за счет использования очень высокой частоты следования импульсов f , вплоть до 100 кГц.

В наших предыдущих работах определены закономерности процесса иницирования разряда в EUV источниках лазерами с различными длинами волн излучения [5], проведено исследование и сравнение излучательных характеристик двух источников, отличающихся способом ввода олова на поверхность вращающихся электродов и типом схемы питания [6]. В работах [5, 6] нами рассматривались характеристики EUV источника при вводимой в плазму энергии 3–10 Дж за импульс, что позволит использовать умеренные частоты ($f \leq 20$ кГц) в будущем промышленном EUV сканере.

В настоящей работе мы представляем недавние результаты экспериментальных и теоретических исследований разрядного EUV источника.

2. Экспериментальная установка

Схема источника с вращающимися дисковыми электродами показана на рис.1. Как и в работе [6], оси вращения дисковых электродов расположены в горизонтальной плоскости. Нижние края дисковых электродов погружены в ванны с жидким оловом, благодаря чему осуществляется непрерывная поставка олова на рабочую поверхность электродов и их контакт с неподвижной импульсной системой питания. Иницирующий разряд лазерный пучок фокусируется на кромку одного из электродов, в точку с минимальным расстоянием между вращающимися дисками (~ 2 мм). Перед работой источника олово в ваннах разогревается встроенной в корпуса ванн спиралью, а избыточное тепло, выделяющееся из электродов, отводится в течение работы источника с помощью теплообменников, помещенных в ванны с жидким оловом.

В.М.Борисов, Г.Н.Борисова, А.Ю.Виноходов, С.В.Захаров, А.С.Иванов, Ю.Б.Кириухин, В.А.Мищенко, А.В.Прокофьев, О.Б.Христофоров. ФГУП «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, ул. Пушкинская, 1; e-mail: borisov@triniti.ru, khristofor@triniti.ru

Поступила в редакцию 26 мая 2010 г.

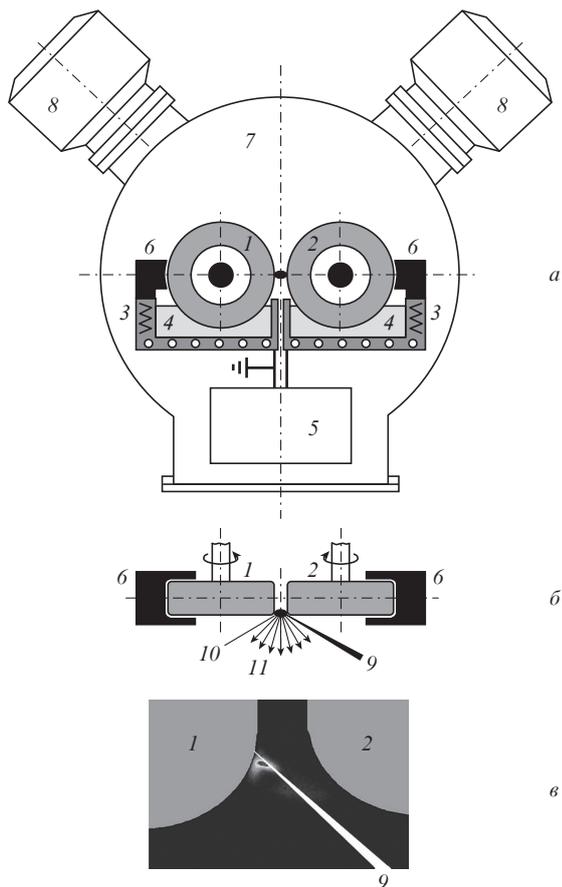


Рис.1. Схема источника (фронтальный вид (а) и вид сверху на электродную систему (б)) и изображение области плазмы, излучающей в EUV диапазоне (в):

1 – заземленный вращающийся электрод, на который фокусируется лазерный пучок; 2 – высоковольтный вращающийся электрод (может быть анодом или катодом); 3 – корпуса ванн с теплообменниками и нагревателями; 4 – жидкое олово; 5 – система питания разряда, включающая LC-генератор и две ступени сжатия импульса (помещены в масляной бак); 6 – система регулировки толщины олова; 7 – вакуумная камера; 8 – турбомолекулярные насосы; 9 – лазерный пучок; 10 – разряд; 11 – EUV излучение.

Для возбуждения разряда в источнике использована схема LC-генератора с двумя ступенями сжатия импульса накачки, использующими магнитные ключи [6]. Индуктивность разрядного контура, измеренная по осциллограмме напряжения на разрядной емкости, составила ~13.5 нГ.

Энергия и мощность потока EUV излучения из разрядной плазмы в требуемом спектральном диапазоне измерялась калиброванным прибором, включающим два многослойных Mo/Si зеркала и фотодиод AXUV-100 (IRD Inc.) с напыленным Mo/Si фильтром, который задерживал видимое и УФ излучение. Изображение плазмы, излучающей в EUV диапазоне, регистрировалось с помощью прибора, содержащего камеру-обскуру с диаметром отверстия 100 мкм, ПЗС-матрицу, фильтр из бериллиевой фольги. Измерение разрядного тока и напряжения осуществлялось с помощью паспортизованных пояса Роговского и высоковольтного делителя напряжения.

В экспериментах для инициирования разряда использовался KгF- или Nd:YAG-лазер. Лазерный пучок всегда был сфокусирован на заземленный электрод, который мог быть как анодом, так и катодом, в зависимости от полярности импульса LC-генератора.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Эффективность и мощность EUV источника

Важнейшей характеристикой источника для EUV литографии является его эффективность CE (Conversion Efficiency), обычно характеризуемая отношением EUV энергии (E_{EUV}), излучаемой в узкой спектральной полосе $\Delta\lambda/\lambda = 2\%$ с центром на $\lambda = 13.5$ нм в пересчете на пространственный угол 2π ср, к электрической энергии, введенной в плазму в течение первого полупериода разрядного тока (E_{in}). Типичная величина CE для источников на основе разряда в Хе составляет 0.4%–0.7% [1, 7–10]. Значительно более высокая эффективность ($CE \sim 2\%–3\%$), достигается при использовании олова в качестве плазмообразующего вещества [2–10].

В первой серии экспериментов использовался KгF-лазер с энергией и длительностью в импульсе соответственно 40 мДж и 8 нс, что обеспечивало плотность мощности лазерного излучения на поверхности электрода $\sim 7 \times 10^8$ Вт/см². На рис.2 показана зависимость CE от энергии, введенной в разряд. Как видно из рисунка, для данной модификации схемы возбуждения высокое значение $CE \sim 2.2\%–2.3\%$ сохраняется в интервале значений вводимой энергии 7–10 Дж. Характер зависимости на рис.2 несколько отличается от характера аналогичной зависимости, приведенной нами в работе [6]. Наблюдающееся различие связано, скорее всего, с увеличением рабочего напряжения в модифицированной схеме питания источника и, соответственно, с различным временем удержания магнитных ключей.

На рис.3 показаны последовательности импульсов напряжения (U_c) на конденсаторе последней ступени системы питания (вверху) и EUV сигнала (внизу), полученные при частоте следования импульсов $f = 2$ кГц и уровне введенной мощности $W \sim 18$ кВт, на 1-й и 44-й минутах непрерывной работы источника. Из рисунка видно, что уровень EUV энергии в импульсе не уменьшается с течением времени работы источника и составляет ~ 180 мДж/2π ср при $E_{in} \approx 9$ Дж.

В этих и последующих экспериментах использовался Nd:YAG-лазер AO8 (PowerLase), который мог работать в широком диапазоне частот от 2 до 20 кГц. Следует отметить, что при этом величина CE была на 15%–20% меньше, чем при использовании KгF-лазера. Лазер AO8 рас-

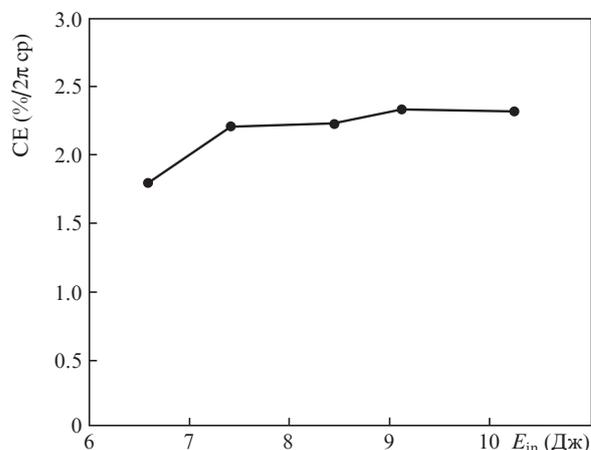


Рис.2. Зависимость эффективности конверсии CE от энергии E_{in} , введенной в разрядную плазму.

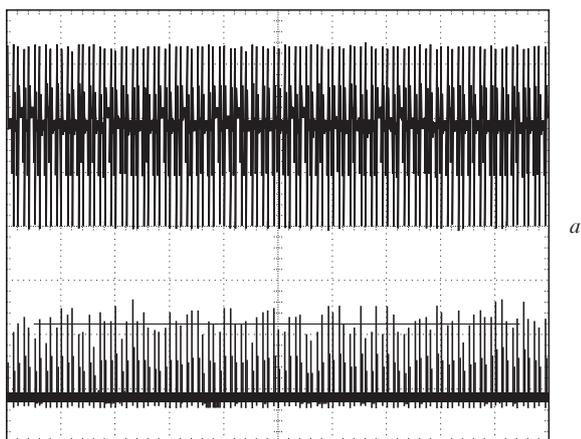


Рис.3. Последовательности импульсов напряжения (вверху) и EUV сигнала (внизу) через 1 (а) и 44 мин (б) после начала работы источника. Частота следования лазерных импульсов 2 кГц.

полагался на расстоянии ~ 11 м от входного окна вакуумной камеры источника. Оптическая схема, позволяющая довести излучение лазера АО8 с минимальными потерями до электрода, состояла из следующих элементов: двухэлементного линзового телескопа, четырех зеркал и линзы с фокусным расстоянием 650 мм. Телескоп имел увеличение 1:5, так что на его выходе формировался коллимированный лазерный пучок диаметром 45 мм. При этом до линзы доводилось $\sim 2/3$ от выходной энергии лазера. В экспериментах с использованием лазера АО8 (рис.3) энергия лазерного излучения, доведенная до электрода, не превышала 45 мДж при длительности лазерного импульса ~ 30 нс.

При проведении долговременного эксперимента с частотой следования импульсов $f = 2.5$ кГц (при этом уровень вкладываемой в разряд мощности составил ~ 22.5 кВт) через 3 мин после начала работы боковые верхние грани ванн, изготовленные из нержавеющей стали, находящиеся в зоне излучения плазмы, начали оплавляться. Это определило в последующих экспериментах по исследованию возможности увеличения вводимой в плазму электрической мощности малое время (~ 10 с) работы источника.

На рис.4 показаны последовательности импульсов напряжения U_c (вверху) и EUV сигнала (внизу), полученные при $f = 5$ и 7 кГц и вводимой электрической мощности соответственно 45 и 63 кВт, после 5 с от момента включения источника. Для представленных на рис.4 ре-

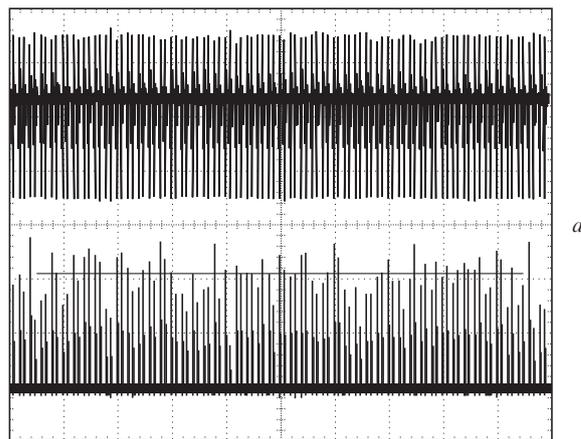


Рис.4. Последовательности импульсов напряжения и EUV сигнала при $f = 5$ (а) и 7 кГц (б).

зультатов $E_{in} \approx 9$ Дж, а скорость вращения дисков составляла 4 об./с.

Рис.4 показывает, что схема питания обеспечивает довольно стабильное напряжение U_c на конденсаторе последней ступени, а EUV сигнал не уменьшается с увеличением частоты следования импульсов. При $f = 7$ кГц нами достигнута EUV мощность более 1 кВт в спектральной полосе 13.5 ± 0.135 нм.

3.2. Особенности генерации EUV излучения в разряде

Исследования изображений плазмы (подобных проиллюстрированным на рис.1,б), излучающей в EUV диапазоне, выявили тот факт, что при типичных разрядных условиях области разряда с характерными размерами ~ 1 мм, являющиеся эффективным источником EUV излучения, возникают вблизи электрода, на который сфокусирован инициирующий пробой лазерный пучок. То есть именно в области межэлектродного промежутка, в котором создается начальное плазменное облако, возникают условия пинчевания разряда.

Этот факт является, на наш взгляд, довольно нетривиальным. Действительно, когда лазерный пучок фокусируется на катод, в принципе понятно, что пинч возникает вблизи катода. Видимо, именно поэтому в ранних работах инициирование разряда происходило у катода [8–10]. При этом отмечалось [6], что в случае фокусировки лазер-

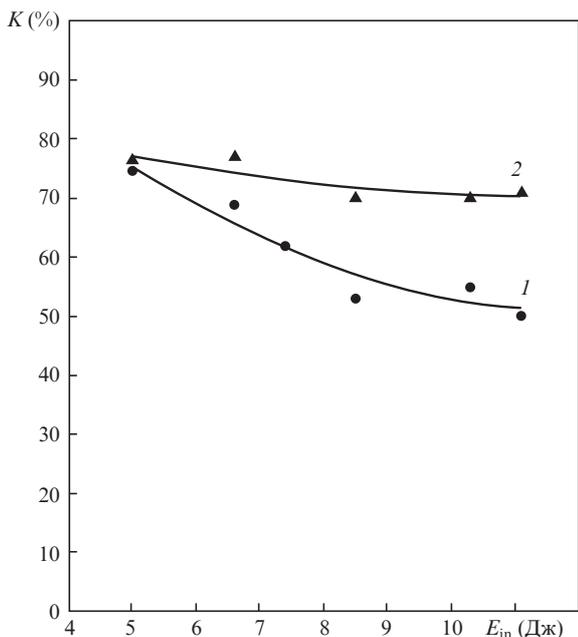


Рис.5. Зависимости эффективности сбора излучения от вводимой в разряд энергии без предимпульса (1) и с предимпульсом (2).

ного пучка на катод, наряду с образованием пинча у катода, формируется более слабое, но занимающее большой объем EUV свечение у анода. При инициировании разряда у анода при рассмотренных типичных условиях пинч возникает только в области, близкой к аноду.

Как уже упоминалось во введении, оптическая система литографа может собрать и передать на подложку излучение только из малой области плазмы. Так, например, оптическая система литографа, упоминаемая в [3], могла использовать излучение из области плазмы в виде эллипсоида с диаметром ≤ 1.3 мм и длиной менее 1.6 мм. Отношение EUV энергии, излучаемой из области плазмы в виде такого эллипсоида, ко всей EUV энергии, излучаемой плазмой в межэлектродном зазоре, можно характеризовать в процентном отношении коэффициентом K (collection efficiency). Значения коэффициента K лежат обычно в диапазоне 50%–80%. Чем выше вклад энергии в разряд, тем меньшая доля EUV энергии содержится в требуемом объеме. Чтобы увеличить значение K при высоких вкладах энергии в разряд, мы использовали схему возбуждения с предимпульсом – слабوتочным разрядом через разрядный промежуток, создаваемым перед возникновением сильноточной стадии разряда [11].

На рис.5 приведены зависимости коэффициента K от вложенной в разряд энергии без использования предимпульса (кривая 1) и с его использованием (кривая 2). Как видно из рисунка, при $E_{in} > 8$ Дж наличие предимпульса позволило на $\sim 20\%$ повысить эффективность сбора излучения из плазмы. Таким образом, использование предимпульса при фокусировке лазерного излучения на анод позволяет сохранить малый размер излучающей плазмы при увеличении вводимой в плазму энергии.

На рис.6,а показана фотография области плазмы, излучающей в EUV диапазоне, полученная при частоте следования импульсов 6 кГц. Горизонтальный профиль яркости свечения (рис.6,б) позволяет оценить размер d излучающей в EUV диапазоне плазмы по полувысоте интенсивности. Так как фотография на рис.6,а получена при наложении 120 импульсов, мы полагаем, что измерен-

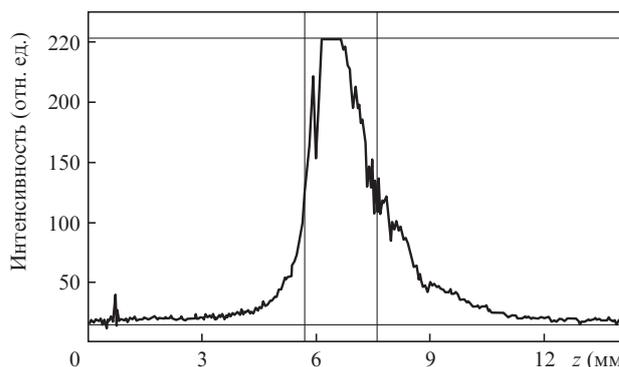
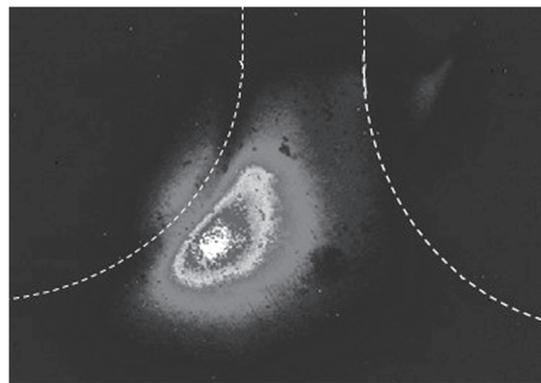


Рис.6. Фотография излучения плазмы в EUV диапазоне (вверху) и горизонтальный профиль яркости EUV свечения (внизу); $f = 6$ кГц, $E_{in} = 7.5$ Дж/имп.

ная величина $d \sim 2$ мм обусловлена как пространственной нестабильностью места возникновения пинча, так и биениями вращающихся дисковых электродов. Следует отметить, что d для одиночных импульсов, как показали измерения, находится в диапазоне 0.4–0.5 мм.

3.3. Моделирование разряда и генерации EUV излучения в полосе 13.5 ± 0.135 нм

Моделирование лазерно-иницируемого разряда проводилось с использованием трехмерной версии радиационно-магнитогидродинамического (РМГД) кода, разработанной на основе двухмерного РМГД кода ZETA [12–14], с параметрами лазерного импульса и электрического генератора, аналогичными параметрам экспериментальной установки, и геометрии, эквивалентной показанной на рис.1,б и в. Трехмерная версия кода ZETA включает в себя двухтемпературную (температуры электронов и ионов) магнито-гидродинамическую модель* с многогрупповым переносом излучения.

Для случая фокусировки лазерного пучка на анод расчет проводился в два этапа. На первом этапе рассчитывались абляция и разлет слоя жидкого олова под действием излучения Nd:YAG-лазера. Под действием импульса лазерного излучения с плотностью энергии 35 Дж/см² слой жидкого олова нагревается и испаряется в виде плазмы. Максимальная температура электронов плазмы

* Уравнение движения и члены уравнений, соответствующие третьей («второстепенной») координате и отклонению от двухмерной симметрии (плоской или цилиндрической), решаются по явной разностной схеме в отличие от «основных» двухмерных уравнений в коде ZETA, решаемых по неявной схеме.

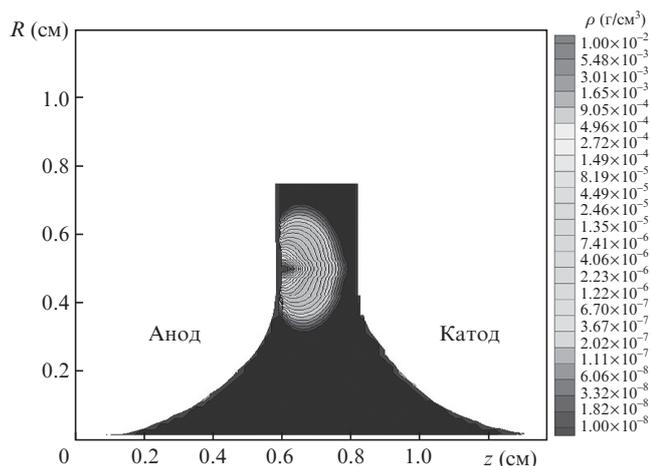


Рис.7. Динамика разлета паров олова при воздействии лазерного импульса на покрытый жидким оловом анод. Изолинии массовой плотности при $t = 250$ нс.

$T_e = 3.2$ эВ достигается вблизи поверхности критической плотности. По мере разлета плазмы температура падает за счет расширения. Пример динамики разлета паров олова представлены на рис.7.

Расчеты показывают, что примерно через 135 нс после максимума лазерного импульса (т.е. в момент времени $t = 250$ нс от начала расчета) пары олова достигают противоположного электрода. Начиная с момента столкновения плазмы с катодом, расчет переходил

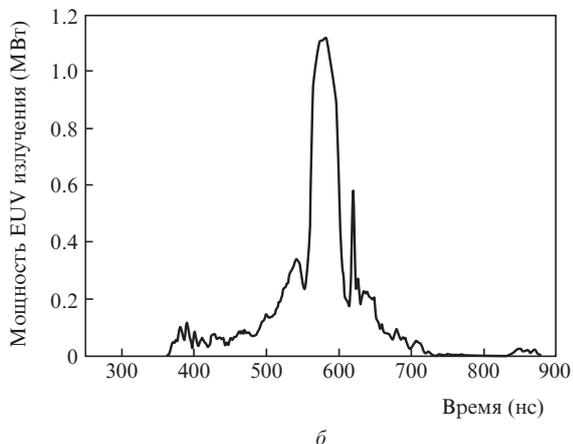
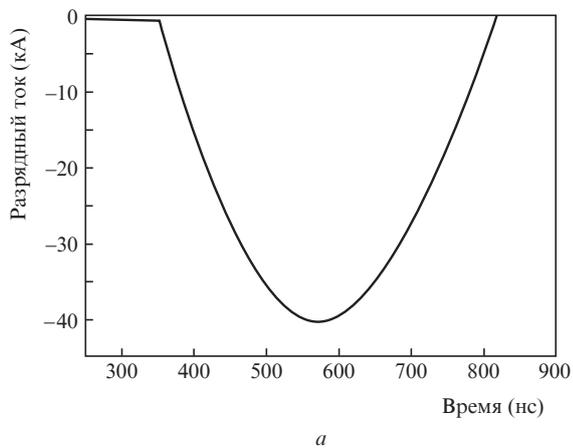


Рис.8. Импульс разрядного тока (а) и импульс EUV излучения в спектральном диапазоне 13.5 ± 0.135 нм (б).

на второй этап, подключался расчет электромагнитного поля с граничным условием, соответствующим внешней LRC-цепи [12] с $L = 13.5$ нГн, $R = 0$ Ом и емкостью $C = 1.45$ мкФ, заряженной в начальный момент до напряжения $U = 4$ кВ.

Хотя через 250 нс пары олова и достигают противоположного электрода (в данном случае катода), их температура и проводимость оказываются низкими и разряд не зажигается. Однако после столкновения паров с твердой поверхностью катода навстречу потоку налетающих паров олова распространяется ударная волна, в которой пары останавливаются и вновь нагреваются, кратность ионизации плазмы и ее проводимость нарастают. К моменту $t = 350$ нс проводимость плазмы становится достаточной для развития разряда, и в плазме быстро нарастает ток, разогревающий плазму за счет джоулевой диссипации. Динамика тока в разряде представлена на рис.8,а. Разрядный ток нарастает до 40 кА к моменту $t = 570$ нс. Плазма нагревается протекающим током и сжимается давлением его магнитного поля. По мере нарастания температуры и плотности плазмы растет и излучение из нее, в том числе и в спектральной полосе 13.5 ± 0.135 нм. Рассчитанный импульс EUV излучения в указанном спек-

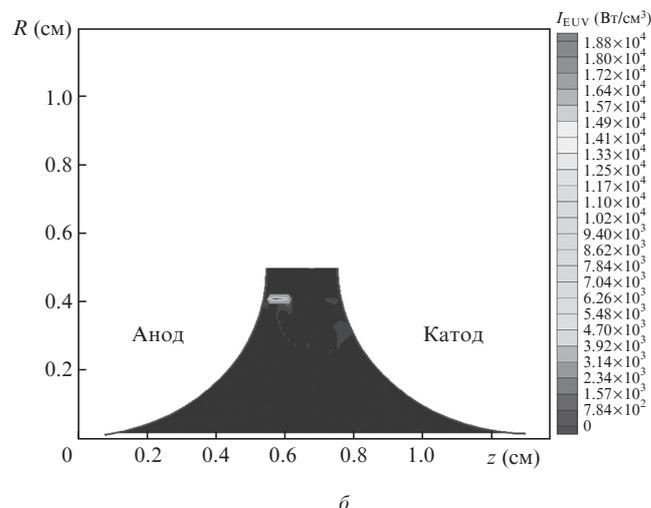
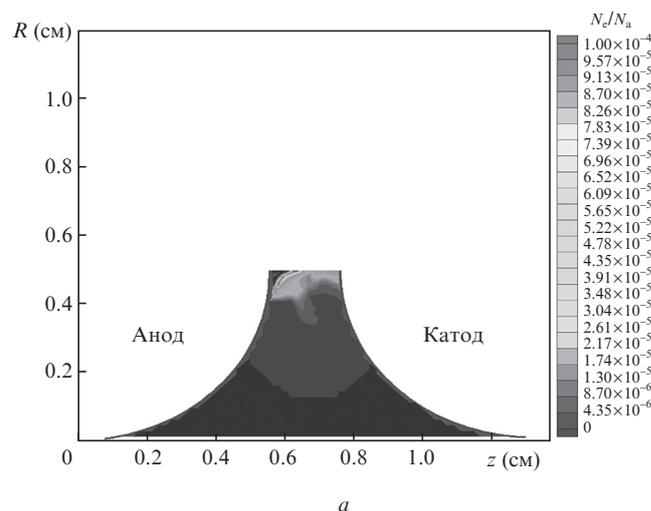


Рис.9. Распределение электронной плотности в плазме олова N_e , нормированной на число Авогадро N_A (а), и распределение плотности EUV излучения в диапазоне 13.5 ± 0.135 нм (б) в разряде при $t = 581$ нс (максимум мощности EUV излучения).

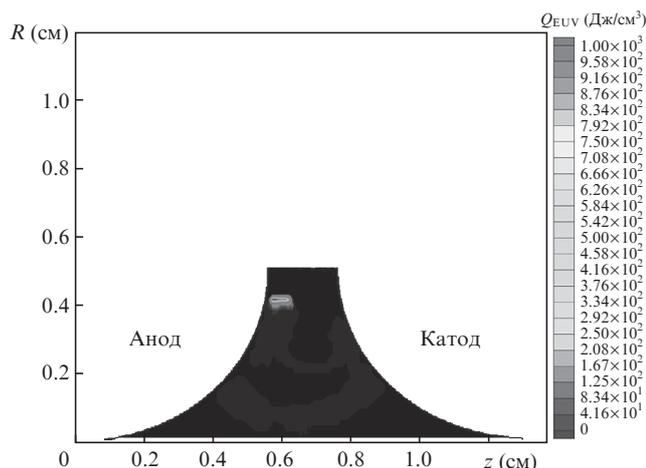


Рис.10. Распределение интегральной по времени импульса плотности EUV излучения в полосе 13.5 ± 0.135 нм.

тральном диапазоне из разряда заданной геометрии представлен на рис.8,б. Максимальная мощность излучения 1.1 МВт достигается к моменту $t = 581$ нс. Как видно из рисунка, длительность по полувысоте интенсивности экспериментально измеренного EUV импульса (~ 50 нс) хорошо согласуется с расчетной.

Распределение электронной плотности в плазме на момент максимума мощности EUV излучения и мгновенное распределение плотности EUV излучения в разряде приведены на рис.9,б. В точке максимальной EUV плотности параметры плазмы имеют следующие значения: температура электронов $T_e = 18.3$ эВ, плотность электронов $N_e = 1.6 \times 10^{18}$ см⁻³, средняя кратность ионизации плазмы олова $\langle Z \rangle = 7.4$. Из сравнения рис.7 и 9 следует, что точка наибольшей плотности EUV излучения не совпадает с точкой фокуса лазерного излучения на аноде. С уменьшением тока EUV плотность быстро падает. Интегральная по времени энергия излучения в спектральной полосе 13.5 ± 0.135 нм в импульсе составляет 0.12 Дж/2π ср, что несколько меньше экспериментально измеренной (0.18 Дж/2π ср).

Пространственное распределение интегральной по времени разряда плотности EUV излучения представлено на рис.10. Как видно из рис.9,б и 10, основная область EUV излучения в данном варианте расчета располагается вблизи поверхности анода, ее усредненный по времени характерный размер составляет $0.75 \times 0.5 \times 0.6$ мм. На рис.10 видна также гораздо меньшая по плотности область EUV излучения. Часть этой области формируется позже основной области у анода и соответствует второму пику на рис.8,б. Области плазмы с высокой плотностью EUV излучения окружены значительным объемом более холодной плазмы и паров олова (из-за низкой температуры и проводимости этой окружающей плазмы магнитное поле диффундирует через плазму, и она не захватывается в процесс сжатия). Окружающая плазма и пары олова частично поглощают и переизлучают свет в широком спектральном диапазоне, снижая тем самым выход EUV излучения в нужном узком интервале 13.5 ± 0.135 нм.

4. Обсуждение результатов

Необходимо отметить, что момент инициирования разряда в рамках МГД модели нельзя считать точным, т. к. при этом не учитывается роль электронных пучков, предьони-

зующих газ, и физическая картина развития разряда в этот момент является значительно более сложной, нежели просто омический разогрев. Особенно велико влияние электронных пучков на инициирование разряда в случае, когда плазма создается сначала на катоде и электроны, вытягиваемые из нее электрическим полем, ускоряются и взаимодействуют как с газом, так и с электродами, создавая ионизационные каналы и потоки встречной плазмы, приводя к более раннему пробую (что и наблюдалось в наших экспериментах при смене полярности зарядки). В случае же создания плазмы на аноде при достаточно низком приложенном напряжении электронные утечки могут возникать только после заполнения межэлектродного промежутка парами. Эти утечки не должны приводить к кардинальному изменению МГД картины развития разряда, а могут лишь скорректировать момент его возникновения.

Место формирования основной области EUV излучения (у анода или у катода) при абляции лазерным излучением анода и последующем сжатии магнитным полем разряда определяется в первую очередь распределением массы плазмы. Погонная масса плазмы, вообще говоря, уменьшается при свободном разлете плазменного факела с удалением от центра разлета вдоль оси сжатия. Если бы сжатие происходило сразу с момента прихода плазмы на катод, то пинч формировался бы у катода. Но, как уже отмечалось, разряд развивается значительно позже, когда ударная волна, отраженная от катода, проходит значительную часть межэлектродного промежутка. Наиболее быстрое сжатие плазмы происходит у анода, где и возникает основной пинч. Вместе с тем, как упоминалось ранее, основная зона с высокой плотностью EUV излучения формируется не в точке фокусировки лазерного излучения на анод, где плотность плазмы максимальна, а вблизи периферии плазменного факела, где плазма имеет оптимальную плотность и температуру для минимальной необходимой ионизации олова Sn V–Sn X и эффективного излучения в EUV диапазоне. Существование оптимальной плотности обусловлено тем, что в области более высокой плотности температура и ионизация плазмы недостаточно высоки, а в области низкой плотности температура достаточно велика, но количество излучающих ионов мало. Вместе с тем, температура плазмы в точке оптимальной плотности в рассматриваемом источнике составляет 18–19 эВ, и соответствующая кратность ионизации олова недостаточна для обеспечения необходимой населенности ионов Sn IX–Sn XIV, наиболее сильно излучающих в нужном EUV диапазоне. Для повышения температуры необходимо снизить плотность в пинче и увеличить ток через него. Решение этой задачи вызывает определенные сложности, поскольку эти требования находятся в противоречии при абляционном способе заполнения разрядного промежутка. Проведенный дополнительный расчет, в котором искусственно вводилась внешняя предьонизация с целью инициирования разряда в момент, когда плазмы вблизи катода еще немного, но она имеет достаточную проводимость для развития тока, показал более раннее (на 50 нс) образование пинча вблизи катода и больший выход EUV излучения как за счет более высокой температуры плазмы в пинче, так и за счет снижения массы окружающей холодной плазмы и перепоглощения света в ней. Возможно, наблюдаемое в эксперименте увеличение выхода EUV излучения при использовании токового предьимпульса вызвано аналогичным эффектом.

5. Заключение

Создан мощный источник EUV излучения и проведено сравнение излучательных характеристик источника с результатами компьютерного моделирования, проясняющее динамику образования области плазмы, излучающей в EUV диапазоне. Показано, что источник может работать непрерывно с мощностью EUV излучения ~ 180 Вт/2 π ср в полосе 13.5 ± 0.135 нм при частоте следования импульсов 2 кГц. В режиме коротких включений (5 с), насколько нам известно, впервые достигнута мощность EUV излучения ≥ 1000 Вт/2 π ср в полосе 13.5 ± 0.135 нм. Полагаем, что разработка электродной конфигурации из жаропрочных металлов позволит реализовать непрерывный режим работы с характеристиками излучения, необходимыми для его использования в промышленных сканерах следующего поколения.

Авторы выражают благодарность А.Ю.Круковскому и всем коллегам, принимавшим участие в экспериментах и разработке МГД кода на различных этапах работы, а также проф. В.Г.Новикову за расчет и предоставление таблиц атомных данных для олова.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-08-00672а) и XTREME Technologies GmbH (проект МНТЦ 3599р).

1. *EUV source for Lithography*. Ed. by V.Bakshi (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006).
2. Corthout M., Aport R., Yoshioka M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6921**, 69210V-1 (2008).
3. Jonkers J. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **15**, 8 (2006).
4. Corthout M., Yoshioka M. *Intern. EUVL Symposium* (Prague, 2009); www.sematech.org
5. Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Иванов А.С. и др. *Квантовая электроника*, **39** (10), 967 (2009).
6. Борисов В.М., Борисова Г.Н., Виноходов А.Ю. и др. *Физика плазмы*, **36** (3), 237 (2010).
7. Borisov V.M., Eltsov A.V., Ivanov A.S., et al. *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, **37**, 3254 (2004).
8. Borisov V.M., Kirukhin Yu.B., Vinokhodov A.Yu., et al., in *EUV Source for Lithography*. Ed. by V.Bakshi (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006, p.477).
9. Stamm U., Kleinschmidt Y., Borisov V., et al. *Proc SPIE, Int. Soc. Opt. Eng.*, **6151**, 61510O (2006).
10. Koshelev K.N., Kunze H.J., Gayazov V., et al., in *EUV Source for Lithography*. Ed. by V.Bakshi (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006, p.175).
11. Иванов А.С., Канд. дис. (Троицк, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 2008).
12. Zakharov S.V., Novikov V.G., Krukovskii A.Yu., et al. *ZETA Code: Physical Models and Numerical Algorithms* (Moscow: KIAM, 1994, p.11).
13. Benattar R., Zakharov S.V., Nikiforov A.F., et al. *Phys. Plasmas*, **6**, 175 (1999).
14. Смирнов В.П., Захаров С.В., Грабовский Е.В. *Письма в ЖЭТФ*, **81** (9), 556 (2005).