

# Лазерно-иницируемые источники экстремального ультрафиолетового излучения для производства интегральных схем следующего поколения

В.М.Борисов, А.Ю.Виноходов, А.С.Иванов, Ю.Б.Кирюхин,  
В.А.Мищенко, А.В.Прокофьев, О.Б.Христофоров

*Актуальность развития мощных разрядных источников, излучающих в спектральном диапазоне  $13.5 \pm 0.135$  нм, определяется их планируемым применением в промышленной EUV (Extreme Ultraviolet) литографии для изготовления интегральных схем по технологическим нормам 22 нм и менее. Исследованы характеристики EUV источников на основе инициируемого лазером разряда в парах олова между вращающимися дисковыми электродами. Выявлены закономерности процесса инициирования разряда лазерами с различными длинами волн излучения и определены параметры лазерного импульса, оптимальные для достижения максимальных энергетических характеристик EUV источника. Разработанный подход к созданию EUV источника позволил достичь в стационарном режиме с частотой следования разрядных импульсов 3000 Гц средней мощности EUV излучения 276 Вт в спектральной полосе  $13.5 \pm 0.135$  нм в пересчете на пространственный угол  $2\pi$  ср.*

**Ключевые слова:** EUV источник, EUV литография, плазма, разряд, лазеры.

## 1. Введение

Высокий темп развития микроэлектроники в последние десятилетия обусловлен успехами в уменьшении расстояния  $\Delta x$  между элементами микросхем, изготавливаемых с помощью фотолитографии. Согласно критерию Рэлея  $\Delta x = k\lambda/\text{NA}$ , где  $k$  – коэффициент, близкий к единице;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $\text{NA} = n \sin \alpha$  – числовая апертура объектива;  $n$  – показатель преломления среды. Таким образом, увеличение пространственного разрешения литографического оборудования возможно при уменьшении рабочей длины волны, увеличении числовой апертуры объектива (путем увеличения апертурного угла  $\alpha$  или использования иммерсионных жидкостей с  $n > 1$ ), а также при уменьшении коэффициента  $k$ .

В настоящее время для производства интегральных схем (ИС) в основном используются литографы, в которых источником УФ излучения является эксимерный ArF-лазер ( $\lambda = 193$  нм). Планируется, что применение фазовых масок и/или иммерсионных жидкостей в проекционной литографии на длине волны 193 нм позволит достичь  $\Delta x \approx 32 - 22$  нм [1]. Для получения лучшего разрешения необходимо использовать излучение с меньшей длиной волны  $\lambda$ , однако ее уменьшение сталкивается с проблемой отсутствия оптически прозрачных материалов, пригодных для построения оптических систем. Выходом из этой ситуации стала возможность построения проекционной системы на основе отражающих зеркал. Наиболее оптимально использовать в литографе следующего

поколения излучение в области EUV (Extreme Ultraviolet) диапазона с длиной волны 13.5 нм [2]. Выбор этой длины волны обусловлен созданием брэгговских MoSi-зеркал с высоким ( $\sim 70\%$ ) коэффициентом отражения в узкой спектральной полосе с максимумом на  $\lambda = 13.5$  нм, относительная ширина которой  $\Delta\lambda/\lambda$  для системы из нескольких MoSi-зеркал составляет 2%.

Исходя из экономически обоснованной производительности промышленного EUV литографа ( $\sim 120$  кремниевых подложек диаметром 300 мм за один час [2]), необходимая мощность EUV излучения на  $\lambda = 13.5$  нм в полосе  $\Delta\lambda/\lambda = 2\%$  должна составлять 2–3 кВт в пересчете на телесный угол  $2\pi$  ср. Для того чтобы разработанные к настоящему времени оптические системы могли эффективно собирать и транспортировать EUV излучение на подложку, характерный линейный размер излучающего объема плазмы не должен превышать 1 мм. Ресурс источника и коллекторной оптики должен быть равен  $\sim 10^{11}$  имп. [2]. Это означает, что оптические элементы должны быть надежно защищены от любых загрязнений, создаваемых источником. Требование высокой средней мощности EUV излучения в комбинации с малыми размерами излучающей плазмы и большим ресурсом делает создание такого источника одним из ключевых условий реализации высокопроизводительной EUV литографии.

Использование плазменных источников для EUV литографии основано на том, что высокотемпературная плазма ряда элементов (Xe, Sn, Li) способна эффективно излучать на  $\lambda = 13.5$  нм. Такая плазма может быть получена как при фокусировке излучения мощных лазеров на мишень, так и в разряде [3]. В последнем случае электрическая энергия, запасенная в конденсаторной батарее, непосредственно преобразуется в энергию плазмы. Впервые использовать классический Z-пинч в Хе в качестве источника излучения для EUV литографии было предложено в [4]. В ГНЦ РФ ТРИНИТИ в кооперации с немец-

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

Поступила в редакцию 17 декабря 2008 г., после доработки – 15 апреля 2009 г.

кой компанией XTREME Technologies в 2000–2004 гг. было создано несколько EUV источников на основе модифицированного Z-пинча в Хе, достигнутая на которых средняя мощность EUV излучения составила  $\sim 100$  Вт/(2 $\pi$  ср) [5]. В качестве источников EUV излучения были исследованы и другие типы разрядов в Хе, такие как плазменный фокус [6], разряд с полым катодом [7], капиллярный разряд [8]. Все эти типы разрядов имеют аксиально-симметричную электродную систему с небольшой (не превышающей 10 см<sup>2</sup>) рабочей поверхностью электродов, что приводит к их сильной эрозии в результате высоких электрических и тепловых нагрузок. Скорость эрозии электродов при типичных разрядных условиях образования Z-пинча в Хе составляет  $10^{-7} - 10^{-6}$  г/имп. [5]. Большая эрозия электродов не позволяет достичь требуемого для промышленного литографа ресурса EUV источника, поскольку с изменением геометрии электродов в результате эрозии меняется как размер излучающей плазмы, так и энергия EUV излучения. При вводимой в разряд мощности 10 кВт эти параметры сохраняются лишь в течение  $\sim 1.5 \times 10^8$  имп. [5].

Другим серьезным препятствием использования разряда типа Z-пинча в Хе в качестве EUV источника для промышленного литографа является его малая эффективность. Эффективность источника – СЕ (Conversion Efficiency) обычно характеризуется отношением EUV энергии, излучаемой в узкой спектральной полосе  $\Delta\lambda/\lambda = 2\%$  с максимумом на  $\lambda = 13.5$  нм в пространственный угол  $2\pi$  ср, к электрической энергии, запасаемой в конденсаторной батарее. Типичная величина СЕ для источника на основе разряда в Хе составляет 0.5% [3, 5–8]. Значительно более высокая эффективность ( $\sim 2\%$ ) достигается при использовании олова в качестве плазмообразующего вещества [7, 9, 10].

Цель настоящей работы – исследование возможности создания источника для промышленной EUV литографии на основе использования разряда в парах олова, инициируемого лазером между вращающимися дисковыми электродами (ВДЭ).

## 2. Экспериментальный EUV источник с вращающимися дисковыми электродами

На рис. 1 схематично изображено устройство EUV источника, в котором дисковые катод 1 и анод 2, скрепленные изолятором 3, вращаются с помощью электромотора 4 на общем валу. Импульсно заряжаемая батарея конденсаторов 5, расположенных между двумя дисковыми электродами и подключенных к ним с минимальной индуктивностью, вращается вместе с электродами. Анодный и катодный диски имеют каналы для циркуляции охлаждающей жидкости, подаваемой системой охлаждения 6 через вал. Зарядка конденсаторной батареи осуществляется с помощью импульсной системы питания 7 через скользящие контакты 8. Мощный турбомолекулярный насос 9 обеспечивает в камере 10 рабочее давление  $\sim 0.1$  Па, что позволяет избежать паразитных пробоев между ВДЭ.

Разряд между ВДЭ возникает только после воздействия сфокусированного пучка лазера 11 на край одного из дисков (обычно катода), покрытый слоем олова. Лазерный импульс за счет абляции формирует плазму и пары олова в межэлектродном пространстве и тем самым инициирует пробой. По сравнению с коаксиально-

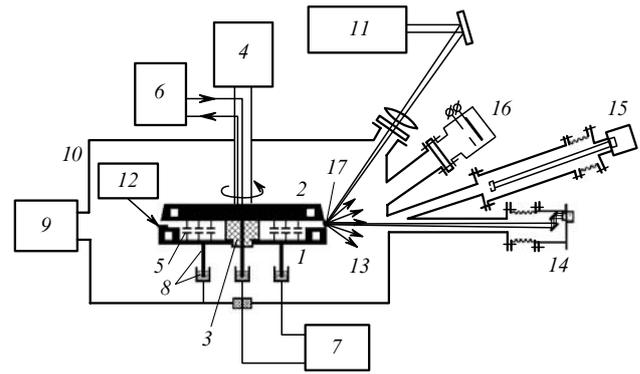


Рис. 1. Схема экспериментального EUV источника с лазерным инициированием разряда в парах олова между ВДЭ:

1 – катод; 2 – анод; 3 – изолятор; 4 – электромотор; 5 – батарея конденсаторов; 6 – система охлаждения; 7 – импульсная система питания; 8 – скользящие контакты; 9 – турбомолекулярный насос; 10 – вакуумная камера; 11 – лазер; 12 – система регенерации олова; 13 – EUV излучение; 14 – измеритель энергии и мощности EUV излучения; 15 – система регистрации изображения плазмы, излучающей в EUV диапазоне; 16 – цилиндр Фарадея; 17 – разрядная плазма.

симметричными электродными системами, использованными в [5–8], рабочая поверхность ВДЭ увеличена, а металл, из которого изготовлены электроды, защищен от эрозии слоем олова, являющегося плазмообразующим веществом. Достаточно большая поверхность охлаждающих каналов позволяет эффективно отводить тепло, которое выделяется в электродах.

Следует отметить, что впервые концепция источника, показанного на рис. 1, была представлена нами на международном совещании по EUV источникам в Антверпене в 2003 г. [11].

Система 12 обеспечивает поставку олова на поверхность катода и его выравнивание. В одном из вариантов источника поставка жидкого олова к рабочей зоне электродов осуществлялась через пористую структуру из внутренней кольцевой полости электродов под действием капиллярных и центробежных сил.

Энергия и мощность потока EUV излучения 13 из разрядной плазмы в требуемом спектральном диапазоне измерялась калиброванным прибором 14, состоящим из Zr-фильтра толщиной 0.2 мкм, который задерживал видимое и УФ излучение, двух MoSi-зеркал, обеспечивающих ширину спектрального диапазона 2% с центральной длиной волны 13.5 нм, и фотодиода AXUV-100G (IRD Inc.), сигналы с которого регистрировались осциллографом. Изображение плазмы, излучающей в EUV диапазоне, регистрировалось с помощью прибора 15, содержащего камеру-обскуру с диаметром отверстия 100 мкм, ПЗС-матрицу и Zr-фильтр. Для измерения ионного тока использовался цилиндр Фарадея 16. Измерение разрядного тока и напряжения осуществлялось с помощью стандартных паспортизованных пояса Роговского и высоковольтного делителя напряжения.

Хотя стенки вакуумной камеры охлаждались водой, при вводимой в плазму электрической мощности  $P > 16$  кВт температура фланцев начинала повышаться, что могло привести к разгерметизации камеры. Таким образом, эксперименты в долговременном (стационарном) режиме работы проводились при  $P < 16$  кВт. Для инициирования разряда в экспериментах использовался KrF-, XeF-, Nd:YAG либо CO<sub>2</sub>-лазер.

### 3. Характеристики и условия оптимального ввода энергии в разряд

Спектр EUV излучения разряда типа вакуумной искры в парах олова состоит из линейчатых спектров высокоионизованных атомов олова (от SnVIII до SnXIII) (см., напр., [12]). Для достижения максимального оптического выхода излучения в спектральной области около 13.5 нм оптимальная электронная температура должна составлять  $\sim 30$  эВ [1, 3, 9]. Плазма с такой температурой может быть получена в разряде пинчевого типа, который характеризуется сжатием и разогревом плазменной оболочки под действием собственного магнитного поля  $B$  разрядного тока. Процесс пинчевания разряда происходит тогда, когда давление, создаваемое магнитным полем  $B^2/2\mu_0$  ( $\mu_0$  – магнитная постоянная), превышает давление плазмы олова. Современное состояние исследований эффекта пинчевания в вакуумной искре подробно обсуждается в [9].

На рис.2 приведены типичные осциллограммы, характеризующие процессы в разряде в парах олова, создаваемых лазерным излучением с вводимой в разряд энергией  $\sim 8$  Дж/имп. Лазерный импульс  $1$  вблизи момента достижения максимума напряжения  $2$  создает на катоде первоначальное плазменное облако, которое в процессе расширения замыкает межэлектродный промежуток. В результате через  $\sim 120$  нс после лазерного импульса начинается резкое падение напряжения  $2$  и появляется заметный разрядный ток  $3$ , а еще через 40 нс, когда разрядный ток  $3$  возрастает до  $\sim 12$  кА, возникает импульс EUV излучения  $4$ . Форма этого импульса свидетельствует о том, что в течение разряда условия пинчевания возникают несколько раз.

Следует отметить, что для условий возбуждения разряда, представленных на рис.2, скорость нарастания разрядного тока  $dI/dt$  до момента генерации импульса EUV излучения приблизительно равна  $0.4 \times 10^{12}$  А/с. В [13] экспериментально показано, что такая скорость опти-

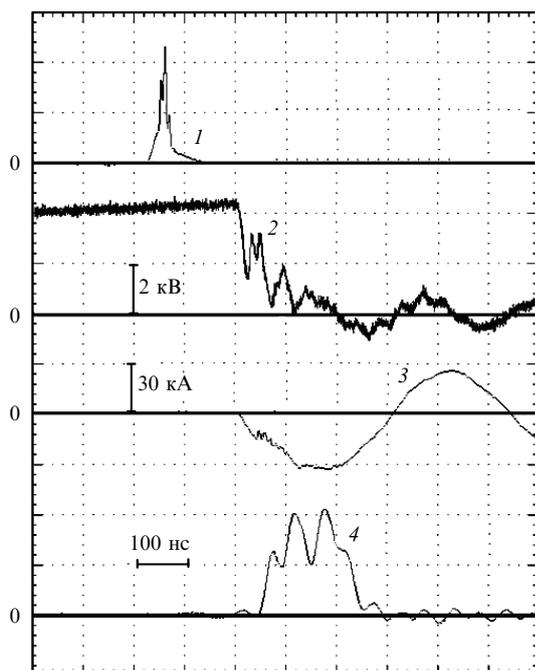


Рис.2. Осциллограммы лазерного импульса (1), разрядных напряжения (2) и тока (3), а также импульса EUV излучения (4).

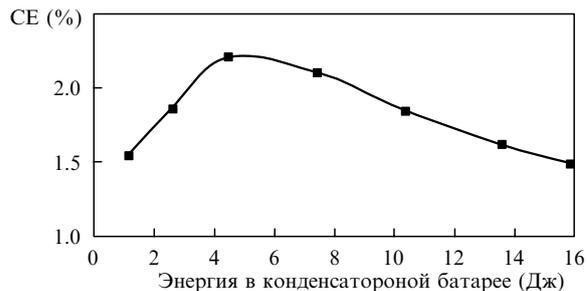


Рис.3. Зависимость эффективности EUV источника от энергии, запасаемой в конденсаторной батарее.

мальна для получения параметров плазмы, обеспечивающих максимальный выход EUV излучения в спектральном диапазоне  $13.5 \pm 0.135$  нм.

Достижимые при  $dI/dt \approx 0.4 \times 10^{12}$  А/с максимальные значения эффективности EUV источника были практически неизменны при варьировании таких параметров схемы возбуждения разряда, как  $C$ ,  $U$ ,  $L$ . Однако, поскольку  $dI/dt \sim U/L$ , обеспечение оптимальных значений  $dI/dt$  при увеличении индуктивности  $L$  требует повышения напряжения  $U$  на конденсаторах, подсоединенных к электродам. Это приводит к неэффективному вводу энергии в разряд, при котором оставшаяся в конденсаторах после первого полупериода разрядного тока энергия, затем бесполезно рассеиваемая в разряде, может составлять значительную (до 50%) часть от первоначально накопленной в конденсаторах электрической энергии.

Зависимость SE источника от электрической энергии  $E$ , запасаемой в емкости  $C$  конденсаторной батареи, представлена на рис.3. Варьирование  $E$  проводилось изменением зарядного напряжения при частоте следования импульсов  $f = 100$  Гц. Из зависимости на рис.3 можно видеть, что SE источника составляет не менее 2% при запасаемой энергии от 3 до 9 Дж.

Энергию, оставшуюся в конденсаторах после первого полупериода разрядного тока, можно, в принципе, передавать в импульсную систему питания для использования в следующем импульсе зарядки конденсаторов. В связи с этим интерес также представляет собственная эффективность  $\eta$  преобразования в энергию EUV излучения электрической энергии, введенной в разряд за первый полупериод разрядного тока. В наших экспериментах (при  $f = 100$  Гц) значения  $\eta$  находились в диапазоне 2.5% – 3.0% при варьировании вложенной за первый полупериод энергии от 2 до 6 Дж.

### 4. Закономерности лазерного инициирования разряда

Эксперименты показали, что существенными факторами, определяющими протекание разряда и величину SE, являются условия лазерного инициирования разряда. Исследование процессов лазерного инициирования разряда в EUV источнике было проведено с использованием различных лазеров, основные характеристики которых приведены в табл.1.

Результаты экспериментов показали, что ключевым параметром лазерного импульса является плотность мощности лазерного излучения  $q$  в фокальном пятне на поверхности электрода. Это иллюстрируется представленными на рис.4,а зависимостями SE от  $q$  при использовании различных лазеров.

Табл.1. Характеристики лазеров, применявшихся для инициирования разряда в EUV.

Тип лазера	$\lambda$ (мкм)	$\tau$ (нс)	$I_{\max}$ (Вт/см <sup>2</sup> )	$E_{\max}$ (мДж)
KrF	0.248	12	$2.2 \times 10^9$	60
XeF	0.351	6	$8 \times 10^8$	30
Nd: YAG	1.06	30	$10^9$	75
Nd: YAG	1.06	8	$1.3 \times 10^{10*}$	38*
Nd: YAG	1.06	8	$6 \times 10^9**$	17**
CO <sub>2</sub>	10.6	100	$2.7 \times 10^8$	250

Примечание:  $\lambda$  – длина волны;  $\tau$  – длительность импульса по уровню половинной интенсивности;  $I_{\max}$  – максимальная интенсивность в фокальном пятне;  $E_{\max}$  – максимальная энергия при мощностях 1 (\*) и 3 кГц (\*\*).

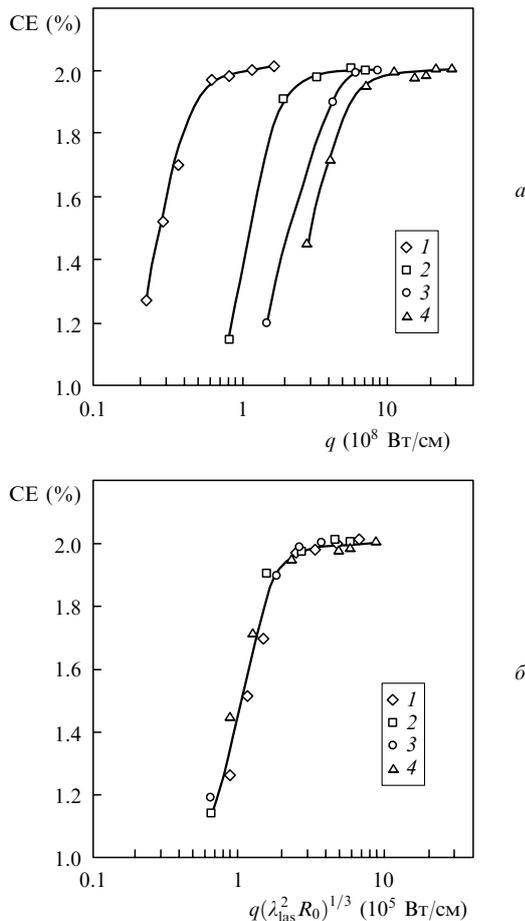


Рис.4. Зависимости эффективности EUV источника от плотности мощности лазерного излучения  $q$  (а) и от параметра  $q(\lambda_{\text{las}}^2 R_0)^{1/3}$  (б) для CO<sub>2</sub>-лазера с  $\lambda = 10.6$  мкм и размером фокального пятна  $S \approx 0.55 \times 0.64$  мм (1), Nd:YAG-лазера с  $\lambda = 1.06$  мкм и  $S \approx 0.48 \times 0.48$  мм (2), XeF-лазера с  $\lambda = 0.351$  мкм и  $S \approx 0.35 \times 1.2$  мм (3) и KrF-лазера с  $\lambda = 0.248$  мкм и  $S \approx 0.36 \times 0.61$  мм (4).

Проведенные эксперименты позволили сделать следующие выводы.

1. Плотность мощности  $q$  лазерного излучения в фокальном пятне является критической характеристикой для генерации EUV излучения.
2. Лазерное инициирование разряда возможно только в случае, если  $q$  больше некоторой определенной критической величины, зависящей от длины волны генерации лазера.
3. Зависимость CE от  $q$  имеет насыщающийся характер.

4. Увеличение длины волны лазерного излучения приводит к уменьшению его плотности мощности  $q_{\text{th}}$ , при которой происходит насыщение. Так, в соответствии с данными рис.4,а интенсивность лазерного излучения, при котором происходит насыщение CE при использовании CO<sub>2</sub>-лазера, близка к  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, тогда как для KrF-лазера она превышает  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

В [13] показано, что электрическая проводимость  $\sigma$  лазерной плазмы, в которой протекает ток разряда, зависит от длины волны лазерного излучения  $\lambda_{\text{las}}$  и от характерного размера фокального пятна  $R_0$  следующим образом:  $\sigma \sim (q^2 \lambda_{\text{las}}^2 R_0)^{1/3}$ . Наряду с зависимостью от  $q$  (рис.4,а) было предложено рассматривать эффективность EUV источника также и в зависимости от параметра  $q(\lambda_{\text{las}}^2 R_0)^{1/3}$  (рис.4,б). Из рис.4 видно, что полученные для различных лазеров данные хорошо описываются единой зависимостью эффективности EUV источника от этого параметра.

Результаты, представленные на рис.4, получены для межэлектродного расстояния 3 мм. Как видно из зависимостей рис.5, с увеличением разрядного промежутка от 3 мм (кривая 1) до 6 мм (кривая 2) эффективность EUV источника падает, что связано с увеличением длины разрядного канала и перераспределением вводимой в разряд энергии между областями разряда, излучающими в EUV диапазоне с различной эффективностью. При увеличении межэлектродного расстояния максимальная эффективность источника достигалась при большей энергии лазерного излучения (рис.5) и, соответственно, при большем значении  $q$ , что можно объяснить падением температуры разлетающейся лазерной плазмы и уменьшением ее электрической проводимости.

Факторами, определяющими величину  $q$ , при которой достигаются максимальные значения CE источника, являются характеристики ввода энергии в разряд. Так, в работе [14], посвященной созданию и исследованию источника с ВДЭ, максимум ( $\sim 1\%$ ) зависимости CE от  $q$  достигался при плотности мощности инициирующего излучения Nd:YAG-лазера  $\sim 9 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Эта величина значительно, в 30 раз, отличается от  $q \approx 3 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> (кривая 2 на рис.4,а), достаточного для достижения максимальной ( $\sim 2\%$ ) эффективности источника, результаты исследования которого представлены в настоящей работе. Причиной столь существенных различий является недостаточно малая индуктивность разрядного контура

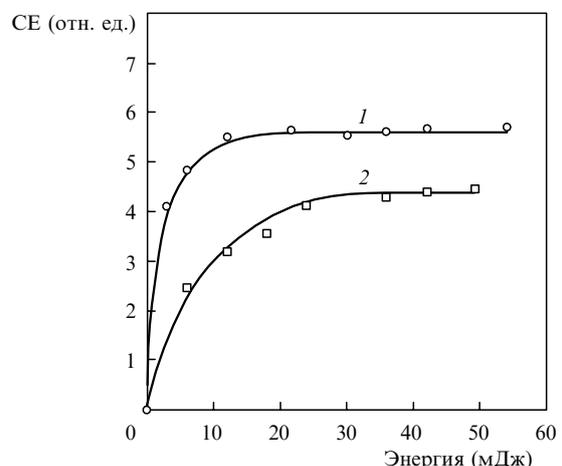


Рис.5. Зависимости эффективности EUV источника от энергии излучения KrF-лазера при межэлектродных расстояниях 3 (1) и 6 мм (2).

в источнике [14]. Вследствие этого скорость нарастания тока в нем в несколько раз ниже приведенной на рис.2, а задержка момента генерации EUV импульса от инициирующего лазерного импульса превышает 300 нс. За такое время (в соответствии с проведенными в [14] измерениями динамики плотности электронов  $n_e$  в лазерной плазме) концентрация лазерной плазмы в области пинчевания разряда во много раз уменьшается из-за ее разлета. В результате этой и других причин для достижения максимального выхода EUV излучения из плазмы разряда с недостаточно высокими значениями  $dI/dt$  требуются гораздо большие концентрации лазерной плазмы и, соответственно, величины  $q$ .

### 5. Характеристики источника излучения в стационарном режиме работы с высокой частотой следования импульсов

Распределение интенсивности EUV излучения в разрядном промежутке между вращающимися электродами, полученное с помощью камеры-обскуры, представлено на рис.6. Видно, что область разряда, из которой излучается основная часть EUV энергии, расположена вблизи катода, на поверхности которого осуществляется лазерное инициирование. Интенсивное свечение вблизи катода связано с образованием плотной высокотемпературной плазмы в микропинче. Наблюдаемая вблизи противоположного электрода (анода) область более слабого свечения связана с рядом факторов, среди которых – бомбардировка анода потоками электронов и взаимодействие кумулятивных струй высокотемпературной

плазмы из микропинча с прианодной плазмой. Обычно усиление EUV свечения в области около анода происходит при работе источника в стационарном режиме и приводит к снижению энергии EUV излучения из прикатодной области и уменьшению СЕ.

Эксперименты, выполненные в стационарном режиме работы источника, показали, что при использовании KrF-лазера ( $\lambda = 248$  нм) EUV энергия в импульсе уменьшается при  $f > 2$  кГц. Мы объясняем этот эффект ослаблением инициирующего лазерного излучения, падающего на катод, в результате накопления паров олова в зоне разряда и сильным, пропорциональным  $1/\lambda_{\text{las}}^4$ , рассеянием лазерного УФ излучения. Использование большей длины волны лазерного излучения ( $\lambda_{\text{las}} = 351$  нм, XeF-лазер) позволило осуществить работу источника с  $f = 3$  кГц, сохранив энергию EUV излучения в импульсе и вводимую в разряд мощность  $P = 16$  кВт в стационарном режиме (в течение трех часов). Последовательности пиковых значений напряжения и EUV сигнала при стационарной работе источника с  $f = 3$  кГц приведены на рис.7. Измеренная выходная мощность EUV излучения в спектральной полосе  $13.5 \pm 0.135$  нм составляла 276 Вт в пространственном угле  $2\pi$  ср при эффективности 1.76 % и  $\eta = 2.24$  %.

Результаты исследования работы источника в стационарном режиме с использованием для инициирования разряда Nd:YAG-лазера при  $f = 3$  кГц близки к полученным с XeF-лазером (рис.7). По нашим оценкам, параметры существующих мощных Nd:YAG-лазеров позволяют увеличивать EUV мощность источника за счет увеличения  $f$  до нескольких десятков килогерц.

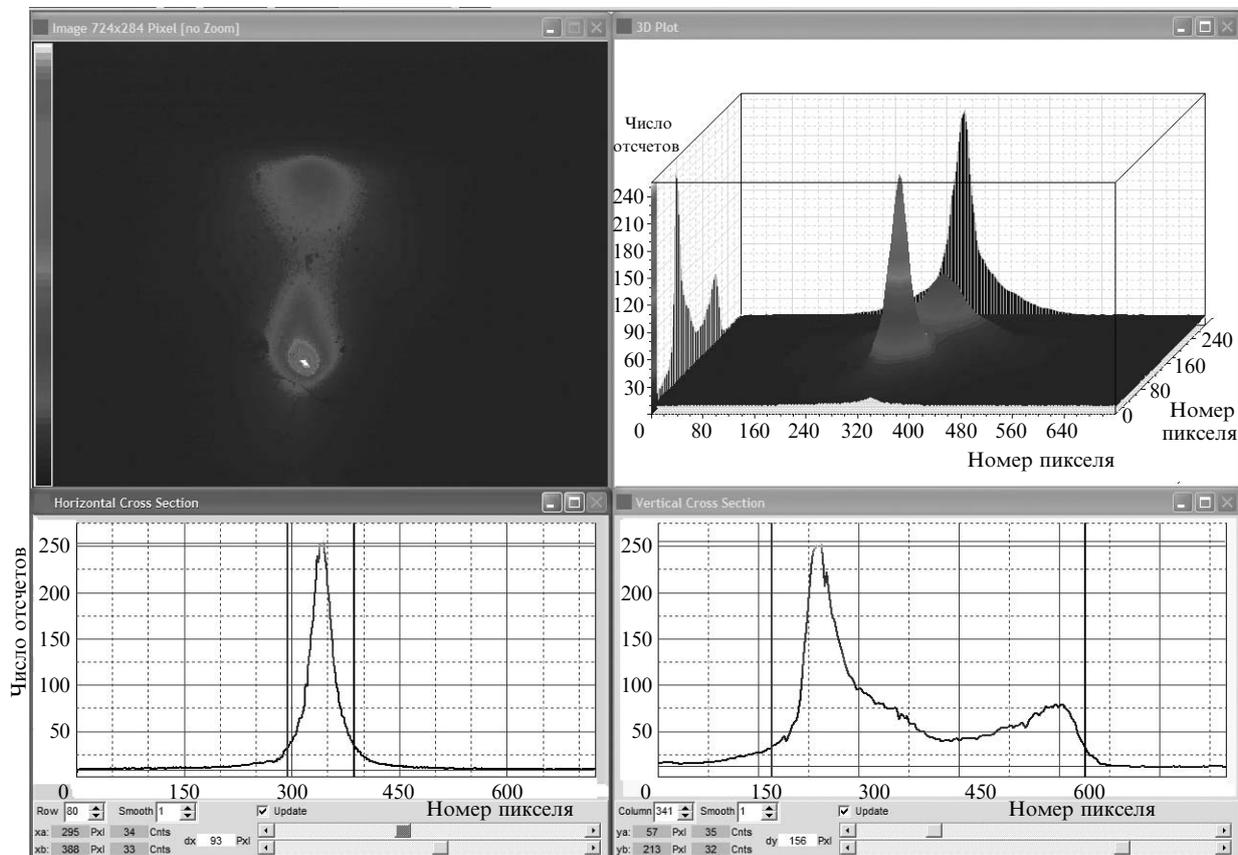


Рис.6. Изображение плазмы, излучающей в EUV диапазоне (а), и профили интенсивности EUV излучения на 18-й минуте работы при  $E = 9.9$  Дж и  $f = 2$  кГц: 3D (б), горизонтальный (в), вертикальный (г).

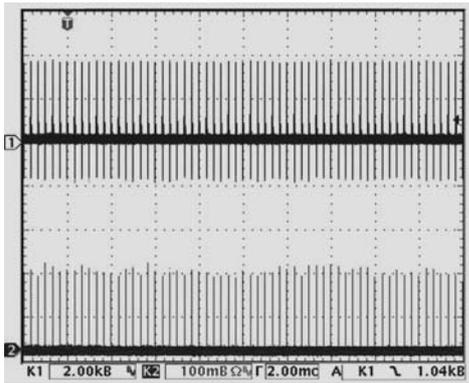


Рис.7. Последовательности пиковых значений разрядного напряжения (2 кВ/дел) и сигналов EUV излучения (0.52 мДж/мВ в пространственный угол  $2\pi$  ср на  $\lambda = 13.5 \pm 0.135$  нм) в стационарном режиме работы источника при  $f = 3$  кГц.

## 6. Заключение

Результаты поиска оптимальных условий как инициирования разряда, так и ввода в него энергии позволили реализовать долговременный стационарный режим работы источника со средней мощностью EUV излучения  $276 \text{ Вт}/(2\pi \text{ ср})$  в спектральной полосе  $13.5 \pm 0.135$  нм при  $f = 3$  кГц и собственной эффективности  $\eta \approx 2.2\%$ .

Представляет интерес сопоставить представленные в данной работе результаты с недавними результатами других исследовательских групп по разработке EUV источников с вращающимися дисковыми электродами. Так, в [15] авторы сообщают о получении в стационарном режиме EUV мощности  $170 \text{ Вт}/(2\pi \text{ ср})$  при  $\eta = 2\%$  и  $f = 5$  кГц. Ресурс источника составил 104 млрд. импульсов, что и требуется для промышленной EUV литографии. В работе [14] в коротком цуге импульсов получена EUV мощность  $\sim 580 \text{ Вт}/(2\pi \text{ ср})$  при  $\eta = 0.6\%$  и  $f = 20$  кГц. Совокупность результатов, представленных в

[14, 15] и в настоящей статье, показывает перспективность дальнейших исследований по созданию разрядных источников для промышленной EUV литографии.

Следует отметить, что ограниченный объем статьи не позволил обсудить такую важную проблему, как генерация из области разряда атомов, ионов и капель олова (так называемый debris), которые при отсутствии защиты загрязняют элементы оптики. Исследования по подавлению debris мы планируем представить в отдельной статье.

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

1. Сейсян Р. *ЖТФ*, **75** (5), 1 (2005).
2. Ota K. et al., in *EUV Source for Lithography* (Ed. by V.Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006, p. 3).
3. Jonkers J. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **15**, 8 (2006).
4. McGeoch M. *Appl. Opt.*, **37**, 1651 (1998).
5. Borisov V. et al., in *EUV Source for Lithography* (Ed. by V.Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006, p. 477).
6. Fomenkov I. et al., in *EUV Source for Lithography* (Ed. by V.Bakshi, Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006, p. 373).
7. Pankert J. et al., in *EUV Source for Lithography* (Ed. by V.Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006, p. 395).
8. Teramoto Yu. et al., in *EUV Source for Lithography* (Ed. by V.Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006, p. 505).
9. Koshelev K. et al., in *EUV Source for Lithography* (Ed. V.Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006, p. 175).
10. Borisov V. et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, 3254 (2004).
11. Borisov V. et al. *EUV Source Workshop* (Antwerp, 2003), см. www.sematech.org.
12. Tolsikhina Yu. et al., in *EUV Source for Lithography* (Ed. V.Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006, p. 113).
13. Иванов А.С. *Канд. дис.* (Троицк, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 2008).
14. Yokoyama T. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7271**, 727139-1 (2009).
15. Corthout M. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6921**, 69210V-1 (2008).