

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук

(31 января 2007 г.)

31 января 2007 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Кошелев К.Н.** (Институт спектроскопии РАН, г. Троицк, Московская обл.), **Банин В.Е.** (ASML, Veldhoven, Нидерланды), **Салашенко Н.Н.** (Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород). *Работы по созданию источников коротковолнового излучения для нового поколения литографии.*

2. **Балькин В.И.** (Институт спектроскопии РАН, г. Троицк, Московская обл.). *Атомно-проекционная параллельная фабрикация наноструктур.*

3. **Лозовик Ю.Е., Попов А.М.** (Институт спектроскопии РАН, г. Троицк, Московская обл.). *Свойства и нанотехнологические применения нанотрубок.*

Краткое содержание докладов публикуется ниже.

PACS numbers: 42.72. – g, 42.82.Cr

Работы по созданию источников коротковолнового излучения для нового поколения литографии

К.Н. Кошелев, В.Е. Банин, Н.Н. Салашенко

Среди внушительного списка научных, технических и технологических проблем, которые предстоит решить при создании коротковолновой литографии, далеко не последнее место по сложности возникающих проблем занимает источник излучения. Длина волны для нового поколения литографии — EUV-литографии (EUV — от англ. Extreme Ultraviolet — сверхжесткое ультрафиолетовое излучение) — 13,5 нм была выбрана задолго до того, как стало более или менее понятно, как именно может быть устроен источник, обеспечивающий коммерчески выгодное производство — HVM (High Volume Manufacturing). Выбор был сделан частично исходя как из характера производства и свойств многослойных зеркал, так и из предположения, что излучателями будут скорее всего служить линия Ly_{α} водородоподобных ионов лития Li^{+2} (13,5 нм) или пик излучения, связанный с переходами в ионе He^{+9} .

Плазма, излучающая в далеком вакуумном ультрафиолете (ВУФ), — давно и хорошо изученный объект,

однако технические требования, предъявляемые к HVM-источнику, настолько необычны, что, казалось бы, простая задача нагрева плазмы до температуры в несколько десятков электронвольт превращается в целый комплекс сложных физических и инженерно-технических проблем. Рассмотрим эти требования подробнее. В литографии принято характеризовать источник мощностью излучения в так называемом "промежуточном фокусе" (ПФ) на выходе из первичной системы сбора излучения (рис. 1).

Сложная оптика литографического аппарата с большим числом отражающих поверхностей (до 11) многослойных зеркал приводит к тому, что только узкая полоса излучения с шириной в 2 % и центром на 13,5 нм может быть использована для печатания микросхем. Минимально требуемая мощность излучения в ПФ 180 Вт. С учетом эффективности первичного сбора излучения (телесного угла сбора и коэффициентов отражения) и обязательных потерь на устройствах, защищающих оптику от "грязи", это приводит к следующей оценке излучательной мощности источника: средняя "полезная" мощность излучения в телесный угол 2π в узкой спектральной 2 %-ной полосе должна составлять не менее 2000 Вт. Источник принято характеризовать также эффективностью перевода (СЕ) электрической энергии в "полезное" излучение. Эффективный размер излучающей области не должен превышать 1 мм²; рабочая частота источника около 10 кГц и стабильность дозы излучения $3\sigma \leq 0,3\%$ (за 50 вспышек).

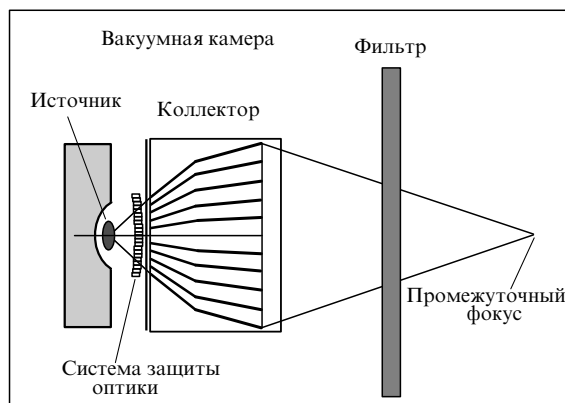


Рис. 1. К определению параметров источника для EUV-литографии.

Литий как рабочий материал был отвергнут на довольно ранней стадии исследований, в первую очередь, из-за необычайных технологических трудностей и опасности загрязнения всей литографической системы химически весьма агрессивным элементом. Эксперименты с более удобным химически нейтральным ксеноном показали, что коэффициент СЕ составляет 0,5–0,7 % для импульсной разрядной плазмы. Это означает, что средняя электрическая мощность, выделяемая в малом объеме источника, должна достигать 300–400 кВт.

Оценки, приведенные выше, сделаны для источника на основе разрядной плазмы. Другой возможный кандидат — плазма лазерного факела (ПЛФ). Существует целый ряд преимуществ ПЛФ как EUV-источника по сравнению с разрядной плазмой. Это и несколько больший коэффициент конверсии, и преимущества в эффективности сбора излучения, и, возможно, более простая система защиты оптики от разрушающего действия корпускулярного излучения. Однако наиболее существенным и, возможно, определяющим выбор типа источника аргументом, является высокая стоимость лазерных систем со средней световой мощностью во много десятков киловатт. Очевидно, что этот аргумент носит временный характер, поскольку коммерческая стоимость любой hi-tech-продукции имеет особенность неуклонно снижаться, однако в сегодняшних планах основных производителей литографических машин акцент сделан на использование EUV-источников на основе разрядной плазмы. Ниже мы опишем некоторые результаты по созданию разрядных источников, опираясь в основном на совместную работу Института спектроскопии РАН и лидирующей компании по производству литографических машин ASML (Нидерланды) в рамках Интеграционного проекта "MoreMoore" 6-й рамочной программы Европейского сообщества.

Низкая эффективность ксенона связана, в частности, с тем, что в используемом узком спектральном диапазоне излучает лишь несколько линий одного иона Xe^{+9} . В результате в нестационарной и неоднородной плазме импульсных разрядов и лазерных факелов полезное излучение присутствует в течение гораздо более короткого времени, чем полное время высокотемпературной фазы, и далеко не весь объем неоднородной по температуре плазмы излучает полезные кванты. Казалось, что это непреодолимое препятствие, однако атомная физика подсказала возможное решение — использование излучения многозарядных ионов олова.

С точки зрения фундаментальной атомной спектроскопии имеется несколько причин в пользу выбора олова в качестве рабочего вещества для источника излучения на длине волны 13,5 нм. Резонансными переходами в ионах $\text{Sn}^{+8} - \text{Sn}^{+13}$ являются $4d^k - (4d^{k-1}4f + 4p^54d^{k+1})$. Большая величина обменного взаимодействия $4d-4f$ в конфигурации $4d^{k-1}4f$ и обменного взаимодействия $4p-4d$ в конфигурации $4p^54d^{k+1}$ приводит к разделению уровней энергии этих конфигураций на две зоны, причем вероятности переходов из верхней зоны намного превосходят вероятности переходов из нижней зоны. Сильное взаимодействие между конфигурациями $4d^{k-1}4f$ и $4p^54d^{k+1}$ приводит к еще большему сужению этой излучательной зоны. В результате, несмотря на наличие многих сотен уровней в широком интервале энергии, излучение концентрируется в узком спектральном интервале. Кроме того, из-за малой зависимости энергии

возбуждения при $n = 4 - n' = 4$ -переходах в этот интервал попадают интенсивные переходы в нескольких соседних ионах. Подробное изучение спектра оловянной плазмы, возбуждаемого в вакуумной искре, было инициировано работами по созданию источника для EUV-литографии [2].

Уже первые эксперименты с разрядом в парах олова продемонстрировали существенное увеличение СЕ — от 0,5–0,7 % до 2 % или даже до 3 %. Требования к выделяемой в разряде мощности существенно понизились, но необходимая мощность все еще составила около 100 кВт — величину слишком высокую для единичного источника малого размера. Прежде чем сформулировать подходы, позволяющие работать в режиме экстремальных тепловых нагрузок, обратимся к физике используемого разряда. В качестве источника плазмы была выбрана классическая вакуумная искра — разряд между двумя электродами с подачей рабочего вещества в межэлектродный промежуток путем абляции материала катода (олово) с помощью импульса лазерного излучения. Исследования аксиально-симметричных разрядов, в частности в вакуумных искрах, показали, что мягкое рентгеновское излучение и ВУФ-излучение возбуждаются в плазме с токами, превышающими 10 кА в момент развития в столбе разряда перетяжных неустойчивостей. Известно, что эти перетяжки, или "микропинчи", образуются в результате вытекания плазмы в условиях сильных радиационных потерь, в данном случае за счет линейчатого излучения многозарядных ионов олова (см., например, [3]). Вытекание плазмы из перетяжки сопровождается сжатием и нагревом плазмы и переходом ко все более высоким кратностям ионизации. Радиус перетяжки определяется балансом джоулевого нагрева и энергетических потерь, в первую очередь радиационных потерь в оптически плотной плазме.

Процесс продолжается до тех пор, пока либо радиационные потери перестанут компенсировать джоулево теплообразование, либо в плазме разовьется аномальное сопротивление из-за малого числа носителей тока. На этой стадии происходит быстрое расширение плазмы и распад микропинча. Развитие неустойчивости можно проиллюстрировать с помощью диаграммы (рис. 2), на которой радиус пинча представлен как функция полного числа ионов в сечении разряда (погонная плотность ионов N_i). Направление траектории развития — умень-

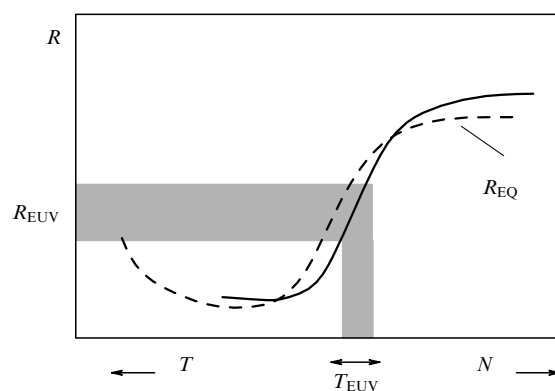


Рис. 2. Равновесный радиус беннетовского пинча (штриховая кривая). Температура T_{EUV} , необходимая для возбуждения EUV-квантов, соответствует сжатию до радиуса R_{EUV} .

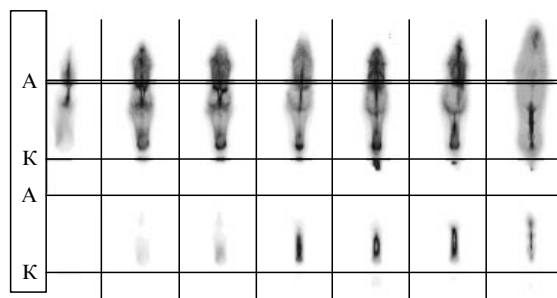


Рис. 3. Изображения столба плазмы, полученные в собственном коротковолновом излучении с помощью микроканального детектора с регулируемым временем открытия (от 3 до 50 нс). Изображение в верхней части рисунка соответствует излучению во всей области чувствительности МКП (< 100 нм); в нижней — через Zr/Si-фильтр. Расстояние между анодом А и катодом К 3 мм.

шение погонной плотности — указано стрелкой. Для сравнительно медленных сжимающихся пинчей в каждый момент выполняется (или почти выполняется) условие равновесия теплового и магнитного давлений — соотношение Беннета,

$$N_i(Z+1)T \sim I^2,$$

так что каждая точка траектории на рис. 2 может быть соотнесена с температурой плазмы, возрастающей вдоль траектории. Для быстрых, динамических пинчей отступления от соотношения Беннета могут быть значительными.

Для токов $I \approx 10-30$ кА температура $T \approx 20-40$ эВ достигается при сжатии столба плазмы до поперечных размеров около 200 мкм. На рисунке 3 приведен пример наблюдаемых в столбе разряда вакуумной искры перетяжек-микропинчей.

Наблюдается (часто последовательное во времени) образование нескольких микропинчей, излучающих в EUV-диапазоне. Этот эффект "скольжения" излучающей области вдоль оси разряда определяет интегральный во времени аксиальный размер источника.

Возникает любопытный вопрос: как можно надеяться на стабильность дозы EUV-излучения, если оно возбуждается в разряде в процессе развития неустойчивости, в данном случае "перетяжной" неустойчивости, хорошо известной в физике плазмы? Тем более, если речь идет о вакуумной искре — разряде с довольно неустойчивыми начальными параметрами, в первую очередь с плохо воспроизводимым начальным распределением рабочего вещества в межэлектродном промежутке. Оказалось, однако, что существует такая область параметров (начальный радиус и полное количество испаренного вещества), для которой траектория развития неустойчивости мало от них зависит [4]. Это обстоятельство проиллюстрировано на рис. 4а. Эксперименты с EUV-источником хорошо подтверждают этот факт: на рис. 4б показаны наложенные друг на друга (и хорошо совпадающие между собой) осциллографические сигналы тока и EUV-излучения 256 разрядов вакуумной искры с лазерным поджигом и током в максимуме около 10 кА.

Переход к плазме олова как излучателю EUV с коэффициентом конверсии СЕ до 2–3 % позволяет снизить требования к величине выделяемой в разряде электрической мощности до 100 кВт. Для разряда с размерами в несколько миллиметров это все еще остается

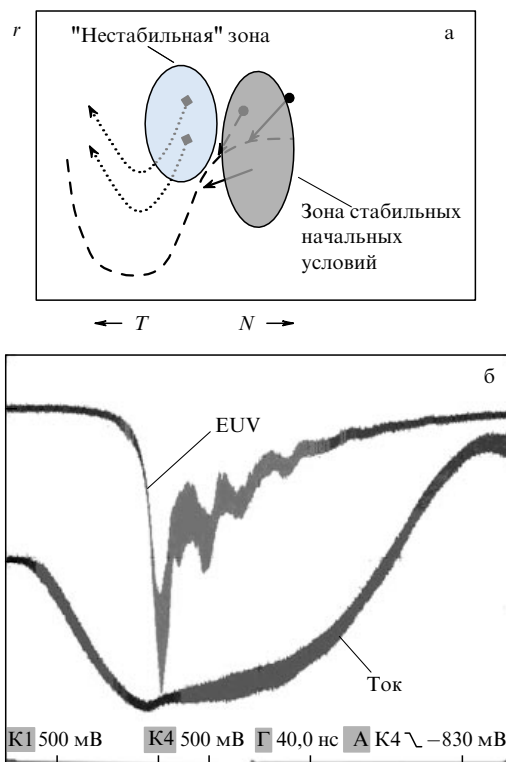


Рис. 4. (а) Стабильные (штриховые кривые) и нестабильные (пунктирные кривые) траектории развития микропинчей в координатах радиуса пинча r и погонного числа частиц N . (б) Наложенные друг на друга осциллографические сигналы тока и EUV-излучения 256 разрядов вакуумной искры с лазерным поджигом и током в максимуме около 10 кА.

ся немыслимо высоким значением. Возможное решение проблемы — так называемое "мультиплицирование" источника, т.е. создание множества источников, для того чтобы распределить между ними электрическую и тепловую нагрузку. Однако требование постоянства положения излучателя в пространстве и высокая рабочая частота (до 10 кГц) практически исключают "револьверную" систему с механическим повторением большого числа вакуумных искр с аксиально симметричной системой электродов и изоляторов. Именно поэтому мультипликация ксенонового источника представлялась практически невозможной.

Использование олова в сочетании с лазерной инициацией открывает особые возможности. Подача вещества в межэлектродный промежуток путем испарения поверхности электрода под воздействием лазерного импульса непосредственно обеспечивает аксиальную начальную симметрию независимо от формы электродов — начальная плазма разлетается в виде конуса с осью, перпендикулярной поверхности электрода. Один из вариантов системы с вращающимися электродами, нижний из которых покрыт жидким оловом (для облегчения возобновления поверхности), схематично изображен на рис. 5.

В случае вращения электродов при каждом новом выстреле лазер, положение фокуса которого не изменяется, испаряет олово с нового участка катодного кольца. Таким образом, возникает последовательность элементарных вакуумных искр, находящихся в одной и той же точке пространства, но относящихся к различным участкам плоских электродов — катода и анода. Жела-

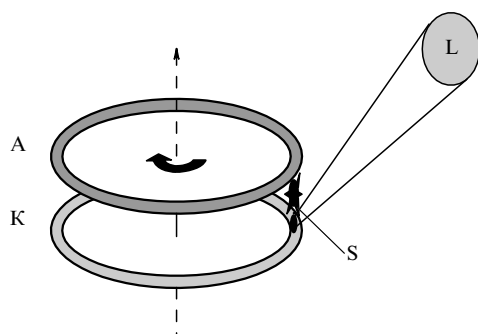


Рис. 5. Принципиальная схема "колесной" мультипликации.

тельно только, чтобы в промежутке между импульсами предыдущее положение фокуса лазера смещалось относительно нового на расстояние в 1–2 мм — размер зоны временно "испорченной" разрядом поверхности. При частоте повторения 10^4 Гц это соответствует минимально необходимой линейной скорости вращения порядка 10 м с^{-1} . Эксперименты и расчеты показывают, что подобные системы способны выдерживать электрические мощности до 50 кВт, а возможно, и до 100 кВт.

Дальнейшее развитие идея "непрерывной мультипликации" получила в струйном варианте источника. В качестве электродов предложено использовать две струи жидкого металла или сплава с невысокой температурой плавления, вытекающие с большой скоростью из металлических сопел. Насосы поддерживают в системе давление жидкого металла в несколько десятков атмосфер, что заставляет струи двигаться со скоростями в несколько десятков метров в секунду, обеспечивая тем самым охлаждение сопел и отвод тепла.

К струям приложено напряжение, и разряд между ними возникает при фокусировке лазерного излучения на одной из них (рис. 6). Струи не только уносят тепло, выделяющееся в разряде, но и эффективно охлаждают ближайшие к разряду металлические элементы — сопла. Струи попадают в теплообменник и после охлаждения возвращаются с помощью насосов в систему. Ресурс мощности такого технического решения 200 кВт.

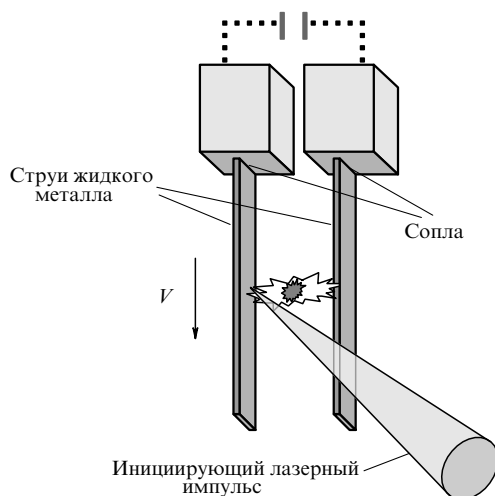


Рис. 6. Схематическое изображение "струйного" источника EUV-излучения.

Выше мы описали некоторые подходы к решению двух проблем — увеличения мощности излучения (тепловой нагрузки) и повышения стабильности дозы излучения. За рамками доклада остались такие важные аспекты создания литографической машины, как время жизни электродов и элементов оптики, в первую очередь коллектора излучения. Последняя проблема непосредственно связана с физикой источника излучения, так как возникает в результате корпускулярных потоков (атомы, ионы, капли материала электродов) из области разряда, так называемых "debris".

Демонстрационный (так называемый "альфа-тул") EUV-литографический аппарат уже создан и осваивается индустрией. Но его основные параметры еще в десять и более раз хуже параметров, соответствующих HVM-требованиям. Индустрия дает исследователям сравнительно короткий срок в два года для преодоления этой пропасти.

Список литературы

1. Banine V, Moors R J. *Phys. D: Appl. Phys.* **37** 3207 (2004)
2. Churilov S S, Ryabtsev A N. *Phys. Scripta* **73** 614 (2006)
3. Koshelev K N, Pereira N R J. *Appl. Phys.* **69** R21 (1991)
4. Antsiferov P S et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **22** 1073 (1989)
5. Koshelev K N et al., in *EUV Sources for Lithography* (Ed. V Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006) p. 175
6. Borisov V M et al., in *EUV Sources for Lithography* (Ed. V Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006) p. 477

PACS numbers: **81.07. – b**, **81.16. – c**, **81.16.Ta**

Атомно-проекционная параллельная фабрикация наноструктур

В.И. Балыкин

1. Введение

Существуют два принципиально разных подхода к развитию нанотехнологии. Эти подходы условно принято называть технологиями "сверху – вниз" и "снизу – вверх". Подход сверху – вниз основан на уменьшении размеров физических тел вплоть до получения объектов с нанометрическими параметрами. Например, полупроводниковые приборы микроэлектроники создаются с помощью метода оптической литографии, в котором заготовка подвергается обработке лазерным лучом и минимальный размер элементов создаваемой схемы определяется длиной волны лазерного излучения. Отметим, что стандартная оптическая литография имеет дифракционный предел разрешения порядка 65 нм. Существуют несколько других подходов в технологии сверху – вниз, каждый из которых обладает как достоинствами, так и недостатками: литография пучков заряженных частиц имеет проблемы, связанные с серийным производством структур и значительной ролью кулоновского отталкивания; самоорганизующаяся фабрикация все еще требует лучшего понимания физических процессов.

Технология снизу – вверх заключается в том, что создаваемый нанообъект "собирается" из индивидуальных атомов, молекул, биологических клеток и т.п. На возможность и перспективность такого подхода впервые указал Ричард Фейнман [1] в выступлении на ежегодном собрании Американского физического общества в 1959 г. Практическая реализация технологии снизу – вверх стала