Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

Институт физики микроструктур РАН

Н. И. Чхало

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

Препринт № 818-24 (ИФМ РАН)





Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

Институт физики микроструктур РАН

Н. И. Чхало

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

Препринт № 818-24 (ИФМ РАН)

Нижний Новгород 2024

УДК 621.38

Дается краткий обзор современного состояния экстремальной ультрафиолетовой (ЭУФ, EUV в англоязычной транскрипции), или рентгеновской, литографии на длине волны 13,5 нм в мире. Обсуждаются проблемы и перспективы развития этой технологии на ближайшие годы. Сообщается о новой концепции рентгеновской литографии в России, развиваемой в Институте физики микроструктур РАН (ИФМ РАН). Приводится обоснование преимуществ и перспектив реализуемости литографии на новой для литографии длине волны 11,2 нм. Дается краткий обзор отечественного уровня развития критических технологий, необходимых для создания рентгеновского литографа.

Ключевые слова: ЭУФ-литография, рентгеновская оптика, источник рентгеновского излучения, длина волны 11,2 нм, многослойные зеркала

New concept for the development of high-performance X-ray lithography

N. I. Chkhalo

A brief overview of the current state of extreme ultraviolet (EUV in English transcription), or, what is the same, X-ray lithography at a wavelength of 13.5 nm in the world is given. The problems and prospects for the development of this technology in the coming years are discussed. A new concept of X-ray lithography, developed at the Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, is reported. A justification is given for the advantages and prospects for the feasibility of lithography at a new wavelength for lithography, 11.2 nm. A brief overview of the domestic level of development of critical technologies necessary to create an X-ray lithograph is given.

Рецензент член-корреспондент РАН **3. Ф. Красильник**

© ИФМ РАН, 2024 г.

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди сотен технологических операций и единиц оборудования, используемых при производстве микросхем, литография занимает особое место. Это связано с рядом обстоятельств. Прогресс микроэлектроники все эти годы напрямую связан с уменьшением геометрических размеров топологических элементов. Чем меньше эти элементы, тем выше степень интеграции, информационная емкость и т. д. Топология и размеры элементов задаются литографией. Затраты на литографическое оборудование и стоимость самого процесса литографии могут на порядки величин превосходить другие затраты при производстве микросхем. Например, цена литографа с иммерсией на длине волны 193 нм может достигать 50 млн. евро, литографа на длине волны 13,5 нм – от 300 млн. евро, а комплект масок может стоить до 10 млн. долларов и более.

Самые современные чипы в основном производятся с использованием литографии на длине волны 193 нм. Это стало возможным благодаря непрерывному развитию методов повышения разрешающей способности (RET – resolution enhancement technique в англоязычной транскрипции). Наиболее эффективными RET являются: внеосевое освещение шаблона [1]; иммерсия, позволившая повысить числовую апертуру проекционных объективов до NA = 1,32 [2]; фазосдвигающие шаблоны, которые уменьшили числовой коэффициент k в критерии пространственного разрешения Рэлея более чем в 2 раза [3], и многократное экспонирование (Multipatterning) [4]. Активно применяются методы оптической коррекции (OPC – optical proximity correction), улучшающие качество передачи рисунка маски на пластину с фоторезистом [5].

Еще одним важным направлением по снижению коэффициента k в рэлеевском соотношении является совершенствование резистов в направлении повышения контраста, увеличивающего угол наклона края проявленного рисунка, и снижения шероховатости края [6].

В настоящее время применение RET позволило достичь предела разрешающей способности ультрафиолетовой литографии 8 нм [7].

Однако эти технологии резко увеличили стоимость литографического процесса и понизили выход годных изделий. Например, если современный чип памяти содержит около 80 слоев, а критических, т. е. с минимальными размерами, 25 слоев, то при размере hp = 8 нм (hp – half pitch) и использовании DUV (deep ultraviolet) 193і литографии только для их изготовления потребуется до 100 полных процессов на пластине.

Разрешающую способность литографии можно повысить, перейдя к более короткой длине волны. Исследования в области EUV-литографии на длине волны $\lambda = 13,5$ нм были начаты еще в 80-е годы прошлого столетия [8]. И если вначале разработкой собственного рентгеновского литографа занимались в США [9], Японии [10], Нидерландах [11] и в России [12], то к настоящему времени осталась только компания ASML, Нидерланды. Период разработки показал невероятную ее сложность, и только компания ASML смогла интегрировать самые передовые достижения со всего мира в своем продукте. Другие компании и организации, достигшие успехов в разработке определенных узлов и технологий для EUV-литографа, сконцентрировались на этих разработках в интересах ASML.

Следует отметить также продолжающиеся исследования в области литографии на синхротронах ALS и NewSUBARU [13, 14].

Несмотря на широкий фронт работ и большое число участников этого глобального проекта, только на рубеже 2018–2019 гг. литографы на рабочей длине волны 13,5 нм стали применяться для производства чипов [15]. К концу 2023 г. на фабриках в США, Корее и Тайване при изготовлении критических слоев уже использовалось около 180 EUV-литографов. Несмотря на относительную молодость этой технологии, она быстро распространяется и можно смело утверждать, что это литография следующего подальнейшего коления. ASML ожилает роста производства EUVлитографов. Если Россия планирует занимать достойное место в микроэлектронике, ей также необходимо развивать эту технологию.

После долгих лет забвения и порой агрессивного отторжения проектов, предлагаемых Н. Н. Салащенко и автором данной работы [16], тема рентгеновской литографии стала широко обсуждаемой в РФ. В значительной мере этому способствовало появление в 2022 г. Дорожной карты по развитию рентгеновской литографии в России, разработанной в Институте физики микроструктур РАН (ИФМ РАН), о которой пойдет речь ниже. Главное же, вызрело понимание в правительстве важности поднятой проблемы. Появился ряд организаций, не имеющих компетенций в области рентгеновских технологий, тем не менее готовых заняться этой проблемой.

Очевидно, что при таких исходных условиях единственно возможным путем к собственному рентгеновскому литографу виделось повторение того, что сделала компания ASML. На основании длительного (начиная с середины 90-х и до 2014 г.) взаимодействия с ASML и ZEISS по разработке EUV-литографа, а также собственного опыта создания экспериментального образца литографа автор убежден, что попытка копирования литографа компании ASML не приведет к успеху. Этот вывод относится как к техническим, так и экономическим проблемам, стоящим на пути построения литографа на 13,5 нм.

Целями данной статьи является обсуждение существующей концепции EUV-литографии, изложение и обоснование новой парадигмы рентгеновской литографии, реализация которой могла бы привести к успеху ее развития в России в обозримом будущем.

2. КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ EUV-ЛИТОГРАФИИ КОМПАНИЕЙ ASML

В данном разделе не будем подробно останавливаться на критических технологиях литографии и принципах построения рентгеновского литографа, этому посвящено много оригинальных работ, монографий, например, [17–19]. В последнее время автор с коллегами обращался к этой теме в отечественных журналах и интернете [20–22]. Остановимся лишь на парадигме, в рамках которой строилась программа развития EUV-литографии в ASML и тех последствиях, к которым привело следование этой концепции.

Концепция развития EUV-литографии компании ASML основана на достижении производительности литографического процесса как у традиционной DUU-литографии, но с выигрышем в пространственном разрешении и уменьшении числа операций на пластине путем уменьшения числа применяемых RET (RET – resolution enhancement techniques). И действительно, еще в 2012 г. на опытных литографах (β-tools) было показано, что если не учитывать низкий жизненный цикл элементов литографа и затраты на ремонт и простои оборудования, начиная с топологических норм 32 нм, стоимость литографического процесса на EUV-машине становится меньше, чем на DUV. При уменьшении топологических размеров этот эффект только усиливается [23].

Следствием требования сравнимой с DUV-литографией производительностью у рентгеновского литографа стал ряд трудно разрешимых проблем и крайне дорогостоящих их решений. Производительность определяется эффективностью отражающей многослойной оптики и конверсии подведенной к источнику энергии в EUV-излучение на рабочей длине волны, в спектральной полосе, равной полосе пропускания оптической системы литографа.

Рекордные коэффициенты отражения многослойных Mo/Si-зеркал на длине волны 13,5 нм составляют 70,15% [24] при теоретически возможном значении около 75%. Несмотря на огромные усилия исследователей, этот результат остается неизменным уже долгие годы. В работе [25] сообщалось о достигнутых коэффициентах отражения около 71,5%, однако в этих зеркалах используется бериллий, работы с которым в Европе ограничены, поэтому этот результат не находил своего применения в литографах.

Если рассчитать эффективность 12-зеркальной оптической системы литографа, состоящей из коллектора, 4 зеркал осветителя, маски и 6 зеркал проекционного объектива, а также учесть коэффициенты пропускания фильтра, защищающего маску от загрязнений (pellicle), и фильтра, разделяющего объемы проекционного объектива и стола с экспонируемой пластиной GDL (gas dynamic lock), то эффективность системы составит менее 0,9%. На практике эта величина еще меньше из-за низкого, на уровне 41%, коэффициента отражения коллектора [26], наличия на поверхности Mo/Siзеркал защитных слоев и поляризационных эффектов. Поэтому для достижения высокой производительности основные усилия разработчиков направлены на увеличение мощности лазерно-плазменного источника (ЛПИ) излучения на 13,5 нм.

В качестве излучателя выступают высокозарядные ионы олова +7...+10, получаемые при воздействии мощного CO_2 -лазера, длина волны 10,6 мкм, на капли олова с размерами около 30 мкм. Коэффициент конверсии (CE) такого источника, который представляет собой долю от энергии лазерного пучка, излученную ионами олова на длине волны 13,5 нм, в спектральной полосе 2%, в телесный угол 2π ср (полупространство) составляет CE = 6% [26]. В русскоязычной версии описание работы такого источника можно найти в [27]. Так как эффективность конверсии уже достигла своего предела, то направление повышения производительности – это увеличение средней мощности лазера. В настоящее время мощность лазера составляет 21,5 кВт [26], обсуждаются планы по ее увеличению до 50 кВт.

Этот источник, обладающий наивысшим коэффициентом конверсии в области 13,5 нм, является основной проблемой EUV-литографа от ASML. Во-первых, это огромные габариты установки, лазерная система занимает целый этаж. Во-вторых, из-за использования уникального по параметрам газоразрядного СО₂-лазера установка превысила по мощности мегаваттный уровень. В-третьих, серьезнейшие проблемы влечет за собой использование олова в литографическом процессе. Нетрудно рассчитать, что за сутки в литограф поступает почти 1 кг олова, которое необходимо вывести из установки, так как даже нанометровые загрязнения зеркал парами олова приведут к полной потери отражательной способности. Решением по защите оптики от загрязнения парами олова стало использование водорода, благодаря образованию летучего соединения SnH₄ [26]. Также водород тормозит высокоэнергичные ионы, предотвращая бомбардировку дорогостоящего коллекторного зеркала, находящегося на расстоянии нескольких десятков сантиметров от точки взаимодействия лазерного пучка с оловянной каплей. Тем не менее защита олова не полная, и требуется перестановка коллектора примерно каждые две недели [28]. Использование в литографе водорода, да еще активированного ионизацией из-за облучения EUV- и DUVизлучением, предъявляет жесткие требования к материалам конструкции, сильно ограничивая их номенклатуру или сокращая срок службы. В частности, химическое взаимодействие водорода с pellicle сильно ограничивает его время жизни примерно двумя неделями [29, 30]. Есть большая вероятность, что при повреждении pellicle, происходит повреждение и маски. Наконец, в-четвертых, 10% мощности, т. е. около 2 кВт, лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм рассеиваются на плазме и падают на коллектор [31]. Для предотвращения распространения этого излучения дальше в литограф коллектор покрывается дифракционной решеткой, отражающей в нулевом порядке EUV-излучение, а в дифракционных порядках 10,6 мкм [32].

Использование хорошо проводящей тепло металлической подложки для коллектора, а также потери, связанные с формированием дифракционной структуры на подложке, приводят к низкой, на уровне 41%, эффективности коллектора, тем самым еще сильнее понижая эффективность оптической системы.

В совокупности, из-за описанных проблем, из 6% конверсионной эффективности источника до промежуточного фокуса доходит менее 1,2% от мощности лазерного излучения. К этому выводу легко прийти, разделив мощность EUV-излучения в промежуточном фокусе 250 Вт на мощность лазерного пучка 21,5 кВт [26]. Эти потери – результат мероприятий, защищающих оптику и другие элементы литографа от паров и высокоэнергичных ионов олова, а также от радиационных нагрузок вследствие рассеяния лазерного излучения.

Очень короткое время жизни коллектора и маски, стоимость каждого в районе миллиона евро, огромное потребление электрической энергии делают крайне высокой стоимость пользования этого вида оборудования.

В целом, развиваемая ASML концепция привела к огромной стоимости оборудования. По разным данным цена выпускаемых в настоящее время литографов серии NXE:3400C и NXE:3600D превышает 300 млн. евро, а нового поколения EXE:5000 с числовой апертурой NA = 0,55 и разрешением 8 нм в разы больше. Тем не менее топ-менеджеры компаний TSMC, Samsung и Intel подтверждают, что, несмотря на все эти затраты, EUV-литография экономически эффективна. Однако надо учитывать, что эта эффективность обусловлена гигантским рынком чипов, занимаемым этими компаниями, по сути, монополистами. При уменьшении рынка эта эффективность резко упадет. Косвенным подтверждением этого вывода является и то, что, кроме этих гигантов, а также американской Micron Technology и корейской SK Hynix Korea, входящих в 5-топ производителей чипов в мире, такое оборудование больше никто не приобрел и согласно прогнозам ASML на ближайшее будущее и не планирует.

Исходя из объемов рынка, можно сделать вывод, что с экономической точки зрения повторять проект ASML для России бессмысленно. Аргумент, что цена для спецтехники не столь принципиальна, на наш взгляд, не корректен, так как даже при классической DUV-литографии стоимость чипа изменяется на 5 порядков величины в зависимости от серийности производства, и при мелкосерийном производстве она может и превысить стоимость спецтехники, для которой этот чип производился.

Невероятные технологические трудности создания EUV-литографа привели к тому, что даже США и Япония, стартовав в этой гонке первыми, не смогли довести свои EUV-программы до конкурентного продукта и ограничились лишь отдельными компонентами для ASML. Причиной их неудачи, и, в противовес, успеха ASML, на наш взгляд, является то, что ASML смогла интегрировать в своем продукте лучшие мировые достижения по всем основным компонентам. Этого они достигли путем беспрецедентной открытости проекта. На основании этого можно сделать вывод, что и в технологическом смысле одной стране маловероятно повторить проект ASML. Поэтому автору очевидно, что для отечественной программы необходим альтернативный подход к решению проблемы высокопроизводительной рентгеновской литографии, обеспечивающий сопоставимые технические характеристики и при этом делающий эту технологию более доступной по цене оборудования и стоимости эксплуатации. В случае реализации этой концепции литографы будут востребованы не только в РФ, но и за рубежом, так как они станут доступными для компаний, не входящих в 5-топ.

3. НОВАЯ ПАРАДИГМА РАЗВИТИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

Последние достижения ИФМ РАН в области многослойной рентгеновской оптики и лазерно-плазменного источника на основе ксенона на длину волны 11,2 нм позволили по-новому взглянуть на развитие рентгеновской литографии с точки зрения удешевления стоимости и дальнейшей эксплуатации литографа с сохранением минимальных технологических норм на уровне ASML ценой некоторого уменьшения его производительности. Достижение такой цели предполагает кратное снижение энергетики ЛПИ. Если литограф от ASML – это установка мегаваттного уровня, то концепт от ИФМ РАН – порядка 100 кВт. Будут кардинально уменьшены габаритные размеры, повышен жизненный цикл лазера, коллектора и других элементов литографа. Появится возможность повышения эффективности рентгенооптической схемы и упрощения проекционной схемы.

В основе предложенной концепции лежат следующие инновации.

1. Уменьшение рабочей длины волны с 13,5 до 11,2 нм приведет, согласно критерию Рэлея, к увеличению разрешающей способности на 20%. Это позволит для достижения одинакового разрешения уменьшить числовую апертуру объектива с $NA_{13,5} = 0,33$ до $NA_{11,2} = 0,27$. Следствием относительно небольшого изменения NA является уменьшение габаритных размеров и существенное упрощение изготовления зеркал. Упрощение изготовления зеркал связано с тем, что зеркала для проекционной схемы литографа имеют асферичность 8–12 порядков, а уменьшение числовой апертуры зеркала на 20% приведет к уменьшению асферичности высоких порядков в 4–9 раз. Поэтому можно ожидать уменьшения габаритных размеров и заметного удешевления производства объектива. Примерно в 1,4 раза повысится эффективность onтической системы в результате применения многослойных Ru/Be-зеркал вместо Mo/Si.

 Замена оловянного лазерно-плазменного источника на ксеноновый на порядки уменьшает загрязнения оптических элементов продуктами разлета материала источника. В разы возрастет время жизни дорогостоящих коллектора и pellicle, а значит и масок. Все это снижает затраты как на изготовление вакуумных элементов и систем, и литографа в целом, так и на стоимость эксплуатации. Ксенон представляет собой инертный газ и не может загрязнять оптику. Основными источниками негативного воздействия на оптику в случае ксенона являются высокоэнергичные ионы, способные распылять зеркала, и продукты эрозии сопла из-за бомбардировки ударными волнами и быстрыми ионами, рожденными в лазерном разряде (о пути решения этих проблем будет сказано ниже). При недостаточной защите рассеянными потоками рабочего газа для подавления ионных потоков будет использоваться инертный или слабоактивный газ.

Одной из проблемных частей оловянного ЛПИ является высокочастотный генератор капель олова, сопло которого работает при температуре, превышающей температуру плавления олова. Помимо проблемы надежности работы генератора капель [33], в этом ЛПИ требуется сложная инфраструктура по синхронизации работы всех систем, обеспечивающая генерацию и предварительное испарение капель, и последующий их нагрев основным импульсом лазерного излучения. В случае ксенонового источника конструкция генератора капель упрощается до примитивного сверхзвукового сопла с непрерывной подачей газа. Это решение устраняет ряд сложных и дорогостоящих систем ЛПИ, увеличивает ресурс его работы. Это снижает как стоимость ЛПИ, так и эксплуатационные затраты.

Вместо крупногабаритного газоразрядного CO₂-лазера используется надежный малогабаритный и энергосберегающий твердотельный дисковый лазер с диодной накачкой. Рабочая длина волны лазера 1,03 мкм. Важно отметить, что в России в настоящее время нет даже экспериментального прототипа импульсного CO₂-лазера с близкими к ASML параметрами, в то время как имеются передовые разработки в области мощных твердотельных гибридных лазеров, о чем будет сказано ниже.

Низкие средняя мощность и рассеянное плазмой лазерное излучение, а также высокие коэффициенты поглощения тонких металлических пленок излучения с длиной волны 1 мкм заметно уменьшают радиационную нагрузку на коллектор, а также позволяют использовать обычные фильтры для подавления длинноволнового излучения вместо дифракционных структур на коллекторе. Это существенно упрощает конструкцию, удешевляет коллектор и повышает его эффективность с ~40%, как у ASML-литографа, до ~65%. Использование фильтра вместо дифракционной структуры на коллекторе также уменьшает тепловые нагрузки на последующие элементы проекционной схемы, поскольку они эффективно поглощают излучение в широком диапазоне длин волн, в то время как дифракционный фильтр на коллекторе фактически защищает только от излучения с длиной волны 10,6 мкм.

3. Переход к длине волны 11,2 нм в потенциале открывает возможность использования резистов на основе кремния, в частности кремнийорганических. Наибольшей чувствительностью при высоких параметрах передачи рисунка в EUV-литографии обладают органические резисты. Однако по мере уменьшения топологических размеров необходимо уменьшение их толщины. В настоящее время толщина слоя резиста составляет десятки нанометров. Однако разработчики столкнулись с проблемой низкого поглощения в этих слоях. Так, слой ПММА толщиной 50 нм (аспектное отношение для hp = 13 нм около четырех) поглотит только 23% излучения. Это одна из причин, понижающая в разы производительность EUV-литографа. ASML приводит дозы при получении наноструктур на уровне 30 мДж/см², в то время как чувствительность химически усиленных резистов на основе ПММА существенно выше, а дробовой шум перестает заметным образом влиять на LER (line edge roughness) при поглощенной дозе на уровне 10 мДж/см² [34]. Для повышения поглощения излучения фоторезист наполняют металлическими нанокластерами, уменьшающими длину пробега фотонов в резисте. Однако использование таких частиц ухудшает шероховатость края формируемых в резисте наноструктур.

Длина волны 11,2 нм находится за L-краем поглощения Si (λ_L = 12,4 нм), и в этом случае поглощение кремния становится даже выше, чем у многих металлов. Поэтому использование кремнийорганических резистов может заметно повысить их чувствительность без ухудшения шероховатости LER. Простейшие расчеты показывают, что хорошо известный электронный резист HSQ, имеющий в своей формуле всего один атом Si, обеспечивает большее поглощение на длине волны 11,2 нм, чем ПММА на 13,5 нм. Можно ожидать, что увеличение доли кремния в резисте приведет к заметному увеличению эффективности резиста на длине волны 11,2 нм по сравнению с 13,5 нм.

В таблице приводится сравнение основных параметров литографа TWINSCAN NXE:3600D с ожидаемыми параметрами литографа, разработанного в ИФМ РАН. Ряд «внутренних» параметров литографа от ASML был восстановлен автором из анализа различных источников, тем не менее основные взяты с сайта ASML. При расчете производительности литографического процесса от ИФМ РАН были сделаны консервативные оценки.

Несколько комментариев к таблице. Благодаря существенно меньшим ионным/тепловым/радиационным нагрузкам и отсутствию водорода, в результате сегментирования коллектора и использования электро-механических приводов сегментов к функционалу коллектора как сборщика рентгеновского излучения, можно добавить функцию формирователя заданного распределения света, падающего на маску. В этом случае в осветительной системе можно уменьшить количество зеркал с 4 до 3, что повысит производительность примерно на 30%. Однако в расчете производительности эта возможность не учитывалась. Точного значения коэффициентов отражения Mo/Si-зеркал в реальных объективах в литературе не нашлось, только для маски, 65%. С нашей точки зрения, значение 69%, близкое к рекордному значению 70,1%, представляется верхней оценкой, так как эксплуатация зеркал в водородной среде предполагает на поверхности дополнительный защитный слой Ru, который снижает коэффициент отражения. В случае Ru/Be-зеркал Ru входит как составной элемент, т. е. не снижая коэффициента отражения зеркала.

Параметр	ASML	ИФМ РАН
Длина волны, нм	13,5	11,2
Числовая апертура объектива, NA	0,33	0,27
Пространственное разрешение, нм	13	13
Количество зеркал в объективе, шт.	6	6
Количество зеркал в осветителе, шт.	4	4 (3)
Коэффициент отражения зеркала, %	69	72
Коэффициент отражения маски, %	66	70
Коэффициент отражения коллектора, %	41	65
Пропускание газодинамической защиты, %	57	80*
Поглощение в резисте, отн. единицы	1	1,2**
Мощность лазера, кВт	21,5	3,6
Конверсионная эффективность источника, %	6	2-4***
Произволительность пластин Ø300 мм в час	160	60

Сравнение основных параметров литографа TWINSCAN NXE:3400С с ожидаемыми параметрами литографа, разработанного в рамках концепции от ИФМ РАН.

Примечание. Пояснения чисел со звездочками даны в тексте.

Пропускание газодинамической системы защиты ASML-литографа было рассчитано из приведенных на сайте производителя среднего значения коэффициента отражения коллектора, коэффициента конверсии, телесного угла коллектора, средней мощности лазера и EUV-мощности в промежуточном фокусе. 80% со звездочкой в нашем случае – расчетная величина с учетом поглощения в ксеноне.

Эффективность конверсии 2–4% с двумя звездочками – это экспериментальные данные разных авторов. Теория показывает, что можно ожидать 7,5%, что даже выше, чем у оловянного источника, на 13,5 нм. Однако экспериментального подтверждения этому пока нет. В расчете производительности был принят коэффициент конверсии 3%.

Увеличенная в 1,2 раза эффективность резиста на длине волны 11,2 нм по сравнению с 13,5 нм – расчетная величина с учетом сильного поглощения кремния на этой длине волны.

Как видно из таблицы, достаточно консервативные оценки показывают, что при средней мощности лазера 3,6 кВт ожидаемая производительность

на длине волны 11,2 нм будет меньше примерно в 2,7 раза, чем у ASMLлитографа. Для фабрик, у которых рынок продукции меньше, чем у 5-топ компаний, этой величины вполне достаточно, с учетом того что из всех слоев на чипе рентгеновская литография используется только при формировании нескольких критических слоев.

Таким образом, успешная реализация данной концепции позволит достичь целей повышения доступности рентгеновской литографии для пользователей без ущерба разрешающей способности.

4. ОБОСНОВАНИЕ РЕАЛИЗУЕМОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ КОНЦЕПЦИИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

Для успешной реализации проекта в ИФМ РАН создан научнотехнологический задел мирового уровня.

Для изготовления рентгеновской оптики, в том числе и асферической, разработана технология двустадийного формообразования. На первом этапе методом классической глубокой шлифовки-полировки с использованием уникальных полирующих составов [35] изготавливаются плоские или сферические заготовки. Целевым параметром завершения этой стадии обработки является достижение эффективной шероховатости в диапазоне пространственных частот 0,025–60 мкм⁻¹ на уровне 0,2 нм и точности формы по параметру среднеквадратического отклонения (СКО) менее 10 нм.

На следующем этапе методом ионно-пучкового травления осуществляется финишная полировка, асферизация и коррекция локальных ошибок. На этой стадии достигается эффективная шероховатость на уровне 0,1 нм, а точность формы СКО = 0,6–0,8 нм, или λ /18– λ /14 для длины волны λ = 11,2 нм. Эти значения удовлетворяют критерию Марешаля для достижения дифракционного качества получаемых изображений. Подробнее о развитых методах безэталонной метрологии аберраций оптических элементов и систем, шероховатости, а также о методах и оборудовании для изготовления высокоточных подложек можно найти в работах [37–40].

Для напыления высокоотражающих многослойных рентгеновских зеркал, в том числе и нормального падения, в ИФМ РАН действуют 8 технологических установок, использующих магнетронное и ионно-пучковое распыление материалов, в том числе две установки работают в специализированной бериллиевой лаборатории. В недавней работе [41] сообщалось, что в ИФМ РАН была разработана технология напыления Ru/Be-зеркал с коэффициентами отражения на длине волны 11,4 нм до 72,2%, что заметно выше рекордных 70,15% Mo/Si-зеркал, используемых в установке ASML. В составе 12-зеркальной оптической системы литографа эта оптика по эффективности превосходит Mo/Si-оптику в 1,4 раза.

Исследования по ксеноновому источнику рентгеновского излучения были начаты почти 10 лет назад. Основные результаты опубликованы в

работах [42–45]. Экспериментальные значения коэффициента конверсии СЕ на длине волны 11,2 нм варьируются в пределах 2–4%. Причиной такого разброса является сильное поглощение рентгеновского излучения в ксеноне. Эта проблема будет решаться путем наращивания откачных мощностей вакуумной камеры источника, а также оптимизации параметров струи в области взаимодействия с лазерным излучением.

Перспективы получения конверсионной эффективности около 4% подтверждаются также работами группы С. Калмыкова из ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Они приводят значение 3,8% [46]. По сравнению с эффективностью оловянного источника 6% эта величина кажется меньше. Однако, как отмечалось выше, из-за потерь в системах защиты оптических элементов от загрязнения оловом и необходимости выдерживать коллектором киловаттные радиационные нагрузки лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм, эффективность этого источника находится на уровне 1%. Таким образом, есть серьезные основания ожидать, что эффективность использования ксенонового источника будет не ниже.

Важно отметить, что приведенные выше коэффициенты конверсии на длине волны 11,2 нм были получены с использованием твердотельного лазера с длиной волны 1,06 мкм. Для литографических целей нужен импульсно-периодический лазер с энергией в импульсе десятки – сотни миллиджоулей, длительностью в несколько наносекунд и средней мощностью от киловатта. В области создания гибридных Yb:YAG-лазеров с дисковым усилителем на длину волны 1,03 мкм имеются существенные заделы в ИПФ РАН. В частности, разработан экспериментальный образец лазера с близкими параметрами импульсов и средней мощностью около 1 кВт [47]. Разработчики уверены в возможности масштабирования средней мощности до 2,4–3,6 кВт, в том числе, при необходимости, путем интеграции в единую систему нескольких лазерных пучков.

К значимым заделам в области источников рентгеновского излучения также следует отнести самые современные диагностики, обеспечивающие измерение основных параметров источника: мощность рентгеновского излучения в спектральной полосе пропускания литографа и вне полосы в EUV-диапазоне, размер источника на рабочей длине волны. Для этого в ИФМ РАН разработан ряд приборов. В частности, абсолютно калиброванный по чувствительности и длине волны прибор для измерения мощности EUV-излучения в 2%-ной спектральной полосе был использован в ASML в качестве вторичного эталона для сравнения источников от различных разработчиков [48]. Однозеркальный спектрометр для абсолютных измерений рентгеновского и EUV-излучения позволяет измерять эмиссионные характеристики источника в диапазоне 3–30 нм [49]. Для измерений размеров источника излучения на длине волны 11,2 нм создан калиброванный по длине волны и чувствительности микроскоп на основе объектива Шварцшильда, обеспечивающий микронное разрешение [50]. В области резистов для 13,5 нм совместно ИФМ РАН и Институтом химии ННГУ им. Н. И. Лобачевского также были получены значимые результаты. На базе химически усиленных ПММА резистов были достигнуты высокие (5–15 мДж) чувствительности резистов при контрасте больше трех [51, 52]. При переходе на резисты на основе Si можно ожидать увеличения чувствительности путем их большего поглощения на длине волны 11,2 нм по сравнению с 13,5 нм. В частности, расчеты показывают, что уже применяемый в электронной литографии резист силсесквиоксановый водород (HSQ), обеспечивающий рисование линий менее 10 нм [53], имея в своей молекулярной формуле всего один атом Si и плотность существенно меньше, чем у ПММА, тем не менее, на длине волны 11,2 нм поглощает больше, чем ПММА на длине волны 13,5 нм. Это позволяет надеяться на существенный прогресс в резистах на основе кремния на длину волны 11,2 нм.

В ИФМ РАН имеются значимые заделы в области масок для EUVлитографии [54] и свободновисящих многослойных пленок для защиты масок (pellicle) и оптики от загрязнений продуктами разложения резистов (GDL), фильтров спектральной очистки (SPF) [55–57]. В частности, экспериментальные литографы компании ASML оснащались этой свободновисящей оптикой. Получено около 20 совместных патентов с ASML. В настоящее время эта оптика востребована, в частности, в странах Юго-Восточной Азии.

При разработке методов изготовления и на стадии серийного производства важной является диагностика дефектов масок на рабочей длине волны. Поверхностных методов диагностики, например с использованием атомносиловой или электронной микроскопии, недостаточно, так как маски для EUV/рентгеновского излучения отражательного типа, и в отражении участвует весь объем многослойной структуры. Внутренние дефекты, даже в одном слое, могут локально привести к потере отражения. При этом на поверхности этот дефект может быть не заметен.

Для решения этой проблемы в ИФМ РАН создан прототип такого микроскопа, работающий на длине волны 13,8 нм [58], обеспечивающий разрешение 140 нм, ограниченное размером пикселя видеокамеры. Аберрации проекционного объектива обеспечивают разрешение на уровне 30 нм, что вполне достаточно для инспекции масок.

В ИФМ РАН имеются некоторые компетенции в области сканирующих систем и автофокуса, что позволило ранее создать первый в России макет литографа на длину волны 13,5 нм [12]. Главным отличием систем сканирования современных нанолитографов от традиционных движущихся платформ является использование принципов левитации – отсутствие контактирующих подвижных элементов [19]. Это новый подход для понятия «точная механика». Если раньше основной упор делался на высокую точность изготовления деталей и их сборку, то в этих подвижках упор переносится на точное позиционирование, базирующееся на системе управления

движущейся платформы с использованием специально рассчитанных и изготовленных электромоторов, системе управления в реальном времени большим числом обмоток и на высокоточных, на первом этапе интерферометрических, системах контроля положения платформы в пространстве. В России имеются компетенции и научные школы в области как электропривода, так и интерферометрических систем, поэтому и эта проблема может быть решена.

5. ДОРОЖНАЯ КАРТА ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА

По аналогии с опытом развития мировой EUV-литографии реализация предложенной концепции предполагает 3 этапа.

Первый этап – это НИР с элементами ОКР. Целями данного этапа являются: доработка, а там, где научно-технологические заделы минимальны, – фактически создание критических технологий рентгеновской литографии; выявление основных проблем по всем ключевым технологиям и выработка предложений по коррекции технических решений, формирование кооперационных связей и списка оборудования, необходимого для решения задач второго этапа; создание экспериментального образца литографа для тестирования всех элементов литографа в реальном технологическом процессе, разработка резистов и отработка технологии формирования наноструктур методом рентгеновской литографии.

Целями второго этапа являются: создание опытного образца высокопроизводительного литографа с шестизеркальным проекционным объективом, мультикиловаттной лазерной системой, системой сканирования для пластин Ø200/300 мм; интеграция рентгеновской литографии в высокопроизводительную линейку производства передовых отечественных чипов; создание кооперационных цепочек для производства основных элементов и систем литографа.

Результатами этапа станут создание опытного образца литографа с производительностью более 60 пластин Ø200 мм в час; интеграция рентгеновской литографии в технологическую цепочку производства чипов на передовой отечественной фабрике, позволяющая использовать эту технологию при производстве критических, с минимальными топологическими нормами, слоев; формулирование технического задания и технико-экономического обоснования на опытный образец литографа для индустриальных применений.

Третий этап предполагает создание литографа, адаптированного к эксплуатации на фабрике, с производительностью пластин диаметром 300 мм более 60 в час, организацию серийного производства литографов в России.

Важным для дальнейших перспектив этой передовой технологии литографии является создание в России научно-технического центра для исследований и разработок в области рентгеновской литографии.

выводы

EUV-литография на длине волны 13,5 нм, несмотря на свою молодость (в индустрии применяется с конца 2018 г.), стала одной из ключевых технологий при производстве чипов с передовыми технологическими нормами. Производство EUV-литографов и сопутствующего оборудования уже обеспечивает около 50% выручки компании ASML – мирового лидера в производстве литографического оборудования и единственного производителя для EUV-литографии. Однако развиваемая ими концепция достижения максимальной производительности литографического

процесса привела к экстремально высокой стоимости оборудования и его эксплуатации. Это резко ограничило число компаний, способных использовать эту технологию. Технически повторить разработку ASML представляется маловероятным, да и использование подобного оборудования для отечественного рынка чипов с его ограниченным объемом не представляется целесообразным.

В данной работе предлагается новая концепция рентгеновской литографии, основанная на ряде инновационных решений, которые приведут к существенному снижению энергетики литографа, габаритных размеров, стоимости оборудования и его использования при сохранении пространственного разрешения и производительности на уровне литографа от компании ASML. Приводится обоснование реализуемости предложенной концепции, которая базируется на почти 30-летней вовлеченности коллектива ИФМ РАН в разработку по EUV-литографии, а также на результатах последних лет в области источника рентгеновского излучения, оптики дифракционного качества и многослойных рентгеновских зеркал на длину волны 11,2 нм. На основе предложенной концепции разработана дорожная карта развития рентгеновской литографии в РФ.

Реализация предлагаемой концепции и дорожной карты развития рентгеновской литографии путем новых решений позволит в разумные сроки создать в РФ собственные современные нанолитографические установки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ. Работа выполнена в рамках государственного задания FFUF-2021-0022.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ. Автор посвящает эту работу ушедшему в 2024 г. из жизни д.ф.-м.н., члену-корреспонденту РАН Н. Н. Салащенко – основателю многослойной рентгеновской оптики в стране, отдавшему много сил для развития рентгеновской литографии. Также выражаю благодарность З. Ф. Красильнику за поддержку темы рентгеновской литографии и активные усилия по продвижению данного проекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Reynolds G. O.* A concept for a high resolution, optical lithographic system for producing one-half micron linewidths // Proc. SPIE. 1986. V. 633. P. 228–238.

2. *Kim K., Chung U-In., Park Y., Lee J., Yeo L., Kim D.* Extending the DRAM and FLASH memory technologies to 10 nm and beyond // Optical Microlithography XXV. Proc. SPIE. 2012. V. 8326. P. 46–56. https://doi.org/10.1117/12.020053

https://doi.org/10.1117/12.920053.

3. *Tritchkov A., Jeong S., and C. Kenyon C.* Lithography Enabling for the 65 nm node gate layer patterning with Alternating PSM // Proc. SPIE. 2005. V. 5754. P. 215–225.

4. Hazelton A. J., Wakamoto S., Hirukawa S., McCallum M., Magome N., Ishikawa J., Lapeyre C., Guilmeau I., Barnola S., and S. Gaugiran S. Double patterning requirements for optical lithography and prospects for optical extension with double patterning // Proc. SPIE. 2008. V. 6924. P. 69240R.

5. *Starikov A*. Use of a single size square serif for variable print bias compensation in microlithography: method, design and practice // Proc. SPIE. 1989. V. 1088. P. 34–46.

6. Allenet T., Vockenhuber M., Yeh C-K., Santaclara J. G., van Lent-Protasov L., Ekinci Y., Kazazis D. EUV resist screening update: progress towards High-NA lithography // Advances in Patterning Materials and Processes XXXIX, edited by Daniel P. Sanders, Douglas Guerrero; Proc. SPIE. 2022. V. 12055. P. 120550F.

7. DUV lithography systems twinscan nxt: 2000i;

https://www.asml.com/en/products/duv-lithography-systems/twinscan-nxt2000i

8. *Kinoshita H., Kurihara K., Ishii Y., Torii Y. //* Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena. 1989. V. 7, № 6. P. 1648–1651. https://doi.org/10.1116/1.584507

9. Tichenor D. A., Ray-Chaudhuri A. K., Replogle W. C., Stulen R. H., Kubiak G. D., Rockett P. D., Klebanoff L. E., Jefferson K. J., Leung A. H., Wronosky J. B., Hale L. C., Chapman H. N., Taylor J. S., Folta J. A., Montcalm C., Soufli R., Spiller E. A., Blaedel K. L., Sommargren G. E., Sweeney D. W., Naulleau P. P., Goldberg K. A., Gullikson E. M., Bokor J., Batson P. J., Attwood Jr. D. T., Jackson K. H., Hector S. D., Gwyn C. W., Yan P.-Y. System integration and performance of the EUV engineering test stand // Proc. SPIE. 2001. V. 4343. P. 19.

10. Uzawa S., KuboH., Miwa Y., Tsuji T., Morishima H. Path to the HVM in EUVL through the development and evaluation of the SFET // Emerging Lithographic Technologies XI. – SPIE. 2007. V. 6517. P. 72–81. https://doi.org/10.1117/12.711650

11. Meiling H., Boon E., Buzing N., Cummings K., Frijns O., Galloway J., Goethals M., Harned N., Hultermans B., de Jonge R., Kessels B., Kurz P., Lok S.,

Lowisch M., Mallman J., Pierson B., Ronse K., Ryan J., Smitt-Weaver E., Tittnich M., Wagner C., van Dijk A., Zimmermann J. Performance of the full field EUV systems // Emerging Lithographic Technologies XII. – SPIE. 2008. V. 6921. P. 171–183. https://doi.org/10.1117/12.773259

12. Volgunov D. G., Zabrodin I. G., Zakalov B. A., Zuev S. Yu., Kas'kov I. A., Kluenkov E. B., Toropov M. N., and Chkhalo N. I. A Stand for a Projection EUV Nanolithographer–Multiplicator with a Design Resolution of 30 nm // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2011. V. 75. \mathbb{N} 1. P. 49–52.

13. Glatzel H., Ashworth D., Bremer M., Chin R., Cummings K., Girard L., Goldstein M., Gullikson E., Hudyma R., Kennon J., Kestner B., Marchetti L., Naulleau P., Soufli R., Spiller E. Projection Optics for Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) Microfield Exposure Tools (METs) with a Numerical Aperture of 0.5 // Proc. SPIE Advanced Lithography. 2013. V. 8679. P. 42.

14. *Watanabe T., Harada T., Yamakawa S.* Fundamental research activities on EUV lithography at NewSUBARU synchrotron light facility // Proc. SPIE. 2021. V. 11908. P. 1190807. DOI: 10.1117/12.2600896

15. Optical and EUV Nanolithography XXXVI, edited by Anna Lio // Proc. SPIE. 2023. V. 12494. P. 1249406.

16. *Макушкин М., Мартынов В.* Нужен ли России самодельный EUVнанолитограф // Фотоника. 2010. № 4. С. 6–13.

17. *Wu B. and Kumar A*. Extreme ultraviolet lithography and three dimensional integrated circuits-A review // Appl. Phys. Rev. 2014. V. 1. P. 011104.

18. Van de Kerkhof M., Jasper H., Levasier L., Peeters R., van Es R., Bosker J.-W., Zdravkov A., Lenderink E., Evangelista F., Broman P., Bilski B., Last T. Enabling sub-10nm node lithography: presenting the NXE: 3400B EUV scanner // Proc. SPIE. 2017. V. 10143. P. 101430D.

19. Levinson H. Principles of Lithography, 4th Edition. SPIE. 2019. P. 524.

20. https://www.atomic-energy.ru/news/2023/03/15/133578

21. Chkhalo N. I., Durov K. V., Nechay A. N., Perekalov A. A., Polkovnikov V. N., and Salashchenko N. N. On the Prospects of Lithography in the Region of Wavelengths Shorter than 13.5 nm // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17, no. 1. P. S226–S232.

22. *Chkhalo N. I., and Salashchenko N. N.* Current State and Prospects for the Development of X-Ray Lithography // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17, no. 1. P. 307–316. DOI: 10.1134/S1027451022060349

23. Wood O., Arnold J., Brunner T., Burkhardt M. Insertion strategy for EUV lithography // Proc. of SPIE. 2012. V. 8322. P. 832203. DOI: 10.1117/12.916292

24. Yakshin A. E., van de Kruijs R. W. E., Nedelcu I., Zoethout E., Louis E., Bijkerk F., Enkisch H., and Müllender S. Enhanced reflectance of interface engineered Mo/Si multilayers produced by thermal particle deposition // Proc. SPIE. 2007. V. 6517. P.65170I.

25. Chkhalo N., Gusev S., Nechay A., Pariev D., Polkovnikov V., Salashchenko N., Schäfers F., Sertsu M., Sokolov A., Svechnikov M., and Tatarsky D. High reflective Mo/Be/Si multilayers for the EUV lithography // Optics Letters. 2017. V. 42. Iss. 24. P.5070–5073. https://doi.org/10.1364/OL.42.005070

26. Fomenkov I., Brandt D., Ershov A., Schafgans A., Tao Y., Vaschenko G., Rokitski S., Kats M., Vargas M., Purvis M., Rafac R., La Fontaine B., De Dea S., LaForge A., Stewart J., Chang S., Graham M., Riggs D., Taylor T., Abraham M., and Brown D. Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography: technology, performance, and power scaling // Advanced Optical Technologies. 2017. V. 6, no. 3–4. P. 173–186. https://doi.org/10.1515/aot-2017-0029

27. Абраменко Д. Б., Анциферов П. С., Астахов Д. И., Виноходов А. Ю., Вичев И. Ю., Гаязов Р. Р., Грушин А. С., Дорохин Л. А., Иванов В. В., Ким Д. А., Кошелев К. Н., Крайнов П. В., Кривокорытов М. С., Кривцун В. М., Лакатош Б. В., Лаш А. А., Медведев В. В., Рябцев А. Н., Сидельников Ю. В., Снегирев Е. П., Соломянная А. Д., Спиридонов М. В., Цыгвинцев И. П., Якушев О. Ф., Якушкин А. А. Плазменные источники экстремального ультрафиолетового излучения для литографии и сопутствующих технологических процессов (к 50-летию Института спектроскопии РАН) // УФН. 2019. Т. 189, № 3. С. 323–334. DOI: 10.3367/UFNr.2018.06.038447

28. Brandt D. C., Fomenkov I. V., Farrar N. R., La Fontaine B., Myers D. W., Brown D. J., Ershov A. I., Bowering N. R., Riggs D. J., Rafac R. J., De Dea S., Peeters R., Meiling H., Hamed N., Smith D., Pirati A., Kazinczi R. LPP EUV source readiness for NXE 3300 B // Proc. of SPIE, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V'; Eds. by O. R. Wood II and E. M. Panning. 2014. V. 9048. P. 90480C-1.

29. Van de Kerkhof M., Jasper H., Levasier L., Peeters R., van Es R., Bosker J.-W., Zdravkov A., Lenderink E., Evangelista F., Broman P., Bilski B., Last T. Enabling sub-10nm node lithography: presenting the NXE:3400B EUV scanner // Proc. SPIE. 2017. V. 10143. P. 101430D.

30. Зуев С. Ю., Лопатин А. Я., Лучин В. И., Салащенко Н. Н., Цыбин Н. Н., Чхало Н.И. Защитные свободновисящие пленки для установок проекционной литографии экстремального ультрафиолетового диапазона // Микроэлектроника. 2023. Т. 52, № 5. С. 354–366. EDN: https://elibrary.ru/QAIWGO. DOI:10.31857/S0544126923700539

31. *Nan Lin, Yunyi Chen, Xin Wei, Wenhe Yang and Yuxin Leng.* Spectral purity systems applied for Laser-produced plasma Extreme UltraViolet (LPP-EUV) lithography source: a review // High Power Laser Science and Engineering. 2023. V. 11, no. 5. P. 05000e64.

32. Platonov Y., Kriese M., Crucet R., Li Y., Martynov V., Jiang L., Rodriguez J., Mueller U., Daniel J., Khatri S., Magruder A., Grantham S., Tarrio C., Lucatorto T. B. Collector development with IR suppression and EUVL optics refurbishment at RIT. https://www.euvlitho.com/2013/S30.pdf (Dublin, November 3–7, 2013). 33. Pirati A., Peeters R., Smith D., Lok S., van Noordenburg M., van Es R., Verhoeven E., Meijer H., Minnaert A., van der Horst J.-W., Meiling H., Mallmann J., Wagner C., Stoeldraijer J., Fisser G., Finders J., Zoldesi C., Stamm U., Boom H., Brandt D., Brown D., Fomenkov I., Purvis M. EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook // Proc. of SPIE, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VII; Eds. by E. M. Panning and K. A. Goldberg. 2016. V. 9776. P. 97760A-1. https://doi.org/10.1117/12.2220423

34. *Naulleau P. P., Niakoula D., and Zhang G.* System-level lineedge roughness limits in extreme ultraviolet lithography // J. Vac. Sci. Technol. B. 2008. V. 26(4). P. 1289–1293.

35. Торопов М. Н., Ахсахалян А. А., Зорина М. В., Салащенко Н. Н., Чхало Н. И., Токунов Ю. М. Получение гладких высокоточных поверхностей методом механического притира // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, вып.11. С. 1958–1964.

36. Чхало Н. И., Малышев И. В., Пестов А. Е., Полковников В. Н., Салащенко Н. Н., Торопов М. Н. Рентгеновская оптика дифракционного качества: технология, метрология, применения // УФН. 2020. Т. 190 (1). С. 74– 91. https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.05.038601

37. Akhsakhalyan A. A., Chkhalo N. I., Kumar N., Malyshev I. V., Pestov A. E., Salashchenko N. N., Toropov M. N., Ulasevich B. A., Kuzin S. V. Compact high-aperture interferometer with a diffractive reference wave for high-precision referenceless aberration measurements of optical elements and systems // Precision Engineering. 2021. V. 72. P. 330–339.

https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.05.011

38. Toropov M., Chkhalo N., Malyshev I., and Salashchenko N. Highaperture low-coherence interferometer with a diffraction reference wave // Optics Letters. 2022. V. 47, no. 14. P. 3459–3462. https://doi.org/10.1364/OL.460708

39. *Chkhalo N. I., Salashchenko N. N. and Zorina M. V.* Note: A stand on the basis of atomic force microscope to study substrates for imaging optics // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 016102. http://dx.doi.org/10.1063/1.4905336.

40. Chkhalo N. I., Kaskov I. A., Malyshev I. V., Mikhaylenko M. S., Pestov A. E., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., Toropov M. N., Zabrodin I. G. Highperformance facility and techniques for high-precision machining of optical components by ion beams // Precision Engineering. 2017. V. 48. P. 338–346. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.004

41. Smertin R. M., Chkhalo N. I., Drozdov M. N., Garakhin S. A., Zuev S. Yu., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., and Yunin P. A. Influence of Mo interlayers on the microstructure of layers and reflective characteristics of Ru/Be multilayer mirros // Opt. Express. 2022. V. 30, no. 26. P. 46749–46761.

42. Chkhalo N. I., Garakhin S. A., Golubev S. V., Lopatin A. Ya., Nechay A. N., Pestov A. E., Salashchenko N. N., Toropov M. N., Tsybin N. N., Vodopyanov A. V., and Yulin S. A double-stream Xe:He jet plasma emission in the vicinity of 6.7 nm // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. P. 221101. DOI: 10.1063/1.5016471

43. Chkhalo N. I., Garakhin S. A., Lopatin A. Ya., Nechay A. N., Pestov A. E., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., Tsybin N. N., and Zuev S. Yu. Conversion efficiency of a laser-plasma source based on a Xe jet in the vicinity of a wavelength of 11 nm // AIP Advances. 2018. V. 8. P. 105003. doi: 10.1063/1.5048288

44. Nechay A. N., Perekalov A. A., Chkhalo N. I., Salashchenko N. N., Korepanov M. A., Koroleva M. R. Emission properties of targets based on shock waves excited by pulsed laser radiation // Optics & Laser Technology. 2021. V. 142. P. 107250. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107250

45. Guseva V. E., Nechay A. N., Perekalov A. A., Salashchenko N. N., Chkhalo N. I. Investigation of emission spectra of plasma generated by laser pulses on Xe gas-jet targets // Applied Physics B. 2023. V. 129, no. 155. https://doi.org/10.1007/s00340-023-08095-8

46. *Kalmykov S. G., Butorin P. S., Sasin M. T.* Xe laser-plasma EUV radiation source with a wavelength near 11 nm – Optimization and conversion efficiency // JAP. 2019. V. 126 (10). P. 103301.

47. Волков М. Р., Кузнецов И. И., Мухин И. Б., Палашов О. В. Дисковые квантроны на основе Yb:YAG для лазеров мультикиловаттной средней мощности // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 4. С. 354–357.

48. Chkhalo N. I., Golubev S. V., Mansfeld D., Salashchenko N. N., Sjmaenok L. A., and Vodopyanov A. V. Source for extreme ultraviolet lithography based on plasma sustained by millimeter-wave gyrotron radiation // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2012. V. 11. P. 021123. DOI:10.1117/1.JMM.11.2.021123

49. Vodop'yanov A. V., Garakhin S. A., Zabrodin I. G., Zuev S. Yu., Lopatin A. Ya., Nechay A. N., Pestov A. E., Perekalov A. A., Pleshkov R. S., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., Smertin R. M., Ulasevich B. A., N.I. Chkhalo N. I. Measurements of the absolute intensities of spectral lines of Kr, Ar, and O ions in the wavelength range of 10–18 nm under pulsed laser excitation // Quantum Elec-

tronics. 2021. V. 51(8) Р. 700 – 707. 50. Антюшин Е. С., Ахсахалян А. А., Зуев С. Ю., Лопатин А. Я., Малышев И. В., Нечай А. Н., Перекалов А. А., Пестов А. Е., Салащенко Н. Н., Торопов М. Н., Уласевич Б. А., Цыбин Н. Н., Чхало Н. И., Соловьев А. А., Стародубцев М. В. Система визуализации плазменного факела бетатронного источника рентгеновского излучения // Журнал технической физики. 2022. Т. 92, № 8. С. 1202–1206. DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52784.80-22

51. Bulgakova S. A., Lopatin A. Ya., Luchin V. I., Mazanova L. M., Molodnjakov S. A., Salashchenko N. N. PMMA-based resists for a spectral range near 13 nm // Nucl. Instrum. and Meth. 2000. A448. P. 487–492.

52. Булгакова С. А., Гурова Д. А., Зайцев С. Д., Куликов Е. Е., Скороходов Е. В., Торопов М. Н., Пестов А. Е., Чхало Н. И., Салащенко Н.Н. Влияние полимерной матрицы и фотогенератора кислоты на литографические свойства химически усиленного фоторезиста // Микроэлектроника. 2014. Т. 43, № 6. С. 419–428. 53. *Min Z., Baoqin C., Changqing X., Ming L., and Jiebing N.* Study of process of HSQ in electron beam lithography // 2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Xiamen, China. 2010. P. 1021–1024. DOI: 10.1109/NEMS.2010.5592584.

54. Gusev S. A., Zuev S. Yu., Klimov A. Yu., Pestov A. E., Polkovnikov V. N., Rogov V. V., Salashchenko N. N., Skorokhodov E. V., Toropov M. N., and Chkhalo N. I. Reflective Mask for Projection Lithography Operating at a Wavelength of 13.5 nm // Journ. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2012. V. 6, no. 4. P. 568–573.

55. Chkhalo N. I., Drozdov M. N., Kluenkov E. B., Lopatin A. Ya., Luchin V. I., Salashchenko N. N., Tsybin N. N., Sjmaenok L. A., Banine V. E., Yakunin A. M.. Free-standing spectral purity filters for extreme ultraviolet lithography // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2012. V. 11. No. 2. P. 021115 https://doi.org/10.1117/1.JMM.11.2.021115

56. Chkhalo N. I., Drozdov M. N., Kluenkov E. B., Kuzin S. V., Lopatin A. Ya., Luchin V. I., Salashchenko N. N., Tsybin N. N., Zuev S. Yu. Thin film multilayer filters for solar EUV telescopes // Applied Optics. 2016. V. 55 (17) P. 4683–4690. DOI: 10.1364/AO.55.004683

57. Chkhalo N. I., Kluenkov E. B., Lopatin A. Ya., Luchin V. I., Salashchenko N. N., Sjmaenok L. A., N.N. Tsybin N. N. Study of heat induced changes in elastic properties of multilayer Mo/ZrSi2 membranes // Thin Solid Films. 2017. V. 631. P. 93–98. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.04.015

58. Malyshev I. V., Reunov D. G., Chkhalo N. I., Toropov M. N., Pestov A. E., Polkovnikov V. N., Tsybin N. N., Lopatin A. Ya., Chernyshev A. K., Mikhailenko M. S., Smertin R. M., Pleshkov R. S., and Shirokova O. M. Highaperture EUV microscope using multilayer mirrors and a 3D reconstruction algorithm based on z-tomography // Optics Express. 2022. V. 30, no. 26. P. 47567–47586. https://doi.org/10.1364/OE.475032

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Николай Иванович Чхало

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

Препринт № 818-24 (ИФМ РАН)

Ответственный за выпуск *Н. И. Чхало*

Поступил в редакцию 18.06.2024. Подписано к печати 19.06.2024. Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 50 экз. Заказ № 28(2024).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН, 603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, 46