

Стенд для тестирования чувствительных к экстремальному ультрафиолетовому излучению фоторезистов

© А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, А.Е. Пестов, Д.Г. Реунов, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603087 Афонино, Кстовский р-он, Нижегородская обл., Россия
e-mail: aepestov@ipm.sci-nnov.ru, lopatin@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 26 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 26 апреля 2024 г.

Принято к публикации 26 апреля 2024 г.

Описан экспериментальный стенд для тестирования чувствительных к экстремальному ультрафиолетовому излучению фоторезистов. Стенд построен на базе лазерно-плазменного источника на основе Nd:YAG-лазера (энергия импульса 0.8 J, длительность импульса 5.2 ns, диаметр пятна фокусировки 66 μm , пиковая интенсивность до $3 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$) и газовой струи в качестве мишени, а также зеркального монохроматора (сменное многослойное рентгеновское зеркало, оптимизированное на выбранную длину волны). Стенд оснащен набором зеркал и фильтров для экспонирования образцов на длинах волн 11.2, 13.9 и 30.4 nm. В качестве рабочего газа использованы Kг, Ag и He, ионы которых Kг X, Ag VIII и He II имеют интенсивные эмиссионные полосы в окрестности обозначенных длин волн. Проведено тестирование прибора на образцах фоторезиста, определены форма пятна фокусировки и его размеры, которые составили около $0.5 \times 1.0 \text{ mm}^2$.

Ключевые слова: многослойные рентгеновские зеркала, монохроматор, коллектор, рентгеновский и экстремальный ультрафиолетовый диапазон длин волн, фоторезист, ЭУФ литография.

DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58560.142-24

Введение

В настоящее время проекционная нанолитография на длине волны 13.5 nm стала ключевой технологией, применяемой при изготовлении критических слоев сверхбольших интегральных схем по нанометровым технологическим нормам [1–3]. В частности, установка последнего поколения от компании ASML (TWINSCAN NXE:3400B), работающая в экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне на длине волны 13.5 nm, имеет производительность до 150 пластин диаметром $\varnothing 300 \text{ mm}$ в час и обеспечивает пространственное разрешение 13 nm [4,5].

Возможность снижения технологических норм до уровня менее 10 nm предполагает применение технологии двойного создания микрорисунка (double patterning), что вдвое увеличивает число технологических операций и соответственно снижает производительность литографического процесса. Попытки избежать двойного создания микрорисунка за счет увеличения числовой апертуры проекционного объектива натолкнулись как на технологические проблемы изготовления светосильных объективов, так и на фундаментальную проблему, связанную с затенениями на маске. Поскольку маски для ЭУФ литографии имеют трехмерную топологию, при больших углах засветки проявляются эффекты затенения рисунка маски, не позволяющие получать качественные изображения. Для решения этой проблемы в компании ZEISS предлагается уникальный объектив, имеющий различные увеличения ($4\times$ и $8\times$) в перпендикулярных плоскостях [6]. Первый экспериментальный

литограф с числовой апертурой $NA = 0.55$ и расчетным разрешением 9 nm в конце 2023 г. был отгружен в Intel. Однако сообщений об успехах этой технологии пока не поступало.

Другой техникой, позволяющей увеличить пространственное разрешение и производительность процесса, является укорочение рабочей длины волны. В этом случае можно использовать уже хорошо себя зарекомендовавшие проекционные объективы с числовой апертурой $NA \sim 0.3$. В работе [7] авторы предложили использовать для этих целей область длин волн 6.6 nm. В этой области лежит K-край поглощения бора, а наивысшими коэффициентами отражения обладают многослойные зеркала La/B и U/B, хорошей стабильностью коэффициента отражения обладают зеркала Sb/B4C [8]. С конца 2008 г. ведутся исследования [9], оптики [10,11], фоторезистов для так называемой BEUV (beyond EUV) литографии [12]. В работе [13] авторы подытожили результаты пятилетних исследований и убедительно показали, что даже последующие разработки не приведут к достаточной для массового производства производительности. Она будет уступать в 20–30 раз литографии на длине волны 13.5 nm. Однако в той же статье показано, что в области 11 nm производительность будет сравнима с литографией на 13.5 nm, или даже в полтора раза выше. При этом разрешение вырастет на 20–25%.

В Российской Федерации также ведутся исследования по созданию собственной технологии литографии коротковолнового диапазона. В качестве перспективных рассматриваются различные длины волн, в том числе

13.5 и 11.2 nm [3,14], а также и более короткие [15,16]. Существуют проекты по безмасочному ЭУФ нанолитографу [17].

Одним из приоритетов исследований, проводимых в области микро- и нанолитографии, является разработка высокоразрешающих фоторезистов. Так, значительные ресурсы направлены на решение этой задачи применительно к литографии с рабочей длиной волны 248 nm, и уже до конца 2025 г. должны быть изготовлены опытные партии ряда чувствительных на этой длине волны фотополимеров с пространственным разрешением не хуже $0.14 \mu\text{m}$, а также подготовлено и освоено их промышленное производство [18].

Логичным было бы ожидать и представления в сопоставимые сроки основополагающего компонента современной литографической системы — проекционного объектива, обеспечивающего столь же высокий уровень пространственного разрешения при приемлемом для микроэлектронного производства размера поля зрения. Характеризация объектива не должна обуславливаться наличием соответствующих резистов, поскольку может быть выполнена и без их использования. Например, непосредственная экспериментальная оценка функции рассеяния точки с помощью транспарентной маски, представляющей собой набор калиброванных микроотверстий, может, по нашему мнению, оказаться существенно более информативной и минимизирующей неоднозначность интерпретации результатов методикой тестирования проекционной оптики.

Для зеркальных объективов, разрабатываемых в ИФМ РАН для литографических схем ЭУФ спектрального диапазона [17] также существует возможность оценить разрешение без использования резистов. Имеющаяся в ИФМ приборная база электронной литографии и микроскопии, ионного травления поверхностей, развитые подходы к изготовлению металлических мембран толщиной $0.1 \mu\text{m}$ и менее — все это в совокупности позволяет рассчитывать на успешное изготовление систем отверстий существенно субмикронных размеров на тонкопленочных мембранах. Необходимо отметить, что возможности проекционных систем ЭУФ диапазона кратно превосходят по уровню проектного разрешения возможности оптики, работающей на длинноволновом крае УФ области спектра. Даже в простой двухзеркальной системе с осесимметричной асферизацией зеркал возможно достижение разрешения 27 nm на поле диаметром около 1.4 cm при коэффициенте уменьшения $10\times$ и работе на длине волны 13 nm [19]. И хотя габариты упомянутой системы (диаметр большого зеркала 50 cm) пока еще достаточно велики с точки зрения актуального для РФ уровня развития в вопросах изготовления прецизионной оптики, со временем внедрение в промышленность литографов ЭУФ диапазона представляется неминуемым. Аттестация чувствительных на этом участке спектра фоторезистов — один из важных аспектов такого перехода.

В ИФМ РАН был успешно выполнен цикл работ по исследованию в качестве чувствительных в ЭУФ диапазоне фоторезистов ряда двойных и тройных сополимеров полиметилметакрилата (ПММА), синтезированных в НИИ химии ННГУ [20]. По результатам тестирования в схеме с лазерно-плазменным источником экспонирующего ЭУФ излучения и концентрирующими излучение многослойными зеркалами на длину волны 13.5 nm были отобраны наиболее чувствительные на этой длине волны составы фоторезистов. С использованием одного из разработанных резистов тогда же была решена и важная практическая задача — фотографирование источника в ЭУФ области и определение его размера на длине волны 13.5 nm ($50 \times 80 \mu\text{m}$), а также по серии фотографий было восстановлено распределение яркости по поперечным координатам на этой длине волны [21]. Эти исследования были продолжены в работах [22,23].

В настоящее время в ИМХ РАН ведутся исследования по разработке химически усиленных фоточувствительных полимеров на основе металлоорганики, что требует исследования их чувствительности и радиационной стойкости как на рабочей длине волны, так и в более широком диапазоне коротковолнового излучения.

В настоящей работе описывается простой в эксплуатации лабораторный стенд для исследования чувствительных к ЭУФ излучению фотополимеров. В стенде реализована простейшая оптическая схема, которая основана на применении сферического зеркала в геометрии падения излучения, близкого к нормальному, с размещением объекта и изображения на круге Роуанда, связанном с зеркалом, или в ближайшей его окрестности. При этом выполняется условие минимизации аберраций [24]. Рабочая длина волны излучения может быть быстро заменена путем смены рабочего газа лазерно-плазменного источника и зеркала-монокроматора с многослойным интерференционным покрытием.

1. Описание стенда

При разработке стенда была выбрана концепция с использованием лазерно-плазменного источника, что позволяет получать высокую интенсивность в широком диапазоне длин волн от вакуумного ультрафиолета до мягкого рентгена. В качестве мишени лазерно-плазменного источника используется струя газа, истекающая из сопла. Преимущество такого источника по сравнению с источником с твердотельной мишенью — многократно более медленное загрязнение рентгенооптических элементов. Выбором различных газов и газовых смесей спектр источника может быть до определенной степени согласован с рабочей длиной волны многослойного зеркала, собирающего излучение на экспонируемом образце. Характеристики используемого Nd:YAG-лазера (энергия импульса 0.8 J, длительность импульса 5.2 ns, диаметр пятна фокусировки $66 \mu\text{m}$, пиковая интенсивность до $3 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$) позволяют разогревать плазму

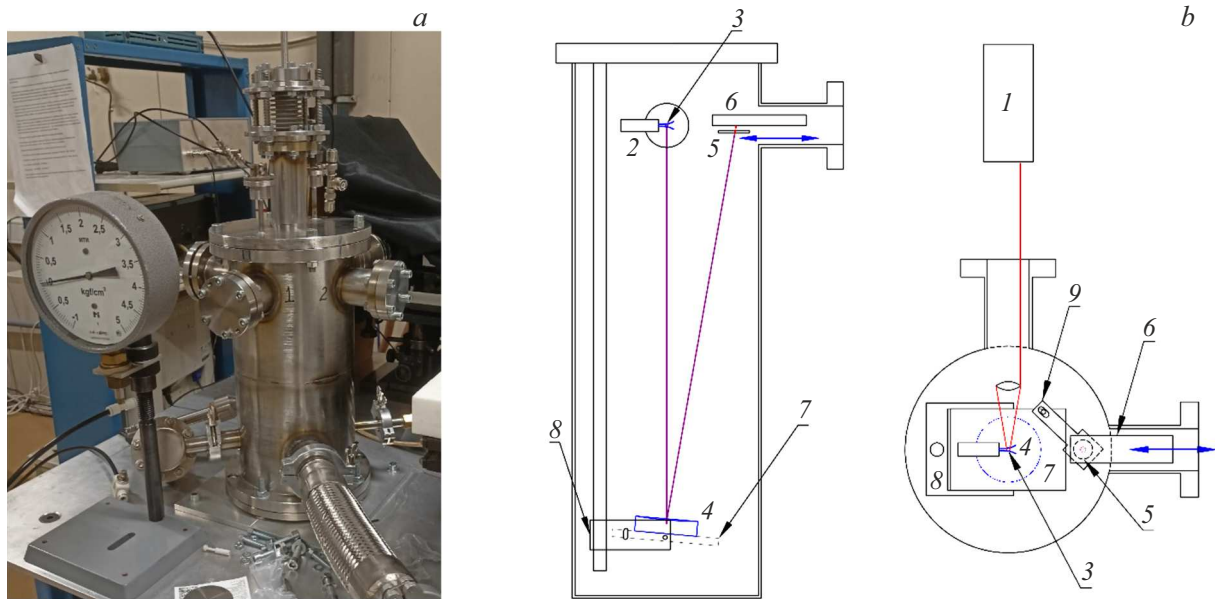


Рис. 1. Фотография (а) и схема (b) экспериментального стенда (вид сбоку и вид сверху): 1 — Nd:YAG-лазер, 2 — импульсное газовое сопло, 3 — лазерная плазма, 4 — многослойное ЭУФ зеркало, 5 — фильтр ЭУФ излучения, 6 — образец с фотополимером, закрепленный на линейном трансляторе, 7 — платформа крепления зеркала-монокроматора, 8 — рамка-держатель платформы крепления зеркала-монокроматора, 9 — держатель фильтра ЭУФ излучения.

до температур, при которых достаточно эффективно излучаются в том числе и спектральные линии в коротковолновой части ЭУФ диапазона. В частности, для углеродсодержащих мишеней уверенно регистрировались линии иона CV с длинами волн 3.6 и 4.1 nm [25]. Фотография и схема экспериментального стенда тестирования фоторезистов приведена на рис. 1.

Как видно, стенд построен на базе вакуумной камеры объемом порядка 75 L (цилиндр диаметром 150 mm и высотой 430 mm). Камера имеет четыре присоединительных фланца, из которых два заняты оптическими вводами, один резервный и один предназначен для загрузки экспериментальных образцов. Лазерное излучение вводится в вакуумную камеру через прозрачное окно, второе окно служит для визуального контроля (наличия искры, перемещения образца и др.). Вакуумный пост откачки представляет собой двухступенчатую систему, состоящую из форвакуумного и турбомолекулярных насосов; контроль давления осуществляется с помощью двухдиапазонного вакуумметра и пары вакуумных датчиков — ПМТ-10 и ПММ-32.

Принцип работы стенда заключается в следующем. Излучение Nd:YAG-лазера 1 с длиной волны 1064 nm и частотой следования импульсов 1–10 Hz (задается генератором импульсов для конкретной задачи) с помощью короткофокусной линзы фокусируется на струе газа, исходящей из импульсного сопла 2; частота следования импульсов лазера синхронизована с частотой открытия клапана сопла. Импульсное сопло применено для облегчения откачки газа из вакуумного объема, что позволяет производить откачку относительно малопроизводитель-

ным турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 1000 L/s. При взаимодействии лазерного излучения с атомами газа происходит многократная ионизация с последующим рекомбинационным излучением многозарядных ионов из лазерной плазмы 3. Испущенное в $4\pi sr$ излучение собирается и монохроматизируется (за счет нанесенного на поверхность многослойного брэгговского зеркала) вогнутым сферическим многослойным коллекторным зеркалом-монокроматором 4, установленным под углом 5° к оси падающего излучения, и, проходя через тонкопленочный абсорбционный фильтр 5, фокусируется на пластине с фотополимером 6, закрепленной на линейном трансляторе. Тонкопленочный абсорбционный фильтр пропускает излучение с рабочей длиной волны и отсекает фоновое видимое и ультрафиолетовое излучение, содержащееся в спектре излучения лазерной плазмы. Перемещая образец с помощью линейного транслятора, можно за одну откачку вакуумной системы сформировать на пластине с фотополимером несколько точек с различными дозами облучения.

2. Юстировка стенда

Юстировка стенда осуществляется по видимому свету, с применением белого светодиода в корпусе для поверхностного монтажа (smd) типоразмера 0805. Светодиод центрирован на втулке, плотно надевающейся на кончик импульсного газового сопла таким образом, что источник света с точностью ± 0.1 mm совпадает с положением лазерно-плазменного источника. Многослойное зеркало установлено на подвижной платформе

крепления зеркала-монокроматора 7, способной перемещаться вдоль стойки. При этом можно изменять положение источника излучения (лазерной плазмы) и его изображения относительно круга Роуланда, связанного с многослойным зеркалом. Кроме того, платформа может быть наклонена относительно горизонтальной оси для возможности изменить в небольших пределах угол падения центрального луча на зеркало. Такие перемещения позволяют легко настроить отраженный луч на центр образца и добиться минимального размера пятна фокусировки. После настройки положения зеркала-монокроматора производится затягивание винтов, фиксирующих положение платформы на стойке и наклон платформы относительно рамки-держателя платформы крепления зеркала-монокроматора 8. Затем перед образцом устанавливается фильтр ЭУФ излучения 5, держатель которого 9 также позволяет смещать его в двух направлениях, за счет чего удается установить фильтр таким образом, чтобы отраженный от зеркала центральный луч проходил через центр апертуры фильтра.

3. Рентгенооптические элементы стенда

К настоящему моменту стенд укомплектован набором сферических брегговских зеркал (радиус кривизны $R = 320$ mm) и пленочных фильтров на длины волн 11.2, 13.9 и 30.4 nm.

Для длины волны 11.2 nm была выбрана многослойная структура Mo/Be с периодом 5.8 nm и числом бислоев $N = 80$. Изготовление структуры производилось на кварцевой сферической подложке методом магнетронного напыления на установке, подробно описанной в [26]. Наносились структуры с градиентом периода по поверхности, обеспечивающим наилучшее отражение при центральном угле падения излучения $\theta_i = 5^\circ$. Спектральные зависимости коэффициента отражения для двух точек (в центре зеркала и на краю апертуры), измеренные с помощью лабораторного рефлектометра на базе спектрометра-монокроматора, построенного по схеме Черни–Тюрнера, и ЛПИ с твердотельной (нержавеющая сталь) мишенью [27], представлены на рис. 2.

Как можно видеть, наблюдается хорошее совпадение спектральных кривых отражения. Пиковые значения коэффициента отражения составили $R = 69.3$ и 67.8% для точек $r = 0$ и 20 mm соответственно.

Для работы на длине волны 13.9 nm была синтезирована структура Mo/Si с периодом 6.9 nm и числом бислоев $N = 50$. Спектральные зависимости коэффициента отражения для данного зеркала приведены на рис. 3. Пиковые значения коэффициента отражения составили $R = 60.5$ и 58.0% для точек $r = 0$ и 20 mm соответственно.

Для работы на длине волны 30.4 nm была синтезирована структура Mo/Si с периодом 15.8 nm и числом бислоев $N = 15$. Угловые зависимости коэффициента

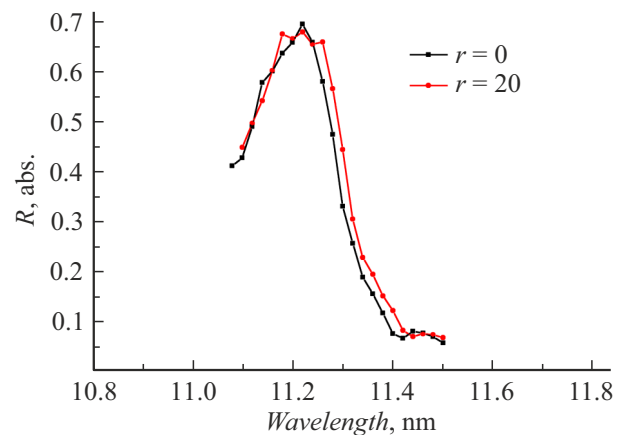


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента отражения от многослойного зеркала коллектора, оптимизированного для отражения излучения на длине волны 11.25 nm. Показаны кривые, измеренные в центре зеркала ($r = 0$) и на краю апертуры ($r = 20$ mm).

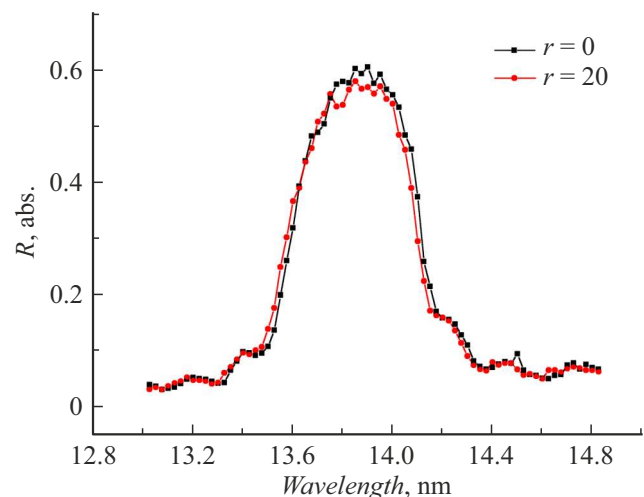


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента отражения от многослойного зеркала коллектора, оптимизированного для отражения излучения на длине волны 13.9 nm. Показаны кривые, измеренные в центре зеркала ($r = 0$) и на краю апертуры ($r = 20$ mm).

отражения, снятые на фиксированной длине волны 30.4 nm (излучение иона He II) на специализированном рефлектометре с газовым разрядным источником [28], приведены на рис. 4. Пиковые значения коэффициента отражения составили $R = 18.8$ и 19.2% для точек $r = 0$ и 20 mm соответственно.

Таким образом, синтезированы высокоотражающие многослойные структуры, оптимизированные на перспективные литографические длины волн, а также длину волны излучения иона He II, интерес к которому имеется при исследованиях, в частности, солнечной короны [29,30].

Фильтры — пленки субмикронной толщины — необходимы для блокирования нерезонансно отражаемого зеркалом длинноволнового излучения. В нашем случае для работы на всех длинах волн использовалась пленка Ве толщиной $d = 200$ nm. Расчетная спектральная зависимость коэффициента пропускания синтезированной структуры с реперными точками, измеренными на некоторых характеристических линиях с помощью лабораторного рефлектометра на базе решеточного спектрометра-монокроматора РСМ-500 и рентгеновской трубки в качестве источника [31], а также рефлектометра с газоразрядным источником, представлены на рис. 5.

Измеренные коэффициенты пропускания на характеристических линиях твердотельных мишеней рентгеновской трубки и газового разрядного источника для пленки бериллия толщиной $d = 200$ nm, а также значение, полу-

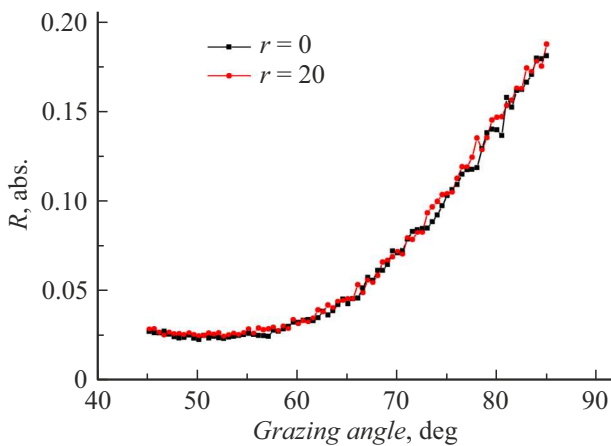


Рис. 4. Угловые зависимости коэффициента отражения от многослойного зеркала коллектора, оптимизированного для отражения излучения на длине волны 30.4 nm. Показаны кривые, измеренные в центре зеркала ($r = 0$) и на краю апертуры ($r = 20$ mm).

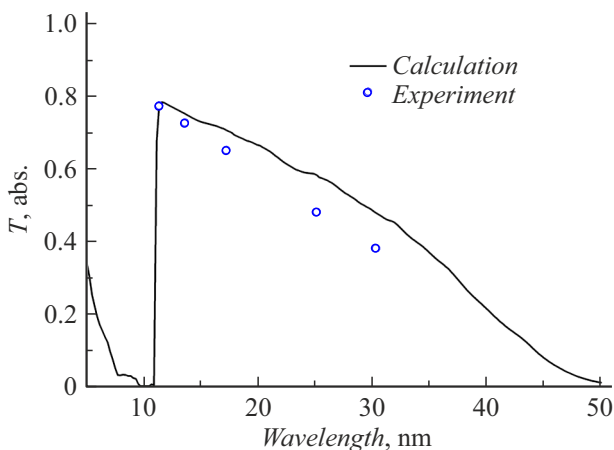


Рис. 5. Расчетная и экспериментально измеренная спектральная зависимость коэффициента пропускания фильтра — пленки Ве толщиной $d = 200$ nm.

Таблица 1. Коэффициенты пропускания Ве-фильтра

Длина волны, nm	Переход	Коэффициент пропускания
11.4	Ве K_{α}	0.772
13.5	Si L_{α}	0.725
30.4	He II	0.38
633	Ne ($5s \rightarrow 3p$)	$5.6 \cdot 10^{-6}$

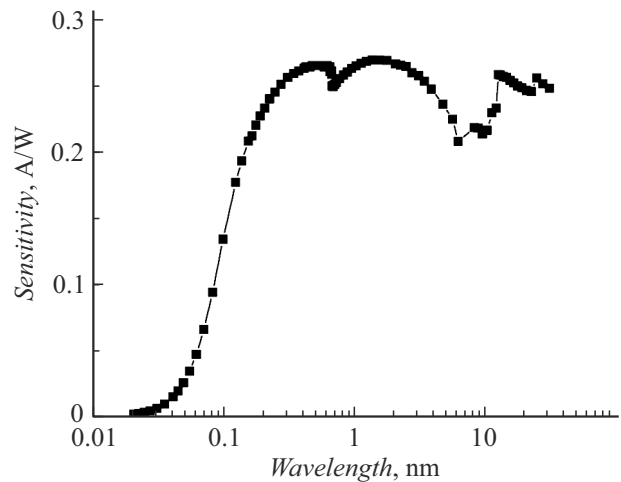


Рис. 6. Спектральная чувствительность детектора ФДУК-100УВ.

ченное на видимом свете (с использованием излучения He–Ne-лазера), представлены в табл. 1.

Как можно видеть, тонкая ($d = 200$ nm) пленка бериллия обладает высоким пропусканием в широком диапазоне длин волн от K -края поглощения бериллия ($\lambda = 11.2$ nm) вплоть до длины волны порядка 50 nm, а также высоким подавлением более длинноволнового излучения, в том числе, видимого. Фильтр устанавливается непосредственно перед образцом и позволяет проводить экспонирование только резонансно отраженной от многослойного зеркала длиной волны, без влияния на результат длинноволнового фона.

Для контроля дозы излучения на место образца с фоторезистом устанавливается детектор ЭУФ излучения — ФДУК-100УВ [32]. Спектральная зависимость чувствительности детектора, снятая на синхротроне BESSYII (Германия), представлена на рис. 6.

4. Тестирование стенда

Для получения излучения с длиной волны 11.2 nm использовался рабочий газ Кг и излучение иона Кг X, для 13.9 nm — Аг (ион Аг VIII), 30.4 nm — He (ион He II).

На предварительном этапе исследований были оценены дозы электромагнитного излучения, поглощае-



Рис. 7. Фотография проэкспонированных и проявленных образцов. λ , nm: *a* — 11.2, *b* — 13.9, *c* — 30.4.

мые образцами фоторезистов в процессе экспонирования. Для этого в области пятна фокусировки зеркала-монокроматора устанавливался детектор ЭУФ излучения — ФДУК-100УВ с дополнительным блоком из двух фильтров для подавления паразитного излучения, отраженного от стенок камеры и попадающего в апертуру детектора, затем записывался сигнал, регистрируемый детектором, и по значению сигнала оценивалась мощность излучения. Частота следования импульсов лазерного излучения и синхронизированного с ним открытия клапана газового сопла в экспериментах на длинах волн 13.9 и 30.4 nm составляла 10 Hz, а на длине волны 11.2 nm — 1 Hz.

Приведем пример расчета для длины волны 13.9 nm. Детектор, работая в токовом режиме, регистрирует сигнал после зеркала-монокроматора, оптимизированного на длину волны $\lambda = 13.9$ nm, и пары спектральных фильтров. В данном случае ток диода составил $I_{\text{det}} = 2.2 \cdot 10^{-6}$ А.

Мощность излучения может быть оценена по формуле

$$P_{\text{det}} = I_{\text{det}}/\eta. \quad (1)$$

Чувствительность детектора на длине волны $\lambda = 13.9$ nm составляет $\eta = 0.25$ А/Вт. В таком случае, мощность излучения, приходящая на детектор:

$$P_{\text{det}} = I_{\text{det}}/\eta = 2.2 \cdot 10^{-6}/0.25 = 8.8 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}. \quad (2)$$

С учетом коэффициентов пропускания дополнительной пары фильтров мощность, которая будет приходить на экспонируемый образец, составляет

$$P_s = P_{\text{det}}/T_{2f} = 8.8 \cdot 10^{-6}/(0.725 \times 0.725) = 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}. \quad (3)$$

Для определения дозы излучения, сообщаемой образцу, необходимо определить размер пятна фокусировки. Для решения этой задачи использовался ЭУФ чувствительный резист ВПР-13 на основе ПММА [33], нанесенный на кремниевую пластину. Пластина с резистом закреплялась на линейном трансляторе и при перемещении образца на его поверхности формировалось несколько пятен засветки с различным временем экспонирования (табл. 2). Затем резист проявлялся (окунанием в 20% раствор метилэтилкетона в изопропиловом спирте, время проявления — 1 min) и размер пятна определялся с помощью оптического

Таблица 2. Величины экспозиционных доз для образца, представленного на рис. 7

№ области	Время засветки, s	Доза, мJ/cm ²
1	10	36
2	1	3.6
3	2.5	9
4	5	18

микроскопа МЕИИ МТ8530 (Япония) с градуированным моторизованным столиком. Размер пятна для образца, проэкспонированного на длине волны 13.9 nm, составил $S = 0.7 \times 1.6$ mm, фото проявленного образца представлено на рис. 7, *b*. Продолговатая форма пятна объясняется формой лазерной плазмы, протяженной в направлении распространения лазерного луча и узкой в поперечном направлении. С учетом размера пятна были определены дозы излучения, поглощенные образцом в процессе экспонирования (табл. 2).

Аналогичные измерения были проведены на длинах волн 11.2 и 30.4 nm. Фотографии проэкспонированных и проявленных образцов приведены на рис. 7, *a, c*. Размер пятна для образца, проэкспонированного на длине волны 11.2 nm, составил 0.5×1.2 mm, а для образца, проэкспонированного на длине волны 30.4 nm, — 0.5×1.1 mm. Сигнал на детекторе при этом составил для случая длины волны 11.2 nm $I_{\text{det}} = 5.5 \cdot 10^{-6}$ А, а на длине волны 30.4 nm — $I_{\text{det}} = 2.5 \cdot 10^{-8}$ А.

С учетом сигнала на детекторе, чувствительности детектора, размера пятна и пропускания фильтров на длинах волн 11.2 и 30.4 nm были вычислены дозы излучения, полученные в каждой точке экспонирования. Времена засветки и соответствующие им дозы излучения для образцов, проэкспонированных на длинах волн 11.2 и 30.4 nm, приведены в табл. 3.

В табл. 4 приведены дозы излучения для каждой длины волны, приходящиеся на 1 импульс лазерного излучения.

Таким образом, проведено тестирование прибора на примере исследованного ранее чувствительного к ЭУФ излучению резиста ВПР-13. Для всех длин волн (11.2, 13.9 и 30.4 nm) удалось зарегистрировать сигнал

Таблица 3. Величины экспозиционных доз для образцов, представленных на рис. 7, *a, b*

№ области	Время засветки, s	Доза, mJ/cm ²
$\lambda = 11.2 \text{ nm}$		
1	5	8.1
2	3	4.9
3	2	3.2
4	7	11.3
5	10	16.2
$\lambda = 30.4 \text{ nm}$		
1	180	27.0
2	30	4.5
3	60	9.0
4	120	18.0
5	150	22.5

Таблица 4. Доза излучения в пятне на 1 импульс лазера

Длина волны, nm	Доза, mJ/(cm ² · imp)
11.2	1.6
13.9	0.36
30.4	0.015

на детекторе, получить пятна засветки, измерить их размер и вычислить дозу излучения, сообщенную образцу на каждом пятне засветки.

Заключение

Разработан и собран экспериментальный стенд для исследования чувствительных к коротковолновому (МР, ЭУФ, ВУФ) излучению фоторезистов. Стенд оснащен лазерно-плазменным источником экспонирующего излучения, причем для минимизации загрязнения иллиминаторной оптики используется лазерная мишень в виде струи газа, истекающего из импульсного сопла. Сбор и монохроматизация излучения источника осуществляется сферическим зеркалом-коллектором с многослойным интерференционным покрытием, спектральная фильтрация обеспечивается тонкопленочным абсорбционным фильтром с подавлением длинноволнового фона до $\sim 6 \cdot 10^{-6}$. Моторизованный предметный столик позволяет проводить тестирование образцов длиной до 25 mm с экспонированием нескольких точек на одной пластине за одну откачку вакуумной камеры.

Стенд оснащен комплектом зеркал, позволяющим работать на трех длинах волн: 11.2, 13.9 и 30.4 nm; дополнительные зеркала и спектральные фильтры на другие длины волн могут быть изготовлены по мере необходимости. Для всех имеющихся в наличии зеркал исследован темп набора дозы (при частоте следования импульсов 1–10 Hz), определяемый мощностью ЭУФ источника, размером пятна на резисте и характеристиками пары „зеркало–фильтр“, который составляет около 16 mW/cm² для $\lambda = 11.2 \text{ nm}$, 3.6 mW/cm² для $\lambda = 13.9 \text{ nm}$ и 0.15 mW/cm² для $\lambda = 30.4 \text{ nm}$.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1361).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.Н. Торопов, А.А. Ахсахалян, М.В. Зорина, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало, Ю.М. Токунов. ЖТФ, **90** (11), 1958 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49990.127-20 [M.N. Toropov, A.A. Akhsakhalyan, M.V. Zorina, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo, Yu.M. Tokunov. Tech. Phys., **65** (11), 1873 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110262]
- [2] М.Н. Торопов, А.А. Ахсахалян, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, А.К. Чернышов, Н.И. Чхало. ЖТФ, **91** (10), 1583 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51374.108-21 [M.N. Toropov, A.A. Akhsakhalyan, I.V. Malyshev, M.S. Mikhaylenko, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, A.K. Chernyshov, N.I. Chkhalo. Tech. Phys., **92** (13), 2141 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.13.52235.108-21]
- [3] N.I. Chkhalo, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, A.A. Soloviev. Appl. Opt., **55** (3), 619 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.000619
- [4] M. Mastenbroek. Proc. SPIE, **10809**, 1080904 (2018). DOI: 10.1117/12.2502785
- [5] A. Zeng. SHS Web Conf., **163**, 03021 (2023). DOI: 10.1051/shsconf/202316303021
- [6] A. Pirati, J. van Schoot, K. Troost, R. van Ballegoij, P. Krabbendam, J. Stoeldraijer, E. Loopstra, J. Benschop, J. Finders, H. Meiling, E. van Setten, N. Mika, J. Dredonx, U. Stamm, B. Kneer, B. Thuring, W. Kaiser, T. Heil, S. Migura. Proc. SPIE, **10143**, 101430G-1 (2017). DOI: 10.1117/12.2261079
- [7] С.С. Андреев, М.М. Барышева, Н.И. Чхало, С.А. Гусев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Н. Рогачев, Н.Н. Салашченко, Ю.А. Вайнер, С.Ю. Зув. ЖТФ, **80** (8), 93 (2010). [S.S. Andreev, M. Barysheva, N. Chkhalo, S.A. Gusev, A. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.N. Rogachev, N.N. Salashchenko, Yu.A. Vainer, S.Yu. Zuev. Tech. Phys., **55** (8), 1168 (2010). DOI: 10.1134/S1063784210080153]

- [8] I.A. Kopylets, V.V. Kondratenko, E.N. Zubarev, D.L. Voronov, E.M. Gullikson, E.A. Vishnyakov, E.N. Ragozin. *Appl. Surf. Sci.*, **307**, 360 (2014). DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.04.038
- [9] S.S. Andreev, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A. Pestov, V. Polkovnikov, N. Salashchenko, L. Shmaenok, Y. Vainer, S. Zuev. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **603** (1–2), 80 (2009). DOI: 10.1016/j.nima.2008.12.165
- [10] T. Tsarfati, E. Zoethout, E. Louis, R. van de Kruijs, A. Yakshin, St. Müllender, F. Bijkerk. *Proc. SPIE*, **7271**, 72713V (2009). DOI: 10.1117/12.824434
- [11] T. Tsarfati, E. Zoethout, E. Louis, F. Bijkerk. *Thin Solid Films*, **518** (5), 1365 (2009). DOI: 10.1016/j.tsf.2009.09.073
- [12] V. Banine, A. Yakunin, D. Glushkov. *Next Generation EUV Lithography: Challenges and Opportunities. Int. Workshop Extreme Ultrav. Sources*, T. 24, Dublin (2010).
- [13] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, *AIP Adv.*, **3** (8), 082130 (2013). DOI: 10.1063/1.4820354
- [14] Д.Г. Волгунов, И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Л.А. Суслов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. *Известия РАН. Сер. физ.*, **75** (1), 54 (2011). [D.G. Volgunov, I.G. Zabrodin, B.A. Zakalov, S.Yu. Zuev, I.A. Kas'kov, E.B. Kluev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, L.A. Suslov, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.*, **75** (1), 49 (2011). DOI: 10.3103/S1062873811010278]
- [15] N.I. Chkhalo, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov. *Proc. SPIE*, **10224**, 102241O (2016). DOI: 10.1117/12.2267125
- [16] Н.И. Чхало, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, Р.А. Шапошников. *ЖТФ*, **92** (8), 1207 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52785.102-22 [N.I. Chkhalo, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, R.A. Shaposhnikov. *Tech. Phys.*, **67** (8), 1023 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.08.54567.102-22]
- [17] Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало, Н.А. Дюжев, *Поверхность*, **10**, 10 (2018). DOI: 10.1134/S0207352818100165 [N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo, N.A. Dyuzhev. *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.*, **12** (5), 944 (2018). DOI: 10.1134/S1027451018050324]
- [18] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.roseltorg.ru/procedure/0173100009523000003>
- [19] K.C. Johnson. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **30** (5), 051606 (2012). DOI: 10.1116/1.4752112
- [20] S.A. Bulgakova, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **448** (1–2), 487 (2000). DOI: 10.1016/S0168-9002(00)00237-0
- [21] С.А. Булгакова, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, Л.М. Мазанова, Н.Н. Салашченко. *Поверхность*, **1**, 133 (1999).
- [22] С.А. Булгакова, М.М. Джонс, Е.А. Киселева, Е.В. Скороходова, А. Пестов, А.Я. Лопатин, С.А. Гусев, В.И. Лучин, Н. Чхало, Н.Н. Салашченко. *Известия РАН. Сер. физ.*, **76** (2), 186 (2012). [S.A. Bulgakova, M.M. Johns, E.A. Kiseleva, E.V. Skorokhodov, A. Pestov, A.Ya. Lopatin, S.A. Gusev, V. Luchin, N. Chkhalo, N.N. Salashchenko. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.*, **76** (2), 159 (2012). DOI: 10.3103/S1062873812020050]
- [23] С.А. Булгакова, М.М. Джонс, А.Е. Пестов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало, С.А. Гусев, Е.В. Скороходов, Н.Н. Салашченко. *Микроэлектроника*, **42** (3), 206 (2013). DOI: 10.7868/S0544126913020063 [S.A. Bulgakova, M.M. Jons, A.E. Pestov, M.N. Toropov, N. Chkhalo, S.A. Gusev, E.V. Skorokhodov, N.N. Salashchenko. *Russ. Microelectron.*, **42** (3), 165 (2013). DOI: 10.1134/S1063739713020054]
- [24] Е.А. Вишняков, К.Н. Медников, А.А. Перцов, Е.Н. Рогозин, А.А. Рева, А.С. Ульянов, С.В. Шестов. *Квантовая электроника*, **39** (5), 474 (2009). [E.A. Vishnyakov, K.N. Mednikov, A.A. Pertsov, E.N. Ragozin, A.A. Reva, A. Ulyanov, S. Shestov. *Quantum Elec.*, **39** (5), 474 (2009). DOI: 10.1070/QE2009v039n05ABEH013902]
- [25] А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, А.А. Соловьев, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **93** (7), 892 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55742.97-23 [A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, A.N. Nachay, A.A. Perekalov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, A.A. Soloviev, N.N. Tsybin, N.I. Chkhalo. *Tech. Phys.*, **68** (7), 829 (2023). DOI: 10.61011/TP.2023.07.56623.97-23]
- [26] N.I. Chkhalo, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, R.A. Shaposhnikov, I.L. Stroulea, M.V. Svechnikov, Yu.A. Vainer, S.Yu. Zuev. *Thin Solid Films*, **631**, 106 (2017). DOI: 10.1016/j.tsf.2017.04.020
- [27] S.A. Garakhin, N.I. Chkhalo, I.A. Kas'kov, A.Ya. Lopatin, I.V. Malyshev, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.N. Tsybin, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev. *Rev. Sci. Instrum.*, **91** (6), 063103 (2020). DOI: 10.1063/1.5144489
- [28] С.Ю. Зуев, А.В. Митрофанов. *Поверхность*, **1**, 81 (2002).
- [29] E.N. Ragozin, K.N. Mednikov, A.A. Pertsov, A.S. Pirozhkov, A.A. Reva, S. Shestov, A. Ulyanov, E.A. Vishnyakov. *Proc. SPIE*, **7360N**, 73600N (2009). DOI: 10.1117/12.820750
- [30] S.V. Kuzin, I.A. Zhitnik, S.V. Shestov, S.A. Bogachev, O.I. Bugaenko, A.P. Ignat'ev, A.A. Pertsov, A.S. Ulyanov, A.A. Reva, V.A. Slemzin, N.K. Sukhodrev, Yu.S. Ivanov, L.A. Goncharov, A.V. Mitrofanov, S.G. Popov, T.A. Shergina, V.A. Solov'ev, S.N. Oparin, A.M. Zykov. *Solar System Res*, **45** (2), 162 (2011). DOI: 10.1134/S0038094611020110
- [31] M.S. Bibishkin, D.P. Chekhonadskih, N.I. Chithalo, E.B. Kluyenkov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev. *Proc. SPIE*, **5401**, 8 (2004). DOI: 10.1117/12.556949
- [32] П.Н. Аруев, М.М. Барышева, Б.Я. Бер, Н.В. Забродская, В.В. Забродский, А.Я. Лопатин, А.Е. Пестов, М.В. Петренко, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, В.Л. Суханов, Н.И. Чхало. *Квантовая электроника*, **42** (10), 943 (2012). [P.N. Aruev, M.M. Barysheva, B.Ya. Ber, N.V. Zabrodskaya, V.V. Zabrodskii, A.Ya. Lopatin, A.E. Pestov, M.V. Petrenko, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko. *Quantum Electron.*, **42** (10), 943 (2012). doi: 10.1070/QE2012v042n10ABEH014901]
- [33] S.A. Bulgakova, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **448** (1–2), 487 (2000). DOI: 10.1016/S0168-9002(00)00237-0