

Рентгеновская литография для реализации наноразмерных изображений

А. А. Иванов¹, В. И. Марголин^{1✉}, А. В. Никифоров²,
Нгуен Вьет Ан¹, Г. В. Петрова¹, А. И. Протченко³, А. А. Рассадина¹,
В. А. Тупик¹, Н. Н. Шарова³, И. С. Шолина¹, А. В. Корбут²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²Открытое акционерное общество "Завод Магнетон", Санкт-Петербург, Россия

³Акционерное общество «Научно-исследовательский институт "Феррит-Домен"»,
Санкт-Петербург, Россия

✉ v.margolin@mail.ru

Аннотация

Введение. Обсуждаются вопросы, связанные с групповыми методами создания защитной маски на подложке в процессах высокоразрешающей проекционной рентгеновской литографии.

Цель работы. Исследование литографических характеристик рентгенорезистов, особенностей применения различных режимов.

Материалы и методы. Исследования проводились с помощью рентгеновского спектрометра-монокроматора РСМ-500. Коэффициенты поглощения измерялись на монохроматических рентгеновских линиях в диапазоне длин волн 5...50 Å. Толщина пленок контролировалась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4.

Результаты. Получены зависимости коэффициентов поглощения резистов в области мягкого рентгеновского излучения (5...50 Å). При достижении определенной длины волны наблюдается резкий скачок коэффициента поглощения. Обнаружены скачки поглощения при длинах волн 23 и 43 Å. Это связано с тем, что энергия квантов рентгеновского излучения становится достаточной для ионизации электронов с определенного энергетического уровня атомов поглощающего вещества. Показано, что коэффициент поглощения рентгеновских лучей возрастает с увеличением их длины волны. Между скачками поглощения в некоторых диапазонах коэффициент может быть аппроксимирован гладкой функцией. Предложены аналитические аппроксимации полученных зависимостей в виде степенных функций, проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями, показавшее удовлетворительное согласие.

Заключение. Описана и представлена методика измерения коэффициентов поглощения рентгенорезистов. Экспериментально получены данные по поглощению в различных резистах рентгеновского излучения с различными волновыми характеристиками.

Ключевые слова: рентгеновская литография, рентгенорезисты, контрастно-чувствительные характеристики

Для цитирования: Рентгеновская литография для реализации наноразмерных изображений / А. А. Иванов, В. И. Марголин, А. В. Никифоров, Нгуен Вьет Ан, Г. В. Петрова, А. И. Протченко, А. А. Рассадина, В. А. Тупик, Н. Н. Шарова, И. С. Шолина, А. В. Корбут // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 3. С. 44–56.
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-44-56

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.04.2026; принята к публикации после рецензирования 18.05.2026; опубликована онлайн 29.06.2026

X-Ray Lithography for Nanoscale Image Formation

Arkady A. Ivanov¹, Vladimir I. Margolin^{1✉},
Andrey V. Nikiforov², Nguyen Viet An¹, Galina V. Petrova¹,
Artemy I. Protchenko³, Anna A. Rassadina¹, Viktor A. Tupik¹,
Natalia N. Sharova², Irina S. Sholina¹, Andrey V. Korbut²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Open Joint Stock Company "Plant-Magneton", St Petersburg, Russia

³ Joint Stock Company "Research Institute "Ferrite Domain", St Petersburg, Russia

✉ v.margolin@mail.ru

Abstract

Introduction. Issues associated with group methods for fabricating protective masks on substrates in high-resolution projection X-ray lithography are discussed.

Aim. To study the lithographic characteristics of X-ray resists and the specific features of their application under various operating modes.

Materials and methods. Studies were conducted using an RSM-500 X-ray spectrometer-monochromator. Absorption coefficient measurements were performed on monochromatic X-ray lines in the wavelength range of 5...50 Å. Film thickness was monitored using an MII-4 interference microscope.

Results. Spectral dependencies of the absorption coefficients in the soft X-ray range (5...50 Å) were obtained. At certain wavelengths, a sharp increase in the absorption coefficient was observed. Absorption jumps were detected at wavelengths of 23 and 43 Å. This phenomenon is associated with the fact that the X-ray photon energy becomes sufficient to ionize electrons from specific atomic energy levels of the absorbing material. It was shown that the X-ray absorption coefficient increases with increasing wavelength. Between the absorption jumps, the coefficient can be approximated by a smooth function over certain wavelength intervals. Analytical approximations of the obtained dependencies in the form of power-law functions were proposed. A comparison of the experimental data with the calculated values showed satisfactory agreement.

Conclusion. A technique for measuring the spectral dependences of X-ray resist absorption coefficients was developed. Soft X-ray absorption coefficients were experimentally obtained.

Keywords: X-ray lithography, X-ray resists, contrast-sensitive characteristics

For citation: Ivanov A. A., Margolin V. I., Nikiforov A. V., Nguyen Viet An, Petrova G. V., Protchenko A. I., Rassadina A. A., Tupik V. A., Sharova N. N., Sholina I. S., Korbut A. V. X-Ray Lithography for Nanoscale Image Formation. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 44–56.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-44-56

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 16.04.2026; accepted 18.05.2026; published online 29.06.2026

Введение. Несмотря на лабораторные и академические исследования в области монокристаллической и мономолекулярной сборки и применение на практике как сфокусированных, так и расфокусированных электронных пучков для генерации изображения (рисунка, маски) на поверхности подложки, покрытой слоем соответствующего резиста, применение мягкого и жесткого рентгеновского излучения (РИ) остается самым продуктивным и востребованным технологическим процессом [1–4]. Применение коротковолнового электромагнитного излуче-

ния, такого, как глубокий вакуумный ультрафиолет (ГУФ), натывается на так называемую коротковолновую границу (при длине волны около 100 нм), препятствующую пропусканию света любыми материалами, что исключает применение обычных оптических систем. Поэтому усилия разработчиков литографического оборудования, работающего в области ГУФ, сконцентрировались на реализации отражающей зеркальной оптики, использующей очень сложные системы зеркал. Системы вакуумного ультрафиолета для обеспечения в будущем

Рентгеновская литография для реализации наноразмерных изображений

X-Ray Lithography for Nanoscale Image Formation

пространственного разрешения около 20 нм и ниже вынуждены использовать зеркала с многослойной структурой до 100 слоев различных материалов с толщиной каждого покрытия в доли микрометров и в десятки нанометров. Системы обычно работают в диапазоне излучения 13.5 нм и связаны с проблемами наличия высокоотражающих многослойных покрытий.

В качестве рабочего обычно используется излучение с длиной волны 13.5 нм, а в качестве отражающих материалов – системы на основе La/B₄C, La/B₉C [5, 6], WSc, WSi, WC [7–9] и другие, обеспечивающие отражение до 90 % падающего излучения (если верить рекламным сообщениям различных фирм). Однако коэффициент отражения 70 % зафиксирован реально, что тоже очень хорошо.

Аналогичные системы используются и для реализации процесса рентгеновской литографии, но если с источниками глубокого ультрафиолета особых трудностей и проблем практически нет, то с рентгеновским излучением все сложнее. Наиболее распространенной аппаратурой являются источники рентгеновского излучения, использующие водоохлаждаемый анод и остросфокусированный пучок электронов. Помимо того, что особо острая фокусировка электронного пучка – серьезная проблема, такая система (и это главное) имеет радиальную симметрию (точечный источник и веером расходящееся рентгеновское излучение).

Совершенно очевидно, что идеальным источником рентгеновского излучения для целей литографии является синхротронное излучение с легко перестраиваемой длиной волны и практически абсолютно параллельное. Таких синхротронов в РФ очень мало.

Применение проекционной электронной литографии ограничивается сложностью изготовления электронных шаблонов, сложностью их эксплуатации и физическими ограничениями, налагаемыми на технологические процессы, связанные с рассеянием и отражением электронов от слоя резиста и нижележащей подложки. Это приводит к трансформации монокинетического параллельного электронного пучка в обратнорассеянный в слой резиста поток электронов с разными углами рассеяния и разной энергией. Применение остросфокуси-

рованного электронного пучка позволяет достичь точечного разрешения около 20 Å (1 Å = 10⁻¹⁰ м). Этого вполне достаточно для формирования как электроношаблонов, так и рентгеношаблонов, но не хватает для массового производства чипов, так как время реализации изображения на поверхности резиста для одного чипа составляет не минуты, а в лучшем случае многие часы [10].

Поскольку в воздухе коротковолновое излучение сильно рассеивается и поглощается, то все эти процессы необходимо производить в вакууме, причем, чем выше вакуум, тем лучше. Применение в качестве источника рентгеновского или ЭУФ-излучения лазерной плазмы, генерируемой Nd:YAG-лазером с длиной волны 1063 нм, создает излучение с широкой полосой предельного ультрафиолета с длиной волны ~10...25 нм. Однако лазерная плазма является точечным источником с радиальной симметрией и массой вытекающих из этого факта проблем. Следует отметить появление интереса к рентгенолитографии со стороны промышленности [11]. В Нижнем Новгороде регулярно проходит симпозиум "Нанозифика и нанозлектроника", где озвучиваются разные положительные тенденции. В частности, сообщается о возглавляемой Николаем Ивановичем Чхало команде исследователей с имеющимися научно-техническими заделами, которая способна решить проблему создания рентгеновского литографа. В Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН выдвинуты предположения о развитии технологии рентгеновской литографии с использованием новой установки СКИФ в Академгородке [11].

Основные литографические характеристики резистных композиций. Помимо чисто технических трудностей имеются проблемы, связанные с использованием резистов и резистных композиций. Исторически сложилось так, что в качестве защитной маски (резиста) использовались такие органические композиции, как полиметилметакрилат (ПММА) и позитивные резисты типа ЭРП-7, ЭРП-40 и ЭРП-51. Любые резисты характеризуются основными литографическими параметрами – пороговой дозой облучения, критической дозой облучения и контрастнo-чувствительной характеристикой [12–14]. Государственный стандарт Российской Федерации

определяет все необходимые параметры резистов, но, к сожалению, не предусматривает никакого наказания за его несоблюдение [15].

Пороговая доза означает количество электромагнитного излучения (в случае электронорезистов – удельный заряд на поверхности пленки), приходящегося на поверхность нанесенной пленки резиста. В классическом понимании это должна быть доза энергии, выделяющаяся в единице объема резиста и обеспечивающая начало полимеризации (или деструкции) резистивной пленки D_0 . Критическая доза соответствует дозе, при которой происходит полная полимеризация (или деструкция) резиста на всю его толщину ($D_{кр}$). Обратный логарифм их отношений определяет так называемый контраст, а зависимость контраста от дозы падающего излучения и есть контрастно-чувствительная характеристика (КЧХ) – $\lg[D_0/D_{кр}]^{-1}$. Стандартные КЧХ для негативного и позитивного резистов приведены на рис. 1.

По энергетическим характеристикам, выраженным в электрон-вольтах на сантиметр в кубе, контрасты электронных и рентгеновских резистов близки по значению, что позволяет коррелировать ранее полученные данные по электронорезистам с данными по рентгенорезистам.

Еще одним узким местом рентгеновской литографии являются особенности рентгеновского излучения. Дело в том, что мягкое рентгеновское излучение целиком поглощается практически любым материалом, а жесткое практически не поглощается, на чем основано применение его в медицине. Поэтому надо

осмысленно подходить к выбору типа излучения и, соответственно, генерирующей его аппаратуры. Жесткое рентгеновское излучение почти не поглощается различными грязными примесями с малым атомным номером, что полезно при эксплуатации рентгеношаблонов и использовании толстых пленок резиста и позволяет формировать в толстом резисте почти вертикальные стенки [13, 16, 17].

Для генерации рентгеновского излучения обычно используют точечный источник излучения с радиальной симметрией, вследствие чего при использовании как мягкого рентгеновского излучения (0.4...10 кэВ), так и жесткого (80...100 кэВ) начинает работать метод теневой проекции (рис. 2).

С точки зрения прецизионности процесса литографии на первом месте стоит синхротронное излучение, поскольку оно обеспечивает использование и регулирование рентгеновского излучения в очень широком диапазоне длин волн и яв-

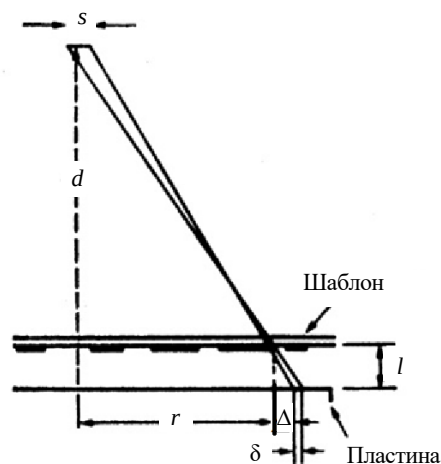


Рис. 2. Эффект полутени в рентгеновской литографии

Fig. 2. Penumbra effect observed in X-ray lithography

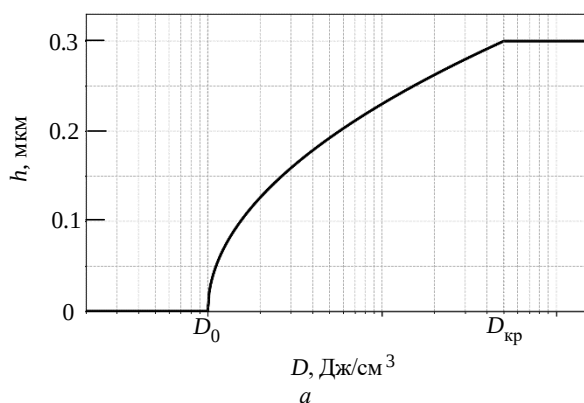
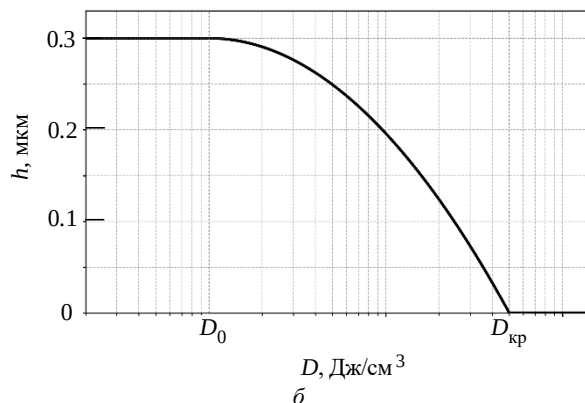


Рис. 1. КЧХ: а – негативного резиста; б – позитивного резиста

Fig. 1. Contrast curve: а – for a negative resist; б – for a positive resist



ляется практически единственным способом получения параллельного потока излучения, исключаяющего эффекты тени и полутени.

Ведущей организацией в области разработки технологий применения синхротронного излучения является Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения, образованный на базе Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск), поскольку располагает необходимым оборудованием и высококвалифицированными кадрами для его обслуживания [18].

К сожалению, чем выше чувствительность резиста, тем хуже реализованный с его помощью контраст. Для использованных авторами статьи позитивных резистов типа ЭРП-7 и ЭРП-40 чувствительность составляет около 400 Дж/см^3 , а контраст примерно 2.5. Для негативного резиста на основе полибутадиена чувствительность 20 Дж/см^3 , а контраст примерно 0.6. Более перспективными представляются резисты на основе ПММА. Для простоты экспериментов часто используются дозовые характеристики – интенсивность излучения, падающего на поверхность резиста, – а не классические (в электрон-вольтах на сантиметр в кубе).

Исследование спектральных зависимостей и коэффициентов поглощения рентгеновского излучения. Литературные данные, которые должны исчерпывающим образом характеризовать исследуемый резист в соответствии с ГОСТ Р 52250–2004 [15] по важным параметрам рентгенорезистов и используемых различных полимерных композиций, к сожалению, носят отрывочный и несистемный характер. К этому добавляется необходимость корректировки полученных данных с учетом особенностей используемой аппаратуры.

В связи с этим представляется необходимой разработка методики и проведение измерений соответствующих параметров. Логично начать эту работу с исследования спектрального хода коэффициента поглощения, который определяет способность резистного материала запасать энергию в процессе экспозиции, а следовательно, и чувствительность резиста к рентгеновскому излучению. Создание одновременно высокочувстви-

тельных и высококонтрастных рентгенорезистов остается пока задачей далекого будущего, поэтому на практике приходится использовать существующие материалы. В связи с этим в описываемой работе решались следующие задачи:

1) разработка методики измерения коэффициентов поглощения полимерных пленок в области мягкого рентгеновского излучения, используя стандартную рентгеноспектральную аппаратуру;

2) получение в области мягкого рентгеновского излучения спектральных зависимостей коэффициентов поглощения электронных полимерных резистов: ПММА, ЭРП-7 и ЭРП-40, пригодных для использования в качестве рентгенорезистов, но с некоторыми добавками.

В работе использовался рентгеновский спектрометр-монокроматор РСМ-500 [19], позволяющий устанавливать дифракционные решетки различных радиусов кривизны для широкой области спектра ($5 \dots 500 \text{ \AA}$).

Способ фильтрации рабочего участка спектра от наложения коротковолнового излучения в высших порядках дифракции основан на использовании явления полного отражения рентгеновских лучей от поверхности вещества [1]. Значение *критической длины волны* для данной среды зависит лишь от угла падения излучения на отражающую поверхность. Критическим длинам волн в области мягкого рентгеновского излучения соответствуют углы $2 \dots 20^\circ$, конструктивно удобные для эксперимента [18].

Экспериментальные исследования проводились в группе профессора ЛЭТИ В. А. Тупика и являются продолжением его ранних работ [16]. Поскольку значения коэффициентов поглощения резистов измерялись на отдельных монохроматических линиях, наложение на рабочий спектральный интервал излучения в высших порядках дифракции не приводило к серьезным затруднениям. Поэтому было использовано одно фильтрующее зеркало ($R = 4000 \text{ нм}$), покрытое золотом и установленное под углом скольжения $1^\circ 30'$ к падающему излучению. В качестве детектора мягкого рентгеновского излучения использовался пропорциональный счетчик, позволяющий регистрировать излучение без заметных просчетов

в широком диапазоне интенсивностей.

Окна счетчиков изготавливались из тонких пленок нитроцеллюлозы и формвара. Если монохроматическая линия достаточно узкая и контрастная, то разность интенсивностей линии и среднего фона с высокой точностью будет представлять интенсивность монохроматического излучения. Коэффициенты поглощения, определенные по интенсивностям (за вычетом фона) падающего и проходящего излучения, соответствуют монохроматическому излучению [16, 17, 20].

Рис. 3 и 4 иллюстрируют использованную методику определения коэффициентов поглощения резистов в области мягкого рентгеновского излучения. На этих рисунках показаны усредненные автоматические записи двух различных по контрастности рентгеновских линий – CuL_α (13.3 Å) и CuL_α (36.3 Å) – без поглотителя (а) и с поглотителем – тонкой пленкой полимерного резиста (б). Уровень фона под максимумом линии определялся посредством линейной интерполяции спектрального хода фона между точками спектра, достаточно удаленными от максимума линии [18]. По результатам измерений определялась величина

$$\mu x = \ln \left[(J_0 - J_{\phi 0}) / (J - J_\phi) \right],$$

где μ – линейный коэффициент поглощения; x – толщина поглотителя; J_0 и $J_{\phi 0}$ – интенсив-

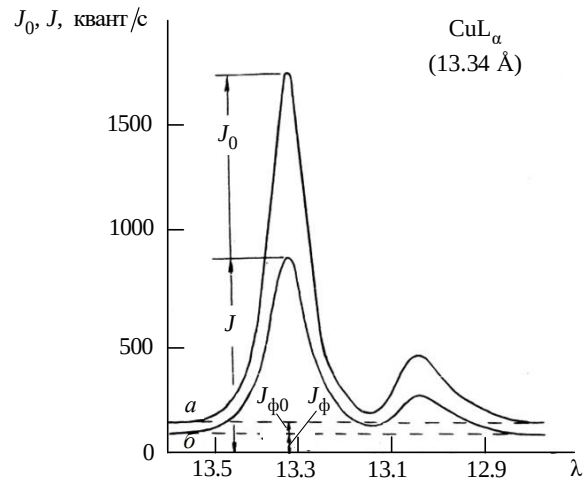


Рис. 3. Иллюстрация методики получения коэффициента поглощения резиста при использовании контрастной рентгеновской линии CuL_α : а – без поглотителя; б – с поглотителем (тонкой пленкой полимерного резиста)

Fig. 3. Illustration of the method for determining the absorption coefficient of the resist using the CuL_α characteristic X-ray line: а – without absorber; б – with absorber (thin polymer resist film)

ность в максимуме и уровень фона монохроматической линии излучения, падающего на поглотитель; J и J_ϕ – аналогичные параметры излучения, проходящего через поглотитель.

Следующий этап в процессе нахождения линейного коэффициента поглощения μ – измерение толщины поглотителя. Эта характеристика поли-

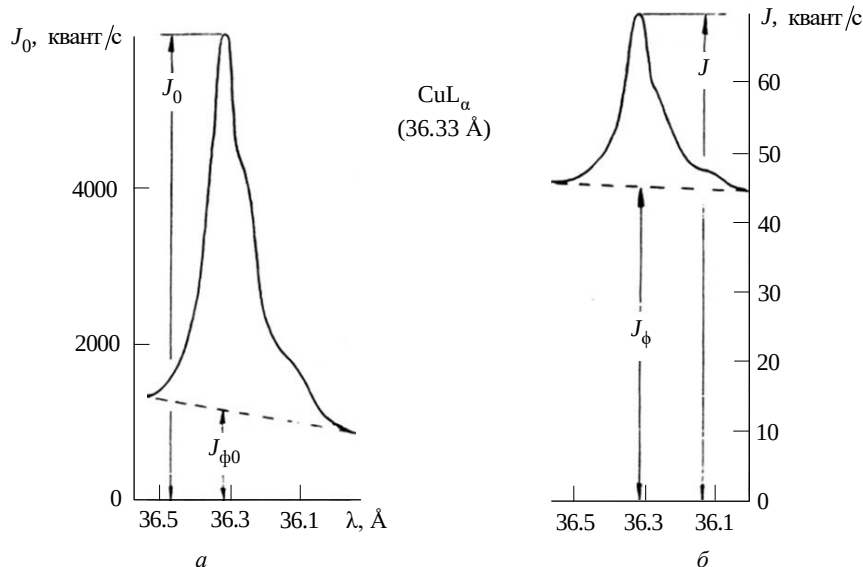


Рис. 4. Иллюстрация методики получения коэффициента поглощения резиста при использовании малококонтрастной рентгеновской линии CuL_α : а – без поглотителя; б – с поглотителем (тонкой пленкой полимерного резиста)

Fig. 4. Illustration of the method for determining the absorption coefficient of the resist using the low-contrast CuL_α characteristic X-ray line: а – without absorber; б – with absorber (thin polymer resist film)

мерной пленки определялась с помощью оптического интерференционного микроскопа МИИ-4.

Пленки на основе резистов ЭРП-7 и ПММА получались либо окунанием стеклянных подложек в раствор, либо методом центрифугирования.

Обсуждение результатов. На рис. 5 и 6 в логарифмическом масштабе представлены экспериментально полученные спектральные зависимости коэффициентов поглощения μ для двух резистов: на основе ПММА и на основе ЭРП-7. Результаты измерений коэффициентов поглощения на рентгеновских линиях указаны на рисунках темными кружками и приведены в табл. 1 и 2.

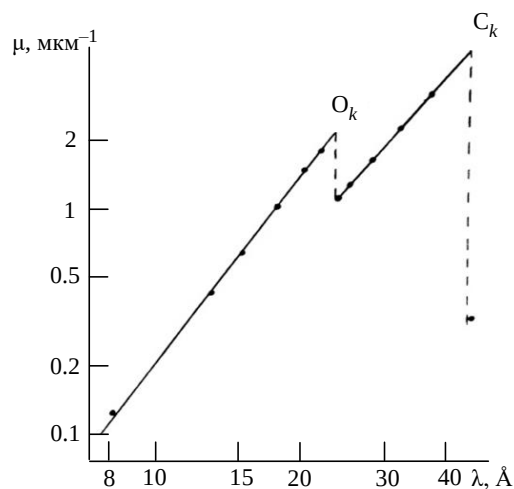


Рис. 5. Спектральная зависимость коэффициента поглощения μ резиста ПММА в области мягкого рентгеновского излучения

Fig. 5. Spectral dependence of the absorption coefficient μ of PMMA resist in the soft X-ray region

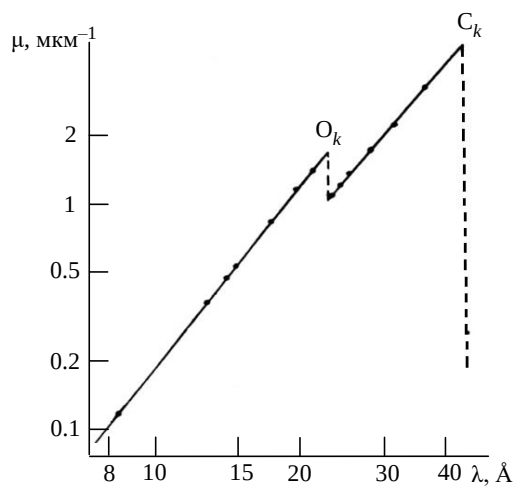


Рис. 6. Спектральная зависимость коэффициента поглощения μ резиста ЭРП-7 в области мягкого рентгеновского излучения

Fig. 6. Spectral dependence of the absorption coefficient μ of ERP-7 resist in the soft X-ray region

Прецизионность полученных экспериментальных результатов – не хуже 10 %. Для обеих зависимостей $\mu(\lambda)$ характерно наличие трех спектральных областей; наблюдаемые скачки коэффициента поглощения соответствуют k -краям атомов кислорода и углерода.

Результаты для $\lambda < 23 \text{ Å}$ и $23 < \lambda < 43 \text{ Å}$ хорошо укладываются в логарифмическом масштабе на отрезки прямых; соответственно, зависимость $\mu(\lambda)$ можно представить в следующем виде:

для ПММА:

$$\begin{aligned} \mu &= 4.76 \cdot 10^{-4} \lambda^{2.65} & \lambda < 23 \text{ Å} \\ \mu &= 7.43 \cdot 10^{-4} \lambda^{2.3} & 23 < \lambda < 43 \text{ Å}; \end{aligned}$$

для ЭРП-7:

$$\begin{aligned} \mu &= 4.71 \cdot 10^{-4} \lambda^{2.6} & \lambda < 23 \text{ Å} \\ \mu &= 3.94 \cdot 10^{-4} \lambda^{2.5} & 23 < \lambda < 43 \text{ Å}. \end{aligned}$$

Сравнив полученные результаты, можно отметить их сходство, так как использовались органические полимерные композиции со сходными физическими характеристиками; расхождения же зависят от интенсивности излучения.

Оптимальная доза рентгеновского облучения для резиста ПММА и композиций на его основе примерно 500 Дж/см^3 . Для композиций на основе резиста ЭРП-7 в настоящее время имеются лишь отрывочные сведения, поэтому необходимо проводить экспериментальные исследования для конкретной аппаратуры и состава композиции. В связи с этим невозможно с определенностью решить, какому из исследованных полимеров следует отдать предпочтение при использовании в качестве рентгенорезиста.

В литературе практически отсутствуют экспериментальные данные о коэффициентах поглощения рентгеночувствительных материалов в области мягкого рентгеновского излучения, а также об их точном химическом составе. Поэтому в табл. 3 результаты, полученные авторами статьи для ПММА при трех длинах волн, сравниваются с оценками из [10, 15] и др. В области мягкого рентгеновского излучения наблюдается хорошее согласие экспериментальных данных с рассчитанными значениями коэффициентов поглощения.

Заключение. Приведен обзор современного состояния научно-исследовательских работ по применению рентгеновской литографии в микроэлектронике. Отмечается, что достигну-

Табл. 1. Коэффициенты поглощения резиста на основе ПММА в области мягкого рентгеновского излучения

Tab. 1. Absorption coefficients of the PMMA-based resist in the soft X-ray region

Линия	AlK _α	CdL _α	CdL _{α1}	FeL _α	FeL _{α1}	CrL _α	OK _α	CrL _{α1}	TiL _α	TiL _{α1}	CaL _α	CK _α
Длина волны, Å	8.34	13.3	15.8	17.6	20.15	21.6	23.6	24.8	27.4	31.4	36.3	44.7
Коэффициент поглощения (μ), мкм ⁻¹	0.11	0.40	0.60	0.90	1.30	1.60	1.08	1.19	1.50	2.20	2.90	0.40

Табл. 2. Коэффициенты поглощения резиста на основе ЭРП-7 в области мягкого рентгеновского излучения

Tab. 2. Absorption coefficients of the ERP-7-based resist in the soft X-ray region

Линия	AlK _α	CaL _α	NiL _α	CaL _{α1}	FeL _α	FeL _{α1}	CrL _α	OK _α	VaL _α	CrL _{α1}	VaL _{α1}
Длина волны, Å	8.34	13.3	14.6	15.8	17.6	20.15	21.6	23.6	24.5	24.8	27.8
Коэффициент поглощения (μ), мкм ⁻¹	0.11	0.41	0.47	0.50	0.72	1.13	1.44	1.03	1.16	1.19	1.50

Табл. 3. Сравнение экспериментальных результатов данной работы с другими

Tab. 3. Comparison of the obtained experimental results with others those reported in literature

Линия	Длина волны, Å	Коэффициент поглощения (μ), мкм ⁻¹	
		Данная работа	Литературные данные
AlK _α	8.34	0.13	0.11
CuL _α	13.3	0.45	0.40
CrL _α	21.6	1.68	1.58

тый в настоящее время уровень рентгенолитографической технологии позволяет изготавливать в лабораторных и промышленных условиях микроэлектронные устройства с субмикронным разрешением. Указываются некоторые

возможные направления научно-исследовательской работы по развитию рентгенолитографической технологии.

Разработана методика получения спектральных зависимостей коэффициентов поглощения рентгенорезистов с использованием стандартной рентгеноспектральной аппаратуры.

В области длин волн 5...50 Å измерены коэффициенты поглощения резистов на основе композиций ПММА и ЭРП-7. Даны аналитические представления полученных результатов.

Отмечается необходимость усиления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области микро- и нанолитографии, включая рентгеновскую литографию.

Авторский вклад

Иванов Аркадий Анатольевич – формулировка и постановка задачи в области групповых методов создания защитной маски на подложке в процессах высокоразрешающей проекционной рентгеновской литографии; обсуждение результатов экспериментов.

Марголин Владимир Игоревич – исследование литографических характеристик рентгенорезистов.

Никифоров Андрей Викторович – исследование спектральных зависимостей и коэффициентов поглощения рентгенорезистов при использовании мягкого рентгеновского излучения.

Нгуен Вьет Ан – анализ литературных данных в области методики получения спектральных зависимостей коэффициентов поглощения рентгенорезистов с использованием стандартной рентгеноспектральной аппаратуры; оформление графической части статьи.

Петрова Галина Васильевна – анализ литературных источников об экспериментальных исследованиях коэффициентов поглощения рентгеночувствительных материалов в области мягкого рентгеновского излучения.

Протченко Артемий Игоревич – изготовление окон счетчика; проведение эксперимента по измерению интенсивности монохроматического излучения.

Рассади́на Анна Александровна – участие в изготовлении окон счетчика и проведение эксперимента по измерению интенсивности монохроматического излучения.

Тупик Виктор Анатольевич – обсуждение вопросов фильтрации рабочего участка спектра от наложения коротковолнового излучения в высших порядках.

Шарова Наталья Николаевна – получение в области мягкого рентгеновского излучения спектральных зависимостей коэффициентов поглощения электронных полимерных резистов.

Шолина Ирина Серафимовна – анализ литературных источников об экспериментальных исследованиях коэффициентов поглощения рентгеночувствительных материалов в области мягкого рентгеновского излучения.

Корбут Андрей Владимирович – анализ литературных источников о химическом составе фоторезистов и размере дозы рентгеновского облучения.

Author's contribution

Arkady A. Ivanov, formulation related to group methods of creating a protective mask on a substrate in the processes of high-resolution projection X-ray lithography; discussion of experimental results.

Vladimir I. Margolin, investigation of lithographic characteristics of X-ray resists.

Andrey V. Nikiforov, investigation of spectral dependences and absorption coefficients of X-ray resists using soft X-ray radiation.

Nguyen Viet An, analysis of literature data in the field of methods for obtaining spectral dependences of absorption coefficients of X-ray resists using standard X-ray spectral equipment; formalization of the graphic part of the article.

Galina V. Petrova, analysis of literature sources on experimental studies of absorption coefficients of rent-sensitive materials in the field of soft X-ray radiation.

Artemy I. Protchenko, manufacturing of counter windows; conducting an experiment to measure the intensity of monochromatic radiation.

Anna A. Rassadina, participation in the manufacture of counter windows and conducting an experiment to measure the intensity of monochromatic radiation.

Viktor A. Tupik, discussion of the issues of filtering the working part of the spectrum from superposition of shortwave radiation in higher orders.

Natalia N. Sharova, получение в области мягкого рентгеновского излучения спектральных зависимостей коэффициентов поглощения электронных полимерных резистов.

Irina S. Sholina, analysis of literature sources on experimental studies of absorption coefficients of rent-sensitive materials in the field of soft X-ray radiation.

Andrey V. Korbut, analysis of literature sources on the chemical composition of photoresists and the dose of X-ray irradiation.

Список литературы

1. Кузьмин С., Матвеев В. Интерференционная рентгенолитография для упорядоченных наноструктур // Электроника: НТБ. 2014. Спец. вып. 00137. С. 47–56.

2. Павлова А. П., Клементьева Д. О. Рентгенолитография как современный метод нанолитографии // Материалы Междунар. науч.-практ. форума студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГИКиТ, 2021. С. 160–170.

3. Артюков И. А. Оптическая и рентгеновская микролитография на рубеже веков // Квантовая электроника. 2022. Т. 52, № 12. С. 1094–1101.

4. Проблемы и перспективы развития рентгеновской литографии / Н. И. Чхало, С. В. Голубев, З. Ф. Красильник, В. Н. Полковников, М. В. Стародубцев // ЛП Междунар. конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу / АО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН". М., 2025. С. 45.
doi: 10.34854/ISPAF.52.2025.1.1.007

5. Многослойные рентгеновские зеркала на основе $\text{La/B}_4\text{C}$ и $\text{La/B}_5\text{C}$ / С. С. Андреев, М. М. Барышева, Н. И. Чхало, С. А. Гусев, А. Е. Пестов, В. Н. Полковников, Д. Н. Рогачев, Н. Н. Салащенко, Ю. А. Вайнер, С. Ю. Зуев // Журн. техн. физики. 2010. Т. 80, вып. 8. С. 93–100.

6. Лаборатория рентгеновской оптики Физического института П. Н. Лебедева РАН. Разработки. Многослойные рентгеновские зеркала. URL: <https://sites.lebedev.ru/ru/LRO/663.html> (дата обращения: 08.04.2026).

7. Многопучковая рентгенолитография для формирования глубоких регулярных микроструктур / Б. Г. Гольденберг, А. Г. Лемзяков, А. Г. Зелинский, В. П. Назьмов, В. Ф. Пиндюрин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные ис-

следования. 2016. № 1. С. 64–67.
doi: 10.7868/S0207352816010133

8. Аристов В. В., Шабельников Л. Г. Современные достижения рентгеновской оптики преломления // УФН. 2008. Т. 178, № 1. С. 61–83.
doi: 10.3367/UFNr.0178.200801c.0061

9. Серов И. Н., Жабров В. А., Марголин В. И. Проблемы нанотехнологии в современном материаловедении // Физика и химия стекла. 2003. Т. 29, № 2. С. 241–255.

10. Скупов А. Основные свойства и характеристики современных резистов для электронной литографии // Вектор высоких технологий. 2016. № 8 (29). С. 26–31.

11. Способ изготовления кремниевых рентгеношаблонов с использованием плазмохимического травления / А. Н. Генцелев, Ф. Н. Дульцев, Б. Г. Гольденберг, К. Э. Купер // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 8. С. 108–112.
doi: 10.31857/S1028096020080087

12. Генцелев А. Н., Варанд А. В. Определение технологического окна для высокоаспектной рентгенолитографии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90, № 12. С. 27–34.
doi: 10.26896/1028-6861-2024-90-12-27-34

13. Работы с использованием синхротронного излучения в Новосибирском Научном центре / К. В. Золотарев, А. И. Анчаров, З. С. Винокуров, Б. Г. Гольденберг, Ф. А. Дарьин, В. В. Кривенцов, Г. Н. Кулипанов, К. Э. Купер, А. А. Легкодымов, Г. А. Любас, А. Д. Николенко, К. А. Тен, Б. П. Толочко, М. Р. Шарафутдинов, А. Н. Шмаков, Е. Б. Левичев, П. А. Пиминов, А. Н. Журавлев // Изв. РАН. Сер. физическая. 2023. Т. 87, № 5. С. 614–626.
doi: 10.31857/S0367676522701095

14. Марголин В. И., Шишов С. Е. Перспективы и проблемы нанотехнологий // О национальной доктрине развития в Российской Федерации нанотехнологий: аналитический сб. / Комитет Совета Федерации по науке, культуре, образованию, здравоохранению и экологии. М., 2006. С. 54–63.

15. ГОСТ Р 52250–2004. Материалы электронной техники. Резисты для литографических процессов. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2004.

16. Марголин В. И., Тупик В. А. Исследование литографических характеристик электроно- и рентгенорезистов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 1998. Вып. 1. С. 82–85.

17. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Наука-Физматлит, 2007. 416 с.

18. Калинин Б. Д., Плотников Р. И., Речинский А. А. Применение рентгеновской спектрометрии для идентификации органических соединений и материалов // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15, № 1. С. 56–63.

19. Назьмов В. П. Глубокая 3D-рентгенолитография на основе высококонтрастного рентгенорезиста // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45, вып. 18. С. 3–5. doi: 10.1134/S1063785019090256

20. Особенности формирования изображения в составных преломляющих линзах в мягком рентгеновском диапазоне длин волн / П. Ю. Глаголев, Г. Д. Демин, В. И. Корнеев, Н. А. Дюжев // Журн. техн. физики. 2024. Т. 94, вып. 7. С. 1182–1195. doi: 10.61011/JTF.2024.07.58355.177-24

Информация об авторах

Иванов Аркадий Анатольевич – доктор технических наук (2018), профессор (2020) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры и устройств СВЧ-диапазона. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aai2@yandex.ru

Марголин Владимир Игоревич – доктор технических наук (1998), профессор (1999) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – нанотехнология и физикохимия органических и неорганических композиционных материалов и фракталы. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: v.margolin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6322-0727>

Никифоров Андрей Викторович – кандидат физико-математических наук (1987), ведущий специалист по инновационной деятельности ОАО "Завод Магнетон" (2017). Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – физика магнитных явлений в твердых телах. Адрес: ОАО "Завод Магнетон", ул. Курчатова, д. 9, Санкт-Петербург, 194223, Россия
E-mail: nikiforovav@magneton.ru

Нгуен Вьет Ан – специалист по специальности "Радиоэлектронные системы" (2016, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны), аспирант кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона; радиолокация, наноматериалы; искусственный интеллект. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: kphivan95@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-8660-3050>

Петрова Галина Васильевна – кандидат технических наук (1989), доцент (1993) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – технология приборостроения; автоматизация проектирования технологических процессов; экспертные системы, а также разработка и исследование резистивных материалов для микро- и нанолитографии. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: pgv50@mail.ru

Протченко Артемий Игоревич – инженер по специальности "Материаловедение и технологии новых материалов" (1998, Ленинградский горный институт), заместитель генерального директора по государственному оборонному заказу АО "НИИ Феррит-Домен". Автор ряда закрытых публикаций по синтезу материалов для применения в СВЧ-устройствах высокого уровня мощности. Сфера научных интересов – разработка ферритовых и диэлектрических материалов для пассивной ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона. Адрес: АО "НИИ Феррит-Домен", ул. Цветочная, д. 25, к. 3, лит. Б, Санкт-Петербург, 196006, Россия
e-mail: a.i.protchenko@domen.ru

Рассадина Анна Александровна – кандидат технических наук (2007), доцент кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 48 научных работ. Сфера научных интересов – разработка сенсорных систем и материаловедение для биомедицинской диагностики и нанотехнологий. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: a.a.rassadina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9906-7034>

Тупик Виктор Анатольевич – доктор технических наук (2011), профессор (2014) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанотехнологии; технологии сборки радиоэлектронных устройств; энерго- и ресурсосберегающие технологии; организация технологических процессов в радиоэлектронике. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: vatupik@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3760-3468>

Шарова Наталья Николаевна – инженер по специальности "Прикладная математика и информатика" (1997, Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля), заместитель генерального директора АО "НИИ Феррит-Домен". Сфера научных интересов – разработка математических моделей для ЭКБ. Адрес: АО "НИИ Феррит-Домен", ул. Цветочная, д. 25, к. 3, лит. Б, Санкт-Петербург, 196006, Россия
e-mail: n.n.sharova@domen.ru

Шолина Ирина Серафимовна – инженер конструктор-технолог радиоаппаратуры (1972, Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) (ЛЭТИ)), старший преподаватель, заместитель заведующего кафедрой микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – информационные технологии, физико-технологические основы проектирования интегральных микросхем. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: issholina@etu.ru

Корбут Андрей Владимирович – магистр по материаловедению и технологии материалов (2023, СПбГТИ), руководитель сектора гальванических покрытий, ОАО "Завод Магнетон". Аспирант кафедры химической нанотехнологии и материалов электронной техники Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – гальванические покрытия; химическая нанотехнология; материалы электронной техники. Адрес: ОАО "Завод Магнетон", ул. Курчатова, д. 9, Санкт-Петербург, 194223, Россия
E-mail: andreykorbut93@yandex.ru.

References

1. Kuzmin S., Matveev V. X-Ray Interference Lithography for Forming Ordered Nanostructures. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2014, iss. 137, pp. 47–56. (In Russ.)
2. Pavlova A. P., Klimenteva D. O. *Rentgenolitografiya kak sovremennyy metod nanolitografii* [X-Ray Lithography as a Modern Nanolithography Method]. *Proc. of the Intern. Scientific and Practical Forum of Students, Postgraduates and Young Scientists: in 3 Pts. Pt 1. St Petersburg, izd-vo SPbGKI*, 2021, pp. 160–170. (In Russ.)
3. Artyukov I. A. Optical and X-Ray Microlithography at the Turn of the Century. *Quantum Electronics*. 2022, vol. 52, no. 12, pp. 1094–1101. (In Russ.)
4. Chkhalo N. I., Golubev S. V., Krasil'nik Z. F., Polkovnikov V. N., Starodubtsev M. V. *Problemy i perspektivy razvitiya rentgenovskoy litografii* [Problems and Prospects of X-Ray Lithography]. *LII Intern. Conf. in Plasma Physics and Controlled Thermonuclear Fusion. Moscow, JSC STC "PLASMAIOFAN"*, 2025, p. 45. (In Russ.)
doi: 10.34854/ICPAF.52.2025.1.1.007
5. Andreev S. S., Barysheva M. M., Chkhalo N. I., Gusev S. A., Pestov A. E., Polkovnikov V. N., Rogachev D. N., Salashchenko N. N., Vainer Y. A., Zuev S. Y. Multilayer X-Ray Mirrors Based ON LA/B₄C and LA/B₉C. *Technical Physics*. 2010, vol. 55, iss. 8, pp. 1168–1174.
6. X-ray Optics Laboratory. Multilayer X-Ray Mirrors. Available at: <https://sites.lebedev.ru/ru/LRO/663.html> (accessed: 08.04.2026).
7. Goldenberg B. G., Lemzyakov A. G., Nazmov V. P., Pindyurin V. F., Zelinsky A. G. Multibeam X-Ray Lithography to Form Deep Regular Microstructures. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2016, vol. 10, no. 1, pp. 92–95.
doi: 10.7868/S0207352816010133
8. Aristov V. V., Shabelnikov L. G. Recent Advances in X-Ray Refractive Optics. *Advances in Physical Sciences*. 2008, vol. 51, pp. 57–77.
doi: 10.1070/PU2008v051n01ABEH006431

9. Serov I. N., Zhabrev V. A., Margolin V. I. Problems of Nanotechnology in Modern Materials Science. *Fizika i khimiya stekla*. 2003, vol. 29, no. 2, pp. 242–256. (In Russ.)

10. Skupov A. Basic Properties and Characteristics of Modern Resists for Electron Lithography. *Vektor vysokikh tekhnologiy*. 2016, no. 8 (29), pp. 26–31. (In Russ.)

11. Gentshev A. N., Dultsev F. N., Goldenberg B. G., Kuper K. E. Method for Manufacturing Silicon X-Ray Masks Via Plasma Chemical Etching. *J. of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2020, vol. 14, no. 4, pp. 862–865. doi: 10.1134/s1027451020040266

12. Gentshev A. N., Varand A. V. The Technological Window Determining for High-Aspect X-Ray Lithography. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2024, vol. 90, no. 12, pp. 27–34. (In Russ.) doi: 10.26896/1028-6861-2024-90-12-27-34

13. Zolotarev K. V., Ancharov A. I., Vinokurov Z. S., Goldenberg B. G., Darin F. A., Kriventsov V. V., Kulipanov G. N., Cooper K. E., Legkodymov A. A., Lyubas G. A., Nikolenko A. D., Ten K. A., Tolochko B. P., Sharafutdinov M. R., Shmakov A. N., Levichev E. B., Piminov P. A., Zhuravlev A. N. Synchrotron Radiation Based Research at the Novosibirsk Scientific Center. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023, vol. 87, no. 5, pp. 541–551. doi: 10.3103/s1062873822701635

14. Margolin V. I., Shishov S. E. *Perspektivy i problemy nanotekhnologii* [Prospects and Problems of Nanotechnolo-

gies]. *O natsionalnoy doktrine razvitiya v Rossiyskoy Federatsii nanotekhnologii: analiticheskiy sbornik*. Moscow, *Izдание Soveta Federatsii*, 2006, pp. 54–63. (In Russ.)

15. GOST R 52250–2004. *Materialy elektronnoy tekhniki. Rezisty dlya litograficheskikh protsessov. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Materials of Electronic Engineering. Resists for Lithographic Processes. General Specifications]. Moscow, *Izd-vo standartov*, 2004. (In Russ.)

16. Margolin V. I., Tupik V. A. Study of Lithographic Characteristics of Electron And X-Ray Resists]. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 1998, iss. 1, pp. 82–85. (In Russ.)

17. Gusev A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies]. Moscow, *Nauka-Fizmatlit*, 2007, 416 p. (In Russ.)

18. Kalinin B. D., Plotnikov R. I., Rechinsky A. A. The Using Of X-Ray Spectrometry for Identification Organic Compounds and Materials. 2011, vol. 15, no. 1, pp. 56–63. (In Russ.)

19. Naz'mov V. P. Deep 3D X-Ray Lithography Based on High-Contrast Resist Layers. *Technical Physics Let.* 2019, vol. 45, iss. 9, pp. 906–908. doi: 10.1134/S1063785019090256

20. Glagolev P. Yu., Demin G. D., Korneev V. I., Dyuzhev N. A. Aspects of Image Formation in Compound Refractive Lenses in the Soft X-Ray Wavelength Range. *Technical Physics*. 2024, vol. 69, iss. 7, pp. 1095–1106. (In Russ.)

Information about the authors

Arkady A. Ivanov, Dr Sci. (Eng.) (2018), Professor (2020) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: aai2@yandex.ru

Vladimir I. Margolin, Dr Sci. (Eng.) (1998), Professor (1999) of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology; physicochemical properties of organic and inorganic composite materials, and fractals. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: v.margolin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6322-0727>

Andrey V. Nikiforov, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (1987), Leading specialist in innovation activities of Magnetron J.S. Co. The author of 15 scientific papers. Area of expertise: magnetic phenomena in solid state bodies. Address: Magnetron J.S. Co., 9, Kurchatova St., St Petersburg 194223, Russia E-mail: nikiforovav@magnetron.ru

Nguyen Viet An, Specialist in "Radio-electronic Systems" (2016, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense), postgraduate student of the Department of Microelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of one scientific publication. Area of expertise: development of electronic components and microwave devices; radar; nanomaterials; artificial intelligence. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: kphivan95@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-8660-3050>

Galina V. Petrova, Cand. Sci. (Eng.) (1989), Associate Professor (1993), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 70 scientific publication. Area of expertise: instrument engineering technology; computer-aided design of technological processes; expert systems, as well as development and investigation of resist materials for micro- and nanolithography. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: pgv50@mail.ru

Artemy I. Protchenko, engineer specializing in Materials Science and Technologies of New Materials (1998, Leningrad Mining Institute), Deputy Director General for State Equipment Order of JSC "Research Institute Ferrite-Domain". The author of a number of closed publications on the synthesis of materials for use in high-power microwave devices. Area of expertise: development of ferrite and dielectric materials for passive ECB and microwave devices. Address: JSC "Research Institute Ferrite-Domain", 25, room 3, lit. B, Tsvetochnaya St., St Petersburg, 196006, Russia
e-mail: a.i.protchenko@domen.ru

Anna A. Rassadina, Cand. Sci. (Eng.) (2007), Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 48 scientific publications. Area of expertise: development of sensor systems and materials science for biomedical diagnostics and nanotechnology. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: a.a.rassadina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9906-7034>

Viktor A. Tupik, Dr Sci. (Eng.) (2011), Professor (2014) of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanotechnologies; radio-electronic device assembly technologies; energy- and resource-saving technologies; organization of technological processes in radio electronics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: vatupik@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3760-3468>

Natalia N. Sharova, Engineer with a degree in Applied Mathematics and Computer Science (1997, Vladimir Dahl East Ukrainian National University), Deputy General Director of JSC Research Institute Ferrite Domain. Area of expertise: development of mathematical models for ECB. Address: JSC "Research Institute Ferrite-Domain", 25, room 3, lit. B, Tsvetochnaya St., St Petersburg 196006, Russia
e-mail: n.n.sharova@domen.ru

Irina S. Sholina, Design engineer-technologist of radio equipment (1972, Electrotechnical Institute n. a. V. I. Ulyanov (Lenin)), Senior Lecturer, Deputy Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: information technologies; physical and technological fundamentals of integrated circuit design. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: issholina@etu.ru

Andrey V. Korbut, Master's Degree in Materials Science and Technology (2023, SPbSET). Head of the Galvanic Coatings Sector of Magneton Plant JSC. Postgraduate student of the Department of Chemical Nanotechnology and Electronic Engineering Materials of St Petersburg State Technological Institute (Technical University). The author of 1 scientific publication. Area of expertise: galvanic coatings; chemical nanotechnology; electronic engineering materials. Address: Magneton J.S. Co., 9, Kurchatova St., St Petersburg 194223, Russia
E-mail: andreykorbut93@yandex.ru.
