15

Исследование топологии олово-оксокластерных соединений, проэкспонированных ЭУФ излучением с длиной волны 13.55 nm

© А.Е. Пестов,[1] М.С. Михайленко,[1] А.Н. Нечай,[1] А.Я. Лопатин,[1] А.А. Перекалов,[1] М.Ю. Захарина,[2] К.В. Арсеньева,[2] Р.С. Ковылин,[2] А.Н. Конев,[2] С.А. Чесноков[2]

[1] Институт физики микроструктур РАН,
603951 Афонино, Кстовский р-он, Нижегородская обл., Россия
[2] Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН,
603137 Нижний Новгород, Россия
e-mail: aepestov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 13 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 13 апреля 2026 г.
Принято к публикации 13 апреля 2026 г.

Проведено экспериментальное исследование влияния ЭУФ излучения с длиной волны 13.55 nm на растворимость и топологию поверхности пленок олово-оксокластерных соединений: TOC-21 — $Sn_{14}(\mu_3{-}O)_{12}(\mu_2{-}O)_4(\mu_2{-}OH)_4(PZ)_8(HPZ)_4Cl_{12}$ и TinS — $[(C_4H_9Sn)_{12}O_{14}(OH)_6]^{2+}[PTSA^-]_2$. Показано, что после проявления для материла TinS остаточная высота рельефа соответствует исходной толщине пленки фоторезиста ($d = 40$ nm) при дозах на уровне 1.0 J/cm^2, а для структуры TOC-21 — при дозах излучения на уровне 1.6 J/cm^2. Для образца TOC-21 методом контактной литографии получен топологический рисунок с модуляцией высоты рельефа от 0 до 30 nm (исходная толщина пленки резиста). Показана перспективность применения пленок из олово-оксокластерных соединений в качестве основы для разработки негативных ЭУФ-резистов.

Ключевые слова: оксокластер, негативный резист, тонкие пленки, ЭУФ-нанолитография.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63630.101-26

Введение

Исследование влияния коротковолнового излучения на фоточувствительные полимеры вызывает значительный интерес ученых разных областей знаний — от формирования изображения до биомедицины. Фоточувствительные полимеры используются при стоматологическом протезировании [1], при 3D-принтинге [2], в качестве армирующего покрытия при изготовлении тонкопленочных фильтров на просвет. Важным технологическим применением является использование фотополимеров в качестве позитивного [3] или негативного [4] ЭУФ-резиста, т. е. фоточувствительного покрытия, в котором формируется рисунок, переносимый впоследствии на кремниевую пластину при изготовлении СБИС методом ЭУФ-литографии.

Повышение производительности ЭУФ-литографии требует развития в том числе фоточувствительных материалов. Поиск композиций, имеющих большую чувствительность к излучению, а как следствие, требующих меньшую дозу для формирования рисунка, производился эволюционным путем. Традиционные полимерные резисты, не использующие механизм химического усиления (например, резисты на основе ПММА — полиметилметакрилата) [5], работают за счет прямого разрыва цепей (скиссинга) под действием излучения. Их главное преимущество — исключительно высокое разрешение, позволяющее формировать структуры размером менее 10 нанометров [6], что делает ПММА эталонным материалом для калибровки оборудования и отработки новых литографических процессов. Кроме того, они отличаются простотой использования, широкой доступностью и возможностью легко удаляться (селективно проявляться) без повреждения подложки, что критически важно при создании исследовательских образцов и масок для нанолитографии [7]. Параллельно с целью повышения чувствительности производились исследования химически усиленных резистов (ХУР), которые стали стандартом для глубокой ультрафиолетовой литографии и впоследствии были адаптированы для ЭУФ [8,9]. Их принцип действия основан на генерации кислоты под действием излучения, которая затем катализирует реакцию деблокирования в полимере при нагреве, что позволяет достичь высокой чувствительности. Однако с уменьшением топологии элементы ХУР сталкиваются с фундаментальными ограничениями, такими как диффузия кислоты, размывающая границы изображения, и стохастические эффекты, приводящие к дефектам [8].

Для преодоления этих ограничений были предложены металлоорганические резисты, содержащие в своем составе атомы элементов, обладающих значительным поглощением на рабочей длине волны ЭУФ-литографии [10]. В отличие от ХУР, где поглощение излучения происходит случайным образом всей матрицей, в металлоорганических резистах атомы металлов (олово, цирконий, гафний, цинк) обеспечивают локальность поглощения ЭУФ-фотонов [11,12]. Поглощенная энергия приводит к отщеплению органических лигандов

и последующему сшиванию или уплотнению материала, формируя изображение.

Помимо высокого поглощения, эти материалы открывают путь к новым процессам, таким как сухое проявление, что делает возможным использовать сверхтонкие пленки, что, в свою очередь, критически важно для предотвращения коллапса нанометровых структур. Исследования в этой области активно продолжаются: от создания резистов на основе кластеров металлов с разрешением менее 10 nm до разработки универсальных платформ, таких как YMORE2, которые обещают приблизить разрешение литографии к ангстремному масштабу. Кроме того, низкомолекулярная природа таких соединений позволяет надеяться на снижение шероховатости края/ширины линии (Line-Edge Roughness/Line-Width Roughness) и повышение разрешения по сравнению с полимерными аналогами [13].

Значительный интерес представляют негативные ЭУФ-резисты, которые формируют изображение за счет снижения растворимости пленок в облученных областях, что делает их незаменимыми для формирования контактных отверстий и изолированных линий при производстве полупроводников [14].

Таким образом, крайне актуальным является поиск композиций и исследование свойств негативных ЭУФ-резистов на основе металлоорганических соединений. Ранее нами была продемонстрирована возможность получения тонких пленок (10–60 nm) на основе олово-оксокластеров, содержащих 12 и 14 атомов олова. Установлено, что пленки проявляют чувствительность к ЭУФ-излучению (13.5 nm), а также воздействию электронного луча [15]. В областях, подвергшихся воздействию высокоэнергетического излучения, на поверхностях пленок были сформированы микроструктуры, устойчивые к последующей обработке проявителем. Настоящая работа является продолжением этих исследований и направлена на детальное изучение морфологических изменений рельефа областей пленок, подвергшихся ЭУФ облучению ($\lambda = 13.55$ nm), связанных с изменением растворимости материала пленки, а также топологии рисунка, сформированного методом контактной литографии. Полученные данные позволят оценить перспективность дальнейших исследований олово-оксокластерных соединений в качестве негативных резистов для ЭУФ-литографии, позволяющих приблизиться к технологическим нормам менее 10 nm.

1. Подготовка и методики исследования экспериментальных образцов

В рамках настоящей работы объектами исследования выступали два типа металлсодержащих оксокластеров, перспективных для использования в негативных ЭУФ-резистах. Первый из них — оксокластер олова с формулой $Sn_{14}(\mu_3{-}O)_{12}(\mu_2{-}O)_4(\mu_2{-}OH)_4(PZ)_8(HPZ)_4Cl_{12}$, в тексте обозначается как TOC-21. Второй исследуемый материал — соединение $[(C_4H_9Sn)_{12}O_{14}(OH)_6]^{2+}[PTSA^-]_2$, обозначается TinS. Синтез обоих материалов осуществлялся по методикам, подробно описанным в ранее опубликованных работах [16,17], что обеспечивает воспроизводимость результатов и позволяет опираться на уже апробированные подходы.

Для формирования тонких пленок из обозначенных выше соединений на поверхности кремниевых подложек использовался метод центрифугирования, который в англоязычной литературе чаще всего обозначается как spin-coating. Процесс нанесения занимал 30 s при варьируемой скорости вращения центрифуги. Рабочие растворы кластеров готовили с использованием органических растворителей: для TOC-21 применяли этиллактат производства компании „Aldrich“, а для TinS — 2-бутанон (метилэтилкетон) отечественного производства („Реахим“). Концентрация соединений в растворах подбиралась в зависимости от требуемой толщины пленки и составляла в пределах $5-13\,\mathrm{g\cdot L^{-1}}$.

При подготовке растворов к нанесению требовались различные дополнительные предварительные технологические приемы. Раствор TOC-21 в этиллактате подвергали ультразвуковой обработке (частота 20 kHz) в течение 20 min. Это необходимо для разрушения возможных агрегатов и ускорения растворения. После обработки нерастворившийся осадок удаляли путем фильтрации через мембранный фильтр из фторопласта (PTFE) с диаметром пор $0.2\,\mu$m, что гарантирует отсутствие крупных частиц, способных повлиять на качество пленки. Для достижения полного растворения кластера соединения TinS в 2-бутаноне смесь кипятили при температуре 90 °C.

Толщина формируемых пленок регулировалась скоростью вращения подложки на центрифуге „Spincoat G3-8“. После нанесения пленки обязательно подвергались термообработке: их сушили в течение 3 min при температуре 70 °C в сушильном шкафу (Ulab UT-4622). Данный этап, называемый также soft-bake, необходим для удаления остаточного растворителя и стабилизации структуры пленки перед дальнейшими операциями.

Контроль толщины полученных покрытий осуществлялся с помощью эллипсометрического метода на приборе META-900. Эллипсометрия позволяет с высокой точностью определять толщину тонких пленок, не разрушая их.

В настоящей работе исследовались образцы с толщиной пленки TOC-21 $d = 30$ nm и пленки TinS $d = 40$ nm, такие толщины получались при следующих параметрах в процессе spin-coating:

— для материала TOC-21 концентрация растворителя (этиллактат) составляла $7.75\,\mathrm{g\cdot L^{-1}}$, а скорость вращения центрифуги — 500 rpm;

— для материала TinS концентрация растворителя (2-бутанон) составляла $5.0\,\mathrm{g\cdot L^{-1}}$, а скорость вращения центрифуги — 3000 rpm.

Для проявления проэкспонированных образцов использовалась смесь изопропилового спирта и воды в объемном соотношении 3 : 2. Время проявления составляло 30 s, после чего образцы высушивались при температуре 50 °C в течение 2.5 min.

Для исследования топологии поверхности образцов после проявления, т. е. анализа сформированного в результате литографического процесса рельефа, использовался оптический микроинтерферометр белого света SuperView W1 производства Китай. Выбор данного метода обусловлен возможностью получать трехмерное изображение поверхности с нанометровым рельефом. Однако для исследуемых композиций возникла проблема, характерная для многих полимерных и металлоорганических материалов: пленка фоторезистивного материала оказалась прозрачной в видимом диапазоне длин волн. Это означает, что интерференционные методы, основанные на отражении света от поверхности, не могут быть напрямую применены, так как свет будет проходить сквозь пленку и отражаться от подложки, создавая искаженную картину рельефа.

Для преодоления данного ограничения была применена дополнительная пробоподготовка, заключающаяся в напылении тонкого металлического слоя на поверхность резиста, т. е. перед проведением интерферометрических измерений образцы покрывали тонкой пленкой вольфрама (W) толщиной 30 nm. Пленка такой толщины с одной стороны достаточно мала и хорошо повторяет рельеф подложки, а с другой является непрозрачной для видимого света. Нанесение осуществлялось методом магнетронного напыления, который обеспечивает высокую однородность покрытия. Для оценки толщины использовали метод „свидетеля“ (контрольного образца). Рядом с исследуемым образцом в процессе напыления устанавливалась стандартная кремниевая подложка толщиной 0.5 mm, выступающая в роли референсного образца. Поскольку свидетель находился в непосредственной близости к основному образцу, толщина пленки на нем должна быть идентична толщине пленки на исследуемом резисте.

Измерение толщины вольфрамового слоя на контрольной подложке осуществлялось методом малоугловой рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра PANalytical XPert PRO (Нидерланды).

2. Экспонирование экспериментальных образцов

Образцы облучались в области экстремального ультрафиолетового излучения (на длине волны 13.55 nm) с помощью стенда на основе лазерно-плазменного источника [18]. Ниже приводится краткое описание принципа работы стенда.

Стенд представляет собой единый вакуумный объем. В качестве источника экстремального ультрафиолетового излучения в работе использовалась лазерно-индуцированная плазма, формируемая фокусировкой мощного лазерного импульса на газовой струе. Генерация плазмы осуществлялась с помощью Nd : YAG-лазера, работающего на длине волны 1064 nm. Лазерная система генерировала импульсы длительностью 9 ns с энергией в импульсе 0.8 J. Излучение лазера с помощью короткофокусной линзы фокусировалось в область непосредственно перед соплом, формирующим газовую струю. Выбор короткофокусной оптики обусловлен необходимостью достижения высокой плотности мощности в области фокуса, достаточной для пробоя газа и образования плазмы. Частота следования импульсов могла варьироваться в диапазоне от 5 до 10 Hz, что позволяло регулировать интенсивность и длительность воздействия и условиях накопления сигнала.

Ключевым элементом экспериментальной установки являлось импульсное газовое сопло, через которое рабочий газ подавался в вакуумную камеру. Использование импульсного режима подачи газа, в отличие от непрерывного, позволяет существенно снизить нагрузку на вакуумную систему и облегчить откачку. Для синхронизации процессов лазерного импульса и газового клапана применялась система задержек: частота следования импульсов лазера синхронизировалась с частотой открытия клапана сопла, таким образом, чтобы каждый лазерный импульс приходился на момент максимальной плотности газа в фокальной области.

При взаимодействии сфокусированного лазерного излучения высокой интенсивности с атомами рабочего газа происходит их многократная ионизация, в результате чего образуется высокотемпературная плазма — лазерная искра. В процессе последующей рекомбинации возбужденных многозарядных ионов возникает характеристическое излучение в широком спектральном диапазоне, включая экстремальную ультрафиолетовую область. Именно это рекомбинационное излучение многозарядных ионов из области лазерной искры являлось предметом дальнейшего использования в литографических экспериментах.

Для получения излучения с длиной волны 13.55 nm, представляющей наибольший интерес для современной ЭУФ-литографии, в качестве рабочего газа был выбран газ аргон (Ar). Данный выбор обусловлен тем, что ион ArVIII имеет в своем спектре интенсивные линии излучения вблизи указанной длины волны. Давление газа на входе в сопло поддерживалось на уровне 10 bar, что обеспечивало достаточную плотность нейтрального газа в области фокусировки для эффективного поглощения лазерной энергии и образования плазмы с требуемым ионным составом. Таким образом, комбинация параметров лазерного излучения, режима работы сопла и выбора рабочего газа позволила получить стабильный источник ЭУФ-излучения на длине волны 13.55 nm, пригодный для проведения литографических экспериментов. Спектр излучения газовой мишени Ar экспериментального стенда представлен на рис. 1.

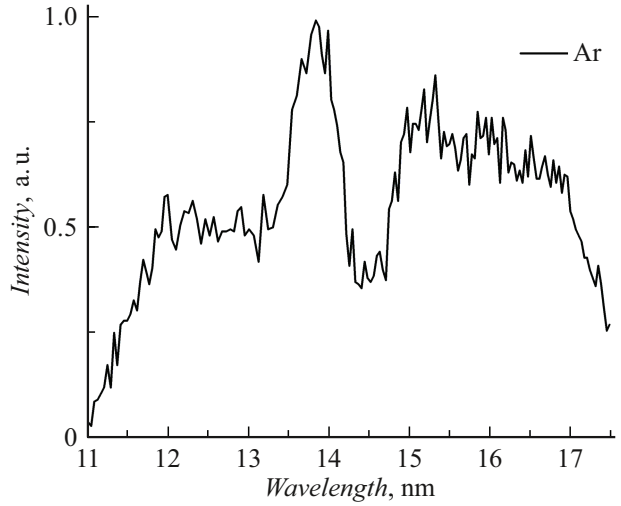

Рис. 1. Спектр излучения лазерно-плазменного источника с газовой мишенью (Ar).

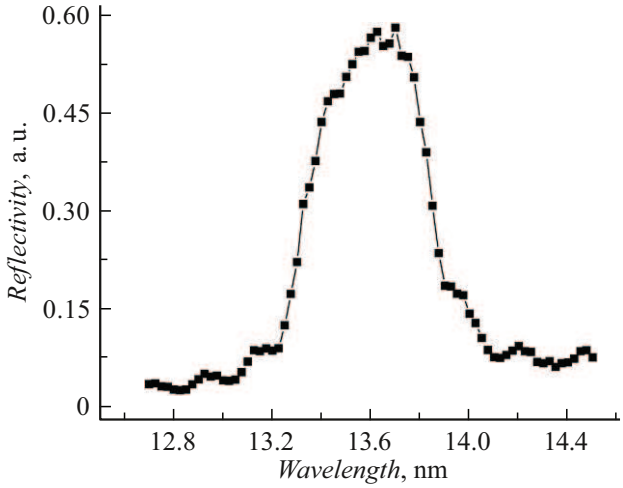

Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента отражения коллекторного сферического многослойного Mo/Si-зеркала-монохроматора.

Поскольку газовая мишень излучает в полный телесный угол 4π sr, а ее спектр достаточно широк (рис. 1), для сбора значительной части излучения и выделения рабочей длины волны 13.55 nm использовалось коллекторное сферическое многослойное Mo/Si-зеркало-монохроматор (рис. 2).

Диаметр зеркала составляет 50 mm, расстояние до источника 320 mm, что соответствует телесному углу оптической системы $\Omega = 0.02$ sr. Его абсолютный коэффициент отражения на длине волны 13.55 nm составляет $R = 60.6\,\%$, а спектральная полоса пропускания $\Delta\lambda = 0.52$ nm. Излучение, собранное коллекторным зеркалом-монохроматором, установленным под углом 5° к оптической оси, проходило через тонкопленочный бериллиевый (Be) абсорбционный фильтр толщиной $0.2\,\mu$m и фокусировалось (с увеличением $m = 1$) на пластине с фоторезистом, закрепленной на линейном трансляторе. Бериллиевый фильтр пропускает излучение рабочей длины волны 13.55 nm и отсекает фоновое видимое и ультрафиолетовое излучение, присутствующее в спектре лазерной искры. Коэффициент пропускания излучения с длиной волны 13.55 nm составляет $T = 72.5\,\%$, а подавление длинноволнового фона более 10^{-5} [18].

Таблица 1. Значения доз излучения с длиной волны 13.55 nm, сообщенных образцу TinS

№ позиции	t, min	Доза, J/cm^2
1	120	2.16
2	10	0.18
3	20	0.36
4	40	0.72
5	60	1.08

Линейный транслятор позволяет перемещать образец в вакуумной камере, формируя на одной пластине с фоторезистом несколько точек экспонирования с различными поглощенными дозами без нарушения вакуума. Количество таких точек зависит от размера пятна ЭУФ-излучения на образце и габаритов самой пластины. Согласно данным работы [18], размер пятна фокусировки в используемой конфигурации стенда составляет примерно $0.5 \cdot 1.0$ mm^2.

Для контроля дозы в область пятна фокусировки устанавливался детектор ЭУФ-излучения — кремниевый фотодиод ФДУК-100УВ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург) с калиброванной на синхротроне BESSY II спектральной чувствительностью, которая на длине волны 13.55 nm составляет $\eta = 0.25$ A/W [19]. Таким образом, регистрируя сигнал детектором, можно определить значение дозы электромагнитного излучения с длиной волны 13.55 nm за единичный лазерный импульс, а впоследствии пересчитать в значение дозы сообщаемой образцу в процессе экспонирования. В данном случае ток детектора при частоте следования лазерных импульсов 10 Hz составил $I_{det} = 3.75 \cdot 10^{-7}$ A, что при размере пятна $0.5 \cdot 1.0$ mm^2 соответствует дозе, переданной образцу и приходящейся на один импульс лазерного излучения — $3.0 \cdot 10^{-5}$ J/(cm$^2 \cdot$ pulse).

После установления зависимости дозы излучения от времени была проведена процедура экспонирования образцов. Было приготовлено по 3 экспериментальных образца для каждого оксокластера. На каждом образце было сформировано по 5–6 пятен засветки с различной сообщенной дозой излучения с длиной волны 13.55 nm. Значения для образца TinS приведены в табл. 1.

Времена засветки составляли до 120 min, что позволило накопить дозы излучения с длиной волны 13.55 nm до 2.16 J/cm^2.

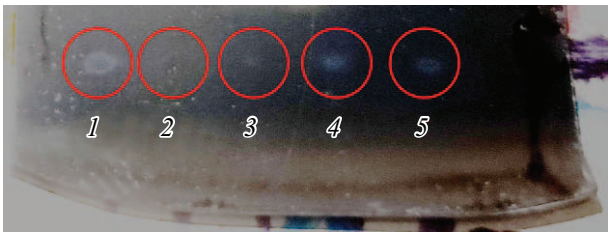

Рис. 3. Фотография образца TinS после проявления. Кругами обведены позиции пятен засветки.

3. Исследование топологии экспериментальных образцов

После нанесения, постобработки (soft-bake), экспонирования и проявления экспериментальных образцов на поверхности отчетливо проявлялись пятна, контраст которых соответствовал сообщенной дозе излучения. Пример поверхности образца после проявления представлен на рис. 3.

Далее проводилось исследование топологии поверхности с помощью микроинтерферометра SuperView W1. Как было упомянуто ранее, для устранения ошибки определения высоты рельефа из-за прозрачности в видимом диапазоне пленки из тестируемого материала, на поверхность образцов наносилась тонкая (порядка 30 nm) пленка W. Типичные карта поверхности для образца резиста ТОС-21, толщиной $d = 30$ nm и ее сечение показаны на рис. 4.

Как можно видеть на рис. 4, высота рельефа в засвеченной области по отношению к периферии составляет ~ 27 nm, что указывает на более высокую стойкость проэкспонированного участка пленки фоторезиста к воздействию проявителя по сравнению с необлученным участком. Аналогичные измерения были проведены для всех пятен засветки. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Остаточная высота пленки резиста в области пятна засветки

t, min	Доза, J/cm^2	$H_{\text{ТОС-21}}$, nm	H_{TinS}, nm
120	2.16	30	40
90	1.62	30	–
60	1.08	27	40
40	0.72	20	20
20	0.36	12	0
10	0.18	0	0

Как можно видеть в табл. 2, для структуры TinS и дозы на уровне 1.0 J/cm^2 остаточная высота рельефа соответствует исходной толщине пленки фоторезиста ($d = 40$ nm). При меньших сообщенных образцу дозах излучения наблюдается частичное или полное вымывание материала из засвеченной области (время проявления для обоих образцов составляло 2.5 min). Для структуры ТОС-21 аналогичные параметры достигаются при дозе излучения на уровне 1.6 J/cm^2. Таким образом, большую чувствительность к ЭУФ излучению ($\lambda = 13.55$ nm) проявили фоторезисты, полученные на основе TinS. Данный эффект аналогичен наблюдавшемуся ранее при экспонировании пленок TinS и ТОС-21 электронным пучком [15] и связан с формированием оксида олова на облученных участках пленки, объем которого растет с увеличением накопленной дозы излучения, что приводит к снижению растворимости облученного участка пленки.

На второй стадии исследования топологии была предпринята попытка формирования топологического рисунка методом контактной литографии. Для данного эксперимента использовалась частично маскирующая поверхность образца сетка с периодом ячейки 0.5 mm и шириной перемычки 0.05 mm. Фотографии держателя образцов с закрепленной на нем сеткой и ее вид под микроскопом представлены на рис. 5.

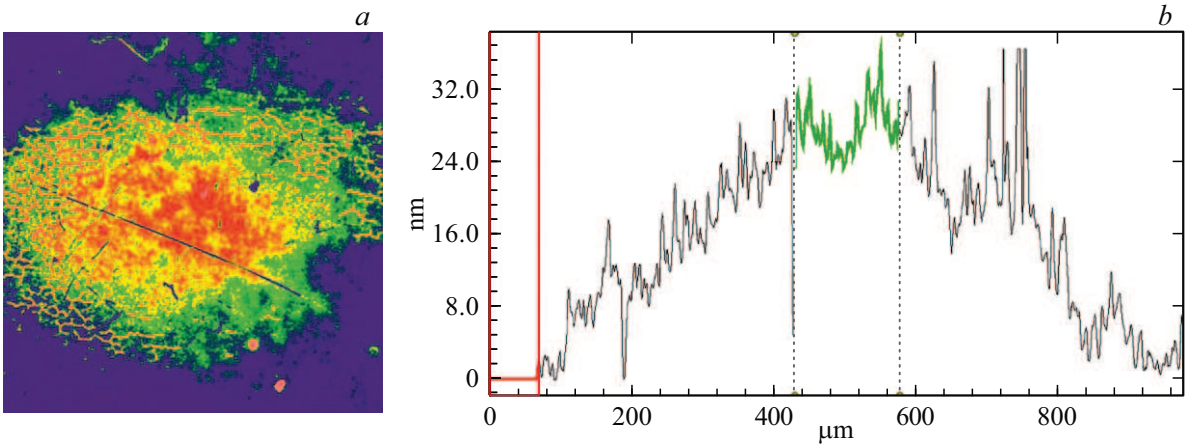

Рис. 4. Карта поверхности (a) и сечение (b) облученного участка резиста ТОС-21, $d = 30$ nm. Время экспозиции 60 min.

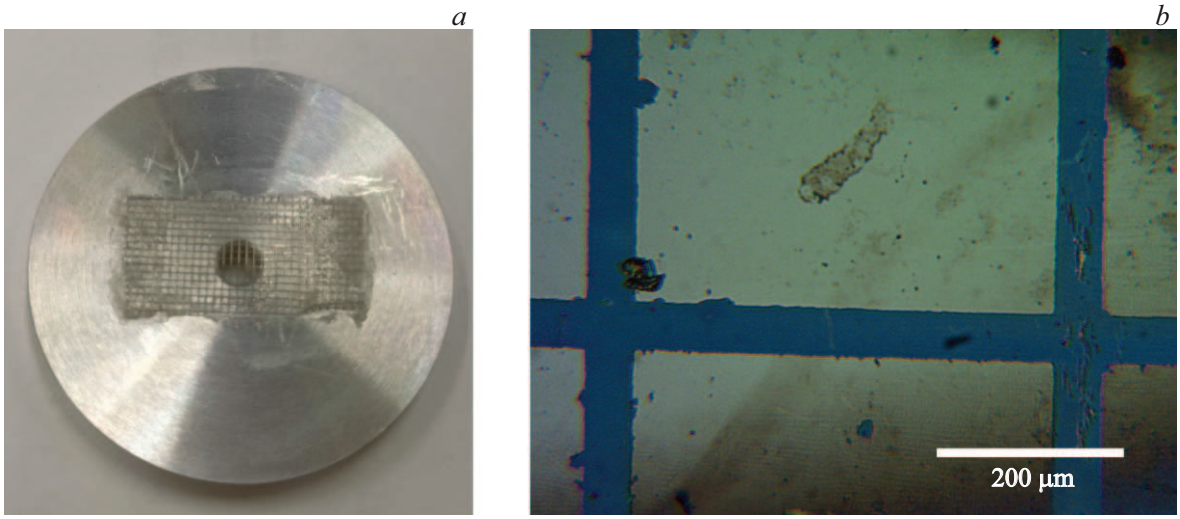

Рис. 5. Фотография держателя образцов с закрепленной маскирующей сеткой (*a*) и фотография элемента сетки под микроскопом (*b*).

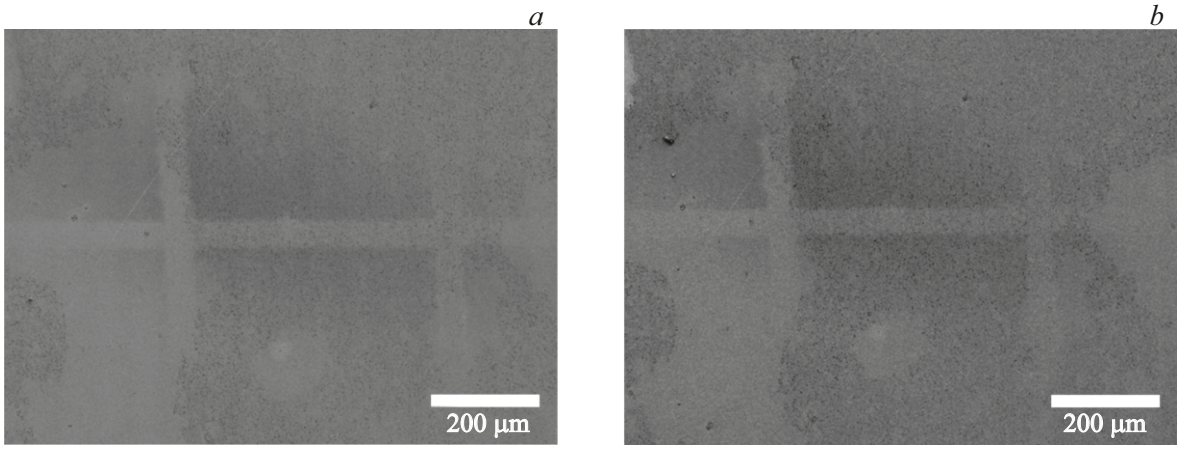

Рис. 6. СЭМ-изображения фрагмента решетки на поверхности резиста ТОС-21 ($d = 30$ nm): *a* — после экспозиции; *b* — после обработки в проявителе.

Для формирования изображения был выбран резист на основе ТОС-21 ($d = 30$ nm), так как пленка, полученная на его основе, имеет более однородную поверхность. Среднеквадратичная шероховатость составляет менее 1 nm ($R_q = 0.6$ nm) [15]. Экспозицию участка фоторезиста проводили через сетку, показанную на рис. 5. Размер пятна засветки составил около $0.5 \cdot 1.0\,\mathrm{mm}^2$; время экспозиции — 10 min; доза облучения — $2160\,\mathrm{mJ/cm}^2$. После облучения сформировавшийся рисунок исследовался с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

СЭМ изображения облученного участка фоторезиста, соответствующего дозе облучения $2160\,\mathrm{mJ/cm}^2$, до и после обработки проявителем приведены на рис. 6.

Как видно на рисунке, на поверхности образца четко виден отпечаток в виде фрагмента решетки, сохраняющий исходные размеры шаблона. Ширина перемычки, зафиксированная методом СЭМ, составила $57.6\,\mu$m, расстояние между перемычками $460\,\mu$m. После обработки фоторезиста в проявителе визуально наблюдается изменение структуры поверхности в областях, подвергшихся облучению.

После СЭМ исследования производилась металлизация поверхности образца для исследования топологии с помощью микроинтерферометра белого света, которое показало увеличение высоты рельефа в экспонированных областях пленок по сравнению с участками, закрытыми от света перемычками решетки. На рис. 7, *a* представлена карта поверхности образца, а на рис. 7, *b* ее сечение (соответствует пунктирной линии на рис. 7, *a*). Маркерами на рис. 7, *b* отмечены точки, соответствующие закрытым областям образца (перемычек маскирующей сетки).

Как можно видеть, высота рельефа в области засвеченных участков над остальной поверхностью образца составляет до 30 nm, однако также наблюдает-

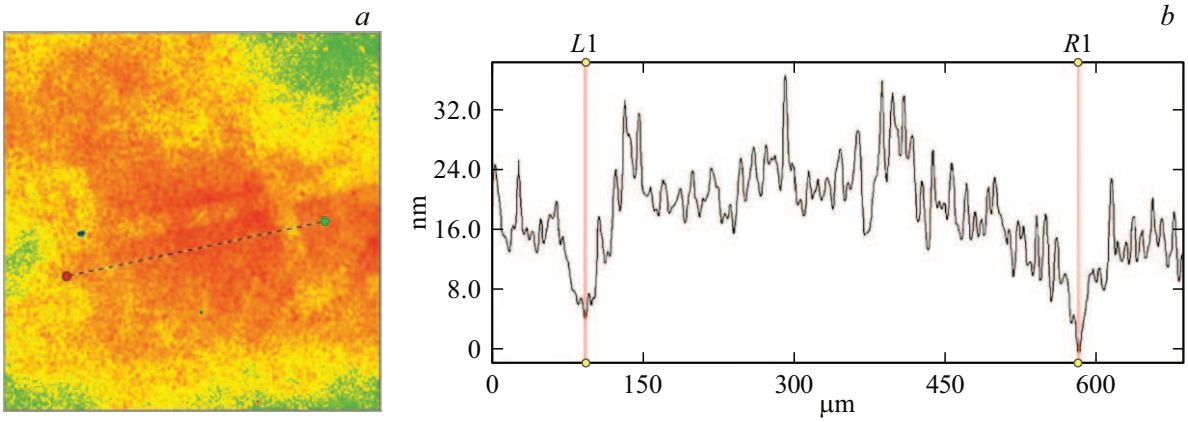

Рис. 7. Карта поверхности (a) и сечение облученного участка (b) резиста ТОС-21, ($d = 30$ nm). Время экспозиции 60 min.

ся значительная шероховатость, размах высот которой составляет более 5 nm. Что вместе с результатом, наблюдаемым в ходе СЭМ исследований, по-видимому, говорит о частичном вымывании материала пленки даже в областях, подвергшихся воздействию ЭУФ-излучения. Высота остаточной пленки после проявки в областях, где пленка была закрыта от излучения, и не подверглась облучению (перемычки решетки), составляет 0–4 nm (рис. 7, b).

Таким образом, проведено исследование топологии поверхности пленок из олово-оксокластерных соединений, нанесенных на кремниевые подложки и подвергшихся воздействию коротковолнового излучения с длиной волны $\lambda = 13.55$ nm. Показано, что рассмотренные материалы имеют неплохую (на уровне 1 J/cm^2) чувствительность и могут служить основой для разработки негативных ЭУФ-резистов для современной нанолитографии.

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование влияния ЭУФ-излучения с длиной волны $\lambda = 13.55$ nm на растворимость пленок на основе олово-оксокластеров: ТОС-21 с формулой — $Sn_{14}(\mu_3{-}O)_{12}(\mu_2{-}O)_4(\mu_2{-}OH)_4(PZ)_8(HPZ)_4Cl_{12}$ и TinS с формулой — $[(C_4H_9Sn)_{12}O_{14}(OH)_6]^{2+}[PTSA^-]_2$ в жидкостном проявителе — смесь изопропилового спирта и воды в объемном соотношении 3 : 2. Обнаружено, что оба материала изменяют свою растворимость в проявителе — смесь изопропилового спирта и воды в объемном соотношении 3 : 2 после облучения.

Исследование остаточной толщины пленки в зависимости от дозы ЭУФ-излучения показало, что для материла TinS остаточная высота рельефа соответствует исходной толщине пленки фоторезиста ($d = 40$ nm) при дозах на уровне 1.0 J/cm^2. При меньших дозах излучения наблюдается частичное вымывание материала, что отражается на уменьшении остаточной высоты рельефа. Для структуры ТОС-21 сохранение исходной толщины пленки происходит при дозах излучения на уровне 1.6 J/cm^2.

Проведены первые эксперименты по формированию топологического рисунка в пленке ТОС-21 методом контактной литографии. После экспонирования с дозой 2160 mJ/cm^2 был получен отпечаток, маскирующий пленку сетки с максимальным размахом высот, соответствующим исходной толщине пленки фоторезиста.

Проведенные исследования показали, что оба материала обладают чувствительностью к излучению с длиной волны $\lambda = 13.55$ nm и могут быть рассмотрены в качестве основы для разработки негативных ЭУФ-резистов. В рамках дальнейших исследований предполагается продолжить поиск олово-оксокластерных соединений, обладающих более высокой чувствительностью к излучению экстремального ультрафиолетового диапазона длин волн, а также планируется проведение экспериментов по определению пространственного разрешения, в том числе с использованием модернизируемого в настоящее время стенда проекционного ЭУФ-литографа-мультипликатора с расчетным разрешением 30 nm [20].

Финансирование работы

Работа в части экспонирования и исследования топологии поверхности выполнена в рамках государственного задания ИФМ РАН FFUF-2024-0022 и с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“, а в части синтеза, нанесения и проявления фоточувствительных олово-оксокластерных соединений в рамках государственного задания ИМХ РАН FFSE-2026-0006 и с использованием оборудования ЦКП ИМХ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Э.С. Каливраджиян, В.И. Кукуев, А.В. Подопригора. ВНМТ, **28** (3), 126 (2011).

[2] Б.С. Шавкута, О.С. Коркунова, Д.В. Ганин, Д.С. Дудова, *Тез. докл. IV Всероссийской научно-технической конференции „Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения“* (М., 2019), с. 186.

[3] K.E. Gonsalves, M. Thiyagarajan, J.H. Choi, P. Zimmerman, F. Cerrina, P. Nealey, V. Golovkina, J. Wallace, N. Batina. Microelectron. Eng., **77** (1), 27 (2005). DOI: 10.1016/j.mee.2004.08.003

[4] T. Fujimori, T. Tsuchihashi, T. Itani. Proc. SPIE, **9425**, 942505 (2015). DOI: 10.1117/12.2085706

[5] A.M. Goethals, R. Gronheid, F. Van Roey, H.H. Solak, Y. Ekinci. JPST, **19** (4), 501 (2006). DOI: 10.2494/photopolymer.19.501

[6] H. Duan, D. Winston, J.K.W. Yang, B.M. Cord, V.R. Manfrinato, K.K. Berggren. JVSTB, **28** (6), C6C58 (2010). DOI: 10.1116/1.3501353

[7] F. Rahman, D.J. Carbaugh, J.T. Wright, P. Rajan, S.G. Pandya, S. Kaya. Microelectron. Eng., **224**, 111238 (2020). DOI: 10.1016/j.mee.2020.111238

[8] X. Wang, P. Tao, Q. Wang, R. Zhao, T. Liu, Y. Hu, Z. Hu, Y. Wang, J. Wang, Y. Tang, H. Xu, X. He. Mater. Today, **67**, 299 (2023). DOI: 10.1016/j.mattod.2023.05.027

[9] M. Li, E. Aqad. Adv. Funct. Mater., **35** (24), 2420962 (2025). DOI: 10.1002/adfm.202420962

[10] A.M. Brouwer. JPST, **35** (1), 81 (2022). DOI: 10.2494/photopolymer.35.81

[11] Y. Wang, H. Yu, L. Wang, Y. Zhang, Z. Zhu, Y. Zhang, Y. Lu, C. Ouyang. J. Mater. Chem. A, **13** (36), 29860 (2025). DOI: 10.1039/d5ta04194e

[12] S. Castellanos, L. Wu, M. Baljozovic, G. Portale, D. Kazazis, M. Vockenhuber, Y. Ekinci, T. Jung. Proc. SPIE, **10583**, 105830A (2018). DOI: 10.1117/12.2297167

[13] M.S.M. Saifullah, A.K. Rajak, K.A. Hofhuis, N. Tiwale, Z. Mahfoud, A. Testino, P. Karadan, M. Vockenhuber, D. Kazazis, S. Valiyaveettil, Y. Ekinci. ACS Nano, **18** (35), 27076 (2024). DOI: 10.1021/acsnano.4c03939

[14] I. Kamohara, U. Welling, U. Klostermann, W. Demmerle. IEICE Transactions Electron., **105** (1), 35 (2022). DOI: 10.1587/transele.2021ECP5010

[15] М.Ю. Захарина, К.В. Арсеньева, М.А. Батенькин, А.Н. Конев, Р.С. Ковылин, А.А. Локтева, А.Е. Пестов, А.Н. Нечай, А.Я. Лопатин, А.А. Перекалов, С.А. Чесноков, А.В. Пискунов, И.Л. Федюшкин. ЖТФ, **96** (2) (2026). DOI: 10.61011/JTF.2026.02.62298.85-25

[16] D. Wang, Z.-N. Chen, Q.-R. Ding, C.-C. Feng, S.-T. Wang, W. Zhuang, L. Zhang. CCS Chem, **2**, 2607 (2020). DOI: 10.31635/ccschem.020.202000546

[17] F. Wu, B.J. Harper, D.A. Marsh, S. Saha, T. Diulus, J.M. Amador, D.A. Keszler, G.S. Herman, B.L.S. Maddux, S.L. Harper. Environ Toxicol Chem., **38**, 2651 (2019). DOI: 10.1002/etc.4580

[18] А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, А.Е. Пестов, Д.Г. Реунов, Н.И. Чхало. ЖТФ, **94** (7), 1323 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58560.142-24

[19] 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. Салащенко, 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, V.L. Sukhanov, N.I. Chkhalo. Quant. Electron., **42** (10), 943 (2012). DOI: 10.1070/QE2012v042n10ABEH014901]

[20] Д.Г. Волгунов, И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, 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. Klyuyenkov, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, L.A. Suslov, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo. Bull. Russ. Academy Sci.: Phys., **75** (1), 49 (2011). DOI: 10.3103/S1062873811010278]