

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 539.1.043, 539.1.044, 539.1.06, 535-34, 66.08, 537.86.029

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАНАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ОПТИКИ ПОСРЕДСТВОМ ГЛУБОКОЙ ТРАФАРЕТНОЙ РЕНТГЕНОЛИТОГРАФИИ

© А. Н. Генцелев¹, С. Г. Баев²

¹ *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

² *Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*

E-mail: ang1209@mail.ru

Представлены особенности проведения трафаретной (с использованием шаблонов) рентгенолитографии синхротронным излучением (СИ) по тонким (до 50 мкм) и толстым (до 1 мм) слоям рентгенорезистов и примеры её реализации на рентгенолитографических станциях электронного накопителя ВЭПП-3. Приведены расчётные графики спектральной зависимости разрешающей способности рентгенолитографии от величины зазора между рабочими поверхностями рентгеношаблона и обрабатываемой подложки, графики зависимостей интенсивности пучка СИ и поглощаемой плотности мощности от глубины проникновения излучения в резист и аналогичные графики для контраста рентгеношаблонов. Дано описание самонесущих перфорированных (со сквозными отверстиями) металлических рентгеношаблонов, проиллюстрирован СЭМ-фотографиями выход на новый качественный уровень их изготовления из металлической фольги способом лазерной резки излучением с фемто-секундной длительностью импульса, вследствие чего принципиально меняется характер взаимодействия излучения с металлом. Полученные таким образом рентгеношаблоны характеризуются и высоким уровнем контраста, и малыми размерами перемычек, формируемых резкой сетчатых структур. Это позволит с помощью LIGA-технологии получать образцы планарных элементов терагерцовой оптики в виде металлических микроструктур, варьируя размеры ячеек, ширину перемычек структур, их толщину в существенно более широком диапазоне, чем это делалось ранее.

Ключевые слова: рентгеношаблон, LIGA-шаблон, лазерная микрообработка, лазерная резка, LIGA-технология, контраст рентгеношаблона, резистивная маска, аспектное отношение.

DOI: 10.15372/AUT20220212

Введение. В последние десятилетия наблюдается бурный рост производства изделий микросистемной техники (МСТ) и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Их изготовление базируется на использовании литографических способов, обеспечивающих формирование трёхмерных (3D) структур. «Микромашин, механизмы и приборы микросистемной техники по стоимости, надёжности, ресурсу, массогабаритным показателям, энергопотреблению, широте и эффективности применения настолько превосходят традиционные аналоги, что созданная без использования микросистемной техники продукция специального и гражданского назначения в ближайшем будущем может оказаться неконкурентоспособной» [1]. Важной особенностью используемых литографических способов является существенное увеличение аспектного отношения (АО), т. е. отношения толщины формируемой резистивной маски к наименьшему латеральному размеру её топологических элементов, в результате чего «... толщина микромеханических элементов, в отличие

от композиций классической микроэлектроники, может превосходить их латеральные размеры в плоскости ... » [1] в десятки и сотни раз.

Впечатляющие успехи проекционной фотолитографии, позволяющей формировать топологии с размерами элементов ~ 10 нм, возможны лишь при условии использования очень тонких плёнок позитивных резистов. Формирование посредством контактной фотолитографии толстых резистивных масок (~ 1 мм) возможно из негативных резистов с химическим усилением типа SU-8 [2], где описано получение маски толщиной ~ 1 мм с латеральными размерами элементов ~ 40 мкм (АО ~ 25). Уменьшая толщину резиста, можно формировать рельеф с меньшими топологическими размерами, например структуры шириной ~ 5 мкм в резисте толщиной ~ 70 мкм (АО ~ 14) [3].

Толщина резиста и спектр экспонирующего излучения (ЭИ) должны быть согласованы, поскольку облучение толстых резистивных слоёв возможно только слабо поглощающим излучением. Из экспоненциальной зависимости ослабления ЭИ от глубины проникновения в резист L (на которой интенсивность уменьшается в e раз) и при условии, что отношение экспозиционных доз на противоположных поверхностях резистивной плёнки толщиной h должно быть ≤ 5 (данное условие экспериментально подтверждено в [4-6]), следует, что

$$h \leq 1,6L. \tag{1}$$

Из этого условия видно, что при проведении рентгенолитографии по толстым слоям резиста ≈ 1 мм (в виде несенсибилизированных углеводородных полимеров типа полиметилметакрилат — ПММА) в качестве ЭИ необходимо применять сравнительно жёсткое рентгеновское излучение ($\lambda \approx 1 \text{ \AA}$, спектр на рис. 1), а при реализации фотолитографии с использованием негативных резистов типа SU-8 или его аналогов [2, 3] экспонирование требуется проводить излучением видимого диапазона с длиной волны $\lambda \approx 4000 \text{ \AA}$.

Оценка величины пространственного разрешения δ для глубокой контактной фотолитографии при толщине резиста ~ 1 мм и использовании ЭИ с $\lambda \approx 4000 \text{ \AA}$ составит

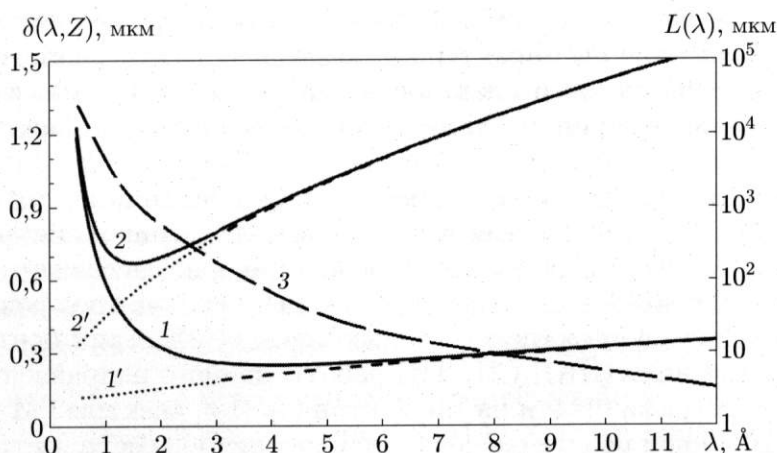


Рис. 1. Графики спектральной зависимости пространственного разрешения $\delta(\lambda, Z)$ при реализации рентгенолитографии, рассчитанные для двух значений зазора, при этом размытие изображения, обусловленное пробегом вторичных электронов $\Delta_e(\lambda)$, оценено по двум различным формулам: с коэффициентом k_1 для $Z = 50$ мкм (1), $Z = 1$ мм (2) и k_2 для $Z = 50$ мкм (1'), $Z = 1$ мм (2'). Также добавлен график спектральной зависимости глубины проникновения излучения $L(\lambda)$ в ПММА (3), шкала справа

$\delta \approx 30$ мкм. Оценка произведена через удвоение размытия изображения края литографической маски в приближении Френеля. Поскольку длина волны используемого для трафаретной рентгенолитографии (далее рентгенолитографии) ЭИ примерно в 1000 раз меньше, то дифракционное размытие края топологического элемента шаблона в этом случае уменьшится в десятки раз по сравнению с контактной фотолитографией. Общая формула для расчёта δ (мкм) следующая:

$$\delta(\lambda, Z) \approx 2(\Delta_{\text{dif}}^2 + \Delta_e^2)^{1/2} = \{2Z\lambda + [k_i/(\rho\lambda)]^2\}^{1/2},$$

где Δ_{dif} — вклад (в мкм), обусловленный дифракцией ЭИ и равный $\Delta_{\text{dif}} \approx (Z\lambda/2)^{1/2}$ (Z — зазор между шаблоном и подложкой, λ и Z измеряются в мкм); $\Delta_e(\lambda)$ — вклад, обусловленный пробегом вторичных электронов; k_i — коэффициент, зависящий от λ и меняющийся в интервале $\sim(3,4-35) \cdot 10^{-6}$ для спектрального диапазона $\lambda \approx (0,5-14) \cdot 10^{-4}$ мкм в зависимости от модели расчёта; ρ — плотность резиста в г/см³. На рис. 1 приведены графики пространственного разрешения для рентгенолитографии, где численные значения k_i взяты из разных источников: $k_1 = 35 \cdot 10^{-6}$ [7] и $k_2 \approx (16,1-3,4) \times 10^{-6}$ ($\lambda \approx 0,5-14 \text{ \AA}$) [8], при этом единицей измерения длины волны на графике является Å , поскольку это более привычно для рентгенолитографии. Значения k_2 вычислены исходя из аппроксимаций, приведённых в работе [9], и их пролонгации в область жёсткого спектра. Правомерность пролонгации на область $\lambda \approx 0,5-3 \text{ \AA}$ находится под вопросом, поскольку в настоящее время нет общепринятой математической модели описания диссипации энергии фотонов ЭИ в углеводородных полимерах в этой области спектра по методике, описанной в [9] (графики на этом интервале выделены пунктиром).

Более высокие потенциальные возможности глубокой рентгенолитографии по сравнению с глубокой контактной фотолитографией, подтверждающие вышеприведённые расчёты, продемонстрированы в [10], где были получены структуры высотой 400–480 мкм с латеральными размерами 4–8 мкм (АО $\sim 60-100$). Таким образом, применяя глубокую рентгенолитографию, можно получать приборы и устройства (МСТ и МЭМС) с новыми свойствами и физическими параметрами: микрофильтры, фильеры для искусственных волокон, планарные псевдометаллические микроструктуры (ПММС) [11, 12] и металлические микроструктуры (ММС) [13] субволновой топологии: фильтры высоких частот, фокусаторы и пр. для управления характеристиками пучков электромагнитного излучения терагерцового и субтерагерцового диапазонов, варьируя форму, размеры ячеек, ширину перемычек структур, их толщину в существенно более широком диапазоне, чем это делалось ранее.

Постановка задачи. В настоящее время в мире практически все исследовательские работы в области рентгенолитографии ведутся с использованием синхротронного излучения (СИ) в силу таких его специфических особенностей, как высокая интенсивность, малая угловая расходимость и возможность подстройки спектра пучка под решаемую технологическую задачу. В центре коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (ЦКП СЦСТИ) работы данного направления проводились на станции рентгенолитографии [14] и на LIGA-станции [15], спектры СИ этих станций приведены на рис. 2. В данной работе расчёты сделаны для полиметилметакрилата (ПММА) и применимы для всех несенсибилизированных резистов на основе углеводородных полимеров.

Анализ графиков показывает, что спектр СИ станции рентгенолитографии сравнительно мягкий и обеспечивает согласно условию (1) без дополнительной фильтрации проведение литографии перфорированными рентгеношаблонами по резисту толщиной ≤ 50 мкм. Спектр LIGA-станции более жёсткий и без дополнительной фильтрации удовлетворяет условию (1) до глубины резиста ~ 550 мкм, а при использовании фильтра в виде фольги из Al толщиной 10 мкм до ~ 1 мм (линия *b* на рис. 2, *b*).

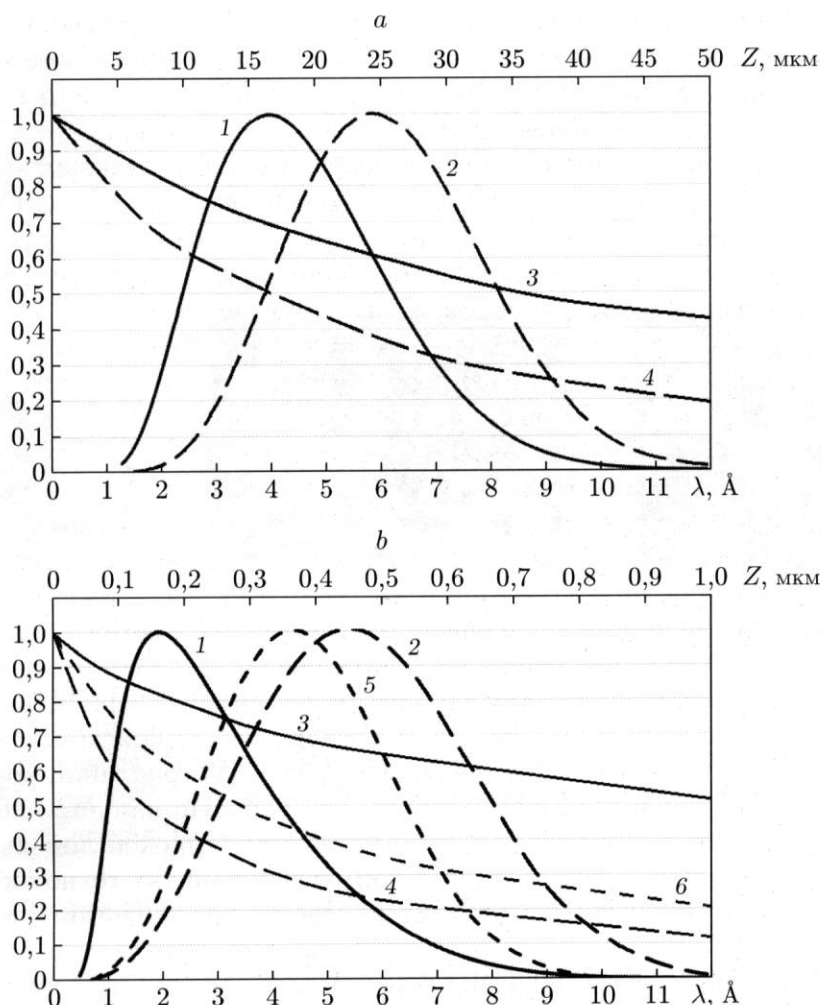


Рис. 2. Зависимости, характеризующие пучки СИ разных станций ЦКП СЦСТИ: для станции рентгенолитографии (а), для LIGA-станции (б). Нормированные на единицу графики: спектральная интенсивность пучка СИ — кривая 1, спектральная плотность поглощаемой мощности в поверхностном слое резиста (при $Z = 0$) — 2, зависимость интегральной интенсивности от глубины Z в резисте — 3, зависимость плотности поглощаемой мощности от глубины — 4 (шкала координаты Z сверху), спектральная зависимость плотности поглощаемой мощности в поверхностном слое резиста — 5 и зависимость интегральной плотности поглощаемой мощности от глубины для потока СИ, прошедшего через алюминиевый (Al) фильтр толщиной 10 мкм — 6

Для изготовления ПММС с применением перфорированного рентгеношаблона необходимо использовать позитивный резист (типа ПММА), в этом случае облучённые участки резиста растворятся и сеточная структура ПММС будет копией топологии рентгеношаблона, а для изготовления ММС, поскольку данная структура формируется посредством гальванопластики, наоборот, нужно использовать негативный резист (типа SU-8), чтобы проводить гальваническое осаждение металла на участки резиста, которые находились «в тени» сеточной структуры рентгеношаблона и были удалены при проявлении резиста. Особенности работы с негативным резистом SU-8 описаны в инструкциях по его использованию в [2, 3] и заключаются в образовании нерастворимой резистивной «корочки» с «пороговой дозой её образования ~ 2 Дж/см³, что составляет ≤ 5 % от типичной дозы

($\sim 40\text{--}100 \text{ Дж/см}^3$) на поверхности резиста» [3]. Это обстоятельство приводит к необходимости использования высококонтрастных фото- и рентгеношаблонов, т. е. интенсивность в первом дифракционном максимуме должна быть $< 5\%$ от падающей интенсивности, из чего следует, что контраст шаблона должен быть > 400 , поскольку из теории дифракции известно, что в области тени интенсивность дифракционных максимумов при использовании ЭИ, близкого к монохроматическому, обратно пропорциональна квадратному корню из контраста шаблона $(C_M)^{-1/2}$ [16] и > 20 в случае, если ЭИ имеет широкий спектральный диапазон. В ряде случаев контраст должен быть ещё выше, если учитывать эмиссию электронов из электропроводящей подложки, на которую нанесён SU-8. Важно иметь в виду, что при фильтрации СИ и в глубине резиста спектр участвующего в экспонировании СИ сужается, спектральный максимум пучка смещается в более жёсткую область и снижается контраст шаблона, поскольку фильтры и резист преимущественно «вырезают» мягкую спектральную составляющую пучка СИ.

Отметим, что срок эксплуатации ПММС ограничен, так как их основой является оргстекло, которое характеризуется «старением» и со временем растрескивается, особенно при интенсивной лучевой нагрузке. В этом отношении ММС характеризуются практически неограниченным сроком эксплуатации и в состоянии выдерживать существенно более интенсивные потоки излучения по сравнению с ПММС. Зависимость спектральных характеристик ПММС и ММС от размеров ячеек приведена в [13], где показана их взаимосвязь с длиной волны излучения, на которую ориентирован прибор. При этом толщина структуры должна быть близка к размеру ячейки, и в этом случае происходит «усиление эффекта волноводной отсечки . . . , который проявляется в резком возрастании крутизны спектральной характеристики вблизи частоты отсечки . . . с экспоненциальным подавлением низких частот» [13]. Таким образом, для обеспечения выпуска широкой линейки ММС толщиной до 1 мм и более необходимо иметь в наличии отработанную технологию, включающую изготовление высококонтрастных рентгеношаблонов в применяемом спектральном диапазоне СИ.

Данная работа посвящена описанию реализованного на практике способа изготовления высококонтрастных самонесущих перфорированных рентгеношаблонов из металлических фольг путём их микрообработки излучением импульсно-периодического лазера (далее — лазерной резки). Достигнутый уровень исследований иллюстрируется СЭМ-фотографиями полученных образцов рентгеношаблонов, а также расчётными графиками их параметров и обоснованием возможности изготовления с их помощью различных приборов микросистемной техники, в частности ММС с гораздо большим, чем ранее, диапазоном варьирования размеров и форм структур, что выразится в расширении диапазона технических параметров этих устройств.

Конструкция рентгеношаблонов и технология их изготовления. В ЦКП СЦСТИ совместно с Институтом автоматики и электрометрии (ИАиЭ СО РАН) и Институтом физики полупроводников (ИФП СО РАН) были освоены три способа изготовления самонесущих рентгеношаблонов: посредством LIGA-технологии [17, 18], плазмохимического травления [8, 13, 19, 20] и лазерной резки [8, 11, 12]. Наиболее простой и наименее трудоёмкий из них — это способ лазерной резки промышленно выпускаемой металлической фольги, содержащий, по сути, две операции: фиксацию фольги в опорном кольце и её лазерную микрообработку.

Первоначально на станции лазерной резки, оснащённой лазером с длительностью импульса ~ 10 нс (табл. 1) изготавливались рентгеношаблоны из латунной фольги с минимальными размерами перемычек сеточных структур ~ 70 мкм и с шероховатостью края реза $\sim \pm 2\text{--}3$ мкм (рис. 3, *a*). В настоящее время осуществлён переход на лазер с длительностью импульса ~ 214 фс, что позволило формировать структуры минимальных размеров (~ 15 мкм) с шероховатостью края ~ 1 мкм (рис. 3, *b*). На рис. 3, *c* приведена

Таблица 1

Основные технические параметры установок лазерной резки

Установка	λ , нм	N , Вт	t , нс	w , кГц	E , мДж	d , мкм	P , МВт/см ²	σ , ГВт/см ²
ЛРС ММ_нс	1064	10	10	10–100	0,23	10	2,6–13	30
ЛРС ММ_фс	1030	1	$214 \cdot 10^{-6}$	100	0,01	10	1,3	~60000

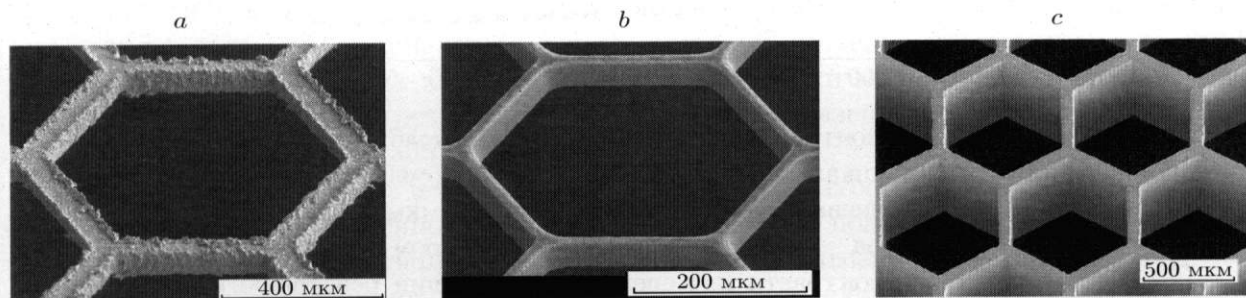


Рис. 3. СЭМ-фотографии фрагментов топологии самонесущих рентгеношаблонов и ПММС: *a* — фрагмент элементарной ячейки шаблона (угол наблюдения 45°), изготовленного из латунной фольги толщиной ~ 50 мкм с помощью лазера с длительностью импульса ~ 10 нс; *b* — из танталовой фольги толщиной ~ 30 мкм с применением лазера с длительностью импульса ~ 214 фс; *c* — фрагмент ПММС (угол наблюдения 15°), изготовленной из оргстекла толщиной ~ 1 мм (реплика с латунного рентгеношаблона, фото фрагмента (*a*))

СЭМ-фотография изготовленного рентгенолитографией образца ПММС (фильтр высоких частот).

Основные параметры станций лазерной резки приведены в табл. 1, где использованы обозначения следующих параметров установок: λ — длина волны лазера, N — средняя мощность лазера, t — длительность импульса, w — частота импульсов, E — энергия в импульсе, d — диаметр перетяжки пучка в фокальной плоскости, P — средняя плотность мощности, σ — средняя плотность мощности в импульсе. Станция, оборудованная лазером с фемтосекундной длительностью импульса, обозначена как ЛРС ММ_фс и имеет полное наименование: «Лазерная рабочая станция для микрообработки материалов на основе фемтосекундного импульсно-периодического лазера Pharos-20-1030» [21]. Она по плотности мощности в импульсе превосходит предыдущий аналог в ~ 2000 раз.

Существенное повышение качества и разрешающей способности микрообработки лазерным излучением (что явно видно при сравнении СЭМ-фотографий на рис. 3, *a*, *b*) происходит благодаря переходу на существенно более короткие импульсы (~ 10 нс на ~ 214 фс), в результате чего принципиальным образом меняется механизм взаимодействия излучения с металлами. Так, при наносекундной длительности импульсов механизм взаимодействия преимущественно тепловой, что по причине высокой теплопроводности металлов приводит к увеличению зоны термического влияния и соответственно к снижению разрешающей способности метода лазерной резки и её качества. Характер взаимодействия излучения с металлами принципиально меняется при уменьшении длительности импульсов до величин ≤ 10 пс. Гравирование и резка металлов происходят в результате их взрывного разрушения или абляции за времена, существенно меньшие времени процессов теплопроводности в них. В таком режиме зона термического влияния практически отсутствует и разрешающая способность определяется размером инструмента, т. е. размером сфокусированного лазерного пучка [22].

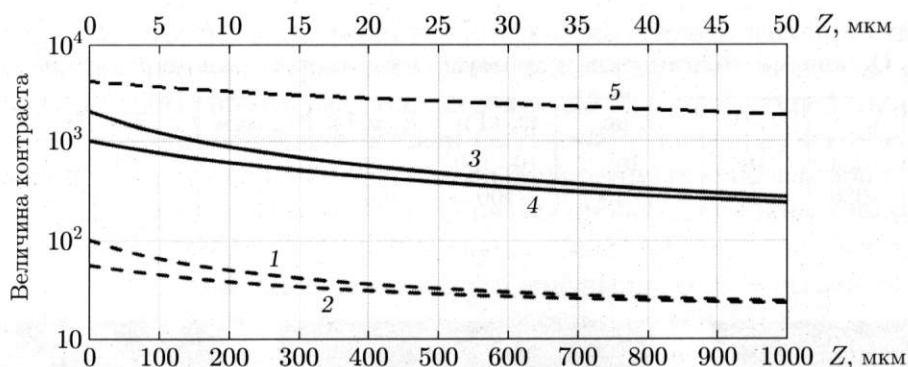


Рис. 4. Зависимость контраста изображения рентгеношаблона от глубины проникновения в резист (шкала снизу): шаблон из латуни (~ 50 мкм) без фильтра — кривая 1 и с алюминиевым фильтром толщиной 10 мкм — 2, шаблон из Та (~ 30 мкм) без фильтра — 3 и с алюминиевым фильтром толщиной 10 мкм — 4. Добавлен график контраста для спектра СИ станции рентгенолитографии (шкала сверху): шаблон из латуни (~ 50 мкм) без фильтра — 5, график контраста шаблона из Та (30 мкм) для этого случая не приведён, его контраст превышает 10^6

На станции ЛРС ММ_{нс} не удавалось найти приемлемый вариант резки фольги из тугоплавкого тантала, но на станции ЛРС ММ_{фс}, где скорость перемещения луча до 1 м/с, такой режим был найден. Микрообработка проводилась в режиме многократного прохода заданного контура. В конкретном случае резки танталовой фольги при формировании сеточной структуры рентгеношаблона (см. рис. 3, *b*) использовался режим перемещения со скоростью $\sim 0,14$ м/с и с 50-кратным прохождением заданного контура, что позволило получить перемычки шириной ~ 15 мкм (т. е. $\sim 1/2$ от толщины фольги) с шероховатостью кромки реза ~ 1 мкм. Если сравнить качество резки, иллюстрируемое СЭМ-фотографией на рис. 3, *a, b*, то прогресс как в уменьшении шероховатости края реза, так и в уменьшении размеров формируемой топологии очевиден, что является результатом перехода на фемтосекундную длительность импульсов лазерного излучения, а по сути является переходом на иной способ микрообработки материалов.

На рис. 4 для спектра СИ LIGA-станции представлены графики контраста изображения рентгеношаблонов (фрагменты топологии (см. рис. 3, *a, b*)) от глубины проникновения в резист. Контраст рассчитан как отношение плотности поглощаемой мощности СИ под рентгенопрозрачным и рентгенонепрозрачным участками. Анализ графиков показывает, что латунные шаблоны могут использоваться для изготовления ПММС или сравнительно тонких ММС ($h < 50$ мкм) на станции рентгенолитографии, поскольку в спектре LIGA-станции их контраст существенно меньше ранее указанного предела, равного ~ 400 , гарантирующего положительный результат. Шаблон из тантала является LIGA-шаблоном, так как значение его контраста ≥ 400 для $h \approx 0-500$ мкм, что гарантированно обеспечивает изготовление ММС $h \leq 500$ мкм и, видимо, более, поскольку расчётная величина контраста на глубине 1 мм равна приблизительно 250, а при экспонировании спектрально-широким пучком СИ LIGA-станции происходит «сглаживание» интерференционных максимумов, вследствие того что фотоны различных длин волн имеют разное угловое распределение при дифракции на краях топологических элементов шаблона.

Заключение. Вышеописанные и реализованные на практике способы изготовления самонесущих перфорированных рентгеношаблонов с минимальными размерами топологических элементов (до ~ 15 мкм) из промышленно выпускаемой танталовой фольги позволяют

существенно увеличить диапазон линейки изготавливаемых посредством глубокой рентгенолитографии приборов, в частности ММС и ПММС, применяемых для управления характеристиками пучков электромагнитного излучения терагерцового и субтерагерцового диапазонов. Данные рентгеношаблоны характеризуются высокими значениями контраста, что обеспечивает их использование в сочетании как с позитивными, так и негативными рентгенорезистами практически во всём применяемом в рентгенолитографии спектральном интервале $\lambda \approx 0,6-14 \text{ \AA}$.

Технологической новизной является переход на резку металлических фольг тугоплавких металлов лазерным излучением с фемтосекундной длительностью импульсов, что, по сути, является переходом на иной способ микрообработки материалов, когда гравировка и резка происходят не в результате расплава и разбрызгивания металла, а путём его взрывного разрушения или абляции.

Способ лазерной резки с использованием мощного фемтосекундного лазера более оперативен и требует существенно меньшей технологической подготовки и меньшего количества операций для его реализации по сравнению с ранее применяемыми способами изготовления перфорированных самонесущих рентгеношаблонов посредством LIGA-технологии и плазмохимического травления.

Благодарность. Авторы выражают благодарность сотруднице Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН Л. А. Ненашевой за проведение плазмохимического травления на оборудовании Института. При изготовлении рентгеношаблонов применялось экспериментальное оборудование ЦКП ИАиЭ СО РАН. При выполнении работы использовалась инфраструктура Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (СЦСТИ) на базе накопительного комплекса ВЭПП-3/ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № АААА-А17-117060810013-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П.** Микросистемная техника. Материалы, технологии, элементная база // Электронные компоненты. 2000. № 4. С. 3–11.
2. **Reznikova E. F., Morh J., Hein H.** Deep photo-lithography characterization of SU-8 resist // *Microsyst. Technol.* 2005. **11**, Iss. 4–5. P. 282–291.
3. **Генцелев А. Н., Дульцев Ф. Н., Кондратьев В. И., Лемзяков А. Г.** Формирование толстых высокоаспектных резистивных масок методом контактной фотолитографии // *Автометрия.* 2018. **54**, № 2. С. 20–29. DOI: 10.15372/AUT20180202.
4. **Malek K., Saile V., Manohara H., Craft B.** Deep X-ray lithography with a tunable wavelength shifter at CAMD // *Journ. Synchrotron Radiat.* 1998. **5**. P. 1095–1098.
5. **Vladimirsky Y., Morris K., Klopff J. M. et al.** X-ray exposure system for induced chemistry and dry processes in microlithography // *Journ. Vac. Sci. Technol.* 1995. **B13**, N 6. P. 3109–3113.
6. **Ehrfeld W., Lehr H.** Deep X-ray lithography for the production of three-dimensional microstructures from metals, polymers and ceramics // *Radiat. Phys. Chem.* 1995. **45**, N 3. P. 349–365.
7. **Feder R., Spiller E., Topalian J.** X-ray lithography // *Polym. Eng. Sci.* 1977. **17**, N 6. P. 385–389.
8. **Генцелев А. Н., Баев С. Г.** Способы изготовления самонесущих рентгеношаблонов // *Прикладная физика.* 2022. № 1. С. 75–82.

9. Мазуренко С. Н., Мануйлов В. В., Матвеев В. М. Моделирование процессов генерации и энергетических потерь фото- и оже-электронов при рентгеновском экспонировании полимерных резистов // Микроэлектроника. 1990. **19**, вып. 3. С. 284–292.
10. Bogdanov A. L., Peredkov S. Use of SU-8 photoresist for very high aspect ratio X-ray lithography // Microelectron. Eng. 2000. **53**. P. 493–496.
11. Кузнецов С. А., Генцелев А. Н., Баев С. Г. Реализация фильтров высоких частот субтерагерцового диапазона с использованием высокоаспектных полимерных структур // Автометрия. 2017. **53**, № 1. С. 107–116. DOI: 10.15372/AUT20170113.
12. Генцелев А. Н., Кузнецов С. А., Гольденберг Б. Г. и др. Создание квазиоптических селективных элементов терагерцового диапазона в виде псевдометаллических структур посредством глубокой рентгеновской литографии // Поверхность: Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2017. № 7. С. 32–42.
13. Генцелев А. Н., Кузнецов С. А., Дульцев Ф. Н. и др. Реализация терагерцовых фильтров высоких частот на основе цельнометаллических микроструктур с использованием глубокой рентгенолитографии // Автометрия. 2019. **55**, № 2. С. 14–27. DOI: 10.15372/AUT20190202.
14. Artamonova L. D., Gentshev A. N., Deis G. A. et al. X-ray lithography at the VEPP-3 storage ring // Rev. Sci. Instrum. 1992. **63**, N 1. Pt 2A. P. 764–766.
15. Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г., Кондратьев В. И. и др. LIGA-станция на накопителе ВЭПП-3 // Поверхность: Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2002. № 9. С. 30–35.
16. Валиев К. А. Физика субмикронной литографии. М.: Наука, 1990. 528 с.
17. Кузнецов С. А., Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г. и др. Создание методами LIGA-технологии микроструктурных фильтров субтерагерцового диапазона и исследование их селективных свойств // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2012. **7**, вып. 4. С. 25–42.
18. Пат. 2421833 RU. Металлическая сеточная структура и способ её изготовления / А. Н. Генцелев, А. Г. Зелинский, В. И. Кондратьев. Опубл. 20.06.2011. БИ № 17.
19. Пат. 2721172 RU. Способ изготовления самонесущего рентгеношаблона / А. Н. Генцелев, Ф. Н. Дульцев. Опубл. 18.05.2020. БИ № 14.
20. Пат. 2759387 RU. Способ изготовления самонесущего рентгеношаблона / А. Н. Генцелев. Опубл. 12.11.2021. БИ № 32.
21. Баев С. Г., Бессмельцев В. П., Булушев Е. Д. и др. Особенности технологии прецизионной фемтосекундной микрообработки оптических материалов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. **5**, № 2. С. 3–8.
22. Kamlage G., Bauer T., Ostendorf A., Chichkov B. Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses // Appl. Phys. A. 2003. **77**, N 2. P. 307–310.

Поступила в редакцию 29.12.2021

После доработки 16.02.2022

Принята к публикации 11.03.2022