

УДК 539.1.043 : 539.1.06

ФОРМИРОВАНИЕ ТОЛСТЫХ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ МАСОК МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ*

А. Н. Генцелев¹, Ф. Н. Дульцев^{2,3}, В. И. Кондратьев¹, А. Г. Лемзяков¹

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

²Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

³Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: A.N.Gentselev@inp.nsk.su

Описан способ формирования толстых (~100 мкм и более) резистивных масок, которые могут быть использованы для решения широкого диапазона технологических задач, например для изготовления рентгенопоглощающего топологического рисунка LIGA-шаблонов, микрорельефов штампов, литевых форм и т. п. Представлены особенности метода контактной фотолиитографии, на основе которого разработана и изготовлена установка. Источником её экспонирующего излучения является светодиод. Экспериментально продемонстрирована возможность получения отдельно стоящих элементов резистивной маски (в частности, с латеральными размерами ~5 мкм и высотой ~70 мкм, аспектное отношение ~14), а также микрорельефа (высотой ~40 мкм) титанового штампа, выполненного путём реактивного ионно-лучевого травления через резистивную маску.

Ключевые слова: глубокая контактная фотолиитография, установка контактной фотолиитографии, резист SU-8, LIGA-шаблон, микрорельеф штампа или литевой формы.

DOI: 10.15372/AUT20180202

Введение. Первым этапом LIGA-технологии является глубокая (глубина от 50 мкм до нескольких миллиметров) теневая трафаретная рентгеновская литография — широко известный способ формирования с высоким разрешением толстых резистивных масок и 3D-структур, основанный на проецировании посредством синхротронного излучения (СИ) изображения LIGA-шаблона в слой рентгенорезиста или рентгеночувствительного материала (оргстекло, лавсан и др.) [1–3]. В связи с появлением негативного высоко разрешающего резиста SU-8 и его аналогов (серии KMPR) продолжились работы по созданию толстых (до 1 мм) резистивных масок с помощью контактной фотолиитографии [4]. Благодаря сочетанию LIGA-технологии и глубокой фотолиитографии появились возможности создания эффективных и менее затратных технологий для решения многих прикладных задач.

В частности, ключевым моментом изготовления LIGA-шаблона является формирование его маскирующего (рентгенопоглощающего) слоя на поверхности рентгенопрозрачной несущей мембраны путём электроосаждения металла через резистивную маску [5–10]. Её толщина задаёт верхний предел толщины маскирующего слоя, а от типа осаждаемого металла и его толщины зависит контрастность LIGA-шаблона.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Новосибирской области (проект № 17-42-540396).

Увеличение глубины проникновения пучка СИ регулируется путём «ужесточения» его спектра, что соответственно требует для сохранения необходимого уровня контрастности шаблона увеличения толщины его маскирующего слоя. Так, для достижения приемлемого уровня контрастности (≥ 100 для работы с негативными резистами) в коротком спектральном диапазоне (3–7 Å) СИ необходимо создание из тяжёлых металлов (типа Ta, W, Pt, Au и др.) маскирующего слоя толщиной $\sim(1,5\text{--}2)$ мкм, а в ультракоротком диапазоне (0,5–3 Å) — около 17–22 мкм и значительно (в 2–3,5 раза) больше при использовании металлов с меньшим атомным весом, таких как Ni, Cu, Ag [6–8]. Суть проблемы в том, что электролиты, содержащие тяжёлые драгоценные (типа Pt, Au) или редкие металлы (Re, Os, Ir), достаточно дороги, а гальванопластика тяжёлых недргоценных металлов (типа Hf, W, Ta и др.) производится из расплавов солей при температурах ≥ 750 °C [11, 12], когда разрушается резистивная маска. В этой связи нами рассматриваются в основном два варианта относительно простых технологий изготовления маскирующих слоёв LIGA-шаблонов: 1) с самонесущим слоем (что возможно для определённых сетчатых топологий), получаемым путём лазерной резки тонкой ($\simeq(20\text{--}50)$ мкм) фольги тяжёлых металлов [13]; 2) с электроосаждённым на несущую мембрану слоем металла Ag или Cu (из водных растворов их солей [6, 8]) через толстую (до 70 мкм) резистивную маску. Известно, что такая маска может быть сформирована посредством трафаретной рентгеновской [3] или рентгенолучевой [14] литографии, однако это достаточно сложные и трудоёмкие технологии.

Освоение метода формирования на больших площадях (диаметром ~ 80 мм) толстой (~ 100 мкм) резистивной маски с литографическим разрешением ~ 5 мкм позволяет решить ещё одну проблему LIGA-технологии, связанную с изготовлением микрорельефа (высотой ~ 50 мкм) штампов и литьевых форм, применяемых для штамповки или отливки деталей из пластмасс, например биочипов. Ранее подобный микрорельеф создавался с помощью глубокой синхротронной рентгенолитографии [15], и применение для этих целей контактной фотолитографии позволяет существенно упростить и удешевить этот процесс.

Цель данной работы — создание установки глубокой контактной фотолитографии и более дешёвого и простого по сравнению с LIGA-технологией способа изготовления LIGA-шаблонов, а также микрорельефов штампов и литьевых форм путём замены операции глубокой рентгенолитографии операцией глубокой контактной фотолитографии.

Описание метода контактной литографии и установки. При проведении контактной фотолитографии важнейшее значение имеют свойства источника экспонирующего излучения (ЭИ): его размеры и излучаемый спектр. На рис. 1 приведены схемы контактной фотолитографии с зазором Z (величина зазора между рабочими поверхностями фотошаблона и подложки не может быть равна нулю, так как в неё входит толщина слоя резиста) с точечным источником (рис. 1, *a*) и с источником конечных размеров (рис. 1, *b*) [1]. В первом варианте конденсорная линза, в фокусе которой находится точечный источник, образует высококоллимированное освещение, обладающее свойствами когерентного освещения. При проведении литографии когерентным излучением в изображении прозрачных окон фотошаблона в рабочей плоскости подложки наблюдаются дифракционные максимумы в распределении освещённости: интенсивность первого и второго побочных максимумов относительно главного составляет $\sim 4,7\%$ и $\sim 1,7\%$ соответственно [1] (рис. 1, *c*). Литографическое разрешение будет определяться дифракционным пределом $\Delta \approx k(\lambda Z)^{1/2}$, где λ — длина волны ЭИ, k — коэффициент, зависящий в том числе и от контрастности используемого резиста.

Степень когерентности освещения шаблона можно уменьшить, увеличивая спектральный диапазон ЭИ и размер области генерации излучения d (т. е. размер «тела свечения»), что приводит к росту углового спектра ЭИ. Такой подход обеспечивает сглаживание осцилляций освещённости, вызванных интерференцией ЭИ, поскольку различные компоненты светового поля создают дифракционные максимумы в различных точках. Однако рас-

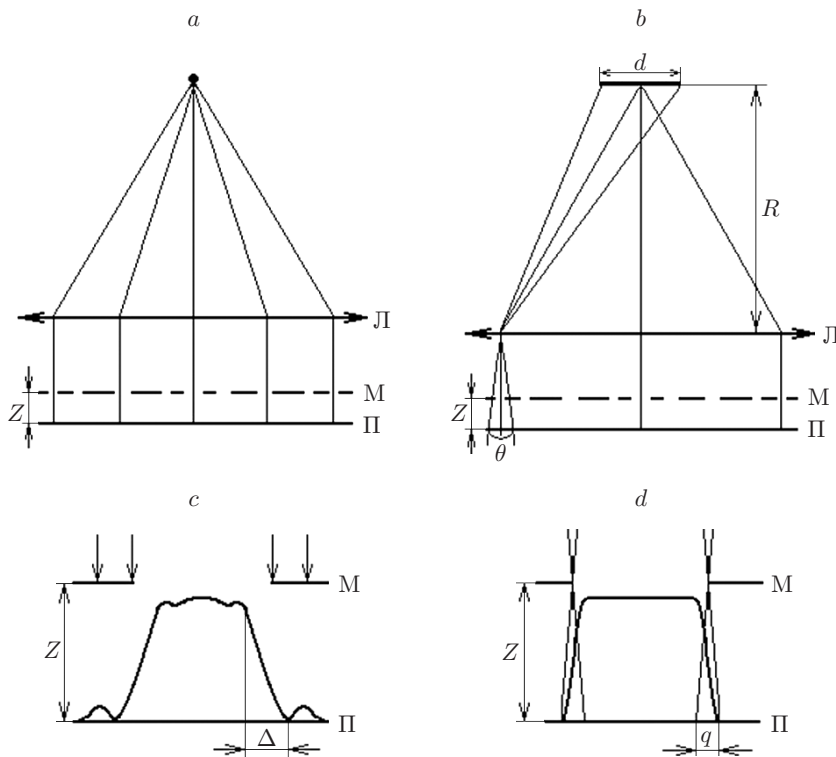


Рис. 1. Схема контактной фотолитографии с зазором: *a* — источник ЭИ имеет точечный размер, *b* — источник ЭИ имеет конечный размер, *c* — распределение освещённости в изображении щели с точечным источником, *d* — образование полутени в системе с источником конечного размера. Обозначения: Л — конденсорная линза, М — литографическая маска (фотошаблон), П — подложка со слоем резиста

ширение углового спектра ЭИ приводит к деградации края изображения щели из-за образования полутени (рис. 1, *d*). Ширина полутени оценивается величиной $q = \theta Z$, где θ — ширина углового спектра ЭИ: $\theta \approx d/F$ (F — фокус линзы).

Длина волны ЭИ должна быть, с одной стороны, как можно короче для улучшения разрешающей способности, а с другой — обеспечивать перепад доз на противоположных поверхностях резистивной маски ≤ 3 . Выбор длины волны проводился нами, исходя из параметров наиболее применяемого для формирования толстых резистивных масок негативного фоторезиста SU-8. Из анализа спектральной зависимости коэффициента поглощения в резисте электромагнитного излучения в диапазоне 200–500 нм следует, что для глубокой ($h \geq 50$ мкм) фотолитографии лучше использовать излучение с $\lambda \geq 350$ нм, при этом верхней границей условно можно считать $\lambda \leq 400$ нм [4]. Наиболее широко применяемыми в фотолитографии источниками излучения в спектральном диапазоне 350–400 нм являлись дуговые газоразрядные ртутные лампы сверхвысокого давления и кварцевые галогенные лампы (хотя анализ спектра излучения последних показывает, что они, равно как и другие источники света с нитями накала, не способны генерировать существенную долю излучения в диапазоне 350–400 нм).

В [4] показано, что невозможно получить качественную толстую ($h \geq 50$ мкм) резистивную маску из SU-8, применяя ртутную лампу в качестве источника ЭИ без использования УФ-фильтра, вырезающего коротковолновую часть (≤ 350 нм) её спектра (в результате практически излучение только одного спектрального максимума с длиной волны $\lambda \sim 365$ нм «задействовано» в создании экспозиционной дозы). Причиной этого является сильное поглощение коротковолнового излучения резистом (глубины проникновения ЭИ в

резист для длин волн в интервалах 270–290 нм и 420–500 нм различаются более чем на четыре порядка [4]), что приводит к значительному превышению дозы на обращённой к источнику ЭИ поверхности резиста. В результате даже незначительные дифракционные потоки ЭИ на периферии формируемой структуры приводят к образованию нерастворимой приповерхностной резистивной «корки». Пороговая доза её образования ~ 2 Дж/см³, что составляет ≤ 5 % от типичной дозы (порядка 40–100 Дж/см³) на поверхности резиста [4].

В свете вышеизложенного явно видны преимущества использования в качестве источников ЭИ промышленно выпускаемых осветительных приборов на основе светоизлучающих диодов, которые представляют собой зафиксированные на едином основании светодиод и формирующую светопоток асферичную линзу. Эти приборы генерируют излучение в очень узком спектральном диапазоне с максимумом в интервале 365–370 нм (наиболее оптимальном для проведения глубокой УФ-литографии в резисте SU-8). Такие приборы (далее светодиоды) широко представлены на рынке, и на их базе спроектированы и изготовлены различные установки контактной литографии, в частности ориентированные на достижение однородной освещённости (~ 20 мВт/см²) рабочего поля в виде квадрата (под стандартные фотошаблоны) путём создания источника из массива 172 плотноупакованных в сотовом порядке на площади 76×76 мм светодиодов $\varnothing 5$ мм [16]. В других установках данная цель достигается с помощью преобразования излучения мощного ($W \approx 150$ Вт) светодиода массивом высококачественных микролинз. Известны установки, ориентированные на создание 3D-структур в толстых (до 300 мкм) слоях резиста [17], содержащие массив из 100 светодиодов, каждый из которых имеет отражатель, обеспечивающий коллимацию ЭИ в заданном направлении.

Далее представим разработанную нами простую компактную настольную установку контактной фотолитографии с вакуумным прижимом (рис. 2), которая имеет два варианта исполнения: вариант 1 — со светодиодом HPL-H44TV1C0-LFVY (компании HPL) и линзой из титанового флинта (с фокусным расстоянием $F \approx 90$ мм); вариант 2 — со светодио-

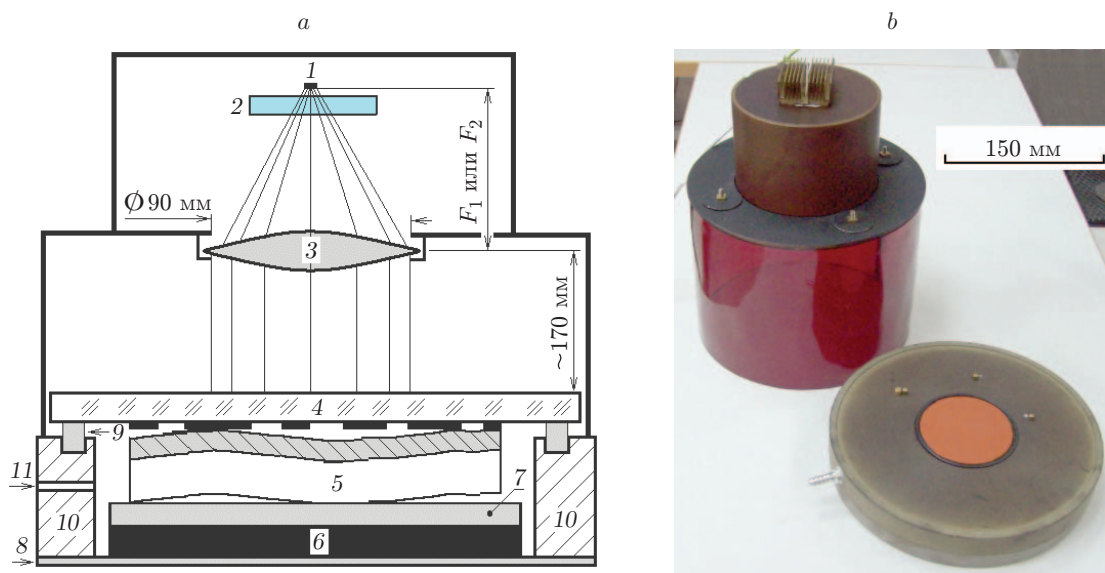


Рис. 2. Установка контактной фотолитографии: *a* — схема основных элементов (1 — светодиод, 2 — светофильтр УФС-5, 3 — линза, 4 — фотошаблон, 5 — подложка с нанесённым резистом, 6 — металлический диск, 7, 8 и 9 — резиновые прокладка, мембрана и уплотнитель, 10 — корпус вакуумного прижима, 11 — газовый канал); *b* — внешний вид У1 (в раскрытом состоянии), боковые стенки установки изготовлены из красного листового органического стекла

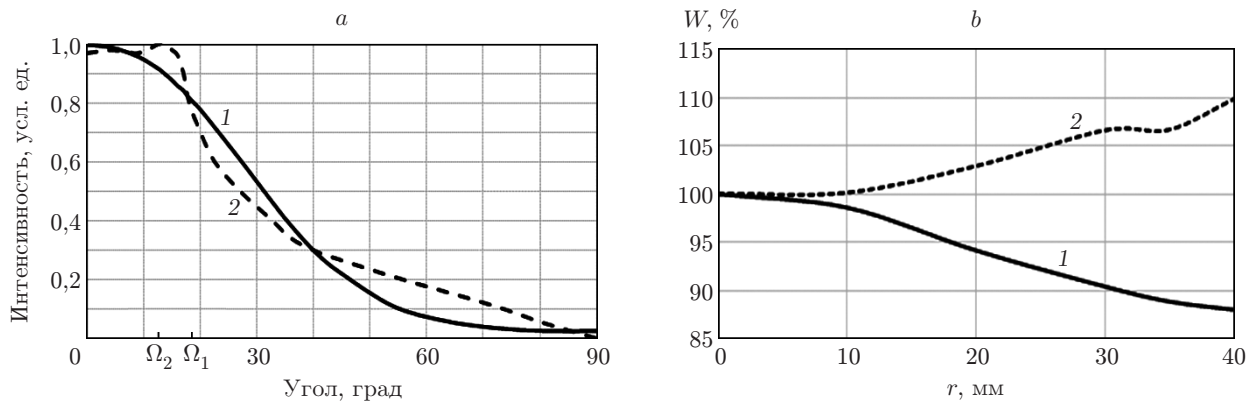


Рис. 3. Диаграммы для У1 (кривые 1) и У2 (кривые 2): а — направленность светопотока от светодиода с асферичной линзой (паспортные данные; Ω — значения апертурного угла раскрытия при вершине конуса, излучение внутри которого используется для освещения рабочего поля); б — усреднённая освещённость рабочего поля (величина освещённости определялась по величине напряжения, создаваемого фотодиодом в фотогальваническом режиме)

дом LEUVA35T01RL00 (компании LG Innotek) и кварцевой линзой ($F \approx 185$ мм) (далее установки 1 и 2 (У1 и У2)).

Светодиоды различаются своими параметрами и диаграммами направленности светопотоков (рис. 3 и табл. 1 и 2). Поскольку мы, как правило, имеем дело с топологиями, характеризующимися круговой симметрией, и рабочими полями сравнительно небольшого диаметра (до 80 мм), то использовалась схема контактной фотолитографии с размещением источника ЭИ в фокусе линзы коллиматора. Схема позволяет получать однородное освещение рабочего поля в виде круга и существенно снижать себестоимость установки по сравнению с аналогами [16, 17], так как требуется один светодиод, а не 100 и более.

Таблица 1

Характеристики источников экспонирующего излучения

Основные характеристики	Лампа ДРШ-500М	Лампа КГМ-12-100	HPL-N44TV1C0-LFVY	LEUVA 35T01RL00
Мощность (потребляемая, номинальная), Вт	500	100	3	2,2
Габаритные размеры прибора, мм	190 × Ø45	44 × Ø10	4,4 × 4,4 × 3,75 ¹	3,4 × 3,4 × 3,34 ¹
Интенсивность излучения (в диапазоне 350–380 нм), Вт/ср	~2,5	~0,01	~0,39 ²	~0,55 ²
Размеры генерирующей области (и диаметр асферичной линзы ³), мм	Ø ~4	~(4 × 2,3)	Ø ~1,3 (Ø4)	Ø ~0,7 (Ø ~3,1)
Усреднённая яркость (в диапазоне 350–380 нм), мВт/(ср · мм ²)	~0,2	~0,001	~0,3	~1,4
Срок службы, ч	8000	85	20000	20000

Примечания: 1 — без учёта системы теплоотвода, 2 — в рабочем угле, 3 — для светодиодов.

Оптимальное значение углового спектра ЭИ можно получить из эмпирической формулы: $\theta_{\text{опт}} = 0,2(\lambda/Z)^{1/2}(1 + 2Z\lambda/\varepsilon^2)$ [18], где ε — минимальный топологический размер. На рис. 4 приведены зависимости оптимального значения углового спектра ЭИ ($\theta_{\text{опт}}$), полутеневого размытия (q) и дифракционного предела (Δ) от величины зазора. Видно, что данная литографическая схема, содержащая светодиод и конденсорную линзу, позволяет путём подбора нужной величины фокуса линзы добиваться оптимальной величины углового спектра ЭИ для формирования резистивных масок с заданными топологическими размерами.

Установка 1 преимущественно ориентирована на формирование резистивных масок толщиной 10–80 мкм с топологическими размерами ~ 5 мкм (рис. 4, а, кривые 3–5). Тре-

Таблица 2

Основные параметры установки в двух вариантах исполнения

Варианты конструкции установки контактной фотолитографии	Вариант 1	Вариант 2
Используемый источник экспонирующего излучения	HPL-H44TV1C0-LFVY	LEUVA 35T01RL00
Материал линзы-коллиматора и её диаметр, мм	титановый флинт, 88	кварц, 88
Тип и радиусы кривизны линзы R_1 и R_2 , мм	выпукло-вогнутая, 51,4 и 77,4	двояковыпуклая, 175,6 и 175,6
Фокусное расстояние линзы-коллиматора, мм	~ 90	~ 185
Диаметр рабочего поля, мм	$\sim 60, \sim 80$	$\sim 60, \sim 80$
Излучение в телесном угле, ср (с углом раскрытия при вершине конуса Ω , град)	$\sim 0,325$ ($\pm 18,5$ для $\varnothing 60$ мм)	0,15 ($\pm 12,5$ для $\varnothing 80$ мм)
Спектральный максимум интенсивности, нм	365–370	~ 365
Спектральная полуширина излучения, нм	~ 15	~ 9
Освещённость рабочего поля в момент включения и в термостабильном состоянии, мВт/см ²	$E_1(0) = 3,7;$ $E_1(\infty) = \sim 3,6$	$E_2(0) = 8,8;$ $E_2(\infty) = \sim 7,5$
Однородность освещённости рабочего поля (диаметром 60 и 80 мм), %	± 5 ± 7	$\pm 2,5$ ± 5
Временная зависимость освещённости (t — время от момента включения, мин)*	$E \approx E_1(0,97 + 0,03 \exp(-t/7))$	$E \approx E_2(0,82 + 0,18 \exp(-t/13))$

*В стандартных условиях чистых помещений и с реализованной системой теплоотвода.

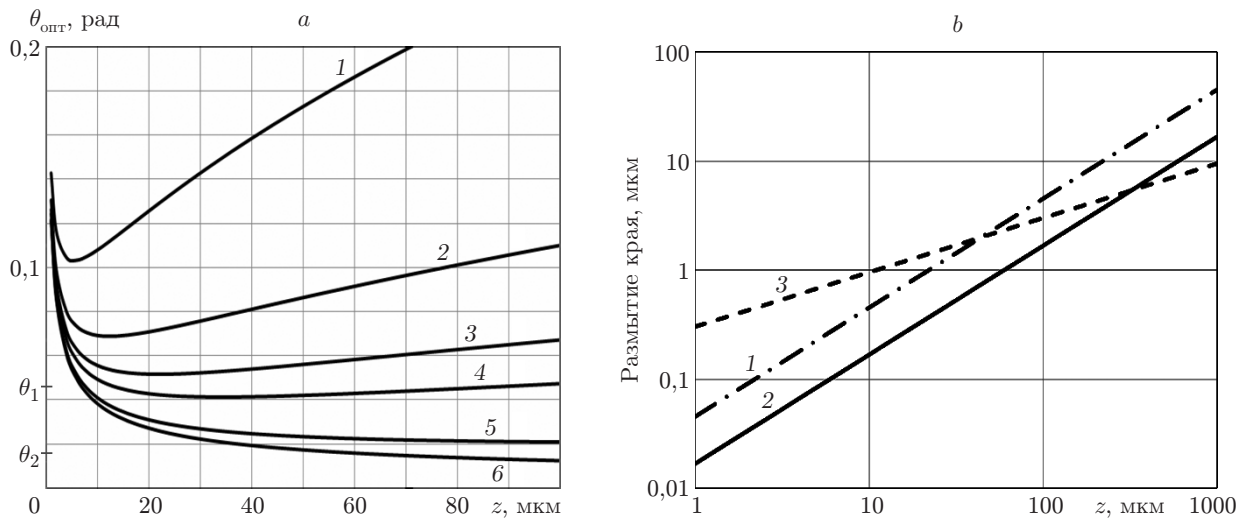


Рис. 4. Расчётная зависимость от зазора Z : a — оптимального значения углового спектра освещения $\theta_{\text{опт}}$ для шести значений ϵ (кривая 1 — 2 мкм, 2 — 3 мкм, 3 — 4 мкм, 4 — 5 мкм, 5 — 10 мкм, 6 — 50 мкм), величина ширины углового спектра ЭИ рассчитана по формуле $\theta \approx d/F$ ($\theta_1 \approx 0,045$ и $\theta_2 \approx 0,017$ для У1 и У2); b — полутеневого размытия q (кривые 1 и 2 для У1 и У2) и дифракционного предела Δ (кривая 3 для справки)

буемая однородность освещения обеспечивается частично поглощающей ЭИ линзой из титанового флинта: для поля $\varnothing 60$ мм используется излучение в диапазоне углов $\pm 18,5^\circ$ (см. рис. 3, a), неоднородность потока должна быть порядка $\pm 10\%$, но благодаря линзе, сильнее поглощающей в центре, неоднородность снижается до уровня приблизительно $\pm 5\%$ (рис. 3, b). Установка 2 (см. рис. 3, 4) ориентирована на формирование топологий размерами ≥ 10 мкм в резистивных слоях от 30 до 400 мкм (для более толстых слоёв следует применять светодиоды с $\lambda \approx 400$ нм), и однородность освещённости в ней на уровне порядка $\pm 5\%$ обеспечивается главным образом параметрами асферической линзы (для поля $\varnothing 80$ мм используется ЭИ в диапазоне углов $\pm 12,5^\circ$).

Временная зависимость потока излучения (а также яркости и освещённости) приведена в табл. 2. Видно, что за типичное время экспозиции ~ 10 мин поток ЭИ в У1 уменьшается незначительно ($\sim 2\%$), а в У2 за этот же промежуток времени падение составляет $\sim 10\%$, что необходимо учитывать при проведении продолжительных экспозиций.

Поскольку всё генерируемое светодиодами излучение сосредоточено в узком спектральном диапазоне ($\sim (365 \pm 15)$ нм), это позволяет проводить экспонирование без дополнительной фильтрации ЭИ и обеспечивает даже при их сравнительно малой мощности (2–3 Вт) и при работе с толстыми резистивными слоями сравнительно малые (≤ 10 мин) времена экспозиции. В установке 1 для отсечки незначительного люминесцентного потока, генерируемого слоями клея, фиксирующего асферическую линзу, используется светофильтр УФС-5. Его применение немного ($\sim 10\%$) снижает поток ЭИ и увеличивает время экспозиции, которое для резиста SU-8 составляет порядка 4–10 мин (в зависимости от толщины слоя).

Экспериментальные результаты. С помощью вышеописанных установок контактной фотолитографии формировались различные резистивные маски из SU-8 (режимы термообработки резиста до и после экспонирования такие же, как и в [4]). На рис. 5 приведены СЭМ-фотографии фрагментов резистивных масок, иллюстрирующие возможности установок. Можно констатировать, что установки в сочетании с данным резистом обеспечивают формирование структур с вертикальными боковыми стенками: с разреше-

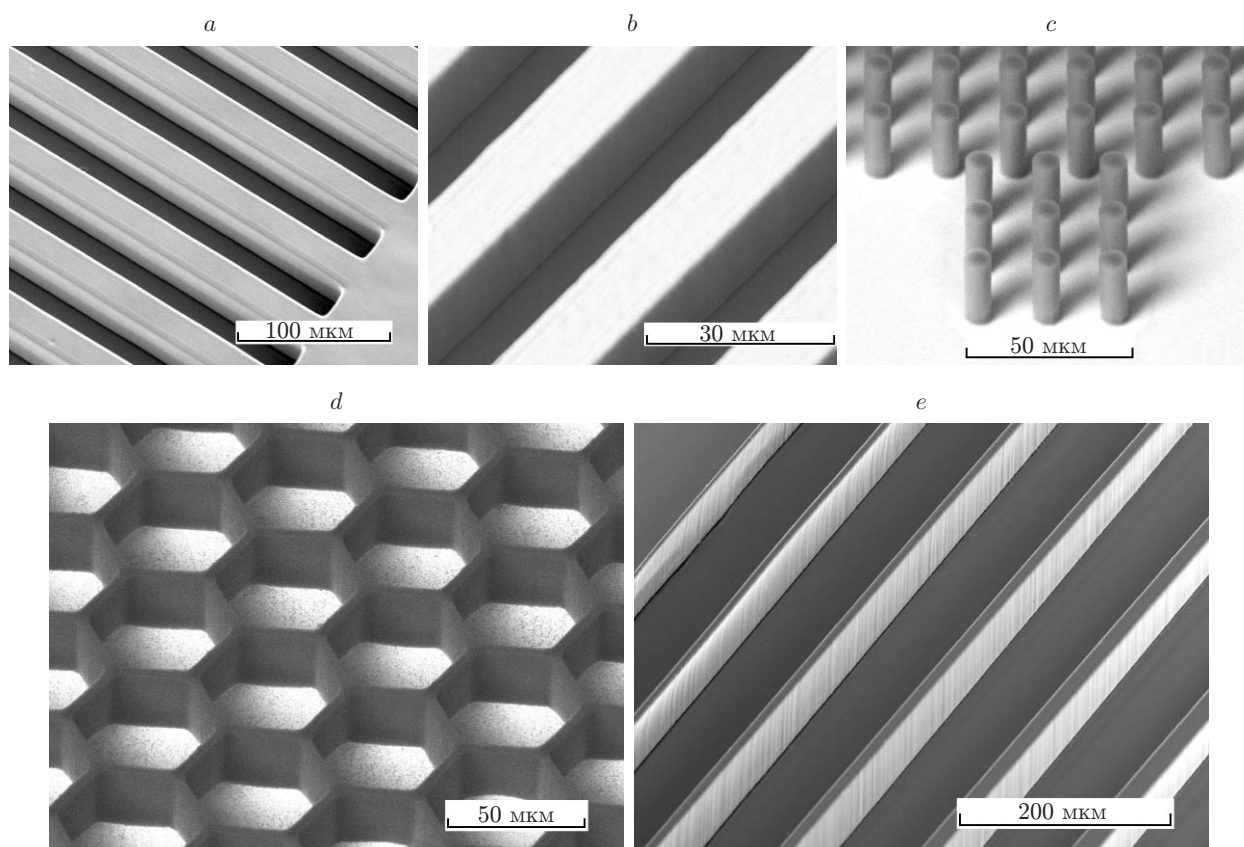


Рис. 5. СЭМ-фотографии фрагментов резистивной маски из SU-8: *a* — мира с шириной линии 25 мкм (толщина резиста ~ 56 мкм, угол наблюдения 20°); *b* — мира с шириной линии 12,5 мкм (толщина резиста ~ 63 мкм, угол 10°); *c* — массив «столбиков» (диаметр ~ 8 мкм, высота ~ 25 мкм, угол 45°); *d* — сотовая структура с шириной стенок ~ 3 мкм (толщина резиста ~ 27 мкм, аспектное отношение ~ 9 , угол 45°); *e* — тестовый набор линий различной ширины, крайняя линия слева имеет ширину ~ 5 мкм (толщина резиста ~ 70 мкм, аспектное отношение ~ 14 , угол 45°)

нием ~ 3 мкм при толщине резистивной маски ~ 27 мкм (рис. 5, *d*); в толстых (толщиной 60–70 мкм) слоях элементы мира с разрешением ~ 12 мкм (рис. 5, *b*); отдельно стоящие элементы с размерами ≥ 5 мкм (рис. 5, *e*).

Реализация контактной фотолитографии с такими параметрами позволит решить широкий круг технологических задач, в том числе изготовления сравнительно недорогих высококонтрастных LIGA-шаблонов путём использования простых и освоенных способов электроосаждения металлов меди (Cu) и серебра (Ag) [6, 8], штампов и литьевых форм, содержащих топологию микрофлюидных систем (биочипов).

На рис. 6 приведены СЭМ-фотографии, подтверждающие, что посредством ионно-лучевого травления через резистивную маску обеспечивается точный перенос топологического рисунка на поверхность металлической подложки, а полученный таким образом рельеф характеризуется вертикальностью боковых стенок. Суть технологии заключается в формировании толстой (~ 100 мкм) резистивной маски на поверхности титановой подложки и проведении однородного травления через маску подложки на глубину ~ 40 мкм. Ионно-лучевое реактивное травление проводилось на установке Plasmalab 80 ионами трихлорида бора (BCl_3) и аргона (Ar) путём многократного (около 70 раз) повторения двух стадий: травления 2,5 мин и охлаждения 3 мин. Рабочая температура столика $\sim 5^\circ\text{C}$.

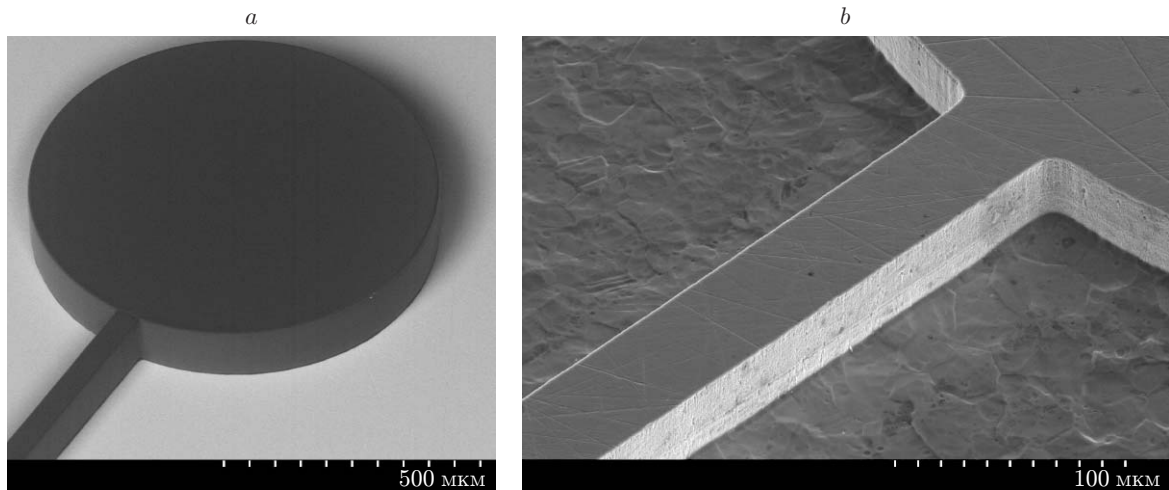


Рис. 6. СЭМ-фотографии топологий на различных этапах изготовления титанового штампа: *a* — фрагмент резистивной маски из SU-8 толщиной ~ 110 мкм; *b* — фрагмент полученного рельефа штампа высотой ~ 40 мкм

Скорости травления резиста и титана приблизительно равны (т. е. исходная толщина резистивной маски должна превышать требуемую высоту рельефа на подложке).

Заключение. Разработана и изготовлена установка контактной фотолитографии, в которой в качестве источников актиничного излучения используются светодиоды с асферичными линзами. На базе данной установки реализована технология формирования на больших площадях (диаметр ~ 80 мм) толстых (≥ 70 мкм) резистивных масок с литографическим разрешением ~ 5 мкм, а с их помощью изготовление сравнительно недорогих высококонтрастных LIGA-шаблонов.

Впервые был изготовлен микрорельеф металлического штампа высотой 40 мкм путём проведения ионно-лучевого реактивного травления через резистивную маску. Данная технология обеспечивает точный перенос топологического рисунка на поверхность металла и получение рельефа заданной высоты с вертикальными боковыми стенками и может быть применена в массовом производстве биочипов.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Сибирского центра синхротронного терагерцового излучения в Институте ядерной физики СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валиев К. А.** Физика субмикронной литографии. М.: Наука, 1990. 528 с.
2. **Моро У.** Микролитография. М.: Мир, 1990. Ч. 1. 605 с.
3. **Ли С. Б.** Обзор публикаций по LIGA процессу. Новосибирск, 1990. 27 с. (Препр. /ИЯФ СО АН СССР; 90-125).
4. **Reznikova E. F., Morh J., Hein H.** Deep photo-lithography characterization of SU-8 resist layers // *Microsystem Technol.* 2005. **11**, Is. 4–5. P. 282–291.
5. **Бобровникова О. Н., Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г. и др.** Формирование и исследование толстых резистивных слоев ПММА для LIGA-технологии // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2005. № 9. С. 38–43.
6. **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.

7. **Абрамский А. Ю., Гольденберг Б. Г., Зелинский А. Г. и др.** Разработка химико-гальванических процессов для литографического производства трёхмерных микроструктур // Гальванотехника и обработка поверхности. 2010. **18**, № 2. С. 11–18.
8. **Генцелев А. Н., Голубцов С. К., Гольденберг Б. Г. и др.** Использование графитовой фольги в качестве несущей мембраны LIGA-шаблонов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 8. С. 19–24.
9. **Генцелев А. Н., Зелинский А. Г., Кондратьев В. И.** Шаблоны для глубокой рентгенолитографии // Науч. вестн. НГТУ. 2014. **54**, № 1. С. 78–87.
10. **Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г., Зелинский А. Г., Лемзяков А. Г.** Бериллиевые рентгенолитографические шаблоны // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 1. С. 58–67.
11. **Stern K. N., Stenly T., Gadomsky S. T.** Electrodeposition of tungsten powders from mineral-salt electrolyte // Journ. Electrochem. Soc. 1983. **130**, N 2. P. 300–305.
12. **Константинов В. И.** Электролитическое получение тантала, ниобия и их сплавов. М.: Металлургия, 1977. 240 с.
13. **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.
14. **Гольденберг Б. Г., Резникова Е. Ф., Лемзяков А. Г., Пиндюрин В. Ф.** Микропучковый рентгенолитограф для прямого формирования глубоких LIGA-структур // Автометрия. 2013. **49**, № 1. С. 96–102.
15. **Гольденберг Б. Г., Горячковская Т. Н., Елисеев В. С. и др.** Изготовление LIGA-шаблонов для создания микрофлюидных аналитических систем // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008. № 8. С. 61–64.
16. **Yapici M. K., Farhat I.** UV-LED exposure system for low-cost photolithography // Proc. SPIE. 2014. **9052**. 90521T.
17. **Kim J., Paik S.-J., Herrault F., Allen M. G.** UV-LED lithography for 3-D high aspect ratio microstructure patterning // Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop. Hilton Head Island, USA, June 3–7, 2012. P. 481–484.
18. **Березин Г. Н., Никитин А. В., Сурис Р. А.** Оптические основы контактной фотолитографии. М.: Радио и связь, 1982. 104 с.

Поступила в редакцию 19 декабря 2016 г.
