

УДК 539.1.044, 535-34, 66.08

## МИКРОПУЧКОВЫЙ РЕНТГЕНОЛИТОГРАФ ДЛЯ ПРЯМОГО ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ LIGA-СТРУКТУР\*

Б. Г. Гольденберг, Е. Ф. Резникова, А. Г. Лемзяков, В. Ф. Пиндюрин

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11  
E-mail: goldenberg@inp.nsk.su*

На станции LIGA на накопителе ВЭПП-3 Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения реализован режим работы микропучкового рентгенолитографа — нового устройства для прямого формирования микроструктур в толстых слоях рентгенорезистов, в том числе для изготовления рентгеношаблонов. С использованием специального программного обеспечения коллимированным пучком синхротронного излучения при перемещении подложки векторным образом непосредственно в слое негативного резиста SU-8 толщиной до 1 мм формируется рисунок микроструктуры с произвольно заданной топологией. Представлено описание устройства установки, её технологические возможности и ограничения. Приведены примеры изготовленных микроструктур с высоким аспектным отношением и рентгеношаблонов.

*Ключевые слова:* синхротронное излучение, рентгенолитография, LIGA-технология.

**Введение.** Для решения задач создания устройств микросистемной техники актуально развитие методов изготовления глубоких микроструктур. Рентгеновская литография как метод изготовления микроструктур имеет ряд существенных преимуществ перед другими методами, такими как фотолитография или реактивное ионное травление. Прежде всего, это возможность формирования глубоких микроструктур с гладкими отвесными стенками.

Скрытое изображение структур формируется в слое рентгенорезиста в процессе облучения через рентгеношаблон с заданной топологией поглотителя. Рентгеношаблон является ключевым элементом рентгенолитографического процесса, рентгеновский контраст которого определяет качество создаваемых микроструктур. Для изготовления контрастных рентгеношаблонов с высокой точностью топологического дизайна в Институте микроструктурной техники (ИМТ/КИТ, г. Карлсруэ, Германия) используется многоэтапная и трудоёмкая технология [1]. В начале с помощью электронной литографии в слое полиметилметакрилата (ПММА) толщиной около 2 мкм и последующей гальваноластики золота создаётся промежуточный рентгеношаблон, контраст которого позволяет проводить рентгенолитографию в мягком спектре синхротронного излучения (СИ). Затем изготавливается рабочий рентгеношаблон с применением промежуточного рентгеношаблона. Таким образом, созданная методом электронной литографии топология воспроизводится в толстом слое ПММА, а гальванические микроструктуры поглотителя рабочего рентгеношаблона обеспечивают контраст, достаточный для репликации топологии в жёстком спектре СИ.

\*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, Сибирского и Дальневосточного отделений РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 92) с использованием оборудования центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения».

Цель данной работы состояла в модернизации аппаратуры и программного обеспечения станции LIGA на нулевом канале вывода синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 [2] для реализации метода прямого формирования диафрагмированным пучком СИ высокоаспектных структур с микронными размерами элементов и с произвольно заданной топологией.

**Описание принципа микропучкового рентгенолитографа.** На станции рентгеновской литографии накопителя ВЭПП-3 спектральная интенсивность СИ определяется энергией электронов в накопителе и установленными в канале бериллиевыми фольгами толщиной 500 мкм. Эксперименты проводятся в штатном режиме работы накопителя: энергия электронов 2 ГэВ, магнитное поле в точке излучения 2 Тл, ток в накопителе 50–150 мА. Основная мощность СИ, поглощаемого облучаемыми резистами, приходится на спектральный диапазон длин волн 1–3 Å. Такое жёсткое рентгеновское излучение характеризуется глубоким проникновением в полимеры и минимальным дифракционным рассеянием. На рис. 1 представлены оценки отклонения размеров воспроизводимых в литографическом процессе структур, вызванного дифракцией и рассеянием вторичных электронов. Здесь  $\sigma_{\text{dif}} \approx (\lambda z)^{1/2}$  — величина дифракционного отклонения ( $\lambda$  — длина волны излучения,  $z$  — зазор в микрометрах),  $\sigma_e \approx 1,212(1/\lambda)^{2,12}$  — радиус области рассеяния вторичных электронов в микрометрах [3],  $\sigma \approx (\sigma_e^2 + \sigma_{\text{dif}}^2)^{1/2}$  — общее отклонение размеров в микрометрах. Как видно, в режиме глубокой рентгенолитографии при длине волны экспонирующего излучения 1–3 Å вторичные электроны существенно ограничивают возможности изготовления субмикронных структур. С другой стороны, малое дифракционное расхождение излучения позволяет экспонировать слои резиста толщиной до нескольких миллиметров или размещать рентгеношаблон и резист с зазором в несколько миллиметров при воспроизведении микроструктур с микронными размерами элементов. Рис. 2 иллюстрирует ослабление экспозиционной дозы вдоль оси вглубь резиста ПММА [4].

При величине зазора около 5 мм между рентгеношаблоном и подложкой конструированные держатели для независимого их перемещения относительно друг друга с субмикронной точностью не является принципиально сложной технической задачей. Такие держате-

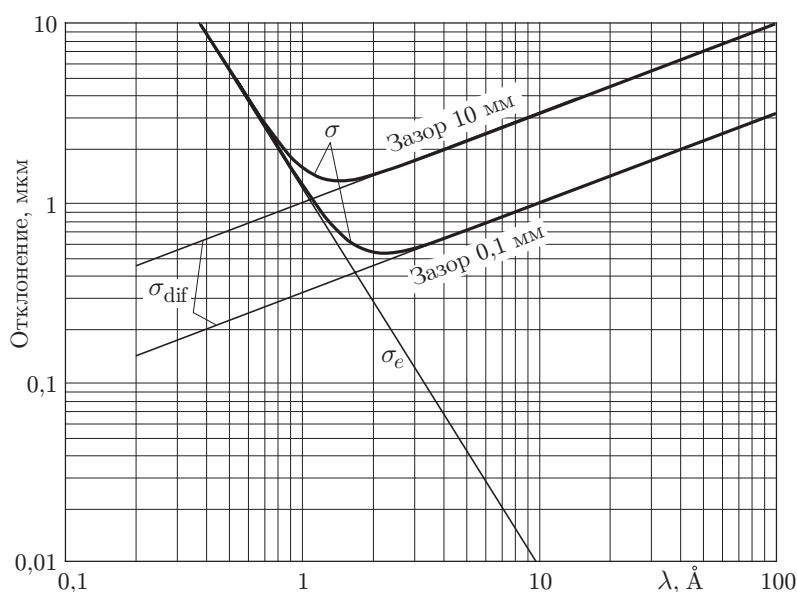


Рис. 1. Отклонение размера рентгенолитографических микроструктур, определяемое сочетанием дифракции и пробега вторичных электронов, в зависимости от длины волны рентгеновского излучения

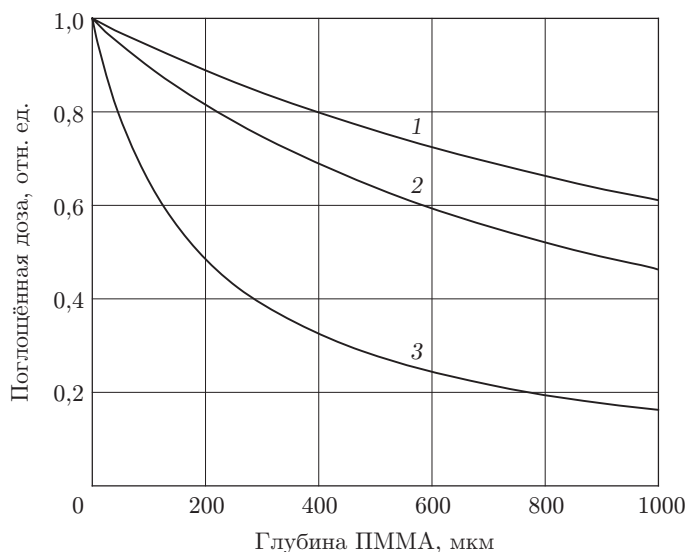


Рис. 2. Распределение по глубине резиста ПММА поглощённой мощности СИ, нормированное на поглощённую на поверхности дозу, при облучении на станции LIGA (кривая 1 — через фильтры из 500 мкм бериллия; 2 — через 500 мкм бериллия и подложку рентгеношаблона из 500 мкм стеклоуглерода и 30 мкм резиста SU-8; 3 — через 500 мкм бериллия, подложку рентгеношаблона из 500 мкм стеклоуглерода и 30 мкм резиста SU-8 и через фильтр из 50 мкм алюминия)

ли изготовлены для реализации нового метода прямого формирования глубоких микро-структур с помощью коллимированного микропучка СИ. Метод основан на векторном рисовании топологии непосредственно в толстом слое рентгенорезиста без использования рентгеношаблонов, как представлено на рис. 3. В данной работе для формирования микропучка применялась диафрагма в слое гальванического золота, поглощающего СИ, созданная по технологии изготовления рентгеношаблонов. Такая диафрагма устанавливается в центральной части падающего потока СИ. Форма отверстия определяет геометрическое сечение микропучка. Подложка с резистом перемещается посредством управляемого от ЭВМ координатного позиционера. Экспозиционная доза, получаемая участками резиста при прохождении под пучком СИ, пропорциональна времени облучения  $\tau = \Delta/u$ , где  $\Delta$  — размер диафрагмы,  $u$  — скорость движения подложки. Таким образом, программно варьируя

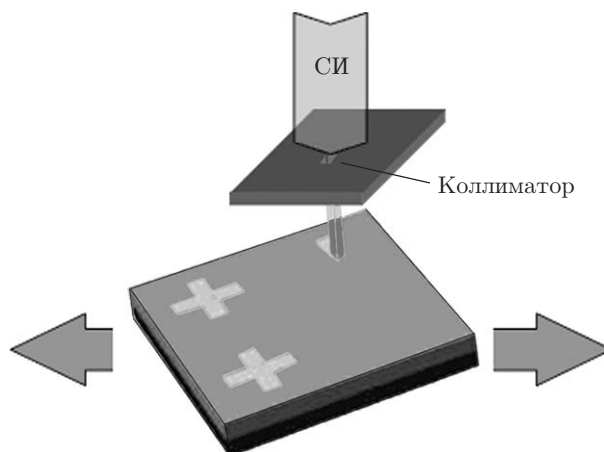


Рис. 3. Схема работы микропучкового рентгенолитографа

скорость движения подложки с резистом, можно регулировать локальную экспозиционную дозу.

**Реализация микропучкового рентгенолитографа на накопителе ВЭПП-3.** На нулевом канале вывода СИ из накопителя ВЭПП-3 функционирует станция глубокой рентгенолитографии LIGA [2, 4]. Экспериментальный объём станции оснащён двумя независимыми автоматизированными трёхкоординатными позиционерами с точностью перемещения 0,1 мкм. Первый позиционер предназначен для размещения в пучке СИ рентгеновской диафрагмы, а второй — для перемещения подложки с нанесённым резистом относительно микронного пучка СИ, сформированного с помощью диафрагмы. Рентгеновская диафрагма изготовлена по той же технологии, что и рентгеношаблоны [4]: апертура  $53 \times 63$  мкм, поглощающий слой золота толщиной 20 мкм на подложке из стеклоуглерода толщиной 500 мкм. Как известно [3, 5–7], для формирования структуры в высокочувствительном резисте SU-8 необходима доза поглощённого излучения 10–40 Дж/см<sup>3</sup>. Соответствующую этой дозе скорость перемещения резиста относительно микропучка рассчитывали для стандартного режима работы накопителя ВЭПП-3 (энергия электронов 2 ГэВ, магнитное поле в точке излучения 20 кГс, ток электронов 100 мА). При указанных выше размерах диафрагмы диапазон скоростей 15–50 мкм/с является оптимальным для перемещений резиста относительно микропучка СИ. Для формирования топологии в резисте SU-8 используются две скорости перемещения подложки с резистом. При скорости 20 мкм/с доза локального облучения слоя SU-8 составляет 29,6 Дж/см<sup>3</sup>, а при перемещении со скоростью 20 мм/с доза поглощённого излучения в тысячу раз меньше, что недостаточно для инициализации процессов полимеризации в резисте SU-8. В результате участки резиста, облучённые при малой скорости движения подложки, станут нерастворимыми, тогда как остальной резист будет удалён в процессе проявления. Установленный в канале вывода синхротронного излучения радиационный затвор имеет скорость открытия/закрытия порядка 2 с и не предназначен для оперативного перекрывания пучка СИ в процессе рисования микроструктур. В течение всего времени экспонирования радиационный затвор открыт, а контроль поглощённой в резисте дозы обеспечивается управлением скоростью перемещения резиста относительно пучка СИ.

Разработано специальное программное обеспечение для прецизионного перемещения подложки с контролем набора дозы. Реализована возможность формирования непрерывных ломаных линий из отрезков прямых. Формирование произвольно заданной топологии структуры осуществляется векторным способом.

**Эксперименты по формированию микроструктур.** Работоспособность микропучкового рентгенолитографа была проверена при рисовании тестовых микроструктур в виде набора уголков. Вариация скорости перемещения подложек в диапазоне от 50 до 500 мкм/с позволила выявить оптимальную величину. После проявления структуры, сформированные при скоростях более 100 мкм/с, имели неудовлетворительное качество в результате недостаточного экспонирования резиста. На рис. 4 приведено сравнение фрагментов структур, полученных при скорости рисования 500 мкм/с (слева) и 50 мкм/с (справа). Для структуры слева доза облучения была меньше порогового значения, поэтому полученная после полимеризации резиста структура не соответствует форме и объёму облучённой области. Для практических работ была выбрана максимальная скорость, при которой качество структур соответствует предполагаемому дизайну, а именно 50 мкм/с при токе в накопителе 100 мА. Использование меньших скоростей нецелесообразно из-за увеличения общего времени процесса рисования. Величина тока в накопителе в процессе эксперимента не постоянна, а изменяется в диапазоне от 150 до 50 мА. Вследствие рассеяния электронов на остаточном газе в накопителе за время работы величина тока уменьшается, и для компенсации этого скорость перемещения подложки программно корректируется пропорционально току.

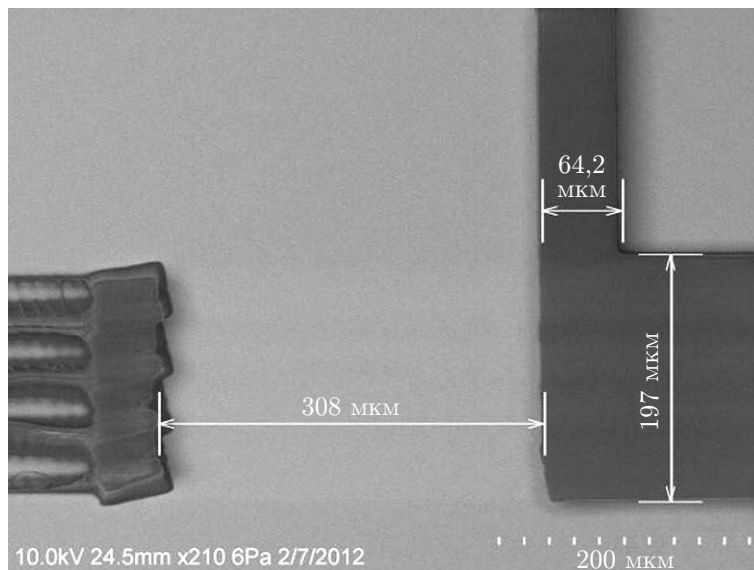


Рис. 4. Сравнение микроструктур, полученных при различных скоростях формирования рисунка

Представленный на рис. 5 фрагмент микроструктуры из резиста SU-8 толщиной 63 мкм на стеклоуглеродной подложке иллюстрирует возможность получения микроструктур с гладкими вертикальными стенками. Прямой угол пересечения линий чётко сформирован по всей глубине, что не достижимо методами фотолитографии на слоях толщиной в несколько десятков микрон. Данный образец является заготовкой рентгеношаблона для последующего изготовления рентгенолитографическим методом микрофлюидных модулей из ПММА. Структура из резиста SU-8 служит маской при гальваническом осаждении на стеклоуглеродную подложку слоя золота толщиной 20 мкм для получения поглощающего рентгеновское излучение контрастного покрытия.

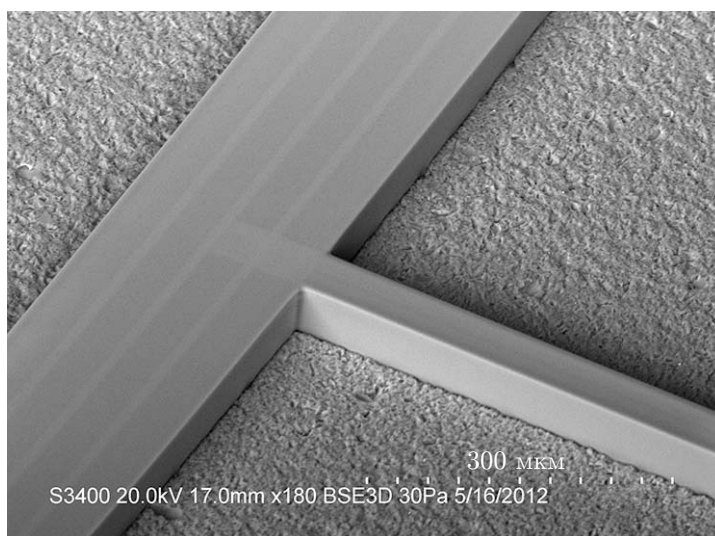


Рис. 5. Фрагмент микроструктуры заготовки рентгеношаблона, сформированной из резиста SU-8

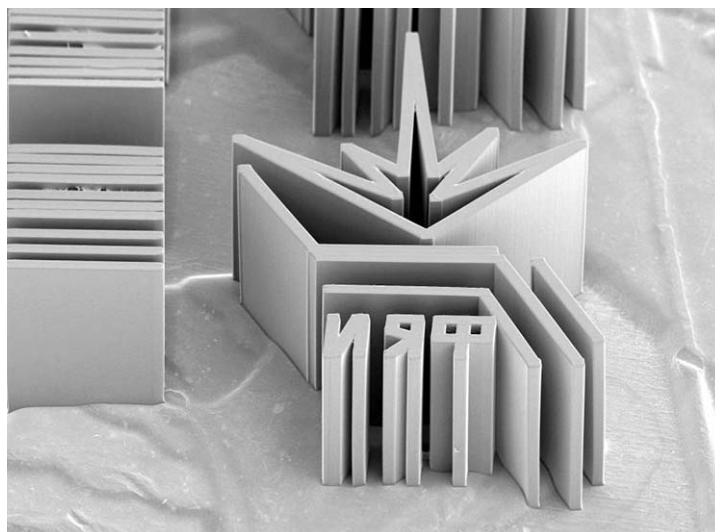


Рис. 6. Микроструктура из резиста SU-8

Рис. 6 иллюстрирует возможность прямого формирования микроструктур с произвольной топологией и с вертикальными гладкими стенками в очень глубоких резистивных слоях. В слое SU-8 толщиной 740 мкм с помощью микропучка СИ нарисован логотип Института ядерной физики СО РАН. Скорость рисования 20 мкм/с, ширина линий рисунка 53 мкм, металлическая подложка — монета.

Оборудование станции LIGA позволяет создавать микроструктуры площадью до  $10 \times 10$  см. Это ограничение задаётся диапазоном перемещения координатных позиционеров. Нужно учитывать, что длительность процесса формирования структуры складывается из времени, необходимого для прохождения полной длины всех элементов рисунка со скоростью 20–50 мкм/с. К примеру, время формирования логотипа (см. рис. 6) составляет около 10 мин при токе в накопителе 100 мА. В настоящее время минимальный размер элементов определяется используемой рентгеновской диафрагмой размера  $53 \times 63$  мкм. В последующей модернизации рентгенолитографа будет изготовлен набор сменных микродиафрагм для регулирования размера пучка в диапазоне от 10 до 100 мкм в процессе рисования, что позволит расширить и оптимизировать возможности быстрого формирования структур. Следует также отметить перспективность применения ахроматических рентгеновских преломляющих или отражающих линз [7] в оптической системе рентгенолитографа для микро- и нанофокусировки пучка СИ. Многократное увеличение мощности рентгеновского излучения в фокусе позволит существенно увеличить скорость перемещения зоны облучения и, таким образом, сделает технологию прямого рисования субмикронных и наноструктур с высоким аспектным отношением приемлемой для практического применения.

**Заключение.** В Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения изготовлен и протестирован микропучковый рентгенолитограф, предназначенный для формирования глубоких микроструктур с гладкими вертикальными стенками и произвольно заданной топологией. С использованием микропучкового рентгенолитографа появилась возможность гибкого производства рентгеношаблонов для глубокой рентгеновской литографии с различными экспериментальными топологиями — микрофлюидные модули, сеточные элементы для фильтрации терагерцового излучения и т. п. Изготовлены образцы глубоких микроструктур из негативного резиста SU-8 и рентгеношаблоны с поглощающим слоем золота 20 мкм для глубокой рентгенолитографии в спектральном диапазоне синхротронного излучения 1–3Å.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Advanced** Micro and Nanosystems. Vol. 7. LIGA and its Applications /Eds. V. Saile, U. Wallrabe, O. Tabata, J. G. Korvink. Weinheim: John Wiley & Sons, 2009. 504 p.
2. **Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г., Кондратьев В. И. и др.** LIGA-станция на накопителе ВЭПП-3 // Поверхность. 2002. № 9. С. 30–35.
3. **Reznikova E., Mohr J., Boerner M. et al.** Soft X-ray lithography of high aspect ratio SU8 submicron structures // Microsyst. Technol. 2008. **14**, Is. 9–11. P. 1683–1688.
4. **Гольденберг Б. Г.** Создание LIGA-технологического комплекса на источнике синхротронного излучения ВЭПП-3: Дис. ... канд. техн. наук /ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 2011. 146 с.
5. **Гольденберг Б. Г., Абрамский А. Ю., Зелинский А. Г. и др.** Особенности изготовления шаблонов для глубокой рентгеновской технологии в Сибирском центре синхротронного и терагерцевого излучения // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 2. С. 61–68.
6. **Lorenz H., Despont M., Fahrni N. et al.** SU-8: A low-cost negative resist for MEMS // Journ. Micromech. Microeng. 1997. **7**, N 3. P. 121–124.
7. **Reznikova E., Weitkamp T., Nazmov V. et al.** Transmission hard X-ray microscope with increased view field using planar refractive objectives and condensers made of SU-8 polymer // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2009. **186**, N 1. 012070.

*Поступила в редакцию 6 июня 2012 г.*

---