

На правах рукописи

ГОЛЬДЕНБЕРГ Борис Григорьевич

**СОЗДАНИЕ LIGA-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА НА ИСТОЧНИКЕ
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЭПП-3**

**01.04.01 - приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

НОВОСИБИРСК – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

КУЛИПАНОВ
Геннадий Николаевич – доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

МИТРОФАНОВ
Александр Викторович – кандидат физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Физический институт имени П.Н.Лебедева
РАН, г. Москва.

ЧЕСНОКОВ
Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор,
Сибирская государственная геодезическая
академия, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Курчатовский центр синхротронного
излучения и нанотехнологий РНЦ
«Курчатовский институт», г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2011 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Синхротронное излучение (СИ) – электромагнитное излучение, испускаемое заряженными частицами, движущимися с релятивистскими скоростями по искривленному в магнитном поле траекториям. Большое практическое значение определяется уникальными свойствами синхротронного излучения: непрерывный спектр от инфракрасного до рентгеновского, малая угловая расходимость, высокая интенсивность, большая глубина проникновения в материалы, возможность вычисления параметров их облучения.

Благодаря своим свойствам СИ является идеальным инструментом для реализации рентгенолитографического способа изготовления микроструктур. Синхротронное излучение, проникающее с минимальным расхождением в полимерные материалы на глубину в несколько миллиметров позволяет формировать высокоаспектные микроструктуры недоступные для методов оптической литографии. В 1980-х годах в Институте микроструктур (ИМТ/КИТ, г. Карлсруе, Германия) была разработана технология изготовления микроструктур посредством последовательного применения глубокой рентгенолитографии на СИ, микрогальваноластики и формовки, названная LIGA-технология (акроним немецких слов *Lithografie, Galvanik, Abformung*). LIGA по точности и пространственному разрешению, аспектному отношению, вертикальности и малой шероховатости боковых стенок превышает возможности любых других технологий микроструктурирования при изготовлении изделий из металла, пластика или керамики.

В настоящее время разработка технологий микроструктурирования поверхности с использованием излучения является одним из приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований. Конечным продуктом новых технологий является элементная база для микромеханики, оптической промышленности, биологии и медицины. Наиболее характерными и востребованными являются: дифракционные-рефракционные объективы и интраокулярные линзы, растры микролинз и микропризм, металлические сеточные структуры – селективные спектральные элементы для излучения инфракрасного и терагерцового диапазона, микроканальные модули для микрофлюидных систем и т.п.

Важным элементом технологического процесса LIGA является глубокая рентгеновская литография. Для ее реализации необходимо создать специализированную станцию на канале вывода синхротронного излучения для облучения образцов и комплекс вспомогательного оборудования для их обработки. Ключевым элементом глубокой рентгенолитографии являются рентгеновские шаблоны. В Научно-исследовательском институте полупроводниковых приборов, г. Томск, ведутся разработки по изготовлению рентгеношаблонов для субмикронной литографии в «мягком»

спектре СИ. Компании, производящие рентгеношаблоны для глубокой рентгеновской литографии в РФ отсутствуют. Такое производство планировалось в Зеленограде для обеспечения нужд рентгенолитографии на Технологическом накопительном комплексе в НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина. Но по экономическим причинам не было реализовано. Немецкие (ИМТ/КИТ, Карлсруэ) шаблоны большой площади стоят 10 – 20 тысяч евро каждый, при потребности несколько десятков в год.

Таким образом, разработка метода LIGA-изготовления микроструктур и микроизделий, включая создание экспериментального оборудования, разработку и адаптацию технологии и техники LIGA-процессов, в том числе, создание рентгеношаблонов для глубокой рентгенолитографии, определяет актуальность настоящей диссертационной работы.

Цель работы

Разработка и создание технологического комплекса LIGA технологии на базе станции на канале вывода СИ из накопителя ВЭПП-3.

Разработка и исследование технологических режимов глубокой рентгеновской литографии.

Разработка метода и изготовление рентгеношаблонов, контрастных для облучения толстых полимерных резистивных слоёв фотонами с энергией около 5 кэВ.

Данная работа мотивирована потребностью создания методической и технологической базы для производства микрофлюидных систем, микрооптических элементов видимого диапазона, микроструктурированных сеточных фильтров для спектральной селекции терагерцового излучения и других изделий, имеющих высокое аспектное отношение микроразмеров.

Личный вклад автора

Большая часть описанных в диссертации расчетных и экспериментальных результатов получена непосредственно автором.

Им были разработаны и созданы программы для расчетов спектрально-угловых характеристик экспонирующего излучения в реальных условиях эксперимента, с учетом используемых спектральных фильтров и подложек шаблонов. Проведены оценки и выбраны режимы экспонирования полимерных резистов, обоснован выбор материалов рентгеношаблонов для оптимизации контраста.

Основным и определяющим был вклад автора в создание станции экспонирования LIGA на канале вывода СИ из накопителя ВЭПП-3.

Автором были проведены эксперименты, включая экспонирование образцов синхротронным излучением на станции LIGA и их обработку. Исследованы многочисленные результаты рентгенолитографического облучения образцов на станции LIGA и их последующей технологической обработки.

Научная новизна

Впервые реализован метод прямого формирования лучом СИ микроструктур с заданной топологией в толстых слоях (30-50 микрон) полимерных резистов.

Впервые в России разработан метод изготовления рентгеношаблонов для глубокой рентгенолитографии на основе прямого формирования структуры рисунка заготовки рентгеношаблона в толстом слое резиста микропучком синхротронного излучения.

Впервые для рентгенолитографических экспериментов реализована система визуализации рентгеновских изображений для контроля положения и совмещения рентгеношаблона и облучаемой подложки в пучке СИ.

Предложен новый метод контроля качества создаваемых рентгеношаблонов на основе рентгеновской микроскопии шаблонов.

Разработан новый тип спектральных фильтров для терагерцового излучения, представляющих собой трёхмерную металлическую пленочную конструкцию на полимерной микроструктурированной сетке.

Научная и практическая ценность

Разработанные в рамках данной работы физические модели, режимы экспонирования и технологические приемы LIGA изготовления микроструктур планируется применять при изготовлении микроструктурированных объектов для решения задач прикладных исследований в различных областях науки.

Разработанные технологические процессы могут быть использованы в ИЯФ СО РАН и на других источниках СИ, например, в Курчатовском центре синхротронного излучения и нанотехнологий РНЦ Курчатовский институт, г. Москва или в будущем на Технологическом накопительном комплексе в НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина, г. Зеленоград.

Положения, выносимые на защиту

Концепция построения экспериментальной станции LIGA на канале вывода СИ из накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН.

Результаты расчета экспозиционных доз в резистивных полимерных материалах и результаты расчета контраста рентгеношаблонов, позволяющие оптимизировать создание и работу LIGA станции на накопителе ВЭПП-3.

Разработка методов изготовления рентгеношаблонов для глубокой рентгенолитографии в «жестком» спектре СИ.

Способы формирования микроструктур микрофлюидных систем, микроструктурированных оптических элементов видимого и терагерцового диапазона.

Разработка системы визуализации рентгеновских изображений для контроля положения и совмещения рентгеношаблона в пучке СИ.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на Всероссийских и Международных конференциях: Национальная конференция по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (Москва, 2001, 2003 гг.); Международные конференции по использованию синхротронного излучения (Новосибирск, 2004, 2006, 2008, 2010 гг.); Симпозиум: нанофизика и наноэлектроника (Нижний Новгород, 2005, 2007, 2008 гг.); Национальная конференция по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования наноматериалов и наносистем, РСНЭ НАНО (Москва, 2005, 2007 гг.); 29th International Free Electron Laser Conference: FEL-2007 (Новосибирск, 2007 г.); VII Национальная "Рентгеновское, синхротронное излучения, нейтроны и электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии", РСНЭ-НБИК (Москва, 2009 г.); Рабочее совещания «Рентгеновская оптика-2010» (Черноголовка, 2010 г.).

Результаты работы были опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах: «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A»; «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования»; «Нанотехнология. Экология. Производство»; «Гальванотехника и обработка поверхности».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст диссертации содержит 146 страницы, 88 рисунков и 5 таблиц. Список литературы состоит из 104 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приведен краткий экскурс в историю развития LIGA технологии в ведущих мировых научных центрах и в России. Рассмотрены проблемы и тенденции развития технологии и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации описаны основные технологические этапы LIGA-процесса. LIGA-процесс – метод изготовления глубоких микроструктур посредством последовательного применения глубокой рентгенолитографии, микрогальваноластики и формовки. Специфика LIGA-процесса заключается в создании микроформ, с помощью которых микрорельеф последовательно повторяется в разных материалах – полимерах, металлах, керамике.

Описаны основные свойства СИ для глубокой рентгенолитографии и метод расчета поглощенной дозы и контраста рентгеношаблонов, обсуждены принципы построения LIGA станции на канале СИ, рассмотрены

применяемые в LIGA-процессе материалы. Описаны классические принципы изготовления рентгеношаблонов.

Рентгеновская маска или рентгеношаблон (РШ) является ключевым элементом LIGA-процесса. РШ в общем представляет собой рисунок из рентгенопоглощающего материала на подложке прозрачной для рентгеновского излучения используемого спектрального диапазона. Используемая в ведущем мировом центре LIGA-технологии – Институте микроструктур (ИМТ/КИТ, Карлсруэ) последовательность изготовления рентгеношаблонов для глубокой рентгеновской литографии включает в себя процесс электронной литографии для изготовления промежуточного рентгеношаблона для «мягкого» спектра СИ и изготовление рабочего рентгеношаблона для «жесткого» спектра СИ, используя промежуточный шаблон в процессе рентгенолитографии в «мягком» спектре СИ.

В этой же главе рассмотрены основные свойства используемых в работе резистов – негативного резиста SU-8 и позитивного резиста ПММА .

Во второй главе приведено описание созданного LIGA-технологического комплекса на источнике синхротронного излучения ВЭПП-3. Описана компоновка станции LIGA.

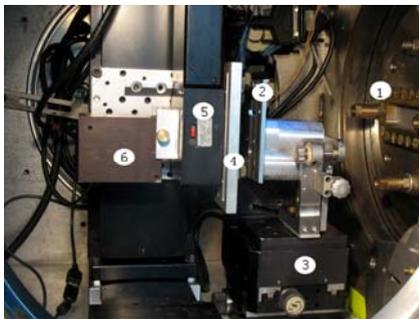
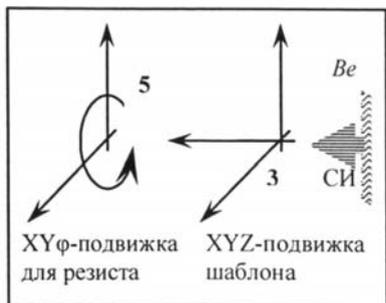


Рис. 1. Схема и фотография внутреннего оснащения рабочего объема станции. 1 – бериллиевое окно входа пучка, 2 и 4 – держатели шаблона и образцов, соответственно, 3 и 5 – координатные столики для XYZ и XYφ перемещения рентгеношаблона и образцов соответственно. 6 – цифровая камера.

Важной конструкционной особенностью станции является возможность перемещать внутри станции в процессе экспонирования как сборку шаблон-подложка с резистом, так и отдельно друг от друга шаблон и подложку с резистом, что обеспечивает большую гибкость в реализации технологических алгоритмов. Для этого внутри камеры размещены трехкоординатные (XYφ) и (XYZ) столики с шагом 0,1 мкм (Рис. 1, поз. 3 и 5). Образец и шаблон фиксируются специальными держателями.

Управление процессом перемещения подвижек и контроль набора дозы облучения автоматизировано с использованием персонального компьютера. Станция оснащена системой визуализации на базе цифровой камеры Logitech© (поз. 6). Система установлена в центре координатного столика непосредственно за держателем образца. Входное окно камеры закрыто люминофорным кристаллом германата висмута, толщиной 400 мкм для преобразования рентгеновского изображения в видимое, свинцовое стекло толщиной 2 мм поглощает рентгеновское излучение, пропуская только видимый спектр, и таким образом регистрируется изображение рентгеношаблона, формирующееся в центральной области облучаемой подложки диаметром 20 мм. Система визуализации позволяет наблюдать изображение шаблона в проходящем СИ, различая элементы размером порядка 10 мкм. Система обеспечивает выставку объекта по пучку СИ, совмещение подложки и рентгеношаблона, визуальный контроль процесса экспонирования.

Разработано физико-математическое моделирование условий экспонирования на станции LIGA, рассчитаны спектральные характеристики излучения в зависимости от материала и толщины фильтров, подложек и других вещественных сред в канале вывода СИ (рис. 2, 3), рассчитаны экспозиционные дозы, времена экспонирования, требуемые для формирования микроструктур. В этой же главе описаны режимы экспонирования. Предложено и реализовано на станции четыре метода управления процессом экспонирования:

- режим экспонирования со сканированием сборки шаблон-резист в вертикальной плоскости поперек пучка СИ для равномерного облучения образцов большой площади;
- режим мультиплицирования – экспонирование со сдвигом резиста относительно шаблона для многократного повторения на подложке элементарного рисунка;
- режим микролитографа, в котором сформированным игольчатым лучом СИ рисуются по толстому слою высокочувствительного резиста SU-8, нанесенному на подложку, микроструктуры для последующего электрохимического осаждения золота и изготовления рентгеношаблона;
- режим динамической литографии – экспонирование движущейся подложки через неподвижный шаблон, что позволяет получать полутоновые рисунки или другие специфические эффекты.

Также в этой главе описано оборудование комплекса LIGA, разработанное для подготовки и обработки подложек и резистов до облучения и после, проведения гальваноформовки и исследования создаваемых образцов.

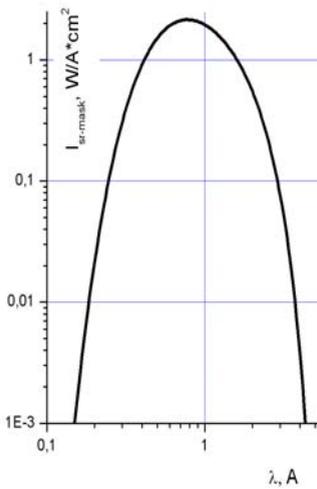


Рис. 2. Расчетное спектральное распределение падающей мощности СИ в медианной плоскости на расстоянии 20 м от точки излучения. При энергии электронов 2 ГэВ, магнитном поле в точке излучения 20 кГс, токе 100 мА, с учетом 500 мкм берилевых окон.

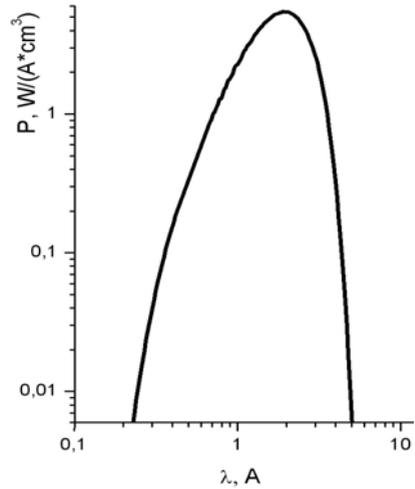


Рис. 3. Расчетное спектральное распределение СИ в медианной плоскости, поглощенного в тонком слое резиста ПММА. При энергии электронов 2 ГэВ, магнитном поле в точке излучения 20 кГс, токе 100 мА, с учетом 500 мкм берилевых окон.

В третьей главе описано создание и исследование рентгеношаблонов для глубокой рентгенолитографии. Проведены оценки и обоснован выбор материалов рентгеношаблонов для оптимизации контраста (рис. 4).

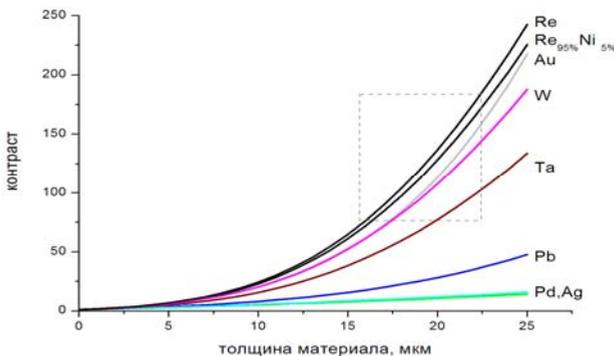


Рис. 4. Расчетная величина контраста для различных поглощающих покрытий при использовании подложек из стеклоглассера толщиной 500 мкм, с учетом влияния спектральных фильтров.

Представлены созданные образцы рентгеношаблонов. В проделанной работе для изготовления рентгеношаблонов основным материалом, используемым в качестве подложек, являлся шлифованный стеклоглерод. Выбор этого материала определялся его уникальными свойствами: прозрачный для используемого СИ, электропроводящий, поддающийся обработке (шлифовка, полировка) обладающий хорошими прочностными свойствами, химически инертный, стойкий к термическим, радиационным и химическим воздействиям. Для формирования рентгеноконтрастных слоев исследовались два материала: рений и золото.

Было исследовано два способа формирования из резиста топологического рисунка заготовки шаблона: фотолитографический и метод прямой рентгенолучевой литографии.

Впервые реализован способ рентгенолучевого формирования топологи рентгеношаблонов для глубокой рентгеновской литографии свободный от недостатков фотолитографического метода, не требующий использования дорогостоящих этапов электронной литографии, изготовления промежуточного рентгеношаблона и рентгенолитографии в «мягком» спектре СИ ($\lambda \sim 12 \text{ \AA}$) для получения рабочего шаблона, обладающего высоким контрастом для энергий фотонов в «жестком» спектре СИ ($\lambda \sim 2 \text{ \AA}$).

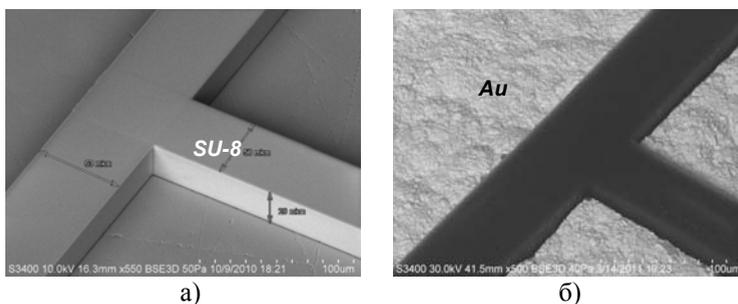


Рис. 5. а) резистивная реплика: заготовка шаблона до электроосаждения поглощающего слоя, – созданная с использованием рентгеновского микролитографа микроструктура высотой 29 мкм из полимера SU-8 на стеклоглеродной подложке. б) рентгеношаблон, полученный после электрохимического осаждения на заготовку ~25 мкм слоя золота в резистивной реплике. Ширина линий 50 мкм.

Данный метод изготовления резистивной реплики рабочего РШ основан на принципе векторного формирования микрорисунка РШ непосредственно в толстом слое рентгенорезиста на проводящей рентгенопрозрачной подложке микропучком СИ, коллимированным специальной диафрагмой в ходе независимого перемещения координатного столика подложки с резистом относительно неподвижного микропучка СИ (рис. 5).

Контроль рисунка микроструктуры и состава поглощающего слоя осуществлялся с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi S3400N (ИЯФ СО РАН). Дополнительная проверка качества РШ проводилась непосредственно с использованием синхротронного излучения на станции Рентгеновской микроскопии и томографии накопителя ВЭПП-3. В экспериментах использовалось монохроматическое излучение с длиной волны $\lambda=1.13 \text{ \AA}$, соответствующей максимуму энергий фотонов в спектре СИ на станции LIGA. На изображениях рентгеношаблонов, полученных методом рентгеновской микроскопии с разрешением 3 мкм дефектные участки с недостаточным контрастом представляются светлыми пятнами в темном рентгеноконтрастном поле. Тогда как, полученное в сканирующем электронном микроскопе изображение не дает информации о контрасте шаблона. Контраст рентгеношаблона в монохроматическом излучении можно непосредственно измерить на полученном цифровом изображении и из этого рассчитать толщину поглощающего покрытия и контраст шаблона в полихроматическом спектре, используемом на станции LIGA.

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты создания методом глубокой рентгенолитографии на LIGA-технологическом комплексе микроструктурированных изделий для прикладных исследований. Практически каждый технологический этап LIGA-процесса завершается изготовлением микроструктуры, которая может являться готовым продуктом. Так глубокая рентгенолитография может завершиться формированием микроканалов в полимере. Металлическая структура, полученная в результате гальваноформовки может использоваться как матрица для последующих технологических процессов или как конечный продукт и т.п.

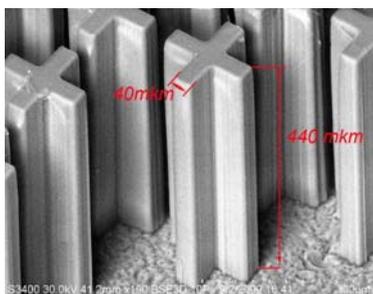


Рис. 6. Микроструктуры с высоким аспектным отношением размеров, полученные из полимера SU-8 с использованием созданного рентгеношаблона. Высота 440 мкм, ширина линии 40 мкм.

Используя разработанную аппаратуру и экспериментальные методики были изготовлены пилотные образцы микроструктурированных изделий для прикладных исследований.

Микрофлюидные системы представляют собой интегрированные устройства – лаборатории на чипах, образованные системой микроканалов с ламинарным течением жидкостей, что создает оптимальные и легко контролируемые условия для протекания транспортных и диффузионных процессов; функционирования бактериальных и эукариотических клеток; протекания молекулярно-биологических, молекулярно-генетических, биохимических, химических реакций в микрообъемах реагентов (рис. 7).

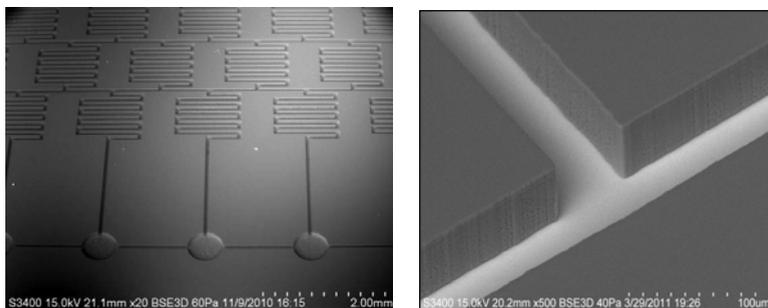


Рис. 7. Фрагменты микроканального модуля для микрофлюидной системы.

Тестовые образцы микрофлюидных модулей были успешно испытаны в ИЦиГ СО РАН.

Принципиально новый метод создания микроструктурированных трёхмерных металлических плёночных сеточных структур – селективных элементов ИК и ТГц диапазона – основан на сочетании рентгенолитографического формирования микроструктур в толстых полимерных пленках (10 – 1000 мкм) и возможности химического осаждения металлического серебра на всей поверхности полимера. Методом глубокой рентгенолитографии на СИ были получены образцы пленок майлара, толщиной 10 мкм и листового ПММА, толщиной 1 мм площадью 40x40 мм, заполненные массивами регулярных сквозных пор. Химическим способом на поверхность сеточной полимерной структуры был нанесен слой серебра, обеспечивающий электропроводность по всей поверхности изделия. Тестовые образцы были испытаны в НГУ (рис. 8). Полученные таким образом металлизированные пленки обладают свойствами близкими к толстым металлическим сеткам и представляют собой пример нового типа элементов оптики для излучения терагерцового диапазона.

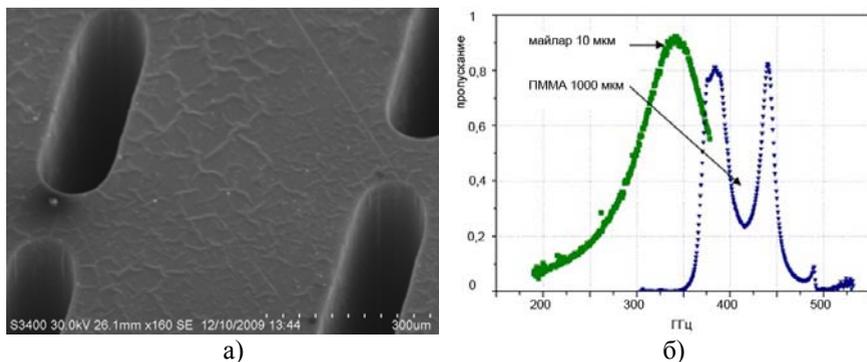


Рис. 8. а) металлизированные сеточные фильтры для терагерцового излучения, изготовленные на микроструктурированной основе из ПММА толщиной 1 мм; б) измеренная спектральная зависимость пропускания изготовленных сеточных фильтров для излучения терагерцового диапазона.

Реализован метод динамической рентгенолитографии для формирования в негативном резисте ПММА непрерывного трехмерного микрорельефа. В однородном пучке СИ был позиционирован планарный рентгеношаблон (рис. 1, поз. 2) со специальным рисунком из треугольных сегментов. Подложка с ПММА, установленная на ХУФ-столике (рис. 1, поз. 4) вращалась в плоскости перпендикулярной пучку СИ. Центр вращения был совмещен с центром рисунка шаблона. При этом резист облучался с дозой пропорциональной ширине проекций прозрачных областей шаблона, что определяло получение после травления в резисте непрерывного 3D профиля с переменной глубиной – линзы Френеля (рис. 9). Такая технология может быть основой метода изготовления искусственных хрусталиков глаза для офтальмологических задач.

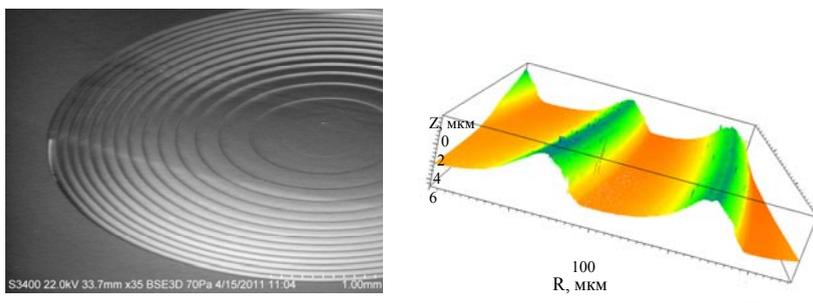


Рис. 9. Фотография и профилограмма созданной методом динамической рентгенолитографии линзы Френеля из ПММА.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты, полученные в диссертации

Разработан и функционирует технологический комплекс LIGA-технологии на базе станции на канале вывода СИ из накопителя ВЭПП-3.

Разработана и реализована концепция построения станции экспонирования LIGA на канале вывода синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3.

Проведены исследования пользовательских характеристик станции: рассчитано и экспериментально проверено распределение мощности экспонирующего излучения в плоскости образца, определены режимы облучения резистов.

Выполнены расчеты контраста рентгеношаблонов в условиях реального эксперимента. Определены требуемые толщины поглощающего слоя для различных материалов.

Разработан и реализован метод изготовления рентгеношаблонов для глубокой рентгенолитографии на основе прямого формирования структуры рисунка заготовки рентгеношаблона в толстом слое резиста микропучком синхротронного излучения, что позволило исключить из технологического цикла этапы электронной литографии и рентгенолитографии в «мягком» спектре СИ. Изготовлены образцы рентгеношаблонов на стеклоуглеродной подложках с золотыми или ренийевыми поглощающими слоями.

Предложен и реализован оперативный неразрушающий метод контроля качества создаваемых рентгеношаблонов на основе использования рентгеновской микроскопии.

Реализован метод формирования микроканальных систем (микрофлюидных модулей) для генетического экспресс-анализа. Тестовые образцы микрофлюидных модулей исследованы в ИЦиГ СО РАН.

Разработан новый тип селективных элементов для излучения терагерцового диапазона – металлизированные сеточные фильтры для терагерцового излучения, изготовленные на основе микроструктурированной толстой полимерной пленки. Тестовые образцы исследованы в НГУ.

Разработан метод динамической рентгенолитографии для формирования осесимметричных структур с 3D микропрофилем для получения оптических элементов видимого диапазона. Получены опытные образцы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. B.G. Goldenberg, V.F. Pindyurin, U.V. Ancharova, et.al. Fabrication of microstructured optical elements for visible light by means of LIGA-technology. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A. - 2009.- Vol.603. - Issues 1-2. - P.157.
2. Ancharov A.I., Baryshev V.B., Chernov V.A., Gentshev A.N., Goldenberg B.G., Kochubei D.I., Korchuganov V.N., Kulipanov G.N., Kuzin M.V., Levichev E.B., Mezentsev N.A., Mishnev S.I., Nikolenko A.D., Pindyurin V.F., Sheromov M.A., Tolochko B.P., Sharafutdinov M.R., Shmakov A.N.,

- Vinokurov N.A., Vobly P.D. and Zolotarev K.V. Status of the Siberian synchrotron radiation center. // Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A. - 2005. - Vol.A543, N1. - P.1-13.
3. V.F. Pindyurin; B.G. Goldenberg; E.V. Petrova; U.V. Ancharova; V.S. Eliseev; V.P. Korolkov; R.K. Nasyrov. Dynamic X-ray lithography for blazed diffractive optics fabrication. // Proceedings SPIE, Vol.7102, Optical Fabrication, Testing, and Metrology III, Angela Duparré; Roland Geyl, Editors, 710208 (September 2008).
 4. Генцелев А.Н., Гольденберг Б.Г., Кондратьев В.И., Кулипанов Г.Н., Мезенцева Л.А., Мигинская Е.Г., Мишнев С.И., Назьмов В.П., Пиндюрин В.Ф., Цуканов В.М. LIGA-станция на накопителе ВЭПП-3. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2002. - № 9. - С. 30-35.
 5. Наливайко В.И., Юрьев Г.С., Гольденберг Б.Г., Пономарёва М.А. Получение фазовых структур в оптических материалах. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2003. - N11. - С.52-55.
 6. О.Н. Бобровникова, А.Н. Генцелев, Б.Г. Гольденберг и др. Формирование и исследование толстых резистивных слоев ПММА для LIGA-технологии. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2005. - N9. - С.38.
 7. Б.Г. Гольденберг, А.Н. Генцелев, В.В. Лях, В.Ф. Пиндюрин, Л.М. Щеголев, В.С. Елисеев, К.А. Коньшев. Позиционно-чувствительный “прозрачный” монитор положения пучков СИ на станции LIGA накопителя ВЭПП-3 технологии. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2005. - N9. - С.53.
 8. Е.В. Петрова, Б.Г. Гольденберг, В.И. Кондратьев, Л.А. Мезенцева, В.Ф. Пиндюрин, А.Н. Генцелев, В.С. Елисеев, В.В. Лях. Создание рентгеношаблонов на толстой подложке для глубокой рентгеновской литографии. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2007. - N6. - С.14-19.
 9. Гольденберг Б.Г., Горячковская Т.Н., Елисеев В.С., Колчанов Н.А., Кондратьев В.И., Кулипанов Г.Н., Попик В.М., Пельтек С.Е., Петрова Е.В., Пиндюрин В.Ф. Изготовление LIGA-шаблонов для создания микрофлюидных аналитических систем. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2008. - N8. - С.61-64.
 10. Пельтек С.Е., Горячковская Т.Н., Попик В.М., Пиндюрин В.Ф., Елисеев В.С., Гольденберг Б.Г., Щеглов М.А., Тикунова Н.В., Хлебодарова Т.М., Рубцов Н.Б., Кулипанов Г.Н., Колчанов Н.А. Микрофлюидные системы в биологии и конструирование геносенсоров. // Российские нанотехнологии. - 2008. - Т.3, N9/10.- С. 136-145.

11. С.А. Кузнецов, Б.Г. Гольденберг, П.В. Калинин, В.С. Елисеев, Е.В.Петрова. Разработка селективных элементов терагерцовой квазиоптики методами LIGA-технологии для применений на мощном новосибирском лазере на свободных электронах. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. - N9. - С.38.
12. Абрамский А.Ю., Гольденберг Б.Г., Зелинский А.Г., Кондратьев В.И., Корольков В.П., Коронкевич В.П., Маслий А.И., Медведев А.Ж. Разработка химико-гальванических процессов для литографического производства трёхмерных микроструктур. // Гальванотехника и обработка поверхности. - 2010. - Т.18, N2. - С.11.
13. Пельтек С.Е., Горячковская Е.Н., Рубцов Н.Б., Хлебодарова Т.М., Колчанов Н.А., Попик В.М., Пиндюрин В.Ф., Гольденберг Б.Г., Щеглов М.А., Кулипанов Г.Н. Микрофлюидные системы в биологии и конструирование геносенсоров. // Нанотехнология. Экология. Производство. - 2010. - N2. - С.84-87.
14. Гольденберг Б.Г., Абрамский А.Ю., Зелинский А.Г., Маслий А.И., Максимовский Е.А., Кондратьев В.И., Корольков В.П., Купер К.Э., Петрова Е.В., Пиндюрин В.Ф. Особенности изготовления шаблонов для глубокой рентгеновской технологии в сибирском центре синхротронного и терагерцевого излучения. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования . - 2011. - N2. - С.62-68.
15. Гольденберг Б.Г., Купер К.Э., Кондратьев В.И. и др. Экспресс-метод контроля рентгеношаблонов для глубокой рентгенолитографии // XVIII международная конференция по использованию синхротронного излучения, СИ-2010. - Книга тезисов, Новосибирск: ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 2010. - С. 32.

ГОЛЬДЕНБЕРГ Борис Григорьевич

**Создание LIGA-технологического
комплекса на источнике
синхротронного излучения ВЭПП-3**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор 21.04. 2011 г.

Подписано в печать 22.04. 2011 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 10

Обработано на ПК и отпечатано

на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11