Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 1(54)

ФИЗИКА

УДК 539.1.043:539.1.06

Шаблоны для глубокой рентгенолитографии*

А.Н. ГЕНЦЕЛЕВ[1], А.Г. ЗЕЛИНСКИЙ[2], В.И. КОНДРАТЬЕВ[1]

[1] *Новосибирск, Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН*
[2] *Новосибирск, Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН*

Описана достаточно простая технология производства характеризующихся высокими уровнями рентгенопрозрачности, геометрической стабильности и прочности рентгенолитографических шаблонов с тонкими (толщиной ~ 40÷120 мкм) несущими мембранами на основе нового материала – эпоксидографита, представляющего собой заполимеризованную эпоксидную смолу с графитовым наполнителем. Разновидностью данного материала, является суграфит, где в качестве связующей основы используется разработанный на базе эпоксидных смол промышленновыпускаемый негативный резист SU-8. Шаблоны из суграфита внешне и по основным литографическим характеристикам ничем не отличаются от эпоксидографитовых, но имеют ряд дополнительных преимуществ, а именно, они характеризуются более высокими уровнями радиационной и температурной стойкости (температурный предел их разрушения ~ 380 °С), что обеспечивает возможность проведения с ними высокотемпературных операций (до 250 °С). Дополнительным преимуществом эпоксидографитовых шаблонов, вытекающим из их электропроводности и прочности, является возможность использования при проведении рентгенолитографии электростатического прижима, что позволяет заметно улучшить качество формируемого топологического рисунка. Приведены проиллюстрированные фотографиями первые результаты применения таких шаблонов в пучках синхротронного излучения в области длин волн экспонирующего излучения $\lambda \approx 0{,}5 \div 3$ Å. Рассмотрены перспективы применения в более мягком спектральном диапазоне $\lambda \approx 3 \div 7$ Å, что позволит использовать их в качестве переходных шаблонов (для формирования резистивной маски при изготовлении ЛИГА-шаблонов), а также расширит диапазон материалов, используемых для обрабатываемых подложек (благодаря подбору экспонирующего спектра и снижению уровня флуоресценции от рабочей поверхности при их облучении). Предполагаемая прикладная область применения рентгеновских шаблонов данной конструкции – это формирование микрорельефов при создании литьевых или пресс-форм и изделий микросистемной техники.

Ключевые слова: рентгенолитография, ЛИГА-технология, рентгеношаблон, ЛИГА-шаблон, переходной шаблон, несущая мембрана, синхротронное излучение, контрастность, резист, маскирующий слой, топологический рисунок.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдался бурный рост на рынке изделий микросистемной техники (МСТ) и, в частности, микроэлектромеханических систем (МЭМС), где «создаются миниатюрные чувствительные, исполнительные и энергообеспечивающие системы, в основе функционирования которых лежит активное использование классических принципов механики, оптики, акустики, электротехники, теплотехники, химии и биологии, интегрируемых в конструктивные решения на микроуровне с широким использованием материаловедческой и технологической баз микро- и оптоэлектроники, а в последнее время – и биотехнологии. Микромашины, механизмы и приборы микросистемной техники по стоимости, надежности, 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]. Анализируя особенности развития технологического базиса этих направлений, «следует выделить один из основных факторов, определивших необходимость видоизменения классических технологических приемов микроэлектронного производства: толщина микромеханических элементов, в отличие от композиций класси-

* *Статья получена 20 июня 2012 г.*

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования СЦСТИ и при финансовой поддержке Минобрнауки России.

ческой микроэлектроники, может превосходить их латеральные размеры в плоскости, т. е. возникает необходимость формирования трехмерных «3D»… структур» [1]. При создании изделий МСТ используется набор основных технологий (~ 20) и одной из широко распространенных в настоящее время является LIGA-технология.

По сравнению с другими известными технологиями, LIGA-технология имеет ряд преимуществ, таких как: универсальность (допускает использование большого числа различных материалов и их комбинаций); широкий диапазон размеров изделий содержащих микроструктуры (от десятков миллиметров до единиц микрометров); низкая себестоимость изделий и возможность их массового производства; высокая технологическая точность изготавливаемых изделий (размеры могут быть выдержаны с точностью до 0,1 мкм). Последнее из указанных преимуществ достигается главным образом благодаря применению трафаретной синхротронной сканирующей рентгеновской литографии (поскольку источники синхротронного излучения (СИ) по яркости на несколько порядков превосходят любые другие источники рентгеновского излучения), что позволяет проводить экспонирование потоком практически параллельно распространяющихся рентгеновских квантов, энергия которых может быть подобрана так, что глубина их проникновения будет составлять от 0,1 до 10^4 мкм. Для получения глубокопрофильных с отвесными стенками резистивных масок, с целью изготовления литьевых форм или пресс-форм при помощи вышеуказанного способа, требуется рентгенолитографический шаблон – трафарет, обычно представляющий собой изготовленный гальванопластикой из тяжелых металлов маскирующий слой, удерживаемый силами адгезии на рабочей поверхности рентгенопрозрачной несущей мембраны [2, 3].

Используемый в рентгенолитографии диапазон длин волн (0,5÷50 Å) можно условно разбить на поддиапазоны ультракоротких (0,5÷3Å), коротких (3÷7Å), средних (7÷10 Å) и длинных (10÷50 Å) волн. Каждый из поддиапазонов имеет свои особенности и для целей глубокой (ориентированной на получение профилей глубиной ≥ 50 мкм) рентгенолитографии используются первые два, что обусловлено спектральной зависимостью длины поглощения рентгеновского излучения в рентгенорезистах, как правило, представляющих собой углеводородные полимеры [4]. Далее для краткости изложения рентгенолитографические шаблоны, применяемые в диапазоне ультракоротких длин волн будут именоваться ЛИГА-шаблонами, в диапазоне коротких длин волн – рентгеношаблонами, а в случаях, относящихся к обоим типам, будет использоваться термин шаблон.

С уменьшением длины волны СИ уменьшается влияние дифракционных эффектов на искажения топологического рисунка при его литографическом переносе и уменьшается ослабление интенсивности излучения разделительными окнами канала и несущей мембраной шаблона, что позволяет увеличивать зазор между рабочими поверхностями шаблона и обрабатываемой подложки и использовать в качестве несущих мембран сравнительно толстые пленки и пластинки из «легких» (с низким атомным номером) материалов. В результате снимаются проблемы, связанные с контактированием рабочей поверхности шаблона с рентгенорезистом, а также существенно возрастают прочность шаблона и срок его службы.

Однако уменьшение длины волны экспонирующего излучения приводит к ухудшению литографического разрешения из-за увеличения кинетической энергии генерируемых СИ в резисте вторичных электронов, вследствие чего диапазон ультракоротких длин волн пригоден для формирования высокоаспектных резистивных масок с размерами топологических элементов >> 1 мкм. Кроме того, использование СИ, характеризующегося высокими значениями энергии фотонов, налагает ограничения на выбор материалов обрабатываемой подложки, поскольку может (при определенных условиях) вызвать сильные флуоресцентные потоки от поверхности подложки, способные создать значительную экспозиционную дозу на участках резиста, расположенных под маскирующим покрытием шаблона.

Также по мере уменьшения длины волны экспонирующего СИ требуется (в обеспечение необходимого уровня контрастности шаблонов) формировать всё более толстые слои маскирующего рентгенопоглощающего покрытия (для надежного литографического воспроизведения в ультракоротком спектральном диапазоне толщина маскирующего покрытия, выполненного из тяжелого металла (золото, рений и т. п.), должна быть ≥ 20 мкм [5]). Для изготовления

слоев такой толщины используется гальванопластика и требуется предварительное формирование на рабочей поверхности исходной заготовки ЛИГА-шаблона резистивной маски, с толщиной заметно превышающей толщину маскирующего слоя, что может быть реализовано путем проведения глубокой рентгенолитографии в диапазоне коротких длин волн с применением переходного шаблона [2] (с характерной толщиной маскирующего покрытия ~ 1,5 мкм). Таким образом, для изготовления ЛИГА-шаблонов вышеуказанным способом требуются рентгеношаблоны, топологические рисунки которых создаются при помощи традиционных фото- или электронной литографий.

В проводившихся в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ) работах по глубокой рентгенолитографии в основном использовались шаблоны с несущими мембранами в виде тонкой (~ 2÷3 мкм) пленки из кремния [6] и в виде шлифованных пластинок (~ 500 мкм) из стеклоуглерода [5], причем первые применялись в коротком диапазоне длин волн экспонирующего СИ на станции рентгеновской литографии (спектр поглощаемого СИ ~ 3÷10 Å) [7], а вторые – в ультракоротком на ЛИГА-станции (~ 0,5÷3 Å) [8].

Тип материала несущей мембраны и ее толщина оказывают значительное влияние как на технологию изготовления шаблона, так и на его основные характеристики (рентгенопрозрачность, контрастность и др.). Поскольку влияние несущей мембраны на спектр экспонирующего СИ очень велико и может рассматриваться как фильтр, вырезающий мягкую спектральную составляющую, наиболее поглощаемую резистивным слоем (т. е. наиболее активно участвующую в создании экспозиционной дозы), желательно увеличить рентгенопрозрачность несущей мембраны и снизить её влияние на литографический процесс. Это достигается путем уменьшения ее толщины и выполнения преимущественно из «легких» и практически не флуоресцирующих в используемом диапазоне СИ материалов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основными недостатками кремниевых рентгеношаблонов были хрупкость несущей мембраны и довольно сложная технология их изготовления.

ЛИГА-шаблоны с несущей мембраной из промышленно-выпускаемого стеклоуглерода (марки СУ-1300 с плотностью $\rho \approx 1{,}5$ г/см^3, исходные подложки которого шлифовкой и полировкой доводились до толщины ~ 500 мкм) достаточно хорошо зарекомендовали себя в силу замечательных свойств данного материала, характеризующегося низкой флуоресценцией, высокими уровнями электропроводности, рентгенопрозрачности, рентгеностойкости, химстойкости и др. Однако данный материал имеет также и недостатки, ограничивающие его использование в качестве несущих мембран – это его дороговизна и хрупкость, ограничивающая толщину пластинки на уровне ~ 450 мкм (в результате она практически не пропускает СИ короткого спектрального диапазона). В связи с вышеизложенным были предприняты попытки найти материал, не имеющий вышеуказанных недостатков, и разработать простую технологию изготовления шаблонов на его основе. В качестве замены были опробованы графитовая фольга и композитный электропроводящий материал на основе гранул (фракция 5÷10 мкм) спектрально чистого графита, скрепленных между собой клеем на основе эпоксидной смолы (далее по тексту эпоксидографит). Удельная плотность эпоксидографита ~ 1,5 г/см^3 и его спектральная рентгенопрозрачность практически равны соответствующим характеристикам стеклоуглерода, поэтому расчетные литографические характеристики для шаблонов из эпоксидографита практически совпадают (при равенстве толщин несущих мембран) с аналогичными величинами стеклоуглеродных шаблонов [9].

2. ШАБЛОНЫ ИЗ ЭПОКСИДОГРАФИТА И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Первоначально из эпоксидографита по специально разработанной технологии (путем прессования под давлением ~ 200 атм при комнатной температуре с последующим отжигом в печи в течение ~ 10 часов при температуре ~ 70 ºС и давлении ~ 120 атм) формовались шайбы диаметром ~ 36 мм и толщиной ~ 600 мкм. Затем технология была существенно изменена для получения намного более тонких несущих мембран [10] и из данного материала формовались

исходные подложки толщиной ~ 1,5 мм, диаметром 36 мм с запрессованными в них шайбами из алюминиевого сплава (Д16Т) толщиной ~ 1,3 мм и диаметром 25 мм. На следующей стадии толщина подложек шлифовкой и полировкой доводилась до величины ~ 1,4 мм и на их рабочую поверхность напылялся тонкий ~ 0,05 мкм адгезивный металлический (серебряный или золотой) подслой, поверх которого формировалась резистивная маска, заданной толщины. После чего на подложку через резистивную маску проводили гальваническое осаждение золотого маскирующего слоя толщиной ≥ 20 мкм. На последнем этапе шайбы из алюминиевого сплава удалялись селективным травлением в 20 % водном растворе NaOH, в результате чего формировалась несущая мембрана толщиной ~ 100 мкм. Фотографии внешнего вида ЛИГА-шаблона на различных стадиях его изготовления приведены на рис. 1.

В плане отработки технологии был изготовлен высококонтрастный ЛИГА-шаблон (контрастность в основном спектре ЛИГА-станции > 10^4, толщины его несущей мембраны и резистивной маски составляли ~ 120 мкм, а маскирующего слоя ~ 80 мкм, рис. 2), полученный с его помощью на ЛИГА-станции ВЭПП-3 «пропечаток» представлен на рис. 3.

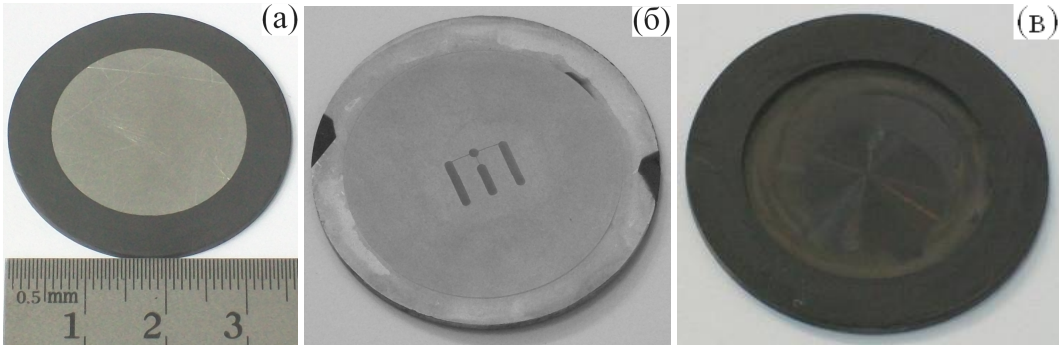


Рис. 1. Фотографии: исходной подложки шаблона с тыльной стороны (*а*); годного LIGA-шаблона со стороны рабочей поверхности (*б*) (в центре рентгенопоглощающий топологический рисунок из золота, на периферии видны незапыленные серебром черные пятна – следы от прижимных лапок); этого же шаблона с тыльной стороны после удаления запрессованной шайбы из алюминиевого сплава (*в*)

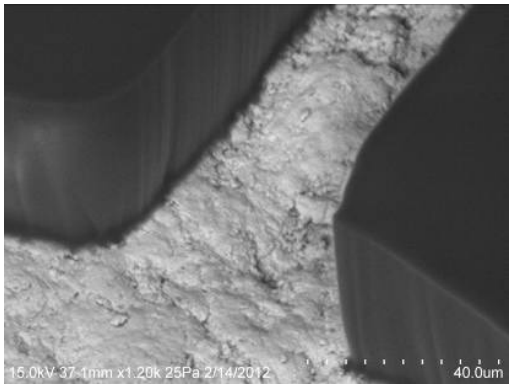


Рис. 2. РЭМ-изображение (угол 45º) фрагмента поверхности золотого маскирующего слоя вместе с резистивной маской из SU-8, возвышающейся над поверхностью слоя примерно на 40 мкм

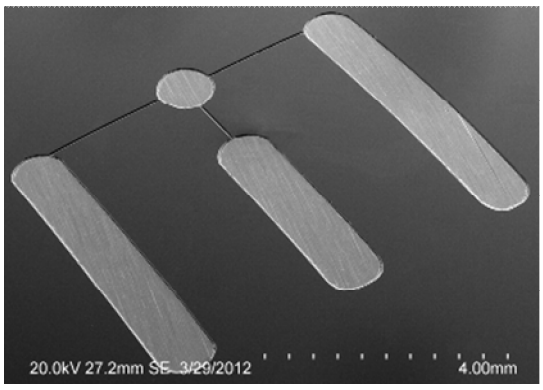


Рис. 3. РЭМ-изображение (угол 45º) фрагмента «пропечатка» в резисте SU-8 (толщиной ~ 30 мкм), нанесенном на шлифованную подложку из сплава Д16Т

В дальнейшем было предложено в качестве полимерной связующей основы использовать разработанный на базе эпоксидных смол промышленновыпускаемый негативный резист SU-8 (далее по тексту этот материал именуется суграфит). Хотя шаблоны из суграфита внешне и по основным литографическим характеристикам не отличаются от эпоксидографитовых, однако

вследствие специфики образования полимерных цепей из молекул EPON SU-8, они имеют ряд дополнительных преимуществ, а именно, они характеризуются более высокими уровнями радиационной и температурной стойкости (температурный предел их разрушения ~ 380 °С), что обеспечивает возможность проведения при их изготовлении высокотемпературных операций (до 250 °С, без видимых признаков коробления шаблонов). Всё вышесказанное позволяет считать суграфит одним из наиболее перспективных материалов для изготовления рентгенолитографических шаблонов.

Из резиста SU-8 с графитовым наполнителем по вышеописанной технологии также получали (содержащие запрессованные диски из алюминиевого сплава) заготовки, которые экспонировались жестким рентгеновским излучением на ЛИГА-станции (с двух сторон для создания в суграфите однородной экспозиционной дозы $D \geq 50$ Дж/см^3). Затем проводилась полимеризация суграфита путем его термообработки (заготовки располагались между плоскошлифованными поверхностями стальных плит, осуществлялись плавный подъем температуры до 280 °С и последующее плавное охлаждение). Далее заготовки (как и аналогичные заготовки из эпоксидографита) следовали по вышеописанному технологическому маршруту, но толщина резистивного слоя была уменьшена до ~ 25 мкм (поскольку проводилась отработка технологии изготовления рентгеношаблонов). Его экспонирование производилось на ЛИГА-станции, работающей в режиме рентгенолучевого генератора изображения [11]. Для повышения рентгенопрозрачности и контрастности рентгеношаблонов резистивная маска на последнем этапе изготовления удалялась, что иллюстрирует рис. 4.

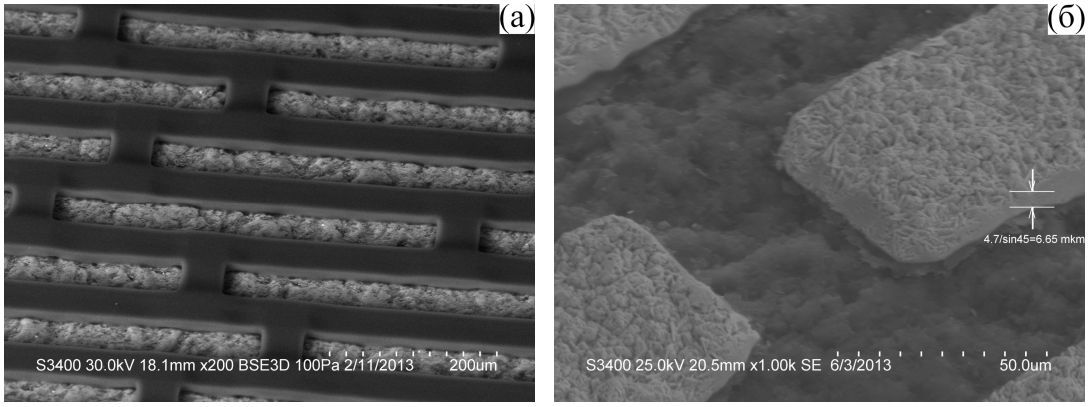


Рис. 4. РЭМ-изображение (угол 45º) фрагмента поверхности рентгеношаблона со сформированным золотым маскирующим слоем: с неудаленной резистивной маской (*а*), после ее удаления (*б*). Средняя толщина осажденного золотого маскирующего слоя составляет ~ 6,2 мкм

3. СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕНЫХ РЕНТГЕНОШАБЛОНОВ С АНАЛОГАМИ

В спектральном интервале $\lambda \approx 0{,}5 \div 11$ Å зависимости коэффициентов рентгенопрозрачности наиболее часто используемых нами материалов (в скобках указана их удельная плотность в г/см^3): резистов ПММА (1,19) и SU-8 (1,22), эпоксидографита (1,5), стеклоуглерода (1,5) и пленки ПЭЭК (полиэфирэфиркетон) (1,3) при равенстве их толщин практически совпадают. На рис. 5 приведены пять универсальных кривых, описывающих спектральную рентгенопрозрачность любого из вышеперечисленных материалов толщиной 10, 40, 80, 120 и 500 мкм. Поскольку все перечисленные в данной статье шаблоны имеют достаточно высокую прозрачность в ультракоротком диапазоне длин волн (0,5÷3 Å), то имеет смысл провести их сравнение в коротком диапазоне (3÷7 Å). В качестве аналогов для сравнения взяты шаблоны с несущими мембранами из кремния и из графитовой фольги (толщиной 220 мкм и удельной плотностью ~ 0,8 г/см^3), которая по рентгенопрозрачности соответствует слою суграфита толщиной ~ 120 мкм. На рис. 6 приведена диаграмма, содержащая усредненные расчетные (для рабочей плоскости установки рентгенолитографии на накопителе ВЭПП-4М [4], работающем на энер-

гии E ≈ 2 ГэВ, при реализации сканирования облучаемого образца в вертикальной плоскости с амплитудой ± 3 см, без применения дополнительной фильтрации СИ, для этих же условий рассчитаны таблица и нижеследующие диаграммы) графики спектральных зависимостей приведенной интенсивности СИ после прохождения полимерной пленки ПЭЭК и различных несущих мембран (рабочий объем установки отделён от канала вывода СИ окном из пленки ПЭЭК толщиной 8 мкм, спектр СИ после прохождения которой близок к спектру, имевшему место на станции рентгенолитографии [7]). Диаграмма иллюстрирует, что в диапазоне 2÷7 Å расчетные кривые для несущих мембран из суграфита толщиной от 40 до 120 мкм, располагаются между кривыми, соответствующими мембранам из кремния и из графитовой фольги. Таким образом, заранее ориентируясь на определенную толщину суграфитовой мембраны и используя имеющуюся у большинства источников СИ возможность изменения генерируемого спектра, можно осуществлять подбор спектра экспонирующего излучения с учетом различных параметров облучаемой системы, таких, как толщина формируемой резистивной маски, спектральное положение краев поглощения материала подложки и пр.

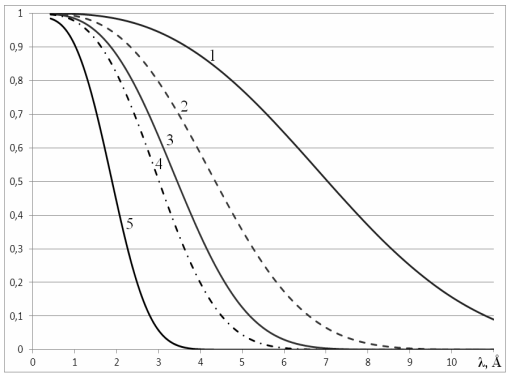


Рис. 5. Спектральная рентгенопрозрачность (резистов ПММА и SU-8, стеклоуглерода, эпоксидографита, суграфита, пленки ПЭЭК) следующих толщин:

10 мкм – кривая 1, 40 мкм – 2, 80 мкм – 3, 120 мкм – 4, 500 мкм – 5. Из графиков следует, что шаблоны с несущими мембранами из стеклоуглерода (суграфита, эпоксидографита) толщиной ~ 500 мкм могут использоваться только в ультракоротком диапазоне длин волн, т. е. только как ЛИГА-шаблоны. На этой и всех последующих диаграммах кривые, относящиеся к эпоксидографитовой (или суграфитовой) несущим мембранам толщиной 40 мкм, выделены пунктирной линией.

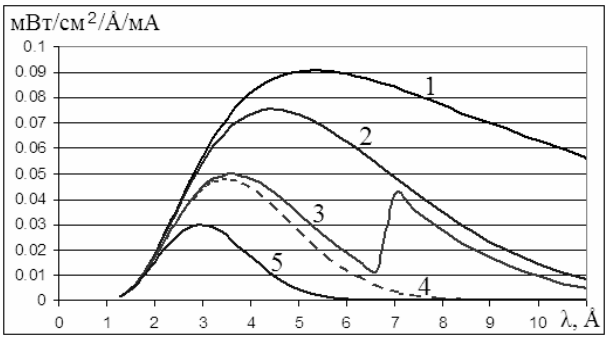


Рис. 6. Спектральная зависимость приведенной падающей плотности мощности СИ в рабочей плоскости установки:

исходная – 1, после прохождения разделительного окна (пленки ПЭЭК) – 2, далее после разделительного окна и одной из несущих мембран: кремниевой (2 мкм) – 3, эпоксидографитовой (40 мкм) – 4, графитовой фольги (220 мкм) – 5

Вследствие более сильного поглощения слоем рентгенорезиста «мягкой» составляющей падающего СИ спектральные зависимости поглощаемой удельной плотности мощности заметно смещаются в более длинноволновую область (рис. 7) по сравнению со спектром падающей плотности мощности СИ (рис. 6). В этой связи следует отметить, что значительное расширение диапазона рентгенопрозрачности несущих мембран, применяемых для глубокой рентгенолитографии шаблонов, на диапазон средних длин волн не всегда целесообразно, поскольку может привести к сильным перепадам экспозиционной дозы по глубине резиста при реализации глубокой рентгеновской литографии (см. рис. 8). Так, из-за относительно большого содержания в пучке СИ «мягкой компоненты» при применении кремниевого шаблона отношение экспозиционных доз на поверхности и на глубине 20 мкм составляет ~ 5 (являющимся предельным при использовании ПММА [12]), в то время как для суграфитового шаблона такое соотношение имеет место для глубины ~ 85 мкм.

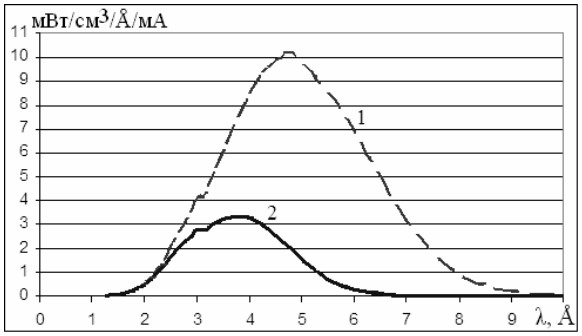


Рис. 7. Приведенная поглощаемая в резисте удельная плотность мощности СИ после прохождения разделительного окна и одной из несущих мембран:

из суграфита – 1, из графитовой фольги – 2

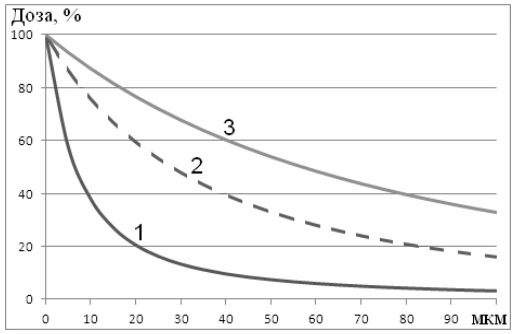


Рис. 8. Зависимость относительной удельной поглощаемой мощности СИ от глубины его проникновения в резист ПММА в случае применения шаблонов с несущими мембранами из:

кремния (2 мкм) – 1, суграфита (40 мкм) – 2, графитовой фольги (220 мкм) – 3. Видно, что (без дополнительной фильтрации СИ) при помощи кремниевого шаблона могут быть надежно сформированы резистивные маски толщиной до 20 мкм, а при помощи суграфитового шаблона до ~ 85 мкм

Очевидными преимуществами суграфитового шаблона по сравнению, например, с кремниевым или титановым шаблонами, вытекающими из того, что он выполнен в основном из углеводородного полимера (резиста SU-8) с углеродным (графитовым) наполнителем, являются высокая рентгенопрозрачность и практически полное отсутствие флуоресценции (что снимает ряд проблем как при его изготовлении рентгенолитографическими способами, так и при его использовании). Дополнительным преимуществом такого шаблона, следующим из его электропроводности и прочности, является возможность использовать при проведении экспонирования электростатического прижима (его суть в том, что между электропроводящими (или содержащими электропроводящие слои) элементами облучаемой системы (шаблоном и подложкой) размещается тонкая (~ 10 мкм) полимерная диэлектрическая пленка, а на элементы кратковременно подается высокое напряжение (меньше напряжения пробоя), вследствие этого на их рабочих поверхностях скапливаются разноименные заряды) в совокупности приводит к следующим позитивным моментам: поток вторичных электронов, выбиваемых СИ из шаблона, полностью поглощается полимерной пленкой [13]; облучаемые элементы надежно фиксируются между собой и при проведении сканирования их относительные сдвиги минимизированы; зазор между рабочей поверхностью шаблона и «свободной» поверхностью рентгенорезиста практически равен толщине полимерной пленки на всем рабочем поле, что задает верхний предел дифракционного размытия изображения и улучшает теплообмен между шаблоном и подложкой (идет сброс тепла с шаблона, наиболее нагреваемого СИ, на обрабатываемую подложку, имеющую хороший тепловой контакт с металлическим столиком и далее с «подвижкой», что наряду с созданием внутри камеры экспонирования гелиевой атмосферы ограничивает температурные деформации маскирующего слоя шаблона) [4].

Для представленного на рис. 6 спектра падающего СИ в таблице приведены рассчитанные для резиста SU-8, различных типов шаблонов и условий экспонирования (использование для реализации электростатического прижима полимерной пленки) следующие величины: h – толщина золотого маскирующего слоя, обеспечивающая контрастность шаблона, равную 40; t – приведенное (т. е. нормированное на величину тока накопителя I = 1 мА) время экспозиции поверхностного слоя резиста. К сведению, в этом спектре расчетная контрастность изготовленного рентгеношаблона (фотографии фрагментов на рис. 4) с несущей мембраной из суграфита толщиной ~ 50 мкм и со средней толщиной золотого слоя ~ 6,2 (6,2 ± 3,2) мкм составляет ~ 5000 (для участков с минимальной толщиной слоя ~ 3 мкм контрастность ~ 350). Поскольку резисты характеризуются своими величинами оптимальных экспозиционных доз

(кДж/см^3): SU-8 ~ $5\cdot10^{-2}$, ПММА ~ 2÷10, то приведенные времена экспозиции для них будут заметно различаться (для ПММА они более чем в 40 раз больше, чем для SU-8).

Характеристики рентгеношаблонов

Режим работы ВЭПП-4М	E = 2 ГэВ			
Наличие пленки ПЭЭК (~ 8 мкм)	нет		есть	
Материал и толщина несущей мембраны	*h*, мкм	*t*, мин	*h*, мкм	*t*, мин
Кремний (2 мкм)	1,1	7,5	1,2	16
Эпоксидографит (40 мкм)	1,5	39	1,5	49
Графитовая фольга (220 мкм)	1,8	160	1,8	180

Приведенные в таблице величины показывают, что при использовании шаблонов данной конструкции в качестве переходных шаблонов для достижения их контрастности, равной 40, вполне достаточно толщины золотого маскирующего слоя ≤ 1,8 мкм даже в случае толстой (~ 120 мкм) несущей мембраны, а переход с толстых мембран на тонкие (~ 50 мкм) позволит существенно (~ в 4 раза, что следует из отношения площадей под кривыми на рис. 7) уменьшить время экспозиции рентгенорезистов, которое характеризуется вполне приемлемыми величинами даже для толстых мембран (с учетом того факта, что средний ток накопителя $I_{ср} \approx 10$ мА).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря своим уникальным свойствам суграфит является весьма перспективным материалом для изготовления из него рентгеношаблонов и ЛИГА-шаблонов. Содержащие толстое (~ 1,5 мм) опорное кольцо и тонкую (40÷120 мкм) несущую мембрану суграфитовые шаблоны и технология их изготовления характеризуются следующими позитивными моментами:

- суграфит является высоко химически-стойким материалом как в кислотных, так и в щелочных средах, легко поддающимся механической обработке и характеризующимся высоким уровнем адгезии к напыляемым металлическим пленкам и к резистивным слоям;
- суграфит характеризуется относительно высоким уровнем температурной стойкости (температурный предел разрушения ~ 380 °C), обеспечивающим возможность проведение различных высокотемпературных операций (до 250 °C);
- технология изготовления достаточно проста, содержит относительно малое количество технологических операций и для её осуществления не требуется высокотехнологичного оборудования и дорогостоящих дефицитных материалов;
- себестоимость изготовленных по данной технологии рентгеношаблонов и ЛИГА-шаблонов низка;
- шаблоны геометрически стабильны, характеризуются практическим отсутствием флуоресценции по всем диапазоне рентгеновского излучения, рентгенопрозрачны, рентгеностойки, электропроводящи и достаточно прочны, последние качества позволяют использовать при проведении рентгенолитографии электростатический прижим, применение которого улучшает качество литографии, главным образом, благодаря существенному снижению тепловых деформаций маскирующего слоя.

Повышение рентгенопрозрачности несущей мембраны путем уменьшения её толщины до 40÷80 мкм позволит использовать данные шаблоны в интервале коротких ($\lambda \approx 3\div7$ Å) длин волн в качестве переходных шаблонов для формирования резистивной маски при изготовлении ЛИГА-шаблонов традиционным способом, а также расширит диапазон материалов, используемых для обрабатываемых подложек (благодаря подбору оптимального спектра СИ и снижению уровня флуоресценции с их поверхности в процессе облучения), что обеспечит возможность создания простым способом микрорельефов литьевых или пресс-форм ориентированных, например, на выпуск микрофлюидных аналитических чипов (биочипов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Васильев А.А.** Микросистемная техника. Материалы, технологии, элементная база / А.А. Васильев, В.В. Лучинин, П.П. Мальцев // Электронные компоненты. – 2000. – № 4. – С. 3–11.

[2] **Ли С.Б.** Обзор публикаций по LIGA процессу / С.Б. Ли. – Новосибирск, препринт 90-125 ИЯФ СО АН СССР, 1990. – 27 с.

[3] LIGA-технология и ее применение / Ин-т ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. – Новосибирск, 1992. – 27 с.

[4] **Генцелев А.Н.** Установка для мягкой рентгеновской литографии на ВЭПП-4М / А.Н. Генцелев, Б.Г. Гольденберг, А.Д. Николенко и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2013. – № 7. – С. 96–102.

[5] **Петрова Е.В.** Создание рентгеношаблонов на толстой подложке для глубокой рентгеновской литографии / Е.В. Петрова, Б.Г. Гольденберг, В.И. Кондратьев и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2007. – № 6. – С. 14–19.

[6] **Артамонова Л.Д.** Рентгеновские шаблоны для рентгенолитографии и LIGA-технологии / Л.Д. Артамонова, Н.И. Гаврюшкина, В.Н. Гаштольд и др. // Отчет Сибирского международного центра синхротронного излучения за 1991–1992 гг. Ин-т ядерной физики им. Будкера СО РАН. – Новосибирск, 1993. – С. 229–231.

[7] **Artamonova L.D.** X-ray lithography at the VEPP-3 storage ring / L.D. Artamonova, A.N. Gentselev, G.A. Deis et al. // Review of scientific instruments. – 1992. – Vol. 63. – № 1, pt 2A. – P. 764–766.

[8] **Генцелев А.Н.** LIGA-станция на накопителе ВЭПП-3 / А.Н. Генцелев, Б.Г. Гольденберг, В.И. Кондратьев и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2002. – № 9. – С. 30–35.

[9] **Генцелев А.Н.** Использование графитовой фольги в качестве несущей мембраны ЛИГА-шаблонов / А.Н. Генцелев, С.К. Голубцов, Б.Г. Гольденберг и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2011. – № 8. – С. 19–24.

[10] Патент на изобретение № 2431881, Российская федерация, G03G 15/00, Способ изготовления LIGA-шаблона, Генцелев А.Н., Кондратьев В.И., Зелинский А.Г., 26.04.2010, 20.10.2011, Бюл. №29, С. 958, приоритет от 26.04.2010 г.

[11] **Гольденберг Б.Г.** Микропучковый рентгенолитограф для прямого формирования глубоких LIGA-структур / Б.Г. Гольденберг, Е.Ф. Резникова, А.Г. Лемзяков и др. // Автометрия. – 2013. – № 1. – С. 96–102.

[12] **Malek K.** Deep X-ray lithography with a tunable wavelength shifter at CAMD / K. Malek, V. Saile, H. Manohara, B. Craft // J. Synchrotron Radiation. – 1998. – Vol. 5. – P. 1095–1098.

[13] Патент на изобретение №2350994, Российская федерация, G03B 42/02, Способ проведения теневой трафаретной рентгенолитографии, Генцелев А.Н., Гольденберг Б.Г., Елисеев В.С. и др., 28.05.2007, 27.03.2009, Бюл. № 9. – С. 1023, приоритет от 28.05.2007 г.

REFERENCES

[1] Vasil'ev A.A., Luchinin V.V., Mal'cev P.P. Mikrosistemnaja tehnika. Materialy, tehnologii, elementarnaja baza. Elektronnye komponenty, 2000, no. 4. pp. 3–11.

[2] Li S.B. Obzor publikacij po LIGA procesu. Novosibirsk, preprint 90-125 IJaF SO AN SSSR, 1990. – 27 p.

[3] LIGA-tehnologija i ee primenenie / In-t jadernoj fiziki im. G.I. Budkera SO RAN. Novosibirsk, 1992, 27 p.

[4] Gencelev A.N., Gol'denberg B.G., Nikolenko A.D. i dr. Ustanovka dlja mjagkoj rentgenovskoj litografii na VEPP-4M // Poverhnost'. Rentgen., sinhrotr. i nejtron. Issled. 2013, no. 7, pp. 96–102.

[5] Petrova E.V., Gol'denberg B.G., Kondrat'ev V.I. i dr. Sozdanie rentgenoshablonov na tolstoj podlozhke dlja glubokoi rentgenovskoj litografii // Poverhnost'. Rentgen., sinhrotr. i nejtron. issled. 2007, no. 6, pp. 14–19.

[6] Artamonova L.D., Gavrjushkina N.I., Gashtol'd V.N. i dr. Rentgenovskie shablony dlja rentgenolitografii i LIGA-tehnologii // Otchet Sibirskogo mezhdunarodnogo centra sinhrotronnogo izluchenija za 1991–1992. In-t jadernoj fiziki im. G.I. Budkera SO RAN. Novosibirsk, 1993, pp. 229–231.

[7] Artamonova L.D., Gentselev A.N., Deis G.A. et al. X-ray lithography at the VEPP-3 storage ring // Review of scientific instruments, 1992, v. 63, no. 1, pt 2A, pp. 764–766.

[8] Gencelev A.N., Gol'denberg B.G., Kondrat'ev V.I. i dr. LIGA-stancija na nakopitele VEPP3 // Poverhnost'. Rentgen., sinhrotr. i nejtron. issled. 2002, no. 9, pp. 30–35.

[9] Gencelev A.N., Golubcov S.K., Gol'denberg B.G. i dr. Ispolzovanie grafitovoj fol'gi v kachestve nesushchej membrany LIGA-shablonov // Poverhnost'. Rentgen., sinhrotr. i nejtron. issled. 2011, no. 8, pp. 19–24.

[10] Patent na izobretenie no 2431881, Rossijskaja federacija, G03G 15/00, Sposob izgotovlenija LIGA-shablona, Г Gencelev A.N., Kondrat'ev V.I., Zelinskij A.G., 26.04.2010, 20.10.2011, Bjul, no. 29, p. 958, prioritet ot 26.04.2010.

[11] Gol'denberg B.G., Reznikova E.F., Lemzjakov A.G. i dr. Micropuchkovyj rentgenolitograf dlja prjamogo formirovanija glubokih LIGA-struktur // Avtometrija. 2013, no. 1, pp. 96–102.

[12] Malek K., Saile V., Manohara H., Craft. B. Deep X-ray lithography with a tunable wavelength shifter at CAMD // J. Synchrotron Radiation. 1998, v. 5, pp. 1095–1098.

[13] Patent na izobretenie no 2350994, Rossijskaja federacija, G03B 42/02, Sposob provedenija tenevoj trafaretnoi rentgenolitografii, Gencelev A.N., Gol'denberg B.G., Eliseev V.S. i dr., 28.05.2007, 27.03.2009, Bjul. No/ 9, p. 1023, prioritet ot 28.05.2007.

Генцелев Александр Николаевич, ведущий инженер Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Основное направление научных исследований – рентгенолитография и ЛИГА-технология. Имеет более 35 публикаций. E-mail: ang1209@mail.ru

Зелинский Александр Георгиевич, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии твердого тела и механохимии СО РАН. Основное направление научных исследований – гальванотехника и гальванопластика. Имеет более 90 публикаций. E-mail: azelinsky@solid.nsc.ru

Кондратьев Владимир Иванович, научный сотрудник. Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Основное направление научных исследований – применение рентгеновского излучения в прикладных и научно-исследовательских целях. Имеет более 40 публикаций. E-mail: v.i.kondratyev@inp.nsk.su

A.N. Gentselev, A.G. Zelinsky, V.I. Kondratyev

Masks for a deep X-ray lithography

A simple technology fabrication of X-ray masks characterized by high level of transparency, geometrical stability and durability is described. Masks have thin (~ 40-120 microns) bearing membranes, manufactured of a new material - epoxygraphite (epoxy pitch with graphite granules). Version of this material, is sugraphite where negative rezist SU-8 is used instead of epoxy pitch. X-ray masks made of sugraphite are same externally and according to the main lithographic characteristics as X-ray masks made of epoksygrafite, but they have a number of additional benefits, namely, they are characterized by higher levels of radiation and temperature firmness (a temperature limit of their destruction ~ 380 °C) that provides possibility of carrying out with them high-temperature operations (to 250 °C). The additional benefit of X-ray masks made of epoksygrafite following from their conductivity and durability is possibility of use an electrostatic chuck that allows to improve quality of formed topological drawing considerably. The first results of application of such masks to scanning X-ray lithography in the synchrotron radiation (spectral range $\lambda \approx 0.5 \div 3.0$ Å) are given. The prospects of application of such masks in softer range $\lambda \approx 3 \div 7$ Å are considered. It will allow to use them for formation of a resistive mask at production LIGA-masks, and also will expand the range of the materials used for substrates (thanks to selection of an irradiate spectrum and decrease in level of fluorescence from a working surface at their radiation). Estimated applied field of x-ray masks of this design are formations of microreliefs at creation compression molds and products of microsystem equipment.

Key words: X-ray lithography, X-ray mask, LIGA technique, LIGA mask, bearing membrane, synchrotron radiation, resist, topological pattern, contrast.