

Рентгеношаблоны с многослойной несущей мембраной

А. Н. Генцелев, Б. Г. Гольденберг, А. Г. Лемзяков

Описаны конструкция и способ изготовления высококонтрастных в рентгеновском спектральном поддиапазоне коротких длин волн ($\lambda \approx 2,5 \div 5 \text{ \AA}$) рентгеношаблонов, являющихся инструментом для формирования резистивных масок толщиной до 250 мкм из негативных и до ~ 1 мкм из позитивных резистов. Данные рентгеношаблоны могут быть также использованы в поддиапазоне средних длин волн ($8 \div 10 \text{ \AA}$) и в качестве переходных шаблонов при изготовлении LIGA-шаблонов, применяемых в поддиапазоне ультракоротких длин волн ($0,5 \div 3 \text{ \AA}$). Способ изготовления базируется на кремниевой планарной технологии. Были изготовлены два вида шаблонов с преимущественно алюминиевой мембраной. Проведенная работа показывает, что, базируясь на данной технологии, можно изготавливать рентгеношаблоны и LIGA-шаблоны со слоистыми несущими мембранами, выполненными из слоёв сравнительно легких материалов типа титана, алюминия, кремния и т. п., толщины которых могут варьироваться в зависимости от предназначения шаблона.

Ключевые слова: рентгенолитографические маски, рентгеношаблоны, LIGA-шаблоны, LIGA-технология, мягкая рентгеновская литография.

Ссылка: Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г., Лемзяков А. Г. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 103.

Reference: A. N. Gentsselev, B. G. Goldenberg, and A. G. Lemzyakov, Applied Physics, No. 5, 103 (2020).

Введение

В основе наблюдаемого в последние десятилетия бурного роста на рынке изделий микросистемной техники (МСТ) и, в частности, микроэлектромеханических систем (МЭМС), «лежит активное использование классических принципов механики, оптики, акустики, электротехники, теплотехники, химии и биологии, интегрируемых в конструктивные решения на микроуровне с широким использованием материаловедческой и техно-

логической 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 микроэлектронных элементов, в отличие от композиций классической микроэлектроники, может превосходить их латеральные размеры в плоскости, т. е. возникает необходимость формирования

Генцелев Александр Николаевич, вед. инженер.

Гольденберг Борис Григорьевич, с.н.с., к.т.н.

Лемзяков Алексей Георгиевич, м.н.с.

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

E-mail: ang1209@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03 сентября 2020 г.

© Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г., Лемзяков А. Г., 2020

трехмерных «3D»... структур» [1]. Кроме того, быстродействие многих полупроводниковых приборов и интегральных схем может быть существенно повышено путем уменьшения сопротивления их элементов и подводящих проводников, что при неизменности их латеральных размеров может быть получено путём увеличения их высоты (толщины), а это обеспечивается посредством проведения литографии по толстым слоям резиста, в частности, одним из таких способов является глубокая рентгеновская литография.

Используемый в рентгенолитографии диапазон длин волн ($0,5 \div 50 \text{ \AA}$) можно условно разбить на поддиапазоны *ультракоротких* ($0,5 \div 3 \text{ \AA}$), *коротких* ($3 \div 7 \text{ \AA}$), *средних* ($7 \div 10 \text{ \AA}$) и *длинных* ($10 \div 50 \text{ \AA}$) волн. Каждый из поддиапазонов имеет свои особенности и для целей глубокой рентгенолитографии используются первые два, что обусловлено спектральной зависимостью длины поглощения рентгеновского излучения в рентгенорезистах, представляющих собой, как правило, углеводородные полимеры [2].

Типичная конструкция рентгеношаблонов представляет собой, как правило, сравнительно тонкую (толщиной в единицы микрометров) фиксирующуюся на опорном кольце рентгенопрозрачную несущую мембрану, выполненную из материалов с малым атомным весом, на рабочей поверхности которой формируется маскирующий слой путем гальванического осаждения тяжелых металлов через резистивную маску [3–11]. Известно достаточно большое количество конструкций рентгеношаблонов и технологий их изготовления, отличающихся различными сочетаниями материалов опорных колец, несущих мембран и маскирующих слоев. Каждый тип шаблонов имеет свои достоинства и недостатки и характеризуется такими параметрами, как: степень рентгенопрозрачности несущей мембраны, контраст шаблона, продолжительность срока эксплуатации, качество переноса маскирующего рисунка, сложность технологии изготовления и др.

Постановка задачи

В работах, проводившихся в Центре Ядерных Исследований (Карлсруэ, Германия),

в качестве несущих мембран рентгеношаблонов для поддиапазона ($\lambda \approx 3 \div 10 \text{ \AA}$) использовались бериллиевая фольга (толщиной $\sim 10 \div 30 \text{ мкм}$) и титановая плёнка ($\sim 2 \div 3 \text{ мкм}$), формируемая посредством магнетронного напыления [5]. Однако, исходная бериллиевая фольга, получаемая спеканием и прокатом, характеризуется существенным содержанием инородных примесей и достаточно шероховатой поверхностью [7], а её полировка трудоёмка и требует больших финансовых затрат, что связано с токсичностью данного материала.

Титановые пленки, получаемые магнетронным напылением [5, 6], характеризуются внутренним напряжением, величина которого зависит от многих факторов: от давления в рабочей камере, от материала подложки, на которую производится напыление, её температуры и величины сдвигового электрического напряжения на ней, от скорости осаждения и пр. Технология изготовления титановых шаблонов достаточно сложна и требует проведения большого объема экспериментальных изысканий с целью минимизации внутреннего напряжения напыляемой титановой пленки, обеспечения её равномерной приклейки к опорному кольцу, бездефектного отделения от подложки и пр.

Алюминий и его окисел – Al_2O_3 , как конструктивные материалы для создания тонких несущих мембран, также не нашли широкого применения, поскольку мембраны на их основе характеризуются большой пористостью поверхности и малой прочностью [8, 9].

В проводившихся в Сибирском центре синхротронного и терагерцевого излучения (СЦСТИ) работах на станции рентгеновской литографии (спектр поглощаемого СИ $\sim 3 \div 10 \text{ \AA}$) в основном использовались шаблоны с несущими мембранами в виде тонкой ($\sim 2\text{--}3 \text{ мкм}$) пленки кремния [10, 11]. Основными достоинствами кремниевых шаблонов были высокое качество их рабочей поверхности, химическая стабильность, высокая рентгенопрозрачность несущей мембраны, а также универсальность технологии их изготовления, поскольку она в основном содержала хорошо известные процессы, используемые в полупроводниковом производстве. Их недостатками являлись высокая себестоимость, хрупкость несущей мембраны и сложность многооперационной

технология изготовления. Формирование несущей мембраны производилось путем создания стоп-слоя методом термического легирования бором кремниевой пластины с обеих сторон на глубину $\sim 2\div 3$ мкм (т. е. на толщину будущей мембраны) и формирования рентгенопрозрачного окна путем жидкостного селективного травления с тыльной стороны и удаления центральной части пластины на одном из последних этапов изготовления шаблона. Это требовало создания нескольких защитных слоев для топологического рисунка, расположенного на рабочей поверхности шаблона и последующего их удаления после формирования несущей мембраны, что существенно усложняло технологию изготовления шаблона.

Данная работа посвящена поиску оптимальной конструкции рентгеношаблонов и технологии их изготовления, которые снимают вышеуказанные проблемы.

Конструкция рентгеношаблонов и технология их изготовления

В качестве исходной заготовки рентгеношаблона использовалась кремниевая пластина (ориентацией (100), $\varnothing 76$ мм). Способ изготовления базируется на кремниевой планарной технологии. Были изготовлены два вида шаблонов с преимущественно алюминиевой мембраной путем реализации следующей последовательности операций:

1. Последовательное магнетронное напыление на рабочую поверхность Si пластины слоев: Al (~ 5 мкм), Ti (~ 1 мкм) и Ni ($\sim 0,02$ мкм). Напыление Ti производилось с подачи на пластины постоянного отрицательного напряжения -100 В для снижения внутренних напряжений титанового слоя, как это рекомендовано в работе [5]. Слой Ti является буферным и блокирует взаимодействие электролита с химически активным алюминием при последующем проведении операций гальванического осаждения золота.

2. Формирование посредством контактной фотолитографии при помощи установки совмещения и экспонирования ЭМ-5006 (в режиме вакуумный контакт) резистивной маски из позитивного резиста SPR220-7.0, толщиной $\sim 14\div 16$ мкм.

3. Гальваническое осаждение золотого маскирующего слоя на рабочую поверхность пластины через резистивную маску.

4. Жидкостное удаление резистивной маски (рабочая поверхность шаблона после проведения этой операции см. рис. 1).

5. Формирование рентгенопрозрачных окон, т. е. удаление участков кремниевой пластины путем плазмохимического травления с тыльной стороны (рис. 2): а) полное удаление до алюминиевого стоп-слоя и в этом случае толщина несущей мембраны полностью определяется напыленными на Si пластину слоями металлов; б) остановка травления в непосредственной близости от стоп-слоя, в конкретном описываемом случае был оставлен слой кремния толщиной $2 \pm 0,5$ мкм.

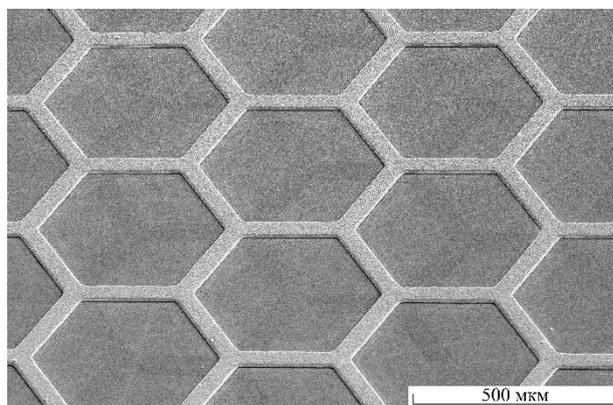


Рис. 1. СЭМ-фото (угол наблюдения 45°) фрагмента расположенного на поверхности подложки золотого маскирующего слоя (~ 12 мкм) после удаления резиста.



Рис. 2. Схема, иллюстрирующая процесс формирования рентгенопрозрачных окон посредством плазмохимического травления, где кремниевая подложка – 1 с напыленными слоями – 2 и сформированной из золота топологией – 3 располагается на охлаждаемом столике в посадочном месте дюралюминиевого трафарета – 4.

Поскольку исходная толщина пластины и скорость её травления известны, а процесс может быть оставлен в любой момент (ориен-

тируясь на расчеты), то это позволяет получать заданную толщину несущей мембраны шаблона без стоп-слоя с точностью $\pm 0,5$ мкм, при условии проведения предварительного отбора плоскопараллельных кремниевых пластин. Увеличение толщины кремниевого слоя существенно увеличивает прочность несущей мембраны, что позволяет изготавливать по данной технологии прочные LIGA-шаблоны с высоким процентом выхода годных и высокой рентгенопрозрачностью в поддиапазоне ультракоротких ($0,5 \div 3$ Å) длин волн.

Установка, на которой производилась отработка режимов формирования несущей мембраны рентгеношаблона, не оснащена интерферометрическим датчиком, позволяющим отслеживать процесс травления в режиме «in-situ», но такая опция для данного типа установок существует и в этом случае процесс может контролироваться по показаниям такого датчика. Форма окон задавалась специально изготовленным из дюралюминия трафаретом, через который производилось травление, и в первом случае он содержал 4 окна диаметром 17 мм, а во втором – одно окно в виде квадрата 40×40 мм² со скругленными углами. Графики спектрального пропускания вышеуказанных несущих мембран приведены на рис. 3. В итоге были получены два образца шаблонов различающиеся количеством слоев несущей мембраны и формами рентгенопрозрачных окон. Следует отметить, что при формировании таким способом окон величина подтравы не имела для нас принципиального значения и она не превышала толщины кремниевой пластины, т. е. не более 0,35 мм.

Операция плазмохимического травления кремния производилось на установке Plasmalab 80 Plus с источником индуктивно-связанной плазмы (ICP) в циклическом режиме, путем многократного (~175 раз) повторения двух стадий: травление – 48 сек и охлаждение – 2 мин. Травление осуществлялось при следующих параметрах: давление $p = 30$ мТорр; скорости подачи газов: гексафторида серы (SF₆) – 50 см³/мин, аргона (Ar) – 5 см³/мин; подводимые мощности: RF (ВЧ-генератор плазмы) ~70 Вт, ICP ~500 Вт. Отвод тепла от образца происходил двумя путями: через теплоотвод к охлаждаемому столику (образец имеет механический контакт со сто-

ликом, рис. 2) и через теплоперенос в среде газа аргона (на стадии охлаждения поток активных газов перекрывается и существенно до 50 см³/мин (т. е. в 10 раз) увеличивается поток аргона). Температура столика контролируется датчиком и исходная температура старта цикла $T \approx 5$ °С. Поскольку во время травления к образцу подводится мощность ~570 Вт, то образец греется и соответственно поднимается температура столика, которая затем снижается на стадии охлаждения до стартовой ($T \approx 5$ °С).

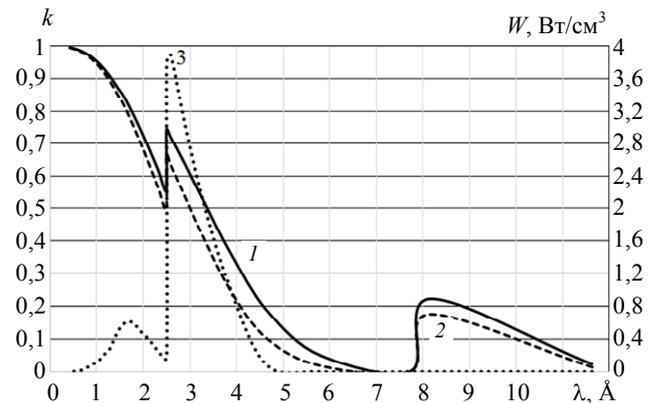


Рис. 3. Расчетные спектры: рентгенопрозрачности несущей мембраны, содержащей: слои Ti (1 мкм) и Al (5 мкм) – линия 1; слои Ti (1 мкм), Al (5 мкм) и Si (2 мкм) – 2 (скачки вблизи 2,5 Å и 8 Å обусловлены K-краями поглощения Ti и Al, соответственно) и плотности мощности СИ, поглощаемой приповерхностным слоем резиста SU-8 при вышеуказанных условиях экспонирования и электронном токе в накопительном кольце ВЭПП-3М, равном 100 мА – 3 (шкала справа).

Данные рентгеношаблоны могут использоваться в качестве переходных шаблонов для изготовления LIGA-шаблонов. Так на LIGA-станции СЦСТИ [12, 13] через рентгеношаблон, несущая мембрана которого содержала слои: Ti (~1 мкм), Al (~5 мкм) и Si (~2 ± 0,5 мкм), было проведено экспонирование с центральным поглотителем шириной 16 мм и титановым фильтром толщиной 10 мкм [13] в сканирующем режиме (с амплитудой сканирования ±3 см) (спектр см. на рис. 3), при этом контраст данного шаблона на дне резиста (т. е. на поверхности резиста, соприкасающейся с кремниевой подложкой) составлял ~250. Это очень высокий показатель контраста, позволяющий работать с толстыми слоями негативных резистов, типа SU-8, особенностью которых является образование нерастворимой

резистивной корки при облучении сравнительно незначительной экспозиционной дозой (пороговая доза её образования ~ 2 Дж/см³, что составляет ≤ 5 % от типичной дозы ($\sim 40 \div 100$ Дж/см³) на поверхности резиста [14, 15]). В результате была получена резистивная маска см. рис. 4.

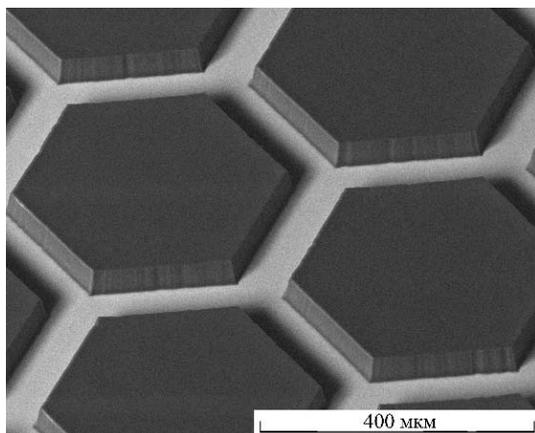


Рис. 4. СЭМ-фото (угол наблюдения 45°) фрагмента сформированной на поверхности кремниевой пластины резистивной маски из SU-8, толщиной ~ 50 мкм, при помощи изготовленного рентгеношаблона с многослойной несущей мембраной, как иллюстрация одного из этапов изготовления LIGA-шаблона.

Скорость травления кремния (т. е. толщина слоя, удаляемого за один цикл) ~ 2 мкм/цикл, а алюминия $\sim 0,5 \div 1$ нм/цикл, таким образом слой алюминия может выполнять функции стоп-слоя при формировании несущей мембраны, как это имело место в первом случае (см. пункт 5 описания технологии). Полученные рентгеношаблоны не исследовались на внутренние напряжения сформированных мембран и на возможную величину прогиба рабочей поверхности, что может быть предметом дальнейших исследований.

Проведенная работа показывает, что, базируясь на кремниевой планарной технологии, можно изготовить рентгеношаблоны со слоистыми несущими мембранами (из слоёв титана, алюминия и кремния, толщины которых могут варьироваться) путем проведения на финальной стадии утонения методом плазмохимического травления кремниевой пластины с тыльной стороны в областях формирования рентгенопрозрачных окон и таким образом могут быть изготовлены как рентгеношаблоны, прозрачные в поддиапазоне коротких

($2,5 \div 5$ Å) и частично прозрачные в поддиапазоне средних ($8 \div 10$ Å) длин волн, так и LIGA-шаблоны, например, с преимущественно кремниевой мембраной [16], прозрачные в поддиапазонах ультракоротких ($0,5 \div 3$ Å) длин волн. LIGA-шаблоны при этом могут иметь более толстые и более прочные несущие мембраны и при этом достаточно рентгенопрозрачные в указанном поддиапазоне рентгеновского излучения.

По оценкам изготовленные таким способом топологические рисунки рентгеношаблонов могут содержать элементы с минимальными размерами ~ 1 мкм, которые могут быть перенесены в слой рентгенорезиста посредством рентгеновской литографии [17].

Заключение

Данная работа демонстрирует, что, базируясь на кремниевой планарной технологии, можно, используя вышеописанный способ, изготавливать высококонтрастные в рентгеновском спектральном поддиапазоне коротких длин волн ($\lambda \approx 2,5 \div 5$ Å) рентгеношаблоны (рентгенолитографические маски), являющихся инструментом для формирования резистивных масок толщиной до ~ 250 мкм из негативных резистов и до ~ 1 мм из позитивных резистов. Такие рентгеношаблоны могут иметь различную комбинацию слоев, составляющих их несущую мембрану, как по применяемым материалам, так и по их толщинам, в зависимости от дальнейшего предназначения шаблонов и могут быть использованы в поддиапазоне средних длин волн ($8 \div 10$ Å), а также в качестве переходных шаблонов для изготовления LIGA-шаблонов, применяемых в поддиапазоне ультракоротких длин волн ($0,5 \div 3$ Å). Разработанная технология формирования рентгеношаблонов может быть использована и для изготовления LIGA-шаблонов с более толстыми и более прочными несущими мембранами.

Описанный способ изготовления достаточно прост и содержит широко известные операции, применяемые в производстве полупроводниковых приборов. Минимальные размеры структур, которые могут быть воспроизведены с помощью данных рентгеношаблонов

оцениваются на уровне ~ 1 мкм. Вышеперечисленные достоинства позволят таким рентгеношаблонам быть востребованными в производстве различных изделий посредством как глубокой, так и «мягкой» рентгеновских литографий.

При выполнении работы использовалась инфраструктура Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ) на базе накопительного комплекса ВЭПП-3/ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. // Микросистемная техника. Материалы, технологии, элементная база. Электронные компоненты. 2000. № 4. С. 3.
2. Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г., Николенко А. Д., Пиндюрин В. Ф., Полетаев И. В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 7. С. 96.
3. Моро У. Микролитография. В 2-х ч. Ч. 1. – М.: Мир, 1990.
4. Кириленко А. Г., Кривостопицкий А. Д., Семин Ю. Ф. // Зарубежная радиоэлектроника. 1980. № 1. С. 36.
5. Ehrfeld W., Glashauser W., Muenchmeyer D., Schelb W. // Microelect. Eng. 1986. Vol. 5(1–4). P. 463.
6. Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г., Зелинский А. Г., Лемзяков А. Г., Кондратьев В. И. // Известия РАН. Серия физическая. 2013. № 9. С. 1351.
7. Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г., Зелинский А. Г., Лемзяков А. Г. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2015. № 1. С. 58.
8. Sullivan P. A., McCoy J. H. // IEEE Trans. 1976. Vol. ED-23. № 4. P. 412.
9. Funayama T., Takayama Y., Inagaki T., Nakamura M. // J. Vac. Sci. Technol. 1975. Vol. 12. № 6. P. 1324.
10. Artamonova L. D., Gentslev A. N., Deis G. A., Krasnoperova A. A., Mikhalyov E. V., Prokopenko V. S., Kulipanov G. N., Mezentseva L. A., Pindyurin V. F. // Review of scientific instruments. 1992. Vol. 63. № 1, pt. 2A. P. 764.
11. Артамонова Л. Д., Гаврюшкина Н. И., Гацтольд В. Н., Глуздакова Г. В., Дейс Г. А., Домахина А. М., Коломеец А. Н., Коломеец Т. М., Прокопенко В. С., Черков Г. А. // Отчет Сибирского международного центра синхротронного излучения за 1991–1992 гг. Ин-т ядерной физики им. Будкера СО РАН. Новосибирск. 1993. С. 229.
12. 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. // Поверхность: Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2002. № 9. С. 30.
13. Goldenberg B. G., Lemzyakov A. G., Nazmov V. P., Pindyurin V. F. // Physics Procedia. 2016. Vol. 84. P. 205.
14. Reznikova E. F., Morh J., Hein H. // Microsystem technologies. 2005. № 11. P. 282.
15. Генцелев А. Н., Дульцев Ф. Н., Кондратьев В. И., Лемзяков А. Г. // Автометрия. 2018. № 2. С. 20.
16. Генцелев А. Н., Дульцев Ф. Н., Гольденберг Б. Г., Купер К. Э. // Поверхность: Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2020. № 8. С. 108.
17. Мазуренко С. Н., Мануйлов В. В., Матвеев В. М. // Микроэлектроника. 1990. Т. 19. Вып. 3. С. 284.

PACS: 85.40.Hp

X-ray masks with multi-layer holding membrane

A. N. Gentslev, B. G. Goldenberg, A. G. Lemzyakov

Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences
11 Acad. Lavrentieva Pr., Novosibirsk, 630090, Russia

Received September 03, 2020

The design and method of manufacture x-ray masks, which are high-contrast in the sub-band X-ray spectral range of shorter wavelengths ($\lambda \approx 2.5 \div 5 \text{ \AA}$), are described. This masks can be a tool for the formation of a resistive mask with a thickness until ~ 250 microns of negative resist and ~ 1 mm of positive resist. Such X-ray masks also can be used in the sub-band of medium wavelengths ($8 \div 10 \text{ \AA}$) and as transition masks in the manufacture of LIGA-masks, which used in the sub-band of ultrashort wavelengths ($0.5 \div 3 \text{ \AA}$).

The manufacturing method is based on silicon planar technology. Two types of masks were made with mainly aluminum membrane. The work shows that, based on silicon planar technology, it is possible to produce X-ray masks with layered (titanium, aluminum and silicon lay-

ers, the thickness of which can vary in a fairly wide range) holding membranes, used in both deep and "soft" x-ray lithographs.

Keywords: x-ray masks, LIGA-masks, LIGA-technology, soft x-ray lithography.

REFERENCES

1. A. A. Vasil'ev, V. V. Luchinin, and P. P. Mal'cev, *Elektronnye komponenty*, No. 4, 3 (2000).
2. A. N. Gentshev, B. G. Goldenberg, A. D. Nikolenko, V. F. Pindyurin, and I. V. Poletaev, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **7** (4), 691 (2013).
3. W. M. Moreau, *Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials* (Springer US, 1988).
4. A. G. Kirilenko, A. D. Krivospickij, and Yu. F. Semin, *Zarubezhnaya radioelektronika*, No. 1, 36 (1980).
5. W. Ehrfeld, W. Glashauser, D. Muenchmeyer, and W. Schelb, *Microelect. Eng.* **5** (1–4), 463 (1986).
6. A. N. Gentshev, B. G. Goldenberg, A. G. Zelinskij, A. G. Lemzyakov, and V. I. Kondratyev, *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, No. 9, 1351 (2013).
7. A. N. Gentshev, B. G. Goldenberg, A. G. Zelinskij, and A. G. Lemzyakov, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **9** (1), 53 (2015).
8. P. A. Sullivan and J. H. McCoy, *IEEE Trans.* **ED-23** (4), 412 (1976).
9. T. Funayama, Y. Takayama, T. Inagaki, and M. Nakamura, *J. Vac. Sci. Technol.* **12** (6), 1324 (1975).
10. L. D. Artamonova, A. N. Gentshev, G. A. Deis, A. A. Krasnoperova, E. V. Mikhalyov, V. S. Prokopenko, G. N. Kulipanov, L. A. Mezentseva, and V. F. Pindyurin, *Review of scientific instruments* **63** (1), pt. 2A, 764 (1992).
11. L. D. Artamonova, N. I. Gavryushkina, V. N. Gashtold, G. V. Gluzdakova., G. A. Deis, A. M. Domakhina, A. N. Kolomeets, T. M. Kolomeets, V. S. Prokopenko, and G. A. Cherkov, *Report of the Siberian international synchrotron radiation center for 1991–1992. Budker Institute of nuclear physics SB RAS*, (Novosibirsk, 1993). P. 229.
12. A. N. Gentshev, B. G. Goldenberg, V. I. Kondratyev, G. N. Kulipanov, L. A. Mezenceva, E. G. Miginskaya, S. I. Mishnev, V. P. Naz'mov, V. F. Pindyurin, V. M. Cukanov, *Poverhnost': Rentgen., sinhrotron. i nejtron. issled*, No. 9, 30 (2002).
13. B. G. Goldenberg, A. G. Lemzyakov, V. P. Nazmov, and V. F. Pindyurin, *Physics Procedia* **84**, 205 (2016).
14. E. F. Reznikova, J. Morh, and H. Hein, *Microsystem technologies*, No. 11, 282 (2005).
15. A. N. Gentshev, F. N. Dul'tsev, V. I. Kondrat'ev, and A. G. Lemzyakov, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* **54** (2), 127 (2018).
16. A. N. Gentshev, F. N. Dultsev, B. G. Goldenberg, and K. E. Kuper, *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **14** (4), 862 (2020).
17. S. N. Mazurenko, V. V. Manujlov, and V. M. Matveev, *Mikroelektronika* **19** (3), 284 (1990).