

А.Г. Пономарев, В.А. Ребров, С.В. Колинько

Институт прикладной физики НАН Украины,
ул. Петропавловская, 58, Сумы, 40000, Украина,
+380 542 22 2794, +380 542 22 3760, ponom56@gmail.com

УСТАНОВКА ПРОТОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ ФАБРИКАЦИИ 3D МИКРО- И НАНОСТРУКТУР



Введение. Поверхностные микро- и наноструктуры находят свое применение в различных физических приложениях, таких как рентгеновская оптика, фотоника, микроэлектромеханические системы, метаматериалы и др.

Проблематика. Существующие методы фабрикации таких структур являются либо дорогостоящими, либо не удовлетворяют определенным требованиям (величина аспектного отношения и качество поверхности их боковых стенок).

Цель. Создание установки для протонно-лучевой литографии, позволяющей создавать поверхностные микро- и наноструктуры с требуемыми параметрами.

Материалы и методы. Одним из альтернативных методов фабрикации вышеупомянутых поверхностных структур является протонно-лучевая литография. В качестве образцов для фабрикации поверхностных структур применяются подложки из кремния с нанесенным слоем позитивного резистивного материала полиметилметакрилата.

Результаты. Разработана установка протонно-лучевой литографии на базе электростатического ускорителя, рассмотрены ее компоновка и особенности конструкции. Приведены основные параметры установки: коэффициент уменьшения, ток протонного пучка, минимальные размеры зонда. Показаны преимущества применения квадрупольной оптики при фабрикации микродифракционных решеток. Проведены первые эксперименты по фабрикации решетки-источника в рентгеновских фазоконтрастных томографах с характерной шириной линии около 20 мкм.

Выводы. В предлагаемой установке применяется новая зондоформирующая система, основанная на распределенном пентуплете магнитных квадрупольных линз. Применение электростатической сканирующей системы обеспечивает высокую точность позиционирования сфокусированного пучка в замкнутом цикле сканирования. Управление процессом сканирования обеспечивается за счет применения многофункционального реконфигурируемого модуля ввода-вывода с программируемой логикой.

Ключевые слова: протонно-лучевая литография, электростатический ускоритель, магнитная квадрупольная линза.

Протонно-лучевая литография (ПЛЛ) является литографической технологией высокого разрешения, которая может быть использована для фабрикации 3D микро- и наноструктур различного применения [1, 2]. Главной характеристикой технологии является способность быстро воспроизводить произвольную структуру в полимере с высокой сте-

пенью точности. Изготовленные структуры могут иметь высокое аспектное отношение (> 50) и чрезвычайно малую шероховатость поверхности боковой стенки (2–3 нм), поскольку траектории протонов с энергией нескольких МэВ в материале слабо отличаются от прямолинейных при взаимодействии с электронами атомов образца из-за большой разности масс между протоном и электроном. Так же энергия вторичных электронов мала,

что обуславливает малый эффект близости. Это, в конечном итоге, позволяет создать структуры с практически вертикальными боковыми стенками. Гладкость боковых стенок микроструктур является особенностью ПЛЛ, которая имеет решающее значение для уменьшения потерь рассеяния в оптических компонентах, таких как волноводы и рентгеновские дифракционные решетки [3]. Базовым аппаратным комплексом для установок ПЛЛ является ядерный сканирующий микронзонд, где используются протоны, ускоренные до энергии нескольких МэВ, которые сфокусированы в зонд размером < 100 нм. Протонный зонд за счет векторного электростатического сканирования перемещается по поверхности образца-резиста, изменяя физико-химические свойства облученной области. После соответствующей ее обработки можно получать практически любую структуру.

Аппаратный комплекс ядерного сканирующего микронзонда в Институте прикладной физики НАН Украины введен в эксплуатацию в 2008 году на базе малогабаритного электростатического ускорителя с максимальным напряжением на высоковольтном термине 2 МВ и имеет минимальный размер зонда 2 мкм с током протонного пучка около 100 пА [4, 5]. Зондоформирующая система микронзонда имеет небольшой коэффициент уменьшения (28), что связано с расположением ферромагнитной сканирующей системы за последней магнитной квадрупольной линзой. Поэтому такая фокусирующая система, с общей длиной около 4 м, имеет большое рабочее расстояние — 22 см. За прошедшее десятилетие микронзонд применяли в различных приложениях для микроанализа [6–8]. Мотивацией разработки установки протонной литографии является необходимость уменьшения размеров зонда, что можно получить при более высоких коэффициентах уменьшения. Требования к высокой точности процесса сканирования обуславливают необходимость разработки новой системы управления пучком протонов на базе электростатического сканера.

ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ ПРОТОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ

Учитывая особенности расположения оборудования в экспериментальном зале, установка ПЛЛ была разработана как продолжение действующего микронзонда (рис. 1, а, б). Поэтому установка имеет общую оптическую ось с микронзондом и использует его объективный и апертурный коллиматоры (1, 2) вместе с одним из дублетов магнитных квадрупольных линз (4). Первый дублет (3) и ферромагнитный сканер (5) не используются при работе установки ПЛЛ.

Гранитная балка (7), стоящая на антивибрационных опорах, расположена после камеры с исследуемыми образцами микронзонда (6). На ней установлено оборудование установки ПЛЛ: ионопровод с насосами (11), электростатический сканер (8), триплет магнитных квадрупольных линз (9) и новая камера прямоугольной формы с образцами (10), которая оборудована оптическим микроскопом, детектором вторичных электронов, детектором заряженных частиц и механизмом позиционирования образцов. Линзы триплета магнитных квадрупольных линз помещены в жесткую раму, и каждая из них имеет пределы несоосности с общей осью триплета $< 0,3$ мрад и < 10 мкм для угловых и поперечных смещений соответственно. Методика, которая дает возможность юстировать триплет с такой точностью, описана в [9]. Триплет установлен на столе позиционирования с пятью степенями свободы и регулируется как единое целое относительно оси пучка. Дублет магнитных квадрупольных линз (4) представляет собой интегрированное устройство, ярмо которого изготовлено из цельного куска магнитомягкого железа с использованием технологии электроэрозионной обработки [10]. Это обеспечивает точность позиционирования каждой линзы относительно общей оси дублета: наклон $< 0,2$ мрад, поперечный сдвиг < 10 мкм [11]. Все значения несоосности учитывают гистерезис. Электростатический сканер, триплет квадрупольных

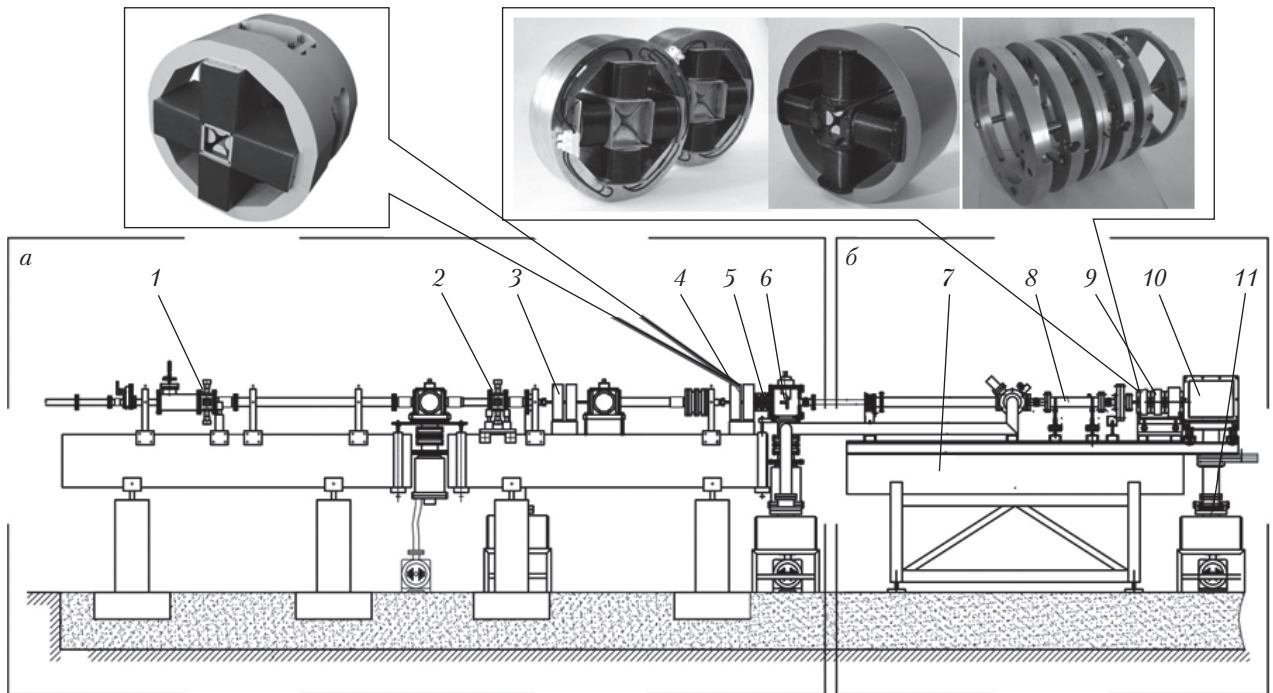


Рис. 1. Общая схема действующего микрозонда (а) и установки ПЛЛ (б): 1 – объектный коллиматор; 2 – апертурный коллиматор; 3, 4 – дублет магнитных квадрупольных линз; 5 – ферромагнитный сканер; 6 – камера с образцами микрозонда; 7 – гранитная балка; 8 – электростатический сканер; 9 – триплет магнитных квадрупольных линз; 10 – камера с образцами ПЛЛ; 11 – ионопровод с вакуумными насосами

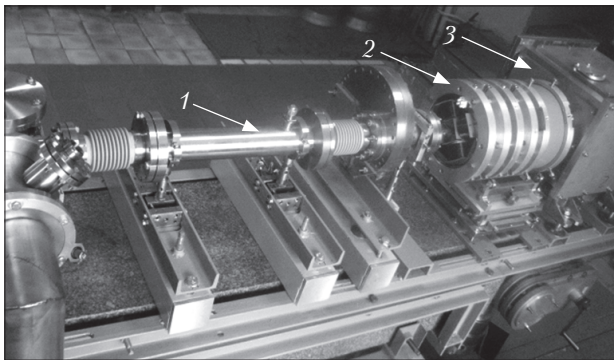


Рис. 2. Общий вид установки ПЛЛ: 1 – электростатический сканер; 2 – триплет магнитных квадрупольных линз в жесткой раме; 3 – камера с образцами

линз в жесткой раме и новая камера образцов представлены на общем виде установки ПЛЛ (рис. 2).

Ионная оптика установки базируется на пятилинзовой зондоформирующей системе (интегрированный дублет и триплет магнитных

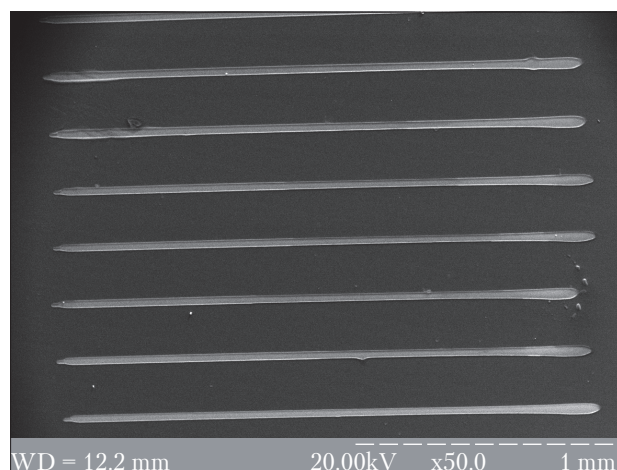
квадрупольных линз) с четырьмя независимыми источниками питания линз. Первая и вторая линзы триплета подсоединены к одному источнику, тогда как все остальные линзы имеют независимые источники питания. Такая зондоформирующая система позволяет изменять коэффициенты уменьшения в пределах 10–400. Ток пучка протонов, за счет изменения размеров коллиматоров, может меняться от 10^{-12} А до 10^{-8} А. Минимальный размер зонда составляет 100 нм, плотность тока в зонде – 100–350 пА/мкм².

Электростатический сканер имеет три пары параллельных пластин с зазором 8 мм. Первая и последняя пары пластин подключены в противоположной полярности. Длина пластин была выбрана с целью компенсации отрицательного действия триплета линз в плоскости xOz . Все пластины получают питание от быстродействующего сдвоенного биполярного вы-

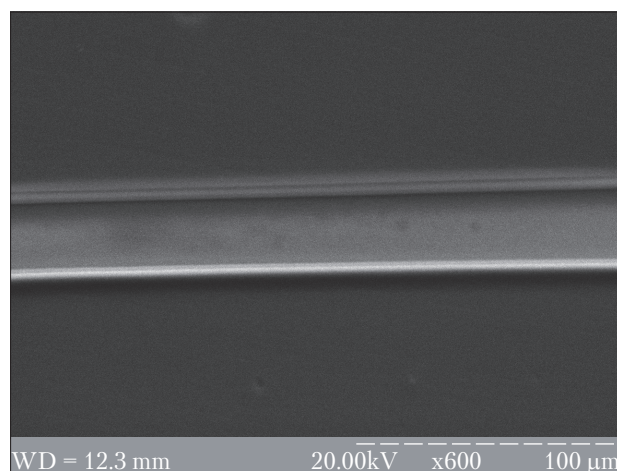
соковольтного усилителя (ВУ). Управление сканированием пучка использует многофункциональный реконфигурируемый модуль ввода-вывода NI 852R, который позиционирует сфокусированный пучок на образце в соответствии с заданным профилем сканирования. Этот профиль представляет собой одномерный массив данных — последовательность координат $(x_i; y_i)$, которые определяют шаблон сканирования. Время экспозиции может быть установлено как общее для всех точек, так и индивидуально для каждой точки (t_i). Кроме того, время экспозиции каждой точки (пикселя) может быть нормализовано флюенсом (дозой облучения). Сигнал от интегратора тока пучка (для проводящих образцов) или от детектора заряженных частиц (для непроводящих образцов) используется как сигнал, пропорциональный флюенсу. В этом режиме пучок пребывает в текущем пикселе до тех пор, пока не будет накоплено заданное количество импульсов от преобразователя тока или детектора. В модуле независимый процесс по внутренним часам последовательно подает текущие координаты пучка $(x_i; y_i)$ на встроенные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Аналоговые напряжения, пропорциональные координатам пучка, поступают с выходов ЦАП на входы ВУ. Усиленные сигналы с выходов ВУ подаются на отклоняющие пластины соответствующих каналов X и Y электростатического сканера.

ФАБРИКАЦИЯ МИКРОДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК РЕНТГЕНОВСКОЙ ОПТИКИ

Микродифракционные решетки используют для получения фазового контрастного изображения с использованием интерференции от некогерентного излучения обычной рентгеновской трубки. В большинстве работ по применению протонной литографии пучок фокусируется в пятно с равными размерами вдоль поперечных координат. Это связано со сложностью формы шаблона. В случае, когда шаблон состоит из параллельных линий, наиболее



а

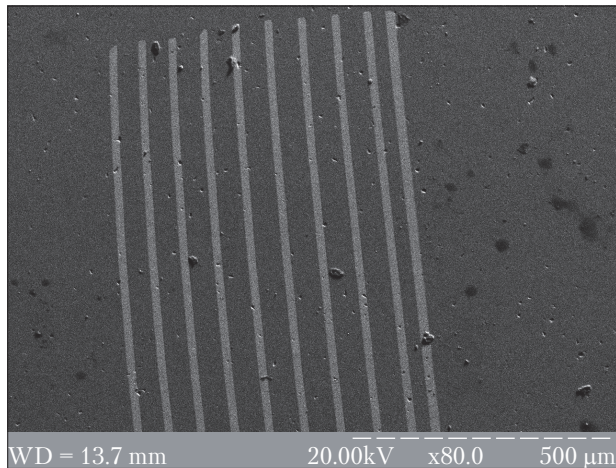


б

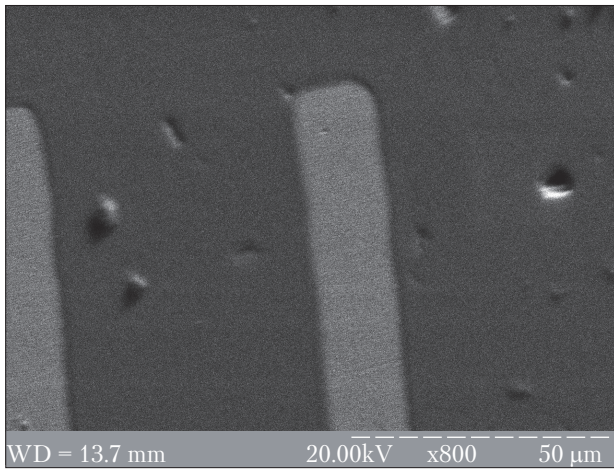
Рис. 3. Изображения шаблона микродифракционной решетки на кремниевой подложке с нанесенным слоем ПММА толщиной 5 мкм: а — общий вид; б — увеличенное изображение одной линии

оптимальным является получение сфокусированного пучка в виде тонкой линии. Это возможно сделать с применением квадрупольной ионной оптики. В этом случае один размер пятна будет измеряться в микрометрах, а другой — в миллиметрах. Такой способ фокусировки позволяет значительно ускорить облучение резистивного материала для получения микрометрических решеток.

Для первых экспериментов были взяты размеры решетки-источника фазоконтрастного интерферометра с характерным размером ши-



a



b

Рис. 4. Шаблон микродифракционной решетки на кремниевой подложке с нанесенным тонким слоем меди и слоем ПММА (5 мкм) после гальванопластики: *a* – общий вид; *b* – увеличенное изображение одной линии

рины линии около 20 мкм. Для фокусировки пучка протонов МэВ-ных энергий в линию с заданными размерами предложен подход, позволяющий рассчитать оптимальные размеры коллиматоров и токов возбуждения магнитных квадрупольных линз [12]. Входными параметрами являются распределение яркости пучка в фазовом пространстве в плоскости объектного коллиматора и ионно-оптические характеристики зондоформирующей системы. Были подготовлены образцы в виде кремниевых пластин с нанесенным слоем резистивного

материала полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 5 мкм. Образцы облучались сфокусированным пучком протонов в линию и после экспозиции 0,5 с производилось сканирование пучком в направлении, перпендикулярном большему размеру линии. После обработки облученных областей были получены шаблоны размером $\approx 23,4 \times 2060$ мкм², которые измеряли с помощью сканирующего электронного микроскопа (рис. 3). На рис. 4 показаны аналогичные шаблоны, заполненные висмутом в результате процесса гальванопластики, когда на кремниевую подложку предварительно был нанесен тонкий слой меди.

ВЫВОДЫ

Физические особенности взаимодействия протонов, ускоренных до энергий нескольких МэВ, являются определяющими при создании трехмерных малоразмерных структур с высоким аспектным отношением (> 50) с практически вертикальными боковыми стенками с шероховатостью поверхности, не более нескольких нанометров. Это обуславливает применение протонно-лучевой литографии для фабрикации оптических компонентов, так как имеет решающее значение для уменьшения потерь рассеяния в волноводах и рентгеновских дифракционных решетках.

Установка протонной литографии является модернизацией действующего ядерного сканирующего микронзонда. Мотивацией для ее разработки стала необходимость уменьшения размеров зонда до 100 нм и создание новой системы управления сканированием на базе электростатического сканера, что позволяет избежать неточности позиционирования сфокусированного пучка вследствие гистерезиса в случае применения ферромагнитного сканера микронзонда. Применение новой электронной системы векторного управления положением пучка позволяет создавать практически любые пространственные структуры. При фабрикации микродифракционных решеток наиболее эффективным является применение

фокусировки пучка протонов в линию, что значительно сокращает время экспозиции, поэтому была разработана методика такой специфической фокусировки с заданными разме-

рами зонда и проведены первые эксперименты по фабрикации микродифракционной решетки-источника рентгеновского фазоконтрастного интерферометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Watt F., Breese M.B.H., Bettiol A., van Kan J.A. Proton beam writing: review. *Materials today*. 2007. V. 10, no. 6. P. 20–29.
2. Watt F., Bettiol A.A., van Kan J.A., Teo J., Breese M.B.H. Ion beam lithography and nanofabrication: a review. *International Journal of Nanoscience*. 2005. V. 4, no. 3. P. 269–286.
3. Bettiol A.A., Ansari K., Sum T.C., van Kan J.A., Watt F. Fabrication of micro-optical components in polymer using proton beam writing. *Proc. of SPIE*. 2004. No. 5347. P. 255–263.
4. Magilin D.V., Ponomarev A.G., Rebrov V.A., Sayko N.A., Melnik K.I., Miroshnichenko V.I., Storizhko V.Y. Performance of the Sumy nuclear microprobe with the integrated probe-forming system. *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2009. No. 267. P. 2046–2049.
5. Storizhko V.E., Ponomarev A.G., Rebrov V.A., Chemeris A.I., Drozdenko A.A., Dudnik A.B., Miroshnichenko V.I., Sayko N.A., Pavlenko P.A., Peleshuk L.P. The Sumy scanning nuclear microprobe: design features and first tests. *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2007. No. 260. P. 49–54.
6. Kurbatov D.I., Klymov O.V., Opanasyuk A.S., Ponomarev A.G., Fochuk P.M., Khlyap H.M. Structural characteristics of $Zn_{1-x}Mn_xTe$ polycrystalline films. *Proc. of SPIE*. 2012. No. 8507. P. 85071J1–85071J-6.
7. Nam D., Opanasyuk A.S., Koval P.V., Ponomarev A.G., Kim G., Jo W., Cheong H., Composition variations in $Cu_2ZnSnSe_4$ thin films analyzed by XRD, EDS, PIXE, and Raman spectroscopy. *Thin Solid Films*. 2014. No. 562. P. 109–113.
8. Valter A.A., Knight K.B., Eremenko G.K., Magilin D.V., Ponomarev A.A., Pisansky A.I., Romanenko A.V., Ponomarev A.G. Spatial investigation of some uranium minerals using nuclear microprobe. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2018. V. 45, no. 6. P. 533–547.
9. Lapin O.S., Kolinko S.V., Rebrov V.A., Salivon V.F., Ponomarev A., Ponomarev A.G. Precise centering method for triplet of magnetic quadrupole lenses using single rigid frame. *Nucl. Instr. Meth. B*. 2017. No. 404. P. 41–44.
10. Rebrov V.A., Ponomarev A.G., Palchik V.K., Melnik N.G. The new design of magnetic quadrupole lens doublet manufactured from a single piece. *Nucl. Instr. Meth. B*. 2007. No. 260. P. 34–38.
11. Kolinko S.V., Ponomarev A.G., Rebrov V.A. Precise centering and field characterization of magnetic quadrupole lenses. *Nucl. Instr. Meth. A*. 2013. No. 700. P. 70–74.
12. Ponomarev A.G., Kolinko S.V., Rebrov V.A., Kolomiets V.N., Kravchenko S.N. Using of proton beam writing techniques for fabrication of micro diffraction gratings. *Problems of atomic science and technology*. 2018. V. 4, no. 116. P. 285–288.

Стаття надійшла до редакції 04.12.18

Статтю прорецензовано 28.02.19

Статтю підписано до друку 01.03.19

REFERENCES

1. Watt, F., Breese, M. B. H., Bettiol, A., van Kan, J. A. (2007). Proton beam writing: review. *Materials today*., 10(6), 20–29.
2. Watt, F., Bettiol, A. A., van Kan, J. A., Teo, J., Breese, M. B. H. (2005). Ion beam lithography and nanofabrication: a review. *International Journal of Nanoscience*, 4(3), 269–286.
3. Bettiol, A. A., Ansari, K., Sum, T. C., van Kan, J. A., Watt, F. (2004). Fabrication of micro-optical components in polymer using proton beam writing. *Proc. of SPIE*, 5347, 255–263.
4. Magilin, D. V., Ponomarev, A. G., Rebrov, V. A., Sayko, N. A., Melnik, K. I., Miroshnichenko, V. I., Storizhko, V. Y. (2009). Performance of the Sumy nuclear microprobe with the integrated probe-forming system. *Nucl. Instr. and Meth. B*., 267, 2046–2049.
5. Storizhko, V. E., Ponomarev, A. G., Rebrov, V. A., Chemeris, A. I., Drozdenko, A. A., Dudnik, A. B., Miroshnichenko, V. I., Sayko, N. A., Pavlenko, P. A., Peleshuk, L. P. (2007). The Sumy scanning nuclear microprobe: design features and first tests. *Nucl. Instr. and Meth. B*., 260, 49–54.

6. Kurbatov, D. I., Klymov, O. V., Opanasyuk, A. S., Ponomarev, A. G., Fochuk, P. M., Khlyap, H. M. (2012). Structural characteristics of $Zn_{1-x}Mn_xTe$ polycrystalline films. *Proc. of SPIE.*, 8507, 85071J-1–85071J-6.
7. Nam, D., Opanasyuk, A. S., Koval, P. V., Ponomarev, A. G., Kim, G., Jo, W., Cheong, H. (2014). Composition variations in $Cu_2ZnSnSe_4$ thin films analyzed by XRD, EDS, PIXE, and Raman spectroscopy. *Thin Solid Films*, 562, 109–113.
8. Valter, A. A., Knight, K. B., Eremenko, G. K., Magilin, D. V., Ponomarev, A. A., Pisansky, A. I., Romanenko, A. V., Ponomarev, A. G. (2018). Spatial investigation of some uranium minerals using nuclear microprobe. *Physics and Chemistry of Minerals*, 45(6), 533–547.
9. Lapin, O. S., Kolinko, S. V., Rebrov, V. A., Salivon, V. F., Ponomarev, A., Ponomarev, A. G. (2017). Precise centering method for triplet of magnetic quadrupole lenses using single rigid frame. *Nucl. Instr. Meth. B.*, 404, 41–44.
10. Rebrov, V. A., Ponomarev, A. G., Palchik, V. K., Melnik, N. G. (2007). The new design of magnetic quadrupole lens doublet manufactured from a single piece. *Nucl. Instr. Meth. B.*, 260, 34–38.
11. Kolinko, S. V., Ponomarev, A. G., Rebrov, V. A. (2013). Precise centering and field characterization of magnetic quadrupole lenses. *Nucl. Instr. Meth. A.*, 700, 70–74.
12. Ponomarev, A. G., Kolinko, S. V., Rebrov, V. A., Kolomiets, V. N., Kravchenko, S. N. (2018). Using of proton beam writing techniques for fabrication of micro diffraction gratings. *Problems of atomic science and technology*, 4(116), 285–288.

Received 04.12.18

Revised 28.02.19

Accepted 01.03.19

Ponomarev, A.G., Rebrov, V.A., and Kolinko, S.V.

Institute of Applied Physics of the NAS of Ukraine,
58, Petropavlivska St., Sumy, 40000, Ukraine,

+380 542 22 2794, +380 542 22 3760, ponom56@gmail.com

PROTON BEAM WRITING DEVICE BASED
ON ELECTROSTATIC ACCELERATOR FOR 3D MICRO-
AND NANO-STRUCTURE FABRICATION

Introduction. Surface micro- and nanostructures have been being used in various physical applications such as X-ray optics, photonics, microelectromechanical systems, metamaterials, etc.

Problem Statement. The existing methods for fabricating such structures either are expensive or do not meet certain requirements (the aspect ratio and the quality of side wall surface).

Purpose. To create a device for proton beam writing, which enables fabricating surface micro- and nanostructures with required parameters.

Materials and Methods. One of alternative methods for fabricating the mentioned surface structures is proton beam writing. Silicon substrates coated with a positive resistive polymethyl methacrylate layer are used as samples for fabricating the surface structures.

Results. A proton-beam lithography device based on an electrostatic accelerator has been developed, the configuration and specifications have been presented. The main parameters (demagnifications, proton beam current, and minimum probe dimensions) have been specified. Advantages of using quadrupole optics in fabricating micro-diffraction gratings have been shown. The first experiments on fabrication of source grating in X-ray phase-contrast tomographs with a characteristic line width of about 20 μm have been carried out.

Conclusions. A new probe-forming system based on a separated magnetic quadrupole lense pentuplet has been used in the proposed device. The use of an electrostatic scanning system ensures a high accuracy of positioning the focused beam in a closed scanning cycle. The scanning process is controlled using a multifunctional reconfigurable input-output module with programmable logic.

Keywords: proton beam writing, electrostatic accelerator, and magnetic quadrupole lens.

О.Г. Пономарьов, В.А. Ребров, С.В. Колінько
Інститут прикладної фізики НАН України,
вул. Петропавлівська, 58, Суми, 40000, Україна,
+380 542 22 2794, +380 542 22 3760, ponom56@gmail.com

УСТАТКУВАННЯ ПРОТОННО-ПРОМЕНЕВОЇ
ЛІТОГРАФІЇ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА
ДЛЯ ФАБРИКАЦІЇ 3D МІКРО- І НАНОСТРУКТУР

Вступ. Поверхневі мікро- і наноструктури використовують в різних фізичних додатках, таких як рентгенівська оптика, фотоніка, мікроелектромеханічні системи, метаматеріали тощо.

Проблематика. Наявні методи фабрикації таких структур є або високовартісними, або не задовольняють певним вимогам (величина аспектного відношення та якість поверхні їхніх бічних стінок).

Мета. Розробка установки для протонно-променевої літографії, яка дозволяє створювати поверхневі мікро- та наноструктури з заданими параметрами.

Матеріали й методи. Одним з альтернативних методів фабрикації вищезгаданих поверхневих структур є протонно-променева літографія. Як зразки для фабрикації поверхневих структур використовують підкладки з кремнію з нанесеним шаром позитивного резистивного матеріалу поліметилметакрилату.

Результати. Розроблено установку протонно-променевої літографії на базі електростатичного прискорювача, наведено її складові та особливості конструкції. Наведено основні параметри установки: коефіцієнти зменшення, струм протонного пучка, мінімальні розміри зонду. Показано переваги застосування квадрупольної оптики для фабрикації мікродифракційних ґраток. Проведено перші експерименти з фабрикації ґратки-джерела в рентгенівських фазоконтрастних томографах з характерною шириною лінії близько 20 мкм.

Висновки. У запропонованій установці застосовується нова зондоформуюча система, яка базується на розподіленому пентуплеті магнітних квадрупольних лінз. Застосування електростатичної скануючої системи забезпечує високу точність позиціонування сфокусованого пучка в замкнутому циклі сканування. Управління процесом сканування забезпечується за рахунок застосування багатофункціонального реконфігурованого модуля введення-виведення з програмованою логікою.

Ключові слова: протонно-променева літографія, електростатичний прискорювач, магнітна квадрупольна лінза.