

В.Е. Сторижко, В.И. Мирошніченко, А.Г. Пономарев

Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины, Сумы

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОТОННОЙ ПУЧКОВОЙ ЛИТОГРАФИИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ



Рассмотрено применение сфокусированных пучков протонов с энергией нескольких МэВ в технологии изготовления микро- и наноразмерных структур. Показаны отличительные особенности взаимодействия энергетичных протонов с резистивными материалами. Дано представление о современном состоянии технологии протонной пучковой литографии и сформулированы перспективы ее развития.

Ключевые слова: протонная пучковая литография, ядерный сканирующий микроскоп, фабрикация наноструктур.

Применение сфокусированных протонных пучков с энергией нескольких мегаэлектронвольт для облучения резистивных материалов с целью изготовления микроразмерных структур было предложено в конце прошлого столетия в ряде работ [1–3], в которых был отмечен ряд физических принципов, позволяющих рассматривать такое применение как перспективную технологию для создания нанокомпонент. К этому времени были достаточно хорошо разработаны как теоретические, так и экспериментальные методы фокусировки микропучков протонов, получаемых на выходе из электростатических ускорителей [4, 5]. Такие аппаратные комплексы получили название *ядерный сканирующий микроскоп (ЯСМЗ)*. Вследствие высокой магнитной жесткости пучка протонов для их фокусировки в ЯСМЗ применяются квадрупольные линзы либо сверхпроводящие соленоиды. Главной мотивацией применения микроскопа при изготовлении малоразмерных структур был поиск альтернативных

методов к рентгеновской литографии для получения структур с высоким аспектным отношением (~100). Основой возможности такого применения служат физические принципы взаимодействия энергетичных протонов с атомами облучаемого образца, которые отличаются от физических принципов аналогичного взаимодействия рентгеновских лучей, а также электронов и тяжелых ионов в растровых электронных микроскопах и установках вторичной ионной микроскопии соответственно.

Пучки протонов с энергией несколько мегаэлектронвольт могут взаимодействовать как с электронами, так и с ядрами атомов облучаемого материала. Однако вероятность взаимодействия протона с электронами на несколько порядков выше, чем вероятность рассеяния на ядрах атомов на первой половине своего пути. Из-за большого различия в массах протон-электронные взаимодействия не могут значительно изменить траекторию движения падающего протона, которая мало отличается от прямой линии. Поскольку энергия, теряемая протоном при такого рода взаимодействиях, мала (с наиболее вероятной величиной на уровне 100 эВ),

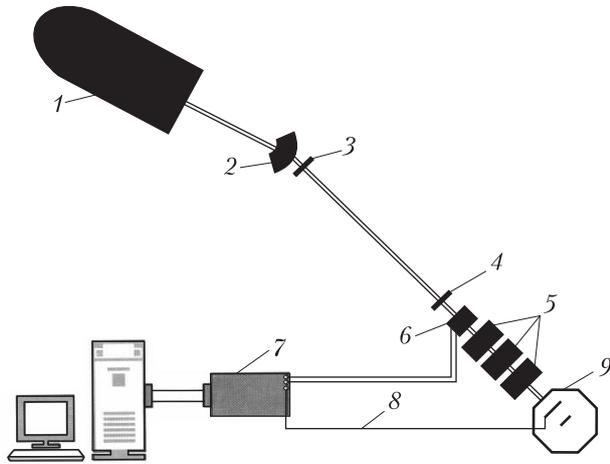


Рис. 1. Общая схема специализированного ЯСМЗ для применения в технологии РВВ: 1 – электростатический ускоритель; 2 – анализирующий магнит; 3,4 – объектный и угловой коллиматоры; 5 – фокусирующая система на базе магнитных квадрупольных линз; 6 – электромагнитный сканер; 7 – система управления сканированием; 8 – обратная связь для нормализации флюенса; 9 – мишенная камера

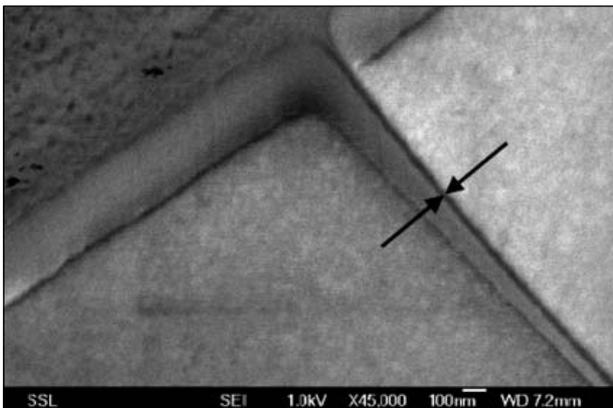


Рис. 2. Изображение отдельно стоящей линии с высоким аспектным отношением и шириной 22 нм, полученной экспонированием сфокусированным пучком H_2^+ с энергией 2 МэВ

то тысячи взаимодействий с электронами атомов материала могут произойти до тех пор, пока протон полностью потеряет свою кинетическую энергию. Свойство равномерной отдачи энергии по мере своего движения имеет большое значение: это дает практически однородное распределение дозы по глубине. По

мере потери энергии и, следовательно, уменьшения скорости движения вероятность взаимодействия с ядрами атомов материала увеличивается и поэтому на второй половине своего пути происходит заметное искривление траектории протона. Отличительной особенностью пучков протонов в ЯСМЗ является отсутствие вторичных электронов с энергией, способной значительно влиять на дозу облучения материала (эффект близости). Глубина проникновения протона для выбранного материала зависит от его энергии и строго определена, что является важным свойством и позволяет создавать многоуровневые трехмерные объекты в однослойных резистивных материалах. Расчеты с применением численного кода SRIM [6] показывают, что протоны с энергией 2 МэВ имеют глубину проникновения в материале ПММА (полиметилметакрилат) 60 мкм с отклонением на уровне 2 мкм в конце своего пути. Однако уширение пучка на глубине 1 мкм составляет лишь 3 нм и 30 нм на глубине 5 мкм. Это свойство позволяет создавать трехмерные нанообъекты с высоким аспектным отношением (≈ 160) и высоким качеством боковых стенок (шероховатость на уровне 3÷7 нм) [7].

Целью настоящей работы является рассмотрение современного состояния применения ЯСМЗ при изготовлении микро- и наноразмерных структур, а также перспективы развития этого направления.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Изготовление микро- и наноразмерных структур с помощью сфокусированных пучков протонов с энергией нескольких мегаэлектронвольт в настоящее время имеет устоявшееся название *экспонирование протонным пучком* (proton beam writing – PBW) и относится к литографическим технологиям высокого разрешения. Как и большинство технологий, она имеет две составляющие: аппаратная часть, обеспечивающая фокусировку пучка протонов с минимальными размерами и максимальным током на поверхности экспонируемого образца, и оп-

ределенные условия экспонирования, которые устанавливают величину вносимой дозы облучения для каждого конкретного материала, методики сканирования пучком и обработки экспонированной области.

Современные аппаратурные комплексы ЯСМЗ, применяющиеся в технологии PBW (рис. 1), основываются на прецизионных электростатических ускорителях, в которых создание высокого напряжения на высоковольтном термине осуществляется с помощью каскадного умножителя напряжения Кокрофта—Уолтона [8]. За счет усовершенствования электростатических ускорителей улучшены параметры пучка на выходе: энергетический разброс в пучке $\Delta E/E \approx 10^{-5}$, стабильность тока пучка $\Delta I_{\text{отн.}} \approx 1\%$, яркость пучка $b \approx 70$ пкА/(мкм² × мрад² МэВ). Разработанные новые типы прецизионных магнитных квадрупольных линз [9, 10] позволили получить размеры сфокусированного пучка протонов $0,29 \times 0,45$ мкм² при токе $I \approx 50$ пкА на поверхности облучаемого образца в режиме высокой плотности тока [11], а для режима малого тока $I \approx 1$ фА размер пучка около 20 нм [12].

В настоящее время в нескольких исследовательских центрах продолжается усовершенствование технологии PBW [13, 14]. Достаточно хорошо отработаны режимы и определены условия облучения для различных резистивных материалов. В таблице приведены дозы облучения и характерные размеры полученных малоразмерных компонент для различных типов резистивных материалов [15]. При использовании материала HSQ была получена структура в виде отдельно стоящей линии с характерной шириной 22 нм [16] (см. рис. 2). Следующим этапом явилось внедрение результатов исследований в производственные циклы по изготовлению наноконструкций с применением разработанной технологии для различных приложений. В Институте технологий (Shibaura Institute of Technology, Токио) разработан аппаратурный комплекс с технологией PBW с целью продвижения его на рынки как

инструмента для промышленного применения в различных областях, таких, как медицина, биология, микрооптика и микрофотоника, приборы MEMS, наностамповка (nanoimprinting) и др. [17]. Однако, несмотря на большой объем исследований, существует еще ряд нерешенных проблем, которые не позволяют рекомендовать эту технологию для широкого коммерческого применения.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Перспективы развития технологии PBW связаны как с усовершенствованием ее аппаратной составляющей — аппаратурных комплексов ЯСМЗ, — так и поиском новых типов резистивных материалов, которые позволили бы уменьшить размеры структур, сфабрикованных с помощью сфокусированных пучков протонов. Одним из главных направлений усовершенствования ЯСМЗ является уменьшение размеров сфокусированного пучка протонов до уровня <10 нм. Для достижения таких размеров необходимо значительно увеличить яркость источников протонов в электростатическом ускорителе. Для сравнения в настоя-

Применение различных резистивных материалов в технологии PBW

| Резистивный материал | Тип | Необходимая доза, нК/мм ² | Наименьший полученный характерный размер |
|----------------------|------------|--------------------------------------|--|
| PMMA | Позитивный | 80—150 | 20—30 нм |
| SU-8 | Негативный | 30 | 60 нм |
| HSQ | Негативный | 30 | 22 нм |
| PMGI | Позитивный | 150 | 1,5 мкм |
| WL-7154 | Негативный | 4 | 800 нм |
| TiO ₂ | Негативный | 8000 | 5 мкм |
| Si | Негативный | 80 000 | 15 нм (острие иголки) |
| DiaPlate | Негативный | 10 | 10 мкм |
| ADEPR | Негативный | 125—238 | 5 мкм |
| Forturan | Позитивный | 1 | 3 мкм |
| PADC | Позитивный | 600 | 5 мкм |
| (CR-39) | | | |
| ma-N 440 | Негативный | 200 | 400 нм |
| GaAs | Негативный | 100 000 | 12 мкм |

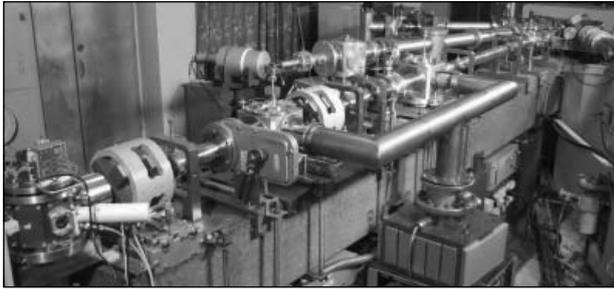


Рис. 3. Общий вид микрозонда ИПФ НАНУ

щее время эта величина яркости более чем на два порядка уступает яркости электронных пучек с вольфрамовым катодом в растровых электронных микроскопах. Для высокояркостных пучков протонов необходимо разработать новые типы зондоформирующих систем (ЗФС), ионно-оптические свойства которых были бы

согласованы с параметрами пучка. В работе [18] предложен новый тип ЗФС со свободными параметрами, это позволяет на порядок увеличить коэффициенты уменьшения системы и сохранить ее пропускную способность (*аксептанс*) на достаточно высоком уровне. Такая система является перспективной в применении к технологии РВW. Другим аспектом усовершенствования ЯСМЗ является создание компактной установки, которая была бы привлекательна с коммерческой точки зрения. В работах [19, 20] предложена новая концепция ядерного сканирующего микрозонда на основе иммерсионной зондоформирующей системы, в которой совмещены процессы ускорения и зондоформирования. Здесь размеры установки ЯСМЗ уменьшаются в несколько раз по сравнению с конвенциональными схемами, применяемыми в на-

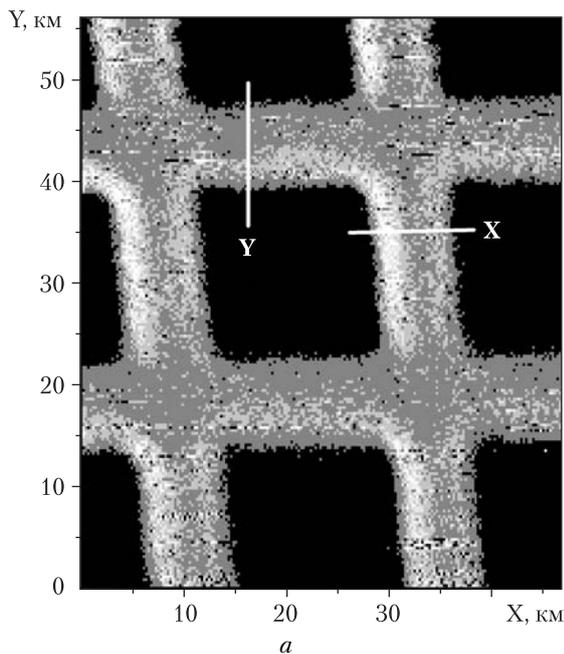
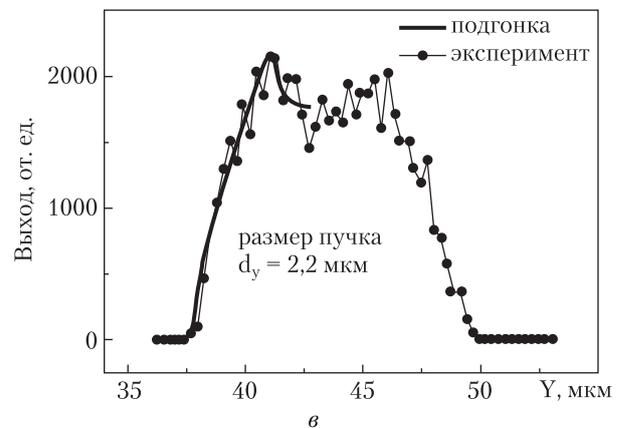
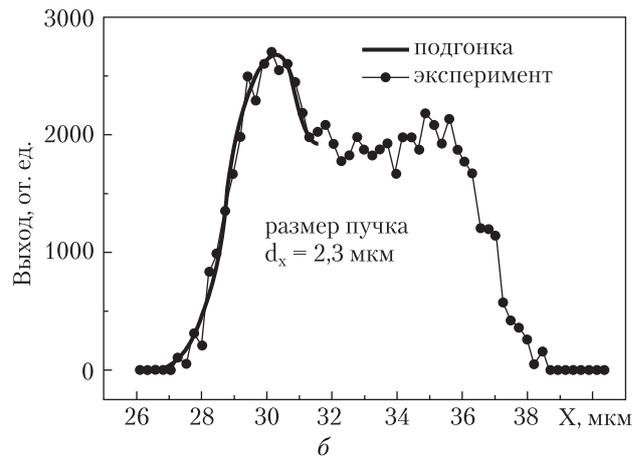


Рис. 4. Результаты эксперимента по определению размеров сфокусированного пучка: *a* — изображение микрометрической калибровочной медной сетки во вторичных электронах при энергии пучка протонов 1 МэВ; *б* и *в* — обработка профиля выхода вторичных электронов при сканировании перемычки сетки в *x* и *y* направлениях соответственно



стоящее время, при этом улучшаются общие характеристики микрзонда.

Развитие направления применения сфокусированных пучков протонов в технологии РВМ в Украине основывается на установке ЯСМЗ Института прикладной физики НАН Украины, которая была введена в эксплуатацию в 2008 г. и разработана для исследования распределения примесей в конструкционных материалах [21]. Общий вид микрзонда ИПФ НАНУ показан на рис. 3. Отличительной особенностью этой установки является зондоформирующая система распределенного типа с прецизионными дублетами магнитных квадрупольных линз новой конструкции [22]. Тип ускорителя — компактный электростатический ускоритель с максимальным напряжением на высоковольтном терминале 2 МВ на основе генератора ван де Грааффа. Размеры сфокусированного пучка ≈ 2 мкм при токе $I \approx 150$ пкА, которые определялись в результате сканирования микрометрической калибровочной медной сетки в режиме детектирования вторичной электронной эмиссии (рис. 4). В настоящее время в рамках ведомственной программы научного приборостроения НАН Украины ведутся работы по созданию установки протонно-пучковой литографии в ИПФ НАНУ. Проведены оптимизационные исследования процессов формирования пучка в квадрупольной зондовой системе нового типа, определены физические и геометрические параметры ЗФС. Основные узлы и системы находятся в стадии изготовления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение процессов прохождения ускоренных протонов до энергии нескольких мегаэлектронвольт в резистивном материале показывает наличие ряда особенностей, которые отличаются от аналогичных процессов для рентгеновских лучей, электронов и тяжелых ионов низких энергий. Наличие этих особенностей дает основание рассматривать технологию протонного экспонирования резистивных материалов как альтернативную технологию высокого

разрешения для изготовления наноструктур с высоким аспектным отношением. Анализ современного состояния технологии дает основание утверждать, что, несмотря на хорошие результаты по созданию трехмерных наноструктур, существует еще ряд нерешенных проблем. В первую очередь они связаны с необходимостью усовершенствования специализированной установки ядерного сканирующего микрзонда. Эти усовершенствования включают в себя исследования по кардинальному увеличению яркости источников протонов и исследованиям процессов формирования пучка протонов в зондовых системах нового типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Springham S.V., Osipowicz T., Sanchez J.L. et al.* Micromachining using deep ion beam lithography // Nucl. Instr. and Meth. B. — 1997. — Vol. 130. — P. 155–159.
2. *Kan J.A., van, Sanchez J.L., Xu B. et al.* Micromachining using focused high energy ion beams: Deep Ion Beam Lithography // Nucl. Instr. and Meth. B. — 1999. — Vol. 148. — P. 1085–1089.
3. *Watt F.* Focused high energy proton beam micromachining: A perspective view // Nucl. Instr. and Meth. B. — 1999. — Vol. 158. — P. 165–172.
4. *Явор С. Я.* Фокусировка заряженных частиц квадрупольными линзами. — М.: Атомиздат, 1968. — 263 с.
5. *Watt F., Grime G.* Principles and applications of high-energy microbeams. Bristol UK: Adam Hilger Ltd. — 1987. — 230 p.
6. <http://www.srim.org/SRIM/SRIMLEGL.htm>.
7. *Chiam S.Y., van Kan J.A., Osipowicz T.* Sidewall quality in proton beam writing // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2007. — Vol. 260. — P. 455–459.
8. *Mous D.J.W., Haitsma R.G., Butz T. et al.* The novel ultrastable HVEE 3.5 MV Singletron™ accelerator for nanoprobe applications // Nucl. Instr. and Meth. B. — 1997. — Vol. 130. — P. 31–36.
9. *Breese M.B.H., Grime G.W., Linford W., Harold M.* An extended magnetic quadrupole lens for a high-resolution nuclear microprobe // Nucl. Instr. and Meth. B. — 1999. — Vol. 158. — P. 48–52.
10. *Ryan C.G., Jamieson D.N., Griffin W.L., Cripps G.* The CSIRO-GEMOC nuclear microprobe: a high-performance system based on a new closely integrated design // Nucl. Instr. and Meth. B. — 1999. — Vol. 158. — P. 18–23.
11. *Watt F., van Kan J.A., Rajta I. et al.* The National University of Singapore high energy ion nano-probe facility: Performance tests // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2003. — Vol. 210. — P. 14–20.

12. Kan J.A., van Malar P., Vera A.B. et al. Proton beam writing nanoprobe facility design and first test results // Nucl. Instr. and Meth. A. — 2011. — Vol. 645. — P. 113–115.
13. Rajta I., S.Z. Szilasi, P. Fürjes et al. Si micro-turbine by proton beam writing and porous silicon micromachining // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2009. — Vol. 267. — P. 2292–2295.
14. Menzel F., Spemann D., Koal T., Butz T. 3D-structures with arbitrary shapes created in negative resists by gray-scale proton beam writing // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2011. — Vol. 269. — P. 2427–2430.
15. Kan J.A., van, A.A. Bettiol, S.Y. Chiam et al. New resists for proton beam writing // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2007. — Vol. 260. — P. 460–463.
16. Kan J.A., van, Bettiol A.A., Watt F. Proton beam writing of three-dimensional nanostructures in hydrogen silsesquioxane // Nano Lett. — 2006. — Vol. 6, № 3 — P. 579–582.
17. Watt F., Breese M.B.H., Bettiol A.A. Proton beam writing // Materialstoday. — 2007. — Vol. 10, № 6. — P. 20–29.
18. Ponomarova A.A., Melnik K.I., Vorobjov G.S., Ponomarev A.G. One-stage probe-forming systems with quadrupole lenses excited by individual power supplies // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2011. — Vol. 269. — P. 2202–2205.
19. Ignat'ev I.G., Magilin D.V., Miroshnichenko V.I. et al. Immersion probe-forming system as a way to the compact design of nuclear microprobe // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2005. — Vol. 231. — P. 94–100.
20. Деклараційний патент на винахід № 67341 Україна, МПК⁷ G 01 N 23/00. Спосіб дослідження структури і елементного складу речовини і пристрій для здійснення цього способу (мікрозонд іонний) / В.Ю. Сторіжко, О.Г. Пономарьов, В.І. Мірошніченко. — Заявник і власник Інститут прикладної фізики НАН України. — № 2003038121; заявл. 01.09.2003; опубл. 15.06.2004, Бюл. № 6. — 3 с.
21. Magilin D.V., Ponomarev A.G., Rebrov V.A. et al. Performance of the Sumy nuclear microprobe with the integrated probe-forming system // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2009. — Vol. 267. — P. 2046–2049.
22. 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. and Meth. B. — 2007. — Vol. 260. — P. 34–38.

В.Ю. Сторіжко,

В.І. Мірошніченко, О.Г. Пономарьов

ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРО- І НАНОРОЗМІРНИХ СТРУКТУР З ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОТОННОЇ ПУЧКОВОЇ ЛІТОГРАФІЇ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Розглянуто застосування сфокусованих пучків протонів з енергією декількох МеВ в технології виготовлення мікро- та нанорозмірних структур. Показано відмітні особливості взаємодії енергетичних протонів з резистивними матеріалами. Викладені уявлення про сучасний стан технології протонної пучкової літографії та сформульовані перспективи її розвитку.

Ключові слова: протонна пучкова літографія, ядерний скануючий мікрозонд, фабрикація наноструктур.

V.E. Storizhko,

V.I. Miroshnichenko, A.G. Ponomarev

NANOFABRICATION WITH USING OF PROTON BEAM WRITING: STATE OF THE ART AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

The application of focusing beams of protons with MeV energy in fabrication technology of micro- and nano-dimension structures is considered. Difference features of energetic protons interaction with resistive materials are shown. The representation about state of the art of technology of proton beam lithography is given and prospects of its development are formulated.

Key words: proton beam writing, scanning nuclear microprobe, nanofabrication.

Стаття надійшла до редакції 04.01.12