

**ПРИМЕНЕНИЕ СФОКУСИРОВАННЫХ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НИЗКИХ И СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ****А.Г. Пономарев***Институт прикладной физики НАН Украины  
ул. Петропавловская 58, г. Сумы, 40030*

*Применение сфокусированных пучков легких ионов средних энергий, электронов и тяжелых ионов низких энергий рассмотрено в технологии изготовления низкоразмерных структур. Описаны физические принципы, лежащие в основе взаимодействия этих пучков с резистивными материалами. Оптика систем, обеспечивающих фокусировку пучков заряженных частиц, и характеристики установок даны вместе с описанием некоторых путей совершенствования фокусировки пучков легких ионов средних энергий. Протонная пучковая литография рассмотрена как новая технология с большими потенциальными возможностями в таких приложениях, как микрообработка кремния, наностамповка, биофизика и медицина, микроструйные системы, микрофотоника и микрооптика.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Проведение исследований физических, химических и механических свойств материалов и объектов, структурированных в наноразмерных масштабах, а также возможность влиять на эти свойства является необходимым условием при разработке перспективных нанотехнологий. В связи с этим стоит проблема создания новых видов инструментов, которые могли бы обеспечить проведение как анализа структуры и элементного состава новых наноматериалов и нанообъектов, так и технологий их изготовления и использования. Среди широкого круга физических принципов, на основе которых должны разрабатываться новые инструменты, особое внимание уделяется сфокусированным пучкам заряженных частиц низких и средних энергий. В первую очередь это связано с тем, что размер сфокусированного пучка составляет от нескольких единиц до десятков нанометров. Поэтому за счет взаимодействия частиц пучка с веществом можно локально модифицировать его физические и химические свойства в наноразмерных масштабах.

Сфокусированные пучки электронов, которые нашли широкое применение в растровой электронной микроскопии, в настоящее время так же широко применяются в пучковой электронной литографии (EBL, e-beam lithography) [1,2]. Сфокусированные пучки тяжелых ионов, которые ранее применялись в основном во вторичной ионной масс-спектрометрии, благодаря способности распылять атомы обрабатываемого образца используются в настоящее время в приборах FIB (Focusing Ion Beam) для создания трехмерных наноразмерных структур [3,4]. Сфокусированные пучки легких ионов мегаэлектронвольтовых энергий первоначально применялись в ядерных сканирующих микроскопах для целей локального элементного микроанализа вещества. В последнее время применение ядерных микроскопов достигло большого прогресса так же и в пучковой ионной литографии для создания трехмерных наноразмерных структур [5,6]. Такая технология получила название p-beam writing (PBW). Рассмотрению состояния развития этой технологии в настоящем кратком обзоре уделено особое внимание. Рассматриваются проблемы, стоящие как при создании мегаэлектронвольтовых нанопучков, так и вопросы, связанные с метрологией определения параметров пучков, применением различных резистивных материалов и общих принципов технологии PBW. Все аспекты рассмотрены в сравнении с более

развитыми технологиями EBL и FIB. Для большего понимания возможностей нанотехнологий, связанных с созданием наноразмерных структур, рассмотрены некоторые области приложений: наностамповка (nanoimprinting), микрообработка кремния, биомедицинские приложения, микрофотоника и микроструйные устройства.

## 1 ОСОБЕННОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ УСКОРЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ВЕЩЕСТВЕ

Различные типы заряженных частиц в зависимости от их энергии по-разному взаимодействуют с веществом в твердой фазе. На рис. 1, заимствованном из работы [5], представлено три разновидности пучков. Это низкоэнергетичные пучки электронов и тяжелых ионов, а также пучки легких ионов средних энергий.

Основным механизмом взаимодействия низкоэнергетичных электронов сфокусированного пучка с веществом является их рассеяние на атомарных электронах, в результате чего первичные электроны многократно отклоняются на большой угол, образуя классическую грушевидную форму области ионизации вокруг точки соприкосновения первичного сфокусированного пучка. В приведенном на рис.1 примере проведены расчеты с применением компьютерного моделирования на основе метода Монте-Карло [7], где сфокусированный пучок электронов с энергией 50 кэВ проникает на глубину до 40 мкм в резистивном материале PMMA (poly methyl methacrylate) и при этом отклоняется от оси до 20 мкм. Эта особенность электронного пучка затрудняет создание трехмерных структур с высоким отношением высоты объекта к его характерному поверхностному размеру. Также негативным фактором, влияющим на процесс облучения вещества, является эффект близости (proximity effect), который заключается в наличии вторичных электронов с достаточно высокой энергетической составляющей способных вносить дополнительную дозу при облучении. Это требует внесения коррекции при определении дозы.

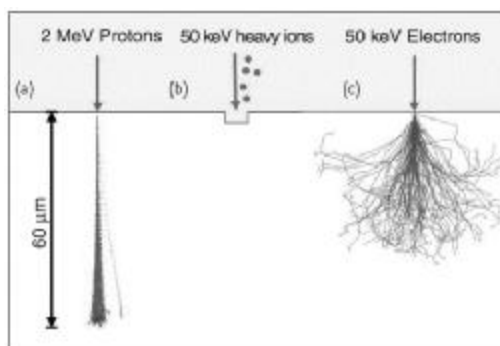


Рисунок 1 – Схематическое изображение взаимодействия пучков различных типов заряженных частиц низких и средних энергий с веществом [5]

Для сфокусированных пучков низкоэнергетичных тяжелых ионов характерным механизмом взаимодействия с веществом является рассеяние падающих ионов на ядрах атомов мишени. За счет передачи импульса ионов пучка атомам приповерхностного слоя материала происходит их переупорядочивание, что приводит к химическим и структурным изменениям, таким, как распыление атомарных и молекулярных образований. Процесс распыления, рассчитанный с помощью метода Монте-Карло (например с применением численного кода SRIM [8]), показывает, что скорость распыления для ионов Ga с энергией

30 кэВ составляет от 1 до 10 атомов мишени на падающий ион в зависимости от типа материала. Однако скорость распыления может быть значительно увеличена за счет подачи молекул химически активного газа в область взаимодействия пучка с материалом, например хлора.

Сфокусированные пучки легких ионов с энергией нескольких мегаэлектронвольт могут взаимодействовать как с электронами, так и с ядрами атомов облучаемого материала. Однако вероятность взаимодействия иона с электронами на несколько порядков выше, чем вероятность рассеяния на ядрах атомов на первой половине своего пути. Из-за большого различия в массах ион-электронные взаимодействия не могут значительно изменить траекторию движения падающего иона, которая мало отличается от прямой линии, что видно на рис. 1. Так как энергия, теряемая ионом при такого рода взаимодействиях, мала, с наиболее вероятной величиной на уровне 100 эВ, тысячи взаимодействий с электронами атомов материала могут произойти до тех пор, пока ион полностью потеряет свою кинетическую энергию. Свойство практически равномерной отдачи энергии по мере своего движения имеет важное значение, что дает практически однородное распределения дозы по глубине. По мере потери энергии и, следовательно, уменьшении скорости движения вероятность взаимодействия с ядрами атомов материала увеличивается и происходит заметное искривление траектории иона (рис. 1). Отличительной особенностью пучков легких ионов средних энергий по сравнению с электронными пучками является практическое отсутствие вторичных электронов с энергией, способной значительно влиять на дозу облучения материала (эффект близости). Глубина проникновения иона 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 показывают, что протоны с энергией 2 МэВ имеют глубину проникновения в материале PMMA 60,8 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 отношением высоты объекта к его характерному поверхностному размеру (ширине) и высоким качеством боковых стенок (шероховатость на уровне 3 нм).

## 2 ЗОНДОВЫЕ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Принципы формирования электронного пучка в системах электронной пучковой литографии (EBL) аналогичны сканирующему электронному микроскопу (SEM), где электронный пучок фокусируется в пятно на образце с помощью электромагнитных линз с аксиальной симметрией и сканируется в необходимой области для получения изображения. Основные отличия EBL и SEM заключаются в том, что в SEM вторичные и обратно рассеянные электроны и характеристическое рентгеновское излучение индуцированное электронами пучка фиксируется с помощью детектирующих устройств для целей получения изображения и элементного анализа.

Напротив, в системах EBL важными являются: высокоточное позиционирование образца за счет контроля его положения с применением лазерной интерферрометрии, система измерения размеров пятна, измерение тока с помощью цилиндра Фарадея, снабженного интегратором, способным измерять пикоамперные токи для нормализации дозы, высокоскоростная система сброса пучка во время перемещения образца, специализированное программное обеспечение для управления сканированием пучком в соответствии с цифровым

шаблоном, подготовленным с использованием одной из CAD программ. На рис. 2, заимствованном из работы [9], показана схема коммерческой установки JBX-9300FS, выпускаемой компанией JEOL [10], с применением термо-полевой электронной пушки. Минимальный размер пучка на образце 4 нм с реализуемым током в пределах от 50 пА до 50 нА. Частота сканирования до 50 МГц, область грубого сканирования 500×500 мкм<sup>2</sup>, область точного сканирования 4×4 мкм<sup>2</sup> (вторичные отклоняющие катушки) с разрешением 1 нм.

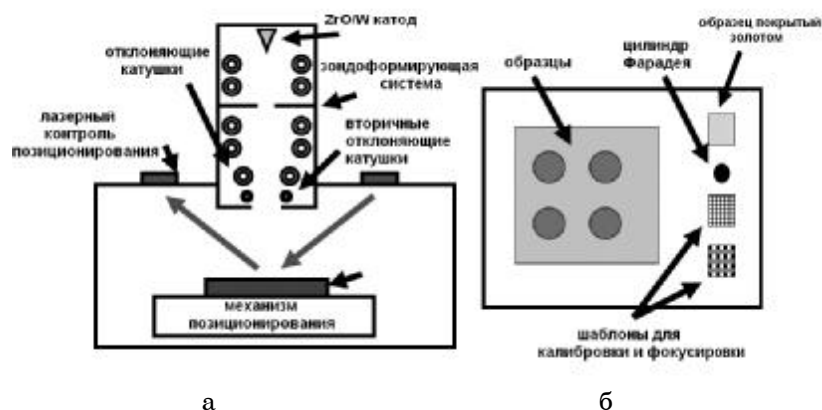


Рисунок 2 - Схематическое представление EBL системы JBX-9300FS: общий вид (а) ; держатель образцов и вспомогательных объектов (б)

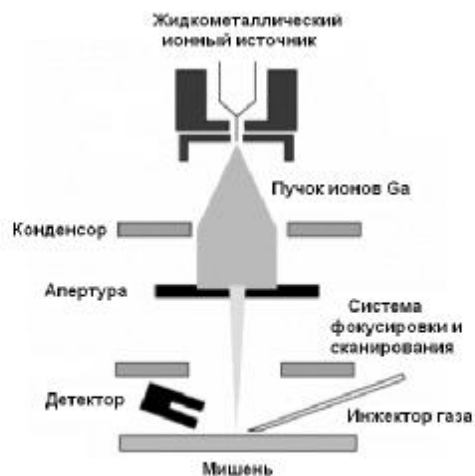


Рисунок 3 - Схема формирования сфокусированного пучка тяжелых ионов низких энергий в устройствах FIB

Общая схема формирования сфокусированного пучка тяжелых ионов низких энергий в устройствах FIB показана на рис. 3. Здесь общие принципы создания сфокусированного пучка аналогичны системе фокусировки электронных пучков, при этом основным отличием является применение пучка ионов галлия ( $Ga^+$ ) вместо электронного пучка. Ионный пучок создается при помощи жидкометаллического источника (LMIS), где приложение высокого электрического поля вызывает эмиссию положительно заряженных ионов из конического электрода жидкого

галлия. Набор апертур используется для того, чтобы выбрать необходимый ток пучка и обеспечить требуемый размер сфокусированного пучка. Типичная энергия пучка от 30 до 50 кэВ, наилучшее разрешение, которое может быть получено, оценивается величиной 5 – 7 нм. Пучок сканируется по образцу, который установлен в вакуумной камере с давлением на уровне  $10^{-7}$  мбарр. В процессе столкновения с поверхности образца эмитируются электроны и рассеянные атомарные и молекулярные образования. Детектирование вторичных электронов позволяет получать изображение поверхности образца в растре сканирования. Более полное описание принципов работы и приложений можно найти в [11].

Как и в случае устройств электронно-пучковой литографии специализированный сканирующий микросонд, предназначенный для целей ионно-пучковой литографии, состоит из ионной пушки, зондоформирующей системы и мишенной камеры (рис.4).



Рисунок 4 - Схема формирования сфокусированного пучка легких ионов средних энергий в ядерном сканирующем микросонде для целей технологии *p-beam writing*

Здесь в качестве ионной пушки выступает электростатический ускоритель с анализирующим магнитом, на выходе из которого создается пучок ускоренных легких ионов ( $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $He^+$ ) до энергии нескольких МэВ. Далее происходит его формирование с помощью системы объектного и углового коллиматоров для того, чтобы фокусирующая система, состоящая из мультиплета магнитных квадрупольных линз, обеспечила фокусировку пучка на мишени в пятно с минимально возможными размерами. В настоящее время наилучшие результаты получены на установке Центра Ионно-Пучковых Приложений (CIBA) Национального Университета Сингапура [12-14]. В качестве ускорителя здесь применен электростатический ускоритель Singletron™ голландской компании NVEE [15] с максимальным напряжением на кондукторе 3,5 МВ, который обеспечивает высокую монохроматичность пучка  $\Delta E/E=10^{-5}$  и яркость около 70 пА/(мкм<sup>2</sup>мрад<sup>2</sup>МэВ). Фокусирующая система состоит из триплета магнитных квадрупольных линз (OM52) компании Oxford Microbeam [16] с коэффициентами уменьшения 228×60 и имеет длину около 7 м (от объектного коллиматора до мишени). Сканирование пучка осуществляется ферромагнитным сканером, который обеспечивает растр

сканирования  $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$  с частотой до 10 кГц. Для более быстрого сканирования применен электростатический сканер с частотой до 1 МГц и растром сканирования  $50 \times 50 \text{ мкм}^2$ . Трехкоординатный (XYZ) механизм перемещения компании Burleigh Inchworm позволяет позиционировать мишень в пределах  $25 \times 25 \text{ мм}^2$  с точность 20 нм в замкнутом цикле. На этой микрозондовой установке получены размеры пятна на мишени  $290 \times 450 \text{ нм}^2$  с током протонного пучка 50 пА и размерами пучка ионов  $\text{H}_2^+$   $35 \times 75 \text{ нм}^2$  при токе на уровне 1 фА.

Несмотря на значительный прогресс в параметрах установок ядерных микрозондов и ряд предпочтительных свойств сфокусированных пучков ионов мегаэлектронвольтных энергий перед аналогичными пучками электронов и тяжелых ионов низких энергий перспективы изготовления коммерческих образцов связаны в первую очередь с разработкой новых схем компоновки микрозондов, которые позволят создать более компактную установку. В работах [17,18] предложен один из вариантов такой компоновки, позволяющий уменьшить размеры установки более чем в пять раз по длине (до пяти метров в длину) и улучшить параметры пучка на мишени.

Величина коэффициентов уменьшения зондоформирующих систем ядерных микрозондов находится на достаточно низком уровне по сравнению с SEM. Поэтому необходимо разрабатывать новые зондовые системы с коэффициентами уменьшения на уровне 1000–10000 на базе принципиально новых линз, позволяющих уменьшить рабочее расстояние до 10 мм. Системы с такими коэффициентами уменьшения будут обладать большими абберациями, поэтому требуется применение новых типов источников ионов со значительно большей величиной яркости. В работах [19-21] рассмотрено применение полевого источника ионов  $\text{He}^+$  с яркостью  $10^9 \text{ А/м}^2\text{ср}$ , что на семь порядков превышает яркость существующих высокочастотных источников ионов. Однако невысокий суммарный ток такого источника (около 100 пА при энергетическом разбросе  $<1 \text{ эВ}$ ) требует разработки принципиально новых схем стабилизации высокого напряжения в электростатических ускорителях.

Метрологические аспекты определения размеров пучка на мишени в устройствах, использующих сфокусированные электронные пучки, достаточно хорошо отработаны. Так, в работе [22] рассмотрен один из методов анализа сигналов, поступающих в результате детектирования вторичных электронов при сканировании специализированного шаблона, который позволяет определять размеры пучка на уровне нескольких нанометров. В связи с тем что выход вторичных электронов при взаимодействии легких ионов с веществом значительно ниже и есть принципиальное отличие их прохождения внутри самого вещества по сравнению с электронами в настоящее время очень остро стоит проблема разработки стандартов по определению размеров пучка  $<30 \text{ нм}$  [23].

### 3 ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УСКОРЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С РЕЗИСТИВНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Ускоренные заряженные частицы, проходя в образце, вызывают изменение физико-химических свойств облученной области. При обработке образца соответствующим проявителем с применением в некоторых процессах электрохимического травления удаляется облученная область, в этом случае резистивный материал называется позитивным, и напротив, удаление необлученной области присуще негативным резистивным материалам. Так в полимерных материалах типа РММА прохождение в них протонов приводит к разрыву полимерных цепочек. В результате облученная область содержит молекулярные соединения с малым молекулярным весом, которая удаляется при воздействии, например, водного раствора

изопропиллированного спирта (IPA) в соотношении 3:7 (рис.5а). С другой стороны, в материале SU-8 протоны создают межмолекулярные поперечные связи, что приводит к увеличению стойкости к химическому проявителю, который удаляет необлученную область, и поэтому такой резистивный материал является негативным по отношению к процессу облучения пучком заряженных частиц (рис.5б) [24].

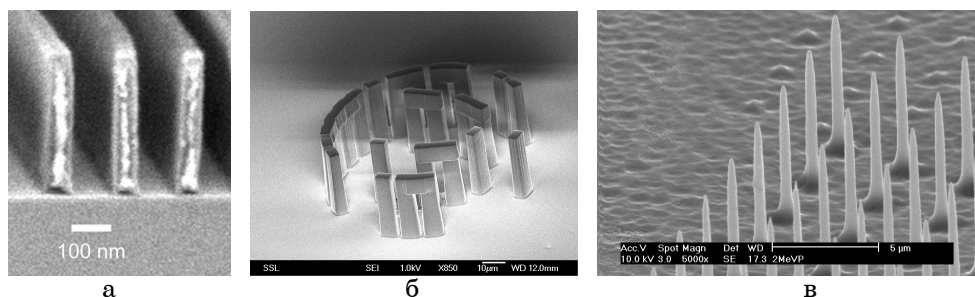


Рисунок 5 - Изображение трехмерных наноразмерных структур, полученных с помощью технологии *p-beam writing* [5]. SEM изображение параллельных линий, полученных в слое PMMA толщиной 350 нм (а); микроскопическая копия монументального строения Stonehenge, полученная в однослойном резистивном материале SU-8 за счет варьирования энергии протонов (б) ; массив иголок с высоким соотношением высоты к ширине, полученных в массивном объеме кремния (в) (кривизна острия 15 нм)

Радиационные повреждения кремния р-типа приводят к увеличению удельного сопротивления облученной области, что позволяет с помощью электрохимического травления образовать в необлученной области пористую структуру, которая впоследствии удаляется с помощью раствора гидроксида калия. Такая технология дает возможность создавать трехмерные наноструктуры в массивном объеме кремния (рис. 5в). Аналогичный механизм создания трехмерных структур применяется и для GaAs [25].

Основной отличительной особенностью технологии с применением пучка протонов по сравнению с электронным пучком является то, что в случае более легких электронов с уменьшением размеров структур необходимо использовать меньшую толщину резистивных материалов (рис.6) (как правило, резистивный материал наносится на подложку с применением центрифуги).

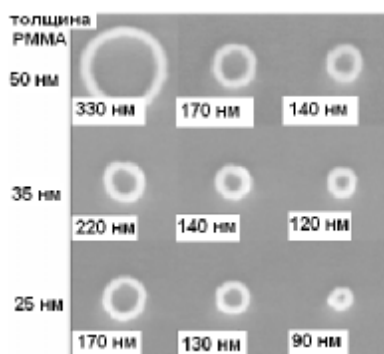


Рисунок 6 – Зависимость толщины слоя резистивного материала PMMA от поверхностного размера наноструктуры для технологии EBL

Это является следствием рассеяния электронов при их прохождении в образце, и структуры при этом являются практически двумерными. В то же время пучок протонов практически не уширяется в резистивных материалах, что в этом случае позволяет создавать трехмерные наноструктуры. Немаловажным фактором является также величина необходимой дозы при облучении резистивных материалов с целью получения желаемого результата. Для случая протонов по оценке работы [26] она на два порядка ниже, чем необходимо для электронного пучка. В таблице 1 приведены значения дозы для различных материалов [26].

Таблица 1 - Применение различных резистивных материалов в технологии РВВ

Резистивный материал	Тип	Необходимая доза, нК/мм <sup>2</sup>	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 <sub>2</sub>	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 (CR-39)	Позитивный	600	5 мкм
ma-N 440	Негативный	200	400 нм
GaAs	Негативный	100 000	12 мкм

#### 4 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Ниже рассмотрим области применения микро- и наноразмерных структур, созданных с помощью сфокусированных пучков заряженных частиц, которые дают представление о возможности их использования.

**Наноштамповка (nanoimprinting).** Для массового производства низкоразмерных структур, расположенных на большой площади с высокой плотностью, наиболее распространенными являются процессы, использующие проекционную световую, рентгеновскую либо электронную или ионную литографию. Однако увеличивающиеся технические сложности и предполагаемый значительный рост стоимости изготовления структур с характерными размерами меньше 100 нм предопределяет поиск альтернативных решений. Поэтому литографические методы с применением сфокусированных пучков заряженных частиц в комбинации с наноштамповкой могут быть в некоторых случаях более предпочтительными [27,28]. Например, на рис.7 приведена последовательность процесса производства 3D Ni штампов с использованием технологий РВВ и гальванического покрытия никелем. Здесь кремниевая подложка Si(100) сначала покрывается слоями Cr(20 мкм) и Au(200 мкм) для лучшей адгезии и электропроводности, а затем с помощью центрифуги наносится слой резистивного материала РММА, который подвергается облучению сфокусированным пучком протонов с энергией 2 МэВ (рис.7а). Далее наносится второй металлизированный слой на верхнюю поверхность, который играет роль основания штампа и обеспечивает условия проводимости при гальваническом покрытии (рис.7б). В результате обработки проявителем образуется трехмерная структура (рис.7в), затем с помощью гальванического процесса наносится никелевое покрытие (рис.7г).



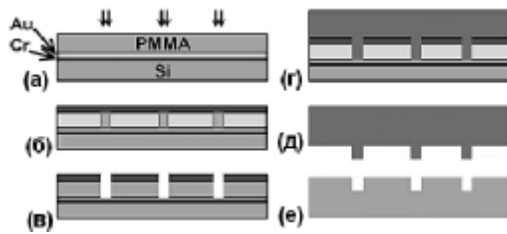


Рисунок 7- Схематическое представление процесса изготовления штампа с использованием технологии RWB [27]

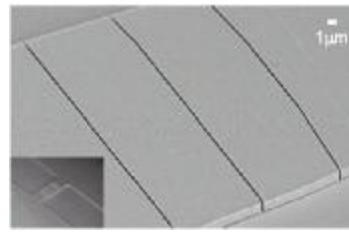


Рисунок 8 - Отпечаток Ni штампа в 8 мкм слое резистивного материала PMMA. Вставка слева: вид отпечатка с меньшим увеличением [27]

Окончательно производятся отслаивание штампа от шаблона (рис. 7д) и наностамповка (рис. 7е). На рис. 8 показан отпечаток Ni штампа в слое PMMA толщиной 8 мкм, нанесенный с помощью центрифуги на Si подложку, где отчетливо видны репродуцированные каналы шириной 100 нм и глубиной 2 мкм с гладкими вертикальными стенками. Такие штампы могут быть использованы до пятнадцати раз без существенного ухудшения качества репродукции.

**Биофизика и медицина.** Созданные с помощью технологии RWB узкие каналы, ширина которых составляет десятки нанометров, а высота может в несколько десятков раз превышать ширину, дают возможность проводить исследования биомолекул. На рис. 9 представлен прототип биосенсорной структуры, представляющий собой встречно-гребенчатые электроды с зазором ~85 нм. Исследования биомолекул осуществляется за счет измерения полного электрического сопротивления между электродами. Каждой разновидности биомолекул соответствует определенная электрическая проводимость, что дает возможность применять такой сенсор для исследования широкого разнообразия биомолекул, включая простые токсины, такие, как формальдегид [29], большие молекулы ДНК и гормоны [30], или более специфические биомолекулы, такие, как антитела ВИЧ [31].

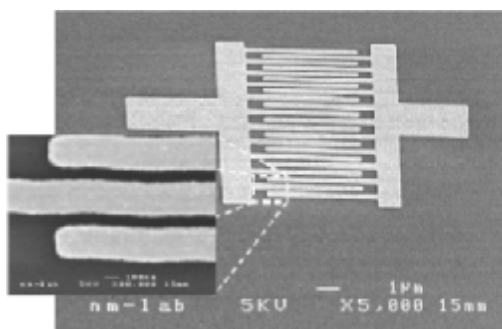


Рисунок 9 - SEM изображения нано-биосенсорной структуры [14]

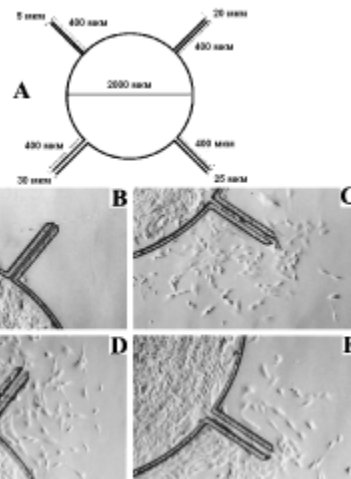


Рисунок 10 - Клетки фибробласта мигрируют и проникают через узкие каналы за пределы инкубационной области в течении 7 дней. Ширина каналов: 5 мкм (B); 20 мкм (C); 25 мкм (D); 30 мкм (E) [14]

На рис. 10 представлен другой пример применения 3D микроканалов для исследования поведения клеток фибробласта с целью создания тканевых волокон. Здесь показаны четыре канала шириной 5, 20, 25 и 30 мкм, соединяющие внешнюю среду с замкнутой инкубационной областью. Из рисунка видно, что клетки не в состоянии проникнуть за пределы замкнутой области через 5 микрометровый канал, в то время как остальные каналы являются для них вполне приемлемыми для перемещения.

**Микроструйные системы.** Другим возможным применением узких микро- и наноканалов, полученных с помощью технологии PBW в полимерных материалах типа PMMA, являются микроструйные системы. Такие системы могут моделировать движение жидких потоков в тканевых структурах живых организмов. В последнее десятилетие значительно возросли потребности массового производства микроструйных систем как для фундаментальных исследований в химии и биологии, так и в химических и медицинских приложениях [32,33]. Однако наноструйные системы находятся в стадии исследований, так как ширина каналов может быть на уровне размеров молекул, и поэтому необходимо изучать их поведение в потоках одномолекулярного масштаба. Появление поверхностного заряда на стенках наноканала, вызванного ионизацией, например, OH<sup>-</sup> групп, а также силы химического притяжения (силы Ван дер Вальса) значительно изменяют кинетику процесса истечения жидких потоков в наноструйных системах. В качестве одного из способов преодоления сил, препятствующих движению потоков через наноканалы, рассматривается электрокинетическое перекачивание. На рис. 11 показана серия резервуаров, соединенных каналами шириной 100 нм. Когда электрическое поле приложено вдоль каналов, такие молекулы, как ДНК, устремляются через наноканалы со скоростью, которая зависит от размера и характеристик разворачивания ДНК. Такая наноструйная система является своего рода наночипом [6]. Немаловажным при изготовлении наноканалов является величина шероховатости их стенок. В технологии PBW вследствие практически отсутствия эффекта близости измеренная с помощью микроскопа атомных сил максимальная шероховатость составляет <3 нм [34].

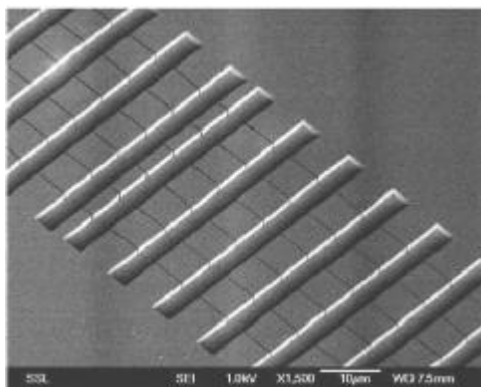
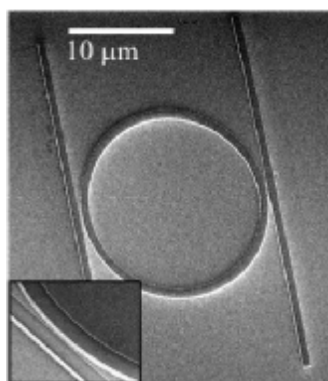


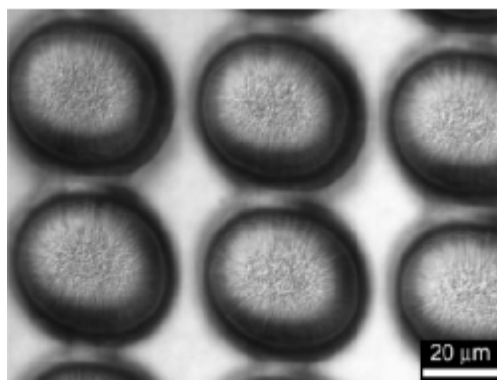
Рисунок 11 - SEM изображение резервуаров, соединенных каналами шириной 100 нм [6]

**Микрофотоника и микрооптика.** Среди множества применений микро- и нано-структур, которые могут быть созданы с помощью технологии PBW, особое место занимают микрооптика и микрофотоника. Обработка светового сигнала может осуществляться с помощью оптических элементов, интегрированных в чип, таких, как излучатели, волноводы, детекторы, модуляторы и массивы микролинз, использование которых должно обеспечить высокую скорость обработки информации. Существует два пути, по которым технология PWB может быть

использована для приложений в микро-оптике и микрофотонике. Первая включает непосредственное формирование низкоразмерных структур из полимеров, нанесенных с помощью центрифуги на соответствующую подложку, такую, как стекло, или термически окисленную кремниевую пластину, при этом подложка и нанесенный материал должны быть с более низким коэффициентом преломления, чем материал сердцевины оптического волокна. Резистивный материал SU-8 является наиболее приемлемым для изготовления волноводов, так как он обладает высокой прозрачностью, низкими потерями и гладкими стенками (рис.12) [35]. К тому же его коэффициент преломления немного выше, чем материала подложки из обычного стекла или термического оксида. Микролинзовые массивы могут быть изготовлены с применением структуры, состоящей из нанесенного слоя резистивного материала с помощью центрифуги на прозрачную подложку, такую, как стекло, обычно применяющееся в световой микроскопии, затем следует шаг создания формы для того, чтобы изготовить микролинзы требуемого диаметра. После проявления полимер термически оплавляется за счет нагрева всей структуры до температуры фазового перехода стекла. Под действием поверхностного натяжения формируются полусферические микролинзы (рис.13). Длина фокуса определяется выбором соответствующей комбинации диаметра линзы и толщины резистивного материала. Другие структуры также могут быть изготовлены непосредственным формированием, включая решетки и пластины с зонами Френеля [14]. Вторым методом формирования волноводов в массивном объеме полимера или кварцевого стекла с применением РВВ включает непосредственную ионнолучковую модификацию без шага проявления [36]. Это достигается за счет использования процессов, происходящих на конечной стадии движения иона в образце, когда создается скрытый канал волновода в подложке. Ионы имеют уникальную особенность, состоящую в том, что количество энергии, которую они вкладывают в подложку, увеличивается быстро, поэтому в конце своего пути вероятность того, что ион создаст вакансию, также быстро увеличивается. Суммарный эффект этого состоит в том, что создается скрытая область повреждений, дающая в результате локальное увеличение плотности материала и, как следствие, локальное увеличение коэффициента преломления. Эта поврежденная область затем может играть роль ядра волновода.



*Рисунок 12 - SEM изображения кольцевого резонатора, изготовленного в слое резистивного материала SU-8 на кремниевой подложке. На изображении справа показана область с характерными особенностями размером 200 нм [14]*



*Рисунок 13 - Оптическое изображение микролинзового массива, изготовленного из резистивного материала РММА толщиной 15 мкм [14]*

## ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены аспекты применения трех разновидностей сфокусированных пучков заряженных частиц в технологии изготовления низкоразмерных структур. Установлено, что пучковая электронная литография позволяет создавать структуры с характерными размерами несколько десятков нанометров. Однако вследствие рассеяния электронов на атомах резистивного материала происходит значительное уширение сфокусированного пучка, что ограничивает отношение высоты структуры к характерному ее поверхностному размеру, и структуры при этом являются практически двумерными. Сфокусированные пучки тяжелых ионов в устройствах FIB обладают уникальными свойствами создания трехмерных структур с характерными размерами несколько десятков нанометров практически из любого материала. Основным недостатком применения этих устройств является то, что процесс изготовления наноструктур является чрезвычайно медленным, что не дает возможности рассматривать эту технологию для массового изготовления. По сравнению с рассмотренными применениями сфокусированных пучков электронов и тяжелых ионов низких энергий технология РВW с использованием пучков легких ионов средних энергий имеет большие потенциальные преимущества при создании низкоразмерных структур при микрообработке кремния, в наностамповке, для применения в биофизике и медицине, микроструйных системах, микрофотонике и микрооптике. Однако разрешающая способность ядерных микронзондов – устройств, обеспечивающих фокусировку легких ионов средних энергий в настоящее время значительно (на порядок) хуже двух остальных типов устройств. С другой стороны, не существует принципиальных физических ограничений, на основании которых было бы невозможно улучшить характеристики ядерного микронзонда. Поэтому пути их усовершенствования лежат в разработке принципиально новых схем зондоформирования, создании новых линзовых систем и применении полевых источников ионов с яркостью значительно превышающей существующие высокочастотные ионные источники.

## SUMMARY

### APPLICATION OF FOCUSING CHARGED PARTICLE BEAMS OF LOW AND MIDDLE ENERGY IN NANOTECHNOLOGY (REVIEW)

**A.G. Ponomarev**

*Institute of Applied Physics NAS of Ukraine  
Petrovavlovska 58, 40030, Sumy, Ukraine*

*The application of focused beams of light ions of middle energy and electrons and heavy ions of low energy is considered in fabrication method of low-dimension structures. The physical principles underlying charged particle beam interaction with materials are described. The optical systems of charged beam focusing and facility performance are given together with description of some ways of probeforming system improvements for beam focusing of light ions of middle energy. The proton beam direct writing lithography considers as a new technology of great potential in such applications as silicon micromachining, nano-imprinting, biophysics and medicine, micro-fluidic systems, micro-photonics and micro-optics.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Ressler, J. Grisolia, C. Martin et al. Fabrication of planar cobalt electrodes separated by a sub-10 nm gap using high resolution electron beam lithography with negative PMMA // *Ultramicroscopy*. – 2007. - Vol. 107. –P. 985-988.
2. Robert A. Lee, Patrick W. Leech, Optical image formation using surface relief micrographic picture elements // *Microelectronic Engineering*. – 2007. - Vol. 84. –P. 669-672.
3. J. Gierak, A. Septier and C. Vien, Design and realization of a very high-resolution FIB nanofabrication instrument // *Nucl. Instr. and Meth.* – 1999. - A 427. – P. 91-98.
4. I. Chyr and A.J. Steck, GaN focused ion beam micromachining with gas-assisted etching // *J. Vac. Sci. Technol.* – 2001. – B. 19. – P. 2547-2550.

5. F. Watt, A.A. Bettiol, J.A. van Kan et al., Ion beam lithography and nanofabrication: a review // International Jour. Of Nanoscience. –2005. - Vol. 4, № 3. – P.269-286.
6. F.Watt, M.B.H. Breese, A. Bettiol and J.A. van Kan, Proton beam writing: review // materials today. – 2007. - Vol. 10, №. 6. - P. 20-29.
7. P. Hovingtone, D.Drouin, R. Gauvin et al., CASINO: A new monte Carlo code in C language for electron beam interactions - part III: Stopping power at low energies // Scanning. – 1997. - Vol. 19. – P. 29-35.  
<http://www.gel.usherb.ca/casino/index.html> .  
<http://www.srim.org/>.
8. <http://www.srim.org/>.
9. T. Yamashita, Unraveling photonic bands: characterization of self-collimation effects in two dimensional photonic crystals // PhD Thesis. - Georgia Institute of Technology, august, 2005.  
<http://www.jeol.com/>
10. <http://www.jeol.com/>
11. S. Reyntjens and R.Puers, A review of focused ion beam applications in microsystem technology // J. Micromech. Microeng. –2001. - № 11. –P. 287-300.
12. J.A. van Kan, A.A. Bettiol and F. Watt, Proton Beam Nano-Machining: End Station Design and Testing // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. – 2003. -Vol. 777. - Material Research Society. – T.2.1.1.
13. F.Watt, J.A. van Kan, I. Raita et al., Proton beam micromachining dose normalization for SU-8 using ionoluminescence detection // Nucl. Instr. and Meth. –2003.- B. 210. - P. 14-18.
14. J.A. van Kan, A.A. Bettiol, K. Ansari et al. Proton beam writing: a progress review // Int. J. Nanotechnology. – 2004. - Vol. 1, № 4. – P.464-479.
15. D.J.W.Mous, R.G. Haitsma, T. Butz et al., The novel ultrastable HVEE 3.5 MV Singletron™ accelerator for nanoprobe applications // Nucl. Instr. and Meth. – 1997. – B. 130. –P. 31-36.
16. M.B.H. Breese, G.W. Grime, W. Linford et al., An extended magnetic quadrupole lens for a high-resolution nuclear microprobe // Nucl. Instr. and Meth. – 1999. – B. 158. –P. 48.
17. I.G.Ignat'ev, D.V.Magilin, V.I.Miroshnichenko, A.G.Ponomarev et al., Immersion probe-forming system as a way to the compact design of nuclear microprobe // Nucl. Instr. and Meth. – 2005. -B. 231. – P. 94-100.
18. Сторіжко В.Ю., Пономарьов О.Г., Мірошніченко В.І. Спосіб дослідження структури і елементного складу речовини і пристрій для здійснення цього способу (мікрозонд іонний)// Деклараційний патент на винахід, UA 67341A, G01N23/00, 2003038121 (15.06.2004 Бюл. №6).
19. V.N. Tondare, Quest for high brightness, monochromatic noble gas ion sources // J. Vac.Sci. Technol. – 2005. - A 23. – P. 1498-1508.
20. R.Hill, J. Note and B.Ward, The ALIS He Ion Source and its Application to High Resolution Microscopy // Abstracts of Seventh International Conference on Charged Particle Optics. - Trinity College, Cambridge, England, 24-28 July 2006. - P. 64.
21. J. Morgan, J. Notte, R.Hill et al., An Introduction to the Helium Ion Microscope // Microscopy Today. –2006. -V. 14, №. 4. –P. 24-31.
22. S.Babin, S. Borisov, A. Ivanchikov et al., Modeling of linewidth measurement in scanning electron microscopes using advanced Monte Carlo software // J. Vac. Sci. Technol. –2006. - B 24. –P. 3121-3124. <http://abeamtech.com/>
23. F. Watt, I. Rajta, J.A. van Kan et al., Proton beam micromachined resolution standards for nuclear microprobes // Nucl. Instr. and Meth. - 2002. -B 190. - P. 306-311.
24. J.A. van Kan, J.L. Sanchez, B.Xu et al., Resist materials for proton micromachining // Nucl. Instr. and Meth. – 1999. - B 158. – P. 179-184.
25. P. Mistry, I. Gomez-Morilla, G.W. Grime et al. // Nucl. Instr. and Meth. – 2005. - B 237. – P.188-193.
26. J.A. van Kan, A.A. Bettiol, S.Y. Chiam et al. New resists for proton beam writing // Nucl. Instr. and Meth. –2007. - B 260. – P. 460-463.
27. K. Ansari, J.A. van Kan, A.A. Bettiol and F.Watt, Fabrication of high aspect ratio 100 nm metallic stamps for nanoimprint lithography using proton beam writing // Appl. Phys. Lett. –2004. - Vol. 85, № 3. – P. 476-478.
28. K. Ansari, J.A. van Kan, A.A. Bettiol and F.Watt, Stamps for nanoimprint lithography fabricated by proton beam writing and nickel electroplating // J. Micromech. Microeng. – 2006. - №16. – P. 1967-1974.
29. S. Dzyadevch, A.A. Arkhypova, Y.I. Korpan et al., Conductometric formaldehyde sensitive biosensor with specifically adapted analytical characteristics // Anal. Chim. Acta. – 2001. - Vol. 445. – P. 47-55.
30. C. Bergren, B. Bjarneson and G. Johansson, Capacitive Biosensors // Electroanalysis. – 2001. - Vol. 13. – P.173-180.
31. H.S. Bresler, M.J. Lenkevich, J.F. Murdock et al., Application of capacitive biosensors for HIV antibody and glucose detection in Biosensor Design and Application // ACS Symp. Series. - American Chemical Society, Washington DC. -V. 51. - P.89-104.
32. Stephen R. Quake, Axel Scherer, From Micro- to Nanofabrication with Soft Materials // Science. – 2000. – V.290. – P.1536-1560.
33. Helene Andersson, Albert Van den Berg, Microfluidic devices for cellomics: a review // Sensor Actuator. – 2003. - B 92. – P.315-325.

34. Kambiz Ansari Mahabadi, Isabel Rodriguez, Sow Chorong Haur et al., Fabrication of PMMA micro- and nanofluidic channels by proton beam writing: electrokinetic and morphological characterization // J. Micromech. Microeng. –2006. - №16. – P. 1170-1180.
35. T.C. Sum, A.A. Bettiol, J.A. van Kan et al., Proton beam writing of low-loss polymer optical waveguides // Appl. Phys. Lett. – 2003. -V. 83. – P.1707-1709.
36. T.C. Sum, A.A. Bettiol, H.L. Seng et al. Proton beam writing of passive waveguides in PMMA // Nucl. Instr. and Meth. – 2003. -B 210. –P. 266.

**А.Г. Пономарев**, кандидат физ.-мат. наук,  
ведущий научный сотрудник

*Поступила в редакцию 28 сентября 2008 г.*