

Формирование прецизионного пучка протонов в зондовой системе с индивидуальными источниками питания магнитных квадрупольных линз (результаты эксперимента)

А.А. Пономарева^{1,*}, Д.В. Магилин², Г.С. Воробьев¹, А.Г. Пономарев²

¹ Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

² Институт прикладной физики НАН Украины, ул. Петропавловская, 58, 40030 Сумы, Украина

(Получено 10.01.2013; опубликовано online 28.03.2013)

Обоснована необходимость разработки новых зондовых систем формирования пучков протонов МэВ-ных энергий в литографических технологиях высокого разрешения. Описана экспериментальная установка ядерного сканирующего микронзонда и условий проведения эксперимента при определении параметров сформированного пучка: величины тока и размеров зонда. Данные эксперимента показали более чем трехкратное увеличение плотности тока в зонде для предложенной системы – квадруплета магнитных квадрупольных линз с индивидуальными источниками питания по сравнению с конвенциональной системой, распределенным «русским квадруплетом».

Ключевые слова: Магнитная квадрупольная линза, Протонная пучковая литография, Пучок протонов, Ядерный сканирующий микронзонд.

PACS numbers: 42.82.Cr, 81.16.Nd

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из приложений сфокусированных пучков протонов с энергией нескольких мегаэлектронвольт являются литографические технологии высокого разрешения [1, 2]. Благодаря физическим свойствам взаимодействия пучков протонов в этом диапазоне энергий с резистивными материалами создается возможность фабрикация трехмерных наноструктур с высоким аспектным отношением [3]. Такая технология в настоящее время имеет устойчивое название proton beam writing (PBW). В связи с невысокой яркостью источников протонов, применяемых в электростатических ускорителях, плотность тока в сфокусированном пятне или зонде на поверхности облучаемого материала и размеры этого зонда являются определяющими факторами в скорости фабрикация и размерах наноструктур. Поэтому тенденции развития технологии PBW связаны с созданием новых зондовых систем формирования прецизионного пучка протонов, которые должны иметь более высокую пропускную способность и более высокие коэффициенты уменьшения по сравнению с существующими микронзондовыми системами.

В работах [4, 5] проведено теоретическое исследование фокусирующих свойств зондоформирующей системы (ЗФС) состоящей из четырех магнитных квадрупольных линз с индивидуальными источниками питания. Установлена возможность трехкратного увеличения приведенного аксептанса и повышение значений коэффициентов уменьшения ЗФС.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования формирования прецизионного пучка протонов в зондовой системе с индивидуальными источниками питания четырех магнитных квадрупольных линз (МКЛ) и установлена корреляция численных и экспериментальных результатов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ЯДЕРНОГО СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОЗОНДА

Экспериментальное исследование формирования прецизионного пучка протонов в зондовой системе с индивидуальными источниками питания МКЛ осуществлялось на установке ядерного сканирующего микронзонда Института прикладной физики НАН Украины [6], общий вид которого приведен на Рис. 1.

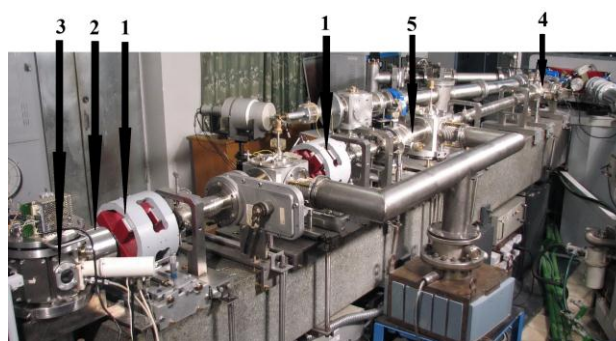


Рис. 1 – Общий вид экспериментальной установки ядерного сканирующего микронзонда: 1 - интегрированные дублеты МКЛ; 2 – ферромагнитная сканирующая система; 3 – камера размещения облучаемых образцов; 4 – объектный коллиматор; 5 – угловой коллиматор

Формирование пучка протонов здесь осуществляется в два этапа. На первом этапе с помощью прецизионных объектного и углового коллиматоров происходит первичное формирование пучка с необходимым фазовым объемом, который на втором этапе формируется в зонд с помощью четырех МКЛ объединенных в интегрированные дублеты [7]. Питание четырех линз осуществляется от двух независимых источников тока PSM-2010, GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD, у которых пульсации и шумы < 2 мArms, стабильность тока $\pm (0,01 \% + 250 \text{ мкА})$,

* ponomareva_a_a@pochta.ru

разрешение 1 мА (для шкалы 10 А). Такое количество источников необходимо для обеспечения стигматической фокусировки пучка на поверхности облучаемого образца в двух направлениях перпендикулярных к оптической оси. Так как количество линз в системе больше числа источников, то линзы подключены к ним по схеме распределенного «русского квадруплета» (РРК) [8]. Здесь первая и четвертая линзы имеют подключение к первому источнику, однако четвертая подключена с инверсным направлением тока. Вторая и третья линзы подключены ко второму источнику, где вторая подключена инверсно. Оба дублета разнесены вдоль оптической оси на оптимальное расстояние, которое обеспечивает наибольший приведенный аксептанс такой ЗФС. Между последней линзой и образцом расположена ферромагнитная сканирующая система, которая обеспечивает дискретное двухкоординатное сканирование сфокусированным пучком в диапазоне ± 500 мкм. Минимальное время нахождения пучка в пикселе (фиксированном положении в растре сканирования) составляет 200 мкс. В режиме реального времени в каждом пикселе осуществляется измерение накопленного заряда, вторичной электронной эмиссии, спектров обратного рассеянных протонов и характеристического рентгеновского излучения индуцированного протонами. Для определения размеров зонда применяется стандартная медная микрометрическая сетка с периодом 25,4 мкм. По результатам обработки измеренного выхода вторичной электронной эмиссии в процессе сканирования определяются размеры зонда. Наилучший результат для размеров зонда для этой установки составил $2,3 \times 2,2$ мкм² с общим током 205 ± 18 пкА, где 90 % тока сосредоточено в области зонда.

3. КВАДРУПЛЕТ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ МАГНИТНЫХ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗ

На Рис. 2 показана схема расположения МКЛ в квадруплете с индивидуальными источниками питания (КИИП). Геометрия расположения основных элементов ЗФС аналогична микронзондовой установке рассмотренной выше и имеет следующие значения: $a_0 = 1,95$ м – объектное расстояние, расстояние между объектным и угловым коллиматорами; $a_1 = 2,54$ м; $a_2 = 0,0394$ м; $a_3 = 0,7854$ м; $a_4 = 0,0394$ м; – дрейфовые участки движения пучка; $L_1 = L_4 = 0,07141$ м; $L_2 = L_3 = 0,05067$ м; – длины эффективного поля линз; $g = 0,236$ м – рабочее расстояние, расстояние от границы эффективного поля на выходе последней линзы до поверхности мишени. Формирование пучка в такой зондовой системе условно можно разделить на три этапа. На первом этапе происходит первичное формирование пучка с помощью прямоугольного объектного и углового коллиматоров. Конструктивно прямоугольное коллимационное окно здесь создается двумя скрещенными щелями. На этом этапе формируется пучок с максимальным фазовым объемом, который может быть сфокусирован квадруплетом МКЛ на поверхности мишени в квадратное пятно с заданными размерами ($d \times d$). Такой фазовый объем пучка называется аксептансом приведенным к заданному размеру пятна или приведенным аксептансом.

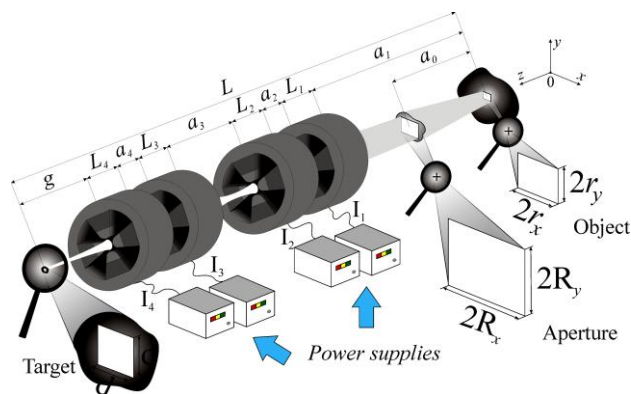


Рис. 2 – Схема ЗФС с применением КИИП

На втором этапе первая подсистема, состоящая из двух линз, обеспечивает согласование первичных фазовых характеристик пучка с ионно-оптическими характеристиками второй подсистемы из двух линз, задействованных на третьем этапе финальной фокусировки пучка. Линзы подсистемы финальной фокусировки пучка подсоединены к одному из двух источников питания, величины тока которых (I_3 и I_4) являются связанными параметрами, обеспечивающими стигматическую фокусировку в двух поперечных плоскостях (x, y). В случае если первая подсистема линз имеет независимые источники питания (I_1 и I_2), тогда сфокусировать пучок на мишени можно бесконечным числом способов за счет выбора значений питания всех источников, т.е. такая ЗФС является переопределенной. Поэтому величины тока первых двух источников являются свободными параметрами. Так как первая подсистема МКЛ является согласующей, то устанавливается требование обеспечить оптимальное согласование процесса формирования пучка, что может быть количественно выражено в максимальной величине приведенного аксептанса A_d . Задание априори формы зонда в виде квадрата удобно для проведения теоретического анализа фокусирующих свойств зондоформирующих систем. Решение такой оптимизационной задачи дает следующие ионно-оптические характеристики зондовой системы КИИП, которые приведены в Таблице 1, где для сравнения так же даны аналогичные характеристики для зондовой системы РРК. В этой таблице представлены данные для плотности приведенного аксептанса $\bar{A}_{1,0} = A_{1,0} / S$ при формировании пучка с максимальным относительным разбросом по импульсу протонов $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ с энергией 1,4 МэВ для размеров зонда $d = 1$ мкм, где $S = d^2$ площадь зонда. Переход к плотности приведенного аксептанса вызван тем, что в эксперименте достаточно трудно получить зонд квадратной формы, поэтому сравнение фокусирующих свойств различных зондоформирующих систем адекватно можно осуществить на основании величины максимальной плотности тока в зонде. Это следует из следующих рассуждений. Ток пучка $I = b \cdot \varepsilon$, где b и ε приосевая яркость и эмиттанс пучка, соответственно. Так как b можно считать величиной постоянной, то:

$$\max(I)/S = b \cdot \max(\varepsilon)/S = b \cdot A_S/S,$$

где S – площадь зонда, A_S – приведенный аксептанс к площади зонда.

Таблица 1 – Ионно-оптические характеристики ЗФС с четырьмя МКЛ, имеющих питание по схемам РРК и КИИП

ЗФС	РРК	КИИП
Коэффициенты уменьшения		
D_x	23,5	- 48,6
D_y	23,5	118,7
Коэффициенты аберраций		
$\langle x/x'\delta \rangle$,	- 526	881
$\langle y/y'\delta \rangle$, мкм/(мрад %)	- 160	- 465
$\langle x/x'^3 \rangle$,	932	- 6328
$\langle x/x'y'^2 \rangle$,	264	- 12458
$\langle y/y'^3 \rangle$,	38	2867
$\langle y/y'x'^2 \rangle$, мкм/мрад ³	264	5099
Плотность приведенного аксептанса $\bar{A}1,0$, мрад ²	0,67	1,78

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОНДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ КИИП

Основной целью проведения экспериментов была проверка данных теоретического анализа фокусирующих свойств КИИП и определения величины плотности тока в зонде при его площади $S \approx 4 \text{ мкм}^2$. Для этого были проведены предварительные расчеты по определению размеров объектного и углового коллиматоров, которые обеспечивают максимальный ток пучка и позволяют сфокусировать пучок в зонд с заданной площадью. Расчеты основывались на экспериментально определенном неравномерном распределении ионов в фазовом пространстве занимаемом пучком [9]. В результате получены расчетные размеры коллиматоров $r_x \times r_y = 90 \times 220 \text{ мкм}^2$ $R_x \times R_y = 160 \times 180 \text{ мкм}^2$, которые обеспечивают формирование зонда $d_x \times d_y = 2,0 \times 1,8 \text{ мкм}^2$ (FWHM) с током $I = 700 \text{ пкА}$. Расчетное распределение плотности тока в зонде показано на Рис. 3, где область зонда на полувысоте распределения содержит 70 % тока пучка.

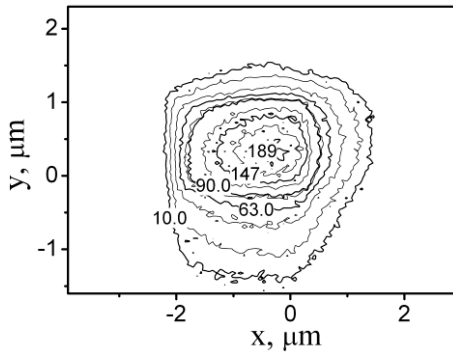


Рис. 3 – Контуры расчетного распределения плотности тока в зонде $J(x, y)$ с размерностью пкА/мкм² при формировании пучка с помощью КИИП

В эксперименте по формированию пучка протонов с энергией 1,4 МэВ размеры объектного и углового коллиматоров были установлены в соответствии с расчетными значениями. Ток пучка после коллимирования измерялся с помощью цилиндра Фарадея и интегратора тока в течении 10 с, результаты величины тока записывались на жесткий диск компьютера, после чего производилась обработка временной

зависимости тока, в результате чего было получено среднее значение и среднеквадратичное отклонение тока пучка $I = I_{cp} \pm \Delta I_{rms} = (719 \pm 69) \text{ пкА}$. Питание первых двух МКЛ подсистемы согласования было установлено в соответствии с расчетными значениями, питание третьей и четвертой линз подсистемы финальной фокусировки выбирались из условия получения зонда с наименьшими размерами. Первоначально это осуществлялось с помощью кварцевого экрана и визуального определения размеров зонда с помощью оптического микроскопа снабженного цифровой камерой. Точная фокусировка производилась за счет уточнения питания линз подсистемы финальной фокусировки в ручном режиме. В результате сканирования калиброванной микрометрической сетки с шагом 25,4 мкм и размерами перемычки около 7 мкм в двух поперечных направлениях x и y производилась регистрация вторичной электронной эмиссии (SEE). Профили выхода SEE обрабатывались системой сбора данных в режиме онлайн, что позволяет определять размеры зонда по величине полной ширины на полувысоте распределения плотности тока на основании методики изложенной в работе [10]. Здесь подгоночная функция для функции выхода вторичной электронной эмиссии f_x зарегистрированного детектором при сканировании в линию в x направлении, может быть выражена в виде:

$$f_x(X_0, \lambda, \tau, \gamma, d_x, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} (\lambda \cdot \theta(x) + \tau \cdot \delta(x - a)) \cdot J(x) = \lambda \int_{-\infty}^a J(x) dx + \tau \cdot J(a) + \gamma = \frac{\lambda}{2} \left[1 + \text{Erf} \left(\frac{2\sqrt{\ln 2}}{d_x} (a - X_0) \right) \right] + \frac{\tau}{d_x} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp \left[-\frac{\ln 16}{d_x^2} (a - X_0)^2 \right] + \gamma, \quad (1)$$

где λ – параметр, описывающий интенсивность выхода вторичных электронов с поверхности сетки перпендикулярной оси пучка; τ – параметр, описывающий интенсивность выхода вторичных электронов с боковой поверхности ячейки сетки по направлению пучка; γ – выход вторичных электронов в полостях сетки, если сама сетка расположена на подложке; $\text{Erf}(z)$ – функция ошибки; a – координата положения края перемычки сетки в x направлении; d_x – полная ширина на полувысоте распределения плотности тока в x направлении $J(x)$.

Здесь предполагается, что плотность тока пучка в поперечном сечении в плоскости поверхности сетки имеет нормальное распределение и относительно центра $x = X_0$ задается выражением:

$$J(x) = \frac{2}{d_x} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp \left[-\frac{\ln 16}{d_x^2} (x - X_0)^2 \right]. \quad (2)$$

Математическая подгонка функции (1) для экспериментальных данных линии сканирования осуществляется при помощи нелинейного метода Левенберга-Марквардта. При подгонке профиля выхода вторичной электронной эмиссии ниже использованы пять параметров: λ, τ, γ, a и d_x . В направлении

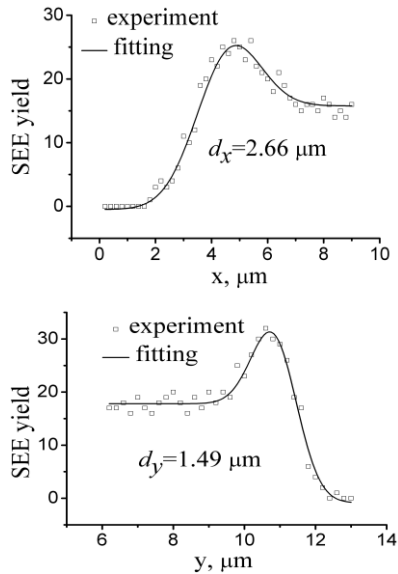


Рис. 4 – Результаты подгонки профилей выхода вторичной электронной эмиссии при сканировании калибровочной сетки сформированным в зонд пучком протонов. При этом размеры зонда d_x , d_y указаны на полувысоте распределения плотности тока пучка

у процедура аналогична. Результаты процедуры подгонки приведены на Рис. 4, где показаны наименьшие размеры зонда, полученные при ручной юстировке зондовой системы КИИП.

Так как выход вторичной эмиссии имеет статистический характер, поэтому было проведено измерение выхода SEE из серий 20 проходов сканирования в x и y направлениях. Обработка профилей выхо-

да для каждой из серий и полученных в результате этого данных дала следующие размеры зонда: $d_{x(FWHM)} = 2,72 \pm 0,29$ мкм; $d_{y(FWHM)} = 1,51 \pm 0,14$ мкм. Несложные вычисления показывают, что средняя плотность тока в зонде для КИИП составляет $j_{киип} = 123$ пкА / мкм², в то время как для зондовой системы РКК эта величина $j_{ркк} = 37$ пкА / мкм², где учтено, что для КИИП в зонде сосредоточено 70 % полного тока пучка, а для РКК эта величина равна 90 %. Полученные результаты эксперимента коррелируют с результатами теоретических исследований работы [5].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальное исследование формирования прецизионного пучка протонов в зондовой системе с индивидуальными источниками питания магнитных квадрупольных линз подтвердило данные ранее проведенного теоретического анализа такой зондоформирующей системы: плотность тока пучка протонов в зонде ($j_{киип} = 123$ пкА / мкм²) более чем в три раза превышает аналогичную величину для широко распространенной в мире зондоформирующей системы с применением распределенного «русского квадруплета» ($j_{ркк} = 37$ пкА / мкм²). Это свидетельствует о том, что процесс экспонирования сфокусированным протонным пучком, при внесении фиксированной дозы облучения в случае применения новой зондоформирующей системы может быть ускорен более чем в три раза, что актуально в реализации литографической технологии PBW.

The Precision Proton Beam Formation in the Probe System with Individual Power Supplies of Magnetic Quadrupole Lenses (Experimental Results)

A.A. Ponomarova¹, D.V. Magilin², G.S. Vorobjov¹, A.G. Ponomarev²

¹ Sumy State University, 2, Rimsky-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine

² Institute of Applied Physic, NAS of Ukraine, 58, Petropavlovskaya Str., 40030 Sumy, Ukraine

Justified the search of new probe systems to forming MeV energy proton beams in high resolution lithographic techniques. To produce description of the nuclear scanning microprobe and experimental conditions to determine parameters of the generated beam: the current and the size of the probe. The processing of the experimental data showed, that more than triple of current density increase in the probe for the new probe system - quadruplet of magnetic quadrupole lenses with individual power supplies compared to the conventional system of distribution "Russian quartet".

Keywords: Magnetic quadrupole lense, Proton beam writing, Proton beam, Nuclear scanning microprob.

Формування прецизійного пучка протонів у зондовій системі з індивідуальними джерелами живлення магнітних квадрупольних лінз (результати експерименту)

Г.О. Пономарьова¹, Д.В. Магілін², Г.С. Воробйов¹, О.Г. Пономарьов²

¹ Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

² Інститут прикладної фізики НАН України, вул. Петропавлівська, 58, 40030 Суми, Україна

Обґрунтовано необхідність розробки нових зондових систем формування пучків протонів МеВ-них енергій у літографічних технологіях високого розрізнення. Наведено опис експериментального пристрою ядерного скануючого мікрозонду й умов проведення експерименту при визначенні параметрів

сформованого пучка: величина тока й розмірів зонда. Дані експерименту показали більш ніж трикратне збільшення щільності току в зонді для запропонованої системи – квадруплета магнітних квадрупольних лінз з індивідуальними джерелами живлення в порівнянні з конвенціональною системою, розділеним «російським квадруплетом».

Ключові слова: Магнітна квадрупольна лінза, Протонна пучкова літографія, Пучок протонів, Ядерний скануючий мікроскоп.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. F. Watt, M. Breese, A. Bettiol, J.A. van Kan, *Mater. Today* **10** No6, 20 (2007).
2. А.Д. Погребняк, А.Г. Пономарев, А.П. Шпак, Ю.А. Куницкий, *УФН* **182** No3, 287 (2012) (A.D. Pogrebnyak, A.G. Ponomarev, A.P. Shpak, Yu.A. Kunitskii, *Phys. Usp.* **55** 270 (2012)).
3. J.A. van Kan, A.A. Bettiol, F. Watt, *Nano Lett.* **6**, 579 (2006).
4. G. Ponomarev, G.S. Vorobjov, A.A. Ponomarova, *Radioelectronics and Communications Systems* **53** No2, 113 (2010).
5. A.A. Ponomarova, K.I. Melnik, G.S. Vorobjov, A.G. Ponomarev, *Nucl. Instrum. Meth. B* **269**, 2202 (2011).
6. D.V. Magilin, A.G. Ponomarev, V.A. Rebrov, N.A. Sayko, K.I. Melnik, V.I. Miroshnichenko, V.Y. Storizhko, *Nucl. Instrum. Meth. B* **267**, 2046 (2009).
7. V.A. Rebrov, A.G. Ponomarev, V.K. Palchik, N.G. Melnik, *Nucl. Instrum. Meth. B* **260**, 34 (2007).
8. А.Д. Дымников, Т.Я. Фишкова, С.Я. Явор, *ЖТФ* **35** No3, 431 (1965).
9. A.A. Ponomarev, V.I. Miroshnichenko, A.G. Ponomarev, *Nucl. Instrum. Meth. B* **267**, 2041 (2009).
10. C.N. Udalagama, A.A. Bettiol, J.A. van Kan, E.J. Teo, M.B. Breese, T. Osipowicz, F. Watt, *Nucl. Instrum. Meth. B* **231**, 389 (2005).