

ямы и момент начала ее увеличения, удалось накопить  $N_{\text{exper}}^* = 2 \cdot 10^8$ . Это значение в 1,3 раза превышает максимальное число накопленных частиц без применения данной методики.

Однооборотная инжекция позитронного пучка в накопителе накладывает ограничение на длительность импульса инжекции, которая составляет около 300 нс при энергии позитронного пучка 10 кэВ, соответственно, выбирается время вывода сгустка из ловушки. Время вывода определялось по фронту нарастания заряда на коллекторе. Оно не превысило 500 нс при длительности переднего фронта отпирающего импульса 200 нс. Достигнутое значение времени вывода сгустка из ловушки позволяет захватить в накопитель 60 % накопленных частиц, что при полученном числе накопленных частиц обеспечивает достижение проектных параметров.

### Заключение

Разработан инжектор позитронов низкой энергии на базе радиоактивного изотопа  $^{22}\text{Na}$  активностью 25 мКи, обеспечивающий необходимую интенсивность сгустка позитронов до  $10^8$  частиц за импульс при проектной периодичности инжекции в накопителе менее 100 с.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 05-02-16320, грантом Президента РФ для поддержки молодых российских ученых, кандидатов наук и ведущих научных школ (МК-3948.2007.2).*

### Литература

1. Meshkov I. N., Sidorin A. O. // NIM A 391. 1997 V. 391. P. 216.
2. Meshkov I., Seleznev I., Sidorin A., Smirnov A., Trubnikov G., Yakovenko S. // NIM B. 2004. V. 214. P. 186.
3. Болтушкин Е. В., Кобец А. Г., Коротаев Ю. В. и др. // Атомная энергия. 2005. № 98. С. 225.
4. Jørgensen L. V., van der Werf D. P., Watson T. L., Charlton M., Collier M. J. T., Doser M., Funakoshi R. // Appl. Surf. Sci., 2002. V. 194. P. 312.
5. Jørgensen L. V., van der Werf D. P., Watson T. L., Charlton M., Collier M. J. T. // Nonneutral Plasma Physics IV/Edited by F. Anderegg, L. Schweikhard, C. F. Driscoll. — New York: American Institute of Physics. 2002. V. 606. P. 35.
6. Быковский В. Ф., Кобец А. Г., Болтушкин Е. В. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Вып. 7. С. 63.
7. Мешков И. Н., Павлов В. Н., Сидорин А. О., Яковенко С. Л.: Препринт/ОИЯИ, Р9-2007-2.
8. Murphy T. J., Surko C. M. // Phys. Rev. A. 1992. V. 46. P. 696.
9. Murphy T. J., Shurko C. M. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. P. 1878.
10. Driscoll C. F. // In Low Energy Antimatter/ Edited by D. B. Cline. — Singapore: World Scientific. 1986. P. 184.
11. Surko C. M., Gilbert S. J., Greaves R. G. // AIP Conf. Proc. № 498. — New York, 1999. P. 3.

*Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.*

## The pulse injector of the low energy positrons

V. F. Bykovsky, A. G. Kobets, Yu. V. Korotaev, I. N. Meshkov, A. Yu. Rudakov,  
V. N. Pavlov, A. O. Sidorin, G. V. Trubnikov, S. L. Yakovenko  
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*The cryogenic source of slow positrons has been tested with a test isotope  $^{22}\text{Na}$  of the initial activity of 80 MBq. The continuous slow positron beam with average energy of 1.2 eV, width of a spectrum 1 eV has been obtained. The achieved moderator efficiency is about 1 %. The accumulation process in the positron trap was investigated with electron flux. The life time of the electrons in the trap,  $\tau_{\text{life}} \geq 80$  s and capture efficiency  $\varepsilon \sim 0.4$  have been obtained. The maximum number of the accumulated particle was  $N_{\text{exper}} = 2 \cdot 10^8$  at the initial flux of  $5 \cdot 10^6$  electrons per sec.*

УДК 537.533.3

## Протонный сканирующий микрозонд с интегрированной зондоформирующей системой

А. Г. Пономарев, В. А. Ребров, Н. А. Сайко, А. Б. Дудник, П. А. Павленко,  
А. А. Дрозденко, В. И. Мирошниченко, В. Е. Сторижко

Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины, г. Сумы, Украина

*На новом протонном сканирующем микрозонде на базе электростатического ускорителя "Сокол" с максимальным напряжением 2 МВ начаты эксперименты в целях определе-*

*ния параметров пучка на мишени. Особенность микрозонда — интегрированная зондоформирующая система (ЗФС), которая основывается на дублетах магнитных квадрупольных линз новой конструкции. Изложен общий подход оптимизации оптики зондоформирующей системы. Дано описание конструктивных особенностей микрозонда. Приведены экспериментальные данные по измерениям параметров пучка.*

Развитие микро- и нанотехнологий является движущей силой в различных областях науки, где среди широкого многообразия методов и устройств протонный сканирующий микрозонд с энергией пучка в несколько мегаэлектронвольт имеет ряд преимуществ. В технологических процессах создания наноразмерных структур технология, получившая название “proton beam writing” [1] за счет возможности проникновения ускоренных протонов на глубину до 50 мкм практически без изменения поперечных размеров пучка, позволяет создавать трехмерные объекты с размерами  $\approx 30$  нм. Наблюдается динамика уменьшения масштабов этих объектов за счет улучшения разрешающей способности микрозондов и усовершенствования резистивных материалов. С другой стороны, возможность детектирования продуктов резонансных ядерных реакций, рассеянных протонов на ядрах атомов исследуемых образцов и характеристического рентгеновского излучения индуцированного протонным пучком, позволяет проводить количественный неразрушающий анализ индивидуальных микрообъектов с чувствительностью на уровне 1—10 ppm и обеспечивает обнаружение практически всех элементов с локальностью около 1 мкм [2, 3].

Проект по созданию протонного сканирующего микрозонда на базе малогабаритного электростатического ускорителя “Сокол” [4] с максимальным напряжением на кондукторе 2 МВ ориентирован на проведение исследований распределения элементов на межзеренных границах конструкционных материалов, состава и структуры материалов в сварных швах и биофизических исследований.

Оптика ЗФС микрозонда была рассчитана с учетом параметров электростатического ускорителя и необходимого получения пространственного разрешения  $\approx 2$  мкм с током пучка на мишени  $\approx 100$  пА.

### Оптимизация оптики зондоформирующей системы

В микрозондовых системах, основанных на сфокусированных пучках ионов с энергией несколько мегаэлектронвольт, для локального неразрушающего элементного анализа исследуемых образцов размер пятна и величина тока на мишени являются главными характеристиками аналитического прибора. Улучшение разрешающей способности ЗФС связано с уменьшением размеров пят-

на, однако это сопряжено с ограничением тока пучка, что ухудшает чувствительность методов, основанных на регистрации вторичных эффектов взаимодействия частиц пучка с атомами исследуемых образцов.

После приобретения необходимой энергии в ускорителе и сепарации по сорту ионов пучок на входе в ЗФС формируется с помощью системы коллиматоров в целях согласования фазового объема с аксептансом ЗФС. В данном случае размер пятна на мишени является виртуальной апертурой, которая рассматривается как составная часть ЗФС. В результате входной ток может быть представлен в виде  $I = b \cdot \varepsilon$ , где  $b$ ,  $\varepsilon$  — яркость и эмиттанс пучка, соответственно. В силу того, что яркость пучка является характеристикой источника ионов и типа ускорителя, можно записать соотношение  $\max(I) = b \cdot \max(\varepsilon)$ . В свою очередь максимальный эмиттанс пучка, который ЗФС способна сфокусировать в пятно заданных размеров, определяет ее аксептанс  $A$  ( $A = \max(\varepsilon)$ ). Поэтому в качестве критерия оптимизации оптики ЗФС была выбрана величина аксептанса. Более детально этот подход изложен в работе [5].

Для фокусировки ионных пучков с энергией несколько мегаэлектронвольт наиболее эффективно применяются магнитные квадрупольные линзы, поэтому были рассмотрены ЗФС на базе параметрических мультиплетов магнитных квадрупольных линз с двумя независимыми источниками питания. В качестве параметров были выбраны:

$a$  — объектное расстояние (расстояние между объектным и угловым коллиматорами);

$a_i$  — расстояние между эффективными границами поля ( $i-1$ ) и ( $i$ ) линз ( $a_1$  — расстояние между объектным коллиматором и эффективной границей поля первой линзы);

$g$  — рабочее расстояние (расстояние между эффективной границей поля последней линзы и плоскостью мишени);

$l$  — длина системы,  $L_{e,i}$  — эффективная длина поля ( $i$ )-й линзы;

$N$  — число линз в системе.

В работе [6] нами показано, что увеличение числа линз в ЗФС с двумя независимыми источниками питания не дает значительного повышения величины аксептанса и уже для систем с пятью и шестью линзами различие в аксептансе находится на уровне величины погрешности вычислений. Поэтому наиболее эффективным является квадруплет магнитных квадрупольных линз в конфигура-

ции, когда первая, вторая, третья и четвертая линзы объединены в дублеты и оба дублета разнесены на некоторое расстояние вдоль оптической оси. Система запитывания линз аналогична системе, изложенной в работе [7], и в настоящее время имеет название "русский квадруплет".

Расчет оптических свойств ЗФС производили с применением матричного метода — метода матрицантов, описанного в [8]. Поле магнитной квадрупольной линзы задавалось на основе представления скалярного магнитного потенциала в виде

$$w(x, y, z) = 2W_2(z)xy + U_3(z)x^3 + 3W_3(z)x^2y - 3U_3(z)xy^2 - W_3(z)y^3 + U_4(z)x^4 + (4W_4(z) - W_2''(z)/6)x^3y - 6U_4(z)x^2y^2 - (4W_4(z) + W_2''(z)/6)xy^3 + U_4(z)y^4 + \dots, \quad (1)$$

где  $W_2(z)$  — основная квадрупольная компонента;  $W_3(z)$ ,  $U_3(z)$  — основная и поворотная секступольные паразитные компоненты, соответственно;  $W_4(z)$ ,  $U_4(z)$  — основная и поворотная октупольные паразитные компоненты, соответственно.

Такое представление потенциала дает возможность учитывать нарушение квадрупольной симметрии поля магнитных квадрупольных линз. Продольное распределение мультипольных компонент поля  $W_i(z)$ ,  $U_i(z)$  ( $i = 2, 3, 4$ ) представлялось в виде прямоугольной модели, что позволяет получить

аббераций 3-го порядка в магнитных квадрупольных линзах

$$\vec{X} = (x, x', y, y', x\delta, x'\delta, y\delta, y'\delta, x^2, xx', x'^2, y^2, yy', y'^2, xy, x'y, xy', x'y', x^3, x^2x', xx'^2, x^3, xy^2, xyu', xy^2, x'y^2, x'yu', x'y'^2, y^3, y^2y', yy'^2, y^3, yx^2, yxx', yx'^2, y'x^2, y'xx', y'x'^2)^T, \quad (2)$$

где  $x, y$  — отклонения частиц пучка от оптической оси  $z$ ;

$x', y'$  — углы между проекциями вектора скорости на плоскости  $xOz$  и  $yOz$  с осью  $z$ , которые задают направленные движения частиц;

$\delta = (p-p_0)/p_0$  — разброс частиц по импульсу от некоторого среднего значения  $p_0$ .

Определение параметров в мультиплете, отвечающих максимальному аксептансу, осуществлялось на основе вычисления ионно-оптических свойств ЗФС и более детально описано в [9]. Ниже приведены результаты оптимизации оптики ЗФС на базе квадруплета магнитных квадрупольных линз, которые реализованы в конструкции протонного сканирующего микронзонда.

### Особенности конструкции микронзонда

В процессе оптимизации оптики ЗФС было определено, что магнитные квадрупольные линзы вдоль оптической оси расположены парами на небольшом расстоянии одна от другой. Поэтому были

#### Параметры базовой ЗФС протонного сканирующего микронзонда

Длина системы $l$ , см.....	405,8
Эффективные длины линз $L_{E,(1)}, L_{E,(2)}$ , см.....	7,141; 5,068
Расстояние между линзами в дублете $a_2 = a_4$ , см.....	3,94
Радиус апертуры линз $r_a$ , см.....	0,65
Рабочее расстояние $g$ , см.....	22,0
Объектное расстояние, $a$ , см.....	270
Максимальная магнитная индукция на полюсе при $E = 2$ МэВ и $H^+$ , $B_{\max}$ , Тл.....	0,203
Коэффициенты уменьшения $D_x = D_y$ .....	29
Хроматическая абберация $C_{px}; C_{py}$ , мкм/мрад/%.....	-601; -175
Собственные сферические абберации $\langle x/\theta^3 \rangle; \langle x/\theta\phi^2 \rangle; \langle y/\phi^3 \rangle; \langle y/\theta^2\phi \rangle$ , мкм/мрад <sup>3</sup> .....	1425; 376; 53; 376
Паразитные абберации, мкм/мрад <sup>2</sup> , обусловленные:	
допустимыми секступольными компонентами $\langle x/\theta^2 \rangle; \langle x/\theta\phi \rangle; \langle x/\phi^2 \rangle; \langle y/\theta^2 \rangle; \langle y/\theta\phi \rangle; \langle y/\phi^2 \rangle$ .....	-794; -175; 27; -88; 54; 23
октупольными компонентами $\langle x/\theta^3 \rangle; \langle x/\theta\phi^2 \rangle; \langle y/\phi^3 \rangle; \langle y/\theta^2\phi \rangle$ .....	-1001; -115; 109; -115
Размеры объектного коллиматора для пучка $H^+$ ( $E = 2$ МэВ, квадратного пятна на мишени $d = 2,5$ мкм; $I = 100$ пА, $r_x, r_y$ ), мкм.....	39; 38
Соответствующий аксептанс, мкм <sup>2</sup> ·мрад <sup>2</sup> .....	10,7

матрицу преобразования координат фазовых моментов в аналитическом виде. Вектор фазовых моментов выбирался из необходимости учета хроматических аббераций, паразитических аббераций 2- и 3-го порядков, а также собственных

разработаны и запатентованы [10] дублеты магнитных квадрупольных линз, ярмо и полюсные наконечники которых составляют единое целое и изготовлены из одного куска магнитомягкого материала с помощью электроэрозионной техноло-

гии обработки металла. Точность позиционирования полюсных наконечников при радиусе апертуры линзы 6,5 мм составляет 5 мкм, шероховатость поверхности 0,65 мкм. Измеренный максимальный градиент поля на оси в линейной области зависимости магнитной индукции от напряженности поля составляет 0,65 Тл/см. На рис. 1 показан дублет магнитных квадрупольных линз новой конструкции. Более подробно технические характеристики и результаты испытаний дублетов приведены в работе [11]. Применение таких дублетов, составляющих основу интегрированной ЗФС микрозонда, позволило вдвое сократить число механизмов позиционирования линз относительно оптической оси системы. Это в свою очередь уменьшило паразитические aberrации, связанные с механической юстировкой линз.



Рис. 1. Дублет магнитных квадрупольных линз новой конструкции

Общий вид и схема микрозонда приведены на рис. 2. Дублет электростатических линз 1 составляет конденсорную систему. Корректирующие катушки 3 обеспечивают соосность пучка с оптической осью ЗФС. Щелевой прибор 5, имеющий водяное охлаждение, гасит основной ток пучка. Прецизионные объектный и угловой коллиматоры формируют пучок с максимальным фазовым объемом на входе в ЗФС. Дублеты магнитных квадрупольных линз новой конструкции 9 обеспечивают фокусировку пучка на мишени. Ферромагнитная сканирующая система (более подробно описана в [12]) обеспечивает сканирование пучка на мишени с растром ±500 мкм и имеет специальный дополнительный режим сканирования со сдвигом оси пучка. Все элементы ЗФС микрозонда расположены на антивибрационном фундаменте.

Разработана новая система сбора данных, синхронизированная с режимом сканирования [13]. Набор спектрометрической информации осуществляется одновременно с трех детектирующих устройств: вторичных электронов 10, обратно рассеянных ионов 15 и характеристического рентгеновского излучения индуцированного ионами пучка 11.

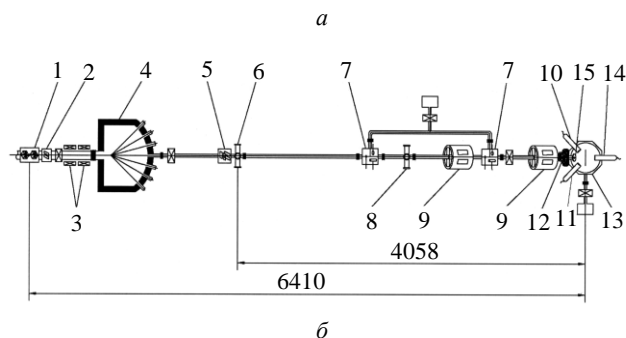


Рис. 2. Протонный сканирующий микрозонд с интегрированной ЗФС:

а — общий вид; б — общая схема:

- 1 — дублет электростатических линз; 2, 5 — щелевые приборы; 3 — корректирующие катушки; 4 — раздаточный магнит; 6 — объектный коллиматор; 7 — система диагностики пучка; 8 — угловой коллиматор; 9 — дублет магнитных квадрупольных линз; 10 — детектор вторичных электронов; 11 — детектор характеристического рентгеновского излучения; 12 — сканирующая система; 13 — мишенная камера; 14 — CCD-камера; 15 — детектор заряженных частиц

Детектирование вторичных электронов осуществляется сцинтилляционным коллектором, оптически соединенным с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Детектор обеспечивает эффективный сбор вторичных электронов на рабочем расстоянии до 80 мм и исполнен по классической схеме: коллекторный сцинтиллятор, световод, ФЭУ, предварительный усилитель.

В качестве детектора обратно рассеянных ионов используется кольцевой поверхностно-барьерный детектор ORTEC® модели TC-017-050. Для детектирования характеристического рентгеновского излучения применен полупроводниковый детектор AMPTЕК® модели XR-100CR с термоэлектрическим охлаждением на элементах Пельтье. Все это в совокупности позволяет проводить неразрушающий локальный элементный анализ исследуемых объектов.

### Результаты испытаний

Прежде чем проводить локальный элементный анализ, необходимо определить параметры пучка на мишени. Для этой цели, как и в растровой электронной микроскопии, применена калиброванная медная сетка с периодом 400 ячеек/дюйм. Изображение такой сетки за счет детектирования вто-

ричных электронов, образованных в процессе столкновения протонов пучка с атомами мишени, приведено на рис. 3, *а*. На рис. 3, *б* показано изображение этой же сетки, полученной с помощью растрового электронного микроскопа РЭММА-102. Размеры пучка определяли путем обработки измеренных значений интенсивности вторичных электронов в каждом пикселе растра сканирования. Было проведено усреднение распределений интенсивностей в областях, указанных на рис. 3, *а* в направлениях  $x$  и  $y$ , соответственно. Усредненные и сглаженные профили интенсивностей показаны на рис. 4, *а*, *в*. В результате дифференцирования переднего фронта зависимостей профилей интенсивностей по координате направления ска-

нирования получены значения размеров пучка в пикселях (полной ширины на полувысоте) (см. рис. 4, *б*, *г*). Пересчет в линейные размеры осуществлен исходя из известной величины периода сетки, определенной в пикселях растра. В результате размеры пучка составили 3,4 мкм в  $x$ -направлении и 2,5 мкм — в  $y$ -направлении. При этом измеренный ток пучка составлял  $600 \pm 40$  пА. Исходя из полученных первых измерений параметров пучка на мишени есть основание утверждать, что при уменьшении размеров коллиматоров и увеличении чувствительности детектора вторичных электронов можно получить разрешение на уровне 1,0—1,5 мкм при необходимом токе пучка  $\approx 100$  пА.

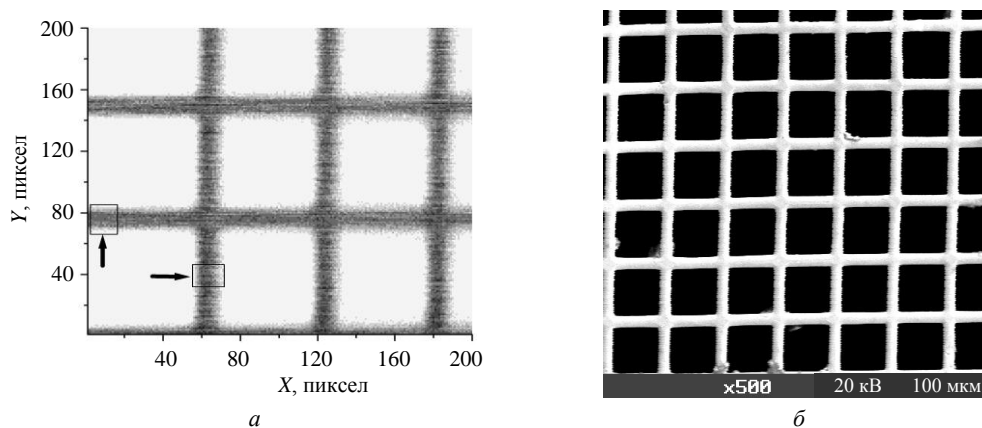


Рис. 3. Изображение медной сетки с периодом 400 ячеек/дюйм во вторичных электронах: *а* — протонный микрозонд; *б* — растровый электронный микроскоп РЭММА-102

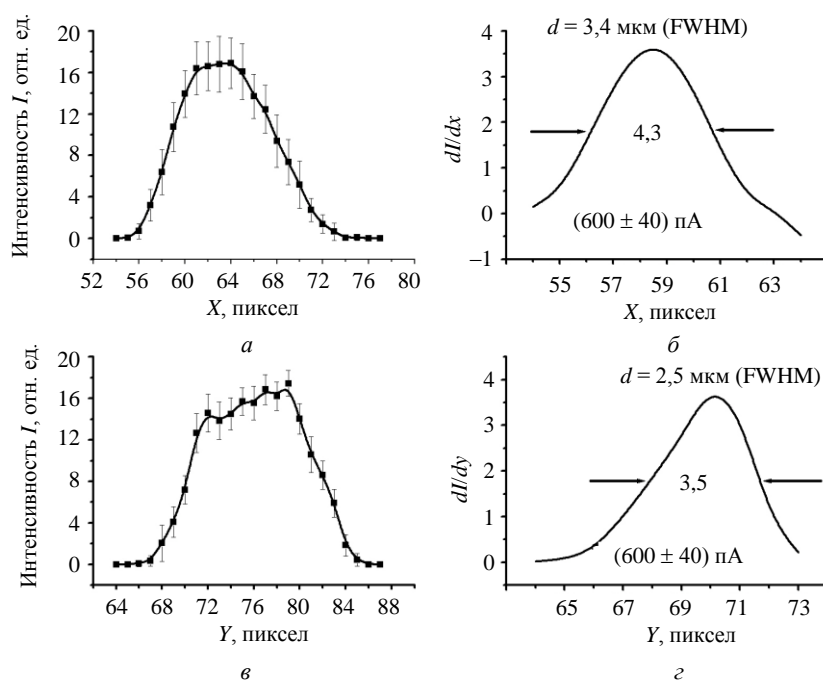


Рис. 4. Обработка изображения (см. рис. 3, *а*) для определения размеров пучка на мишени:

*а* — усредненное распределение интенсивности вторичных электронов в  $x$ -направлении; *б* — определение  $x$ -ширины профиля интенсивности на полувысоте переднего фронта нарастания; *в* — усредненное распределение интенсивности вторичных электронов в  $y$ -направлении; *г* — определение  $y$ -ширины профиля интенсивности на полувысоте переднего фронта нарастания

### Заключение

В результате проведенной оптимизация ионной оптики разработана интегрированная ЗФС, основой которой являются дублеты магнитных квадрупольных линз новой конструкции с источниками питания и модульный ферромагнитный сканер с системой управления сканированием и синхронизированным сбором данных. Первые эксперименты по определению параметров сфокусированного пучка на мишени дали следующие результаты: размеры пучка  $3,4 \times 2,5$  мкм, ток — 600 пА.

### Литература

1. Watt F., Bettiol A. A., J. A. van Kan et al.// Int. Journal of Nanoscience. 2005. V. 4. № 3. P. 269—286.
2. Martin B. W.// Scanning electron microscopy. 1980. V. I. P. 419—438.
3. Ryan C. G., Jamieson D. N.// Nucl. Instr. and Meth B 158. 1999. P. 97—106.
4. Вергунов А. Д., Левченко Ю. З., Новиков М. Т., Пустряк В. М., Сторижко В. Е., Чеканов С. Я.// ВАНТ. Сер. ТЭФ. 1985. № 1(22). С. 26—28.

5. Ponomarev A. G., Miroshnichenko V. I., Storizhko V. E.// Nucl. Instr. and Meth. A 586/1-2. 2003. P. 20—25.
6. Ponomarev A. G., Melnik K. I., Miroshnichenko V. I.// Nucl. Instr. and Meth B 231. 2005. P. 86—93.
7. Дымников А. Д., Явор С. Я.// ЖТФ. 1963. Т. 33. Вып. 7. С. 851—858.
8. Dymnikov A., Hellborg R.// Nucl. Instr. and Meth. A 330. 1993. P. 323—362.
9. Абрамович С. Н., Завьялов Н. В., Звенигородский А. Г. и др.// ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 2. С. 6—12.
10. Пономарев А. Г., Ребров В. А., Магиллин Д. В. Мультиплет квадрупольных линз: Пат. Украины UA 75687, H 01 J 3/20, H 01 J 3/22 (2006.01); 2004021145. 15.05.2006; Бюл. № 5.
11. 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. doi:10.1016/j.nimb.2007.01.275.
12. Сайко Н. А., Пономарев А. Г., Мордик С. Н. и др.// ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 3. С. 72—75.
13. Sayko N. A., Ponomarev A. G., Drozdenko A. A. The beam scanning control and data acquisition on the Sumy nuclear microprobe// Nucl. Instr. and Meth. B. 2007. doi:10.1016/j.nimb.2007.01.282.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

## Proton scanning microprobe with integrated probeforming system

A. G. Ponomarev, V. A. Rebrov, N. A. Sayko, A. B. Dudnik, P. A. Pavlenko,  
A. A. Drozdenko, V. I. Miroshnichenko, V. E. Storizhko  
Applied Physics Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine

*The experiments with the object to determine the beam parameters on the target are started at the new proton scanning microprobe based on a single-ended 2 MV Van de Graaff accelerator "SOKOL". The main microprobe feature is the integrated probeforming system which is based on the doublet of magnetic quadrupole lenses of new design. The general approach of the ion optic optimization of the probeforming system is considered. The description of the microprobe design features is given. The experimental data of the beam parameters on the target are cited.*

УДК 537.533.3

## Временная и пространственная фокусировка фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических полях (численное моделирование и эксперимент)

С. В. Андреев, В. С. Белолипецкий, Г. И. Брюхневич, Н. С. Воробьев,  
В. П. Дегтярева, Е. А. Кузьменко, В. И. Лозовой, М. А. Монастырский,  
Ю. И. Сердюченко, В. А. Тарасов, М. Я. Щелев  
Институт общей физики РАН им. А. М. Прохорова, Москва, Россия

Д. Э. Гринфельд

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Проведены теоретическое исследование и компьютерное моделирование пространственно-временной фокусировки фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических*