

12;13

## **Влияние гистерезиса магнитных квадрупольных линз на процесс фокусировки пучка при изменении его энергии в ядерном сканирующем микронзонде**

© А.В. Романенко, А.Г. Пономарев

Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы  
E-mail: romanenko@ipflab.sumy.ua

Поступило в Редакцию 22 сентября 2012 г.

Экспериментально определено влияние гистерезиса магнитных квадрупольных линз на размеры сфокусированного пучка на мишени в зондоформирующей системе, которая имеет конфигурацию распределенный „русский квадруплет“. Измерения проводились в канале ядерного сканирующего микронзонда с использованием пучка протонов с вариацией энергии в пределах 0.8–1.6 MeV. Размеры пучка определялись на основании обработки профилей выхода вторичной электронной эмиссии при сканировании калиброванной микрометрической медной сетки. Предложен подход, который позволяет осуществлять фокусировку пучка в ядерном микронзонде при изменении его энергии с сохранением размеров зонда в заданных пределах.

Одним из приложений сфокусированных микропучков легких ионов с энергией нескольких MeV с возможностью сканирования по образцу является облучение микроскопических областей с целью получения распределенных дефектов по глубине [1] либо экспонирование резистивных материалов в литографических технологиях высокого разрешения для получения многоуровневых малоразмерных структур с высоким

аспектным отношением [2]. Для этого необходимо менять энергию пучка с сохранением параметров сфокусированного пучка на поверхности образца. При изменении энергии размеры сфокусированного пучка на поверхности мишени не изменятся, если возбуждения полюсов линз  $\beta$  останутся неизменными. Зависимость  $\beta$  от параметров линз и энергии пучка для нерелятивистского случая имеет вид

$$\beta = \sqrt{\frac{qB_p}{r_a \sqrt{2mE}}}, \quad (1)$$

где  $q$ ,  $m$ ,  $E$  — заряд, масса и энергия частиц пучка соответственно;  $B_p$ ,  $r_a$  — величина магнитной индукции на полюсе и радиус апертуры линзы соответственно.

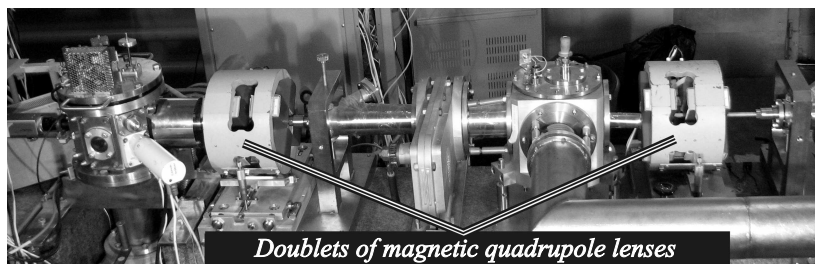
Из соотношения (1) видно, что условие  $\beta = \text{const}$  может быть выполнено, если при переходе от энергии  $E_1$  к энергии  $E_2$  изменить магнитную индукцию на полюсе согласно соотношению

$$B_2 = B_1 \sqrt{E_2/E_1}. \quad (2)$$

В силу того что магнитные квадрупольные линзы, применяемые для фокусировки пучков легких ионов в ядерном микронзонде, имеют малый радиус апертуры ( $r_a < 0.01$  м), расположить датчик для измерения поля на каждом из полюсов с относительной погрешностью измерений  $\sim 10^{-4}$  крайне затруднительно. Поэтому изменение магнитной индукции на полюсе определяется согласно экспериментальной зависимости намагничивания полюсов от тока  $I$  в возбуждающих катушках

$$B = f(I). \quad (3)$$

Как известно, зависимость (3) является неоднозначной вследствие явления гистерезиса, поэтому удовлетворить равенству (2) с достаточной точностью без соблюдения определенной последовательности действий не удастся. Самым простым решением здесь является процедура перефокусировки пучка при изменении энергии. Но для этого необходима смена мишени на калиброванную микрометрическую сетку для каждой энергии и обратное возвращение к исходной мишени в прежнюю позицию. Это занимает достаточно много времени и не всегда приемлемо с технологической точки зрения. В данной работе экспериментально определено влияние гистерезиса магнитных квадрупольных



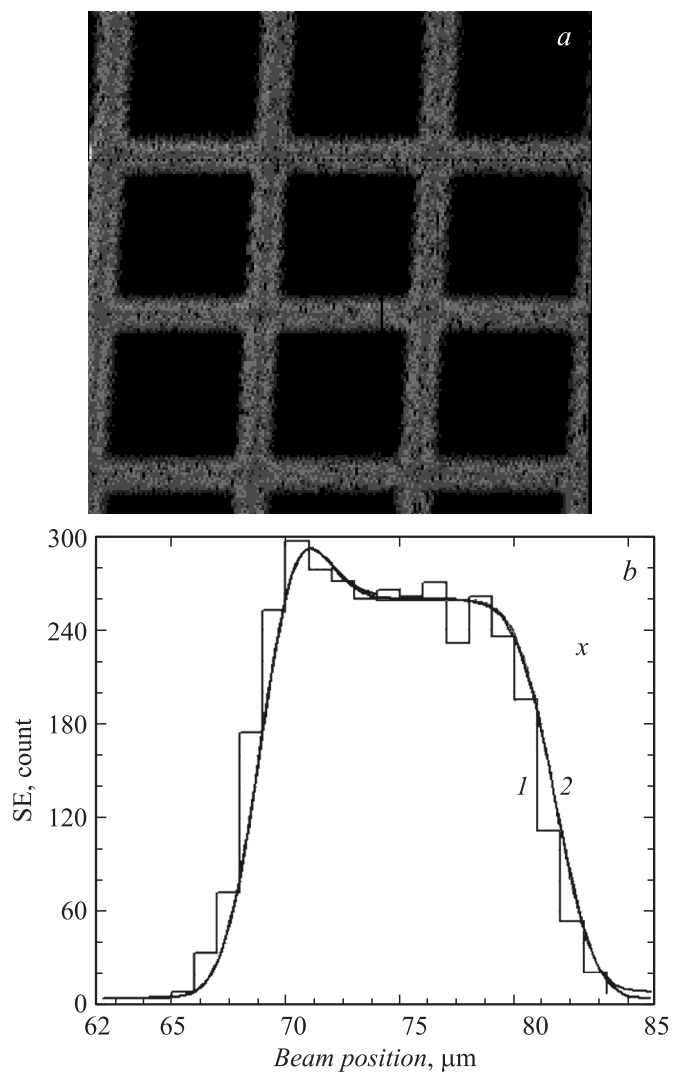
**Рис. 1.** Распределенный „русский квадруплет“ зондоформирующей системы канала ядерного сканирующего микрозонда ИПФ НАНУ.

линз на размеры сфокусированного пучка на мишени и предложен подход, который позволяет осуществлять фокусировку пучка в ядерном микрозонде при изменении его энергии.

Канал ядерного сканирующего микрозонда является одним из аналитических каналов ускорительного комплекса ИПФ НАНУ на базе малогабаритного электростатического ускорителя с максимальным напряжением на кондукторе 2 MV [3] (рис. 1). Фокусирующая система микрозонда представляет собой два интегрированных дублета магнитных квадрупольных линз [4], отстоящих друг от друга на расстоянии 0.8 m. Квадруплет имеет антисимметричную систему запитывания линз от двух независимых источников питания постоянного тока. Такая конфигурация запитывания линз впервые была предложена в работе [5] и в настоящее время имеет устоявшееся название „русский квадруплет“. В нашем случае стабильность источников питания составляет  $10^{-4}$  с минимальной дискретной установкой тока 1 mA. Каждая из катушек имеет 80 витков. Максимальный используемый ток для энергии 1.6 MeV не превышает 6.1 A.

Точная фокусировка и определение размеров пучка осуществлялись посредством сканирования медной микрометрической сетки с регистрацией выхода вторичных электронов (рис. 2, a). Период сетки —  $63.5 \mu\text{m}$ , размер перемычки —  $\approx 10 \mu\text{m}$ . Размеры зонда  $d_{x(\text{FWHM})} \times d_{y(\text{FWHM})}$  определялись по величине полной ширины на полувысоте распределения плотности тока пучка в плоскости поверхности сетки за счет обработки профилей выхода вторичных электронов при сканировании в поперечных  $x$  и  $y$  направлениях к оси пучка. Обработка профилей осуществлялась при помощи метода, изложенного в работе [6].

1\* Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 7



**Рис. 2.** Сканирование медной микрометрической сетки пучком протонов с энергией 1.6 MeV: *a* — изображение сетки во вторичных электронах; *b*, *c* — профили выхода вторичной электронной эмиссии при сканировании в линию в *x* и *y* поперечных направлениях; *1* — экспериментальный, *2* — подгоночный профили.

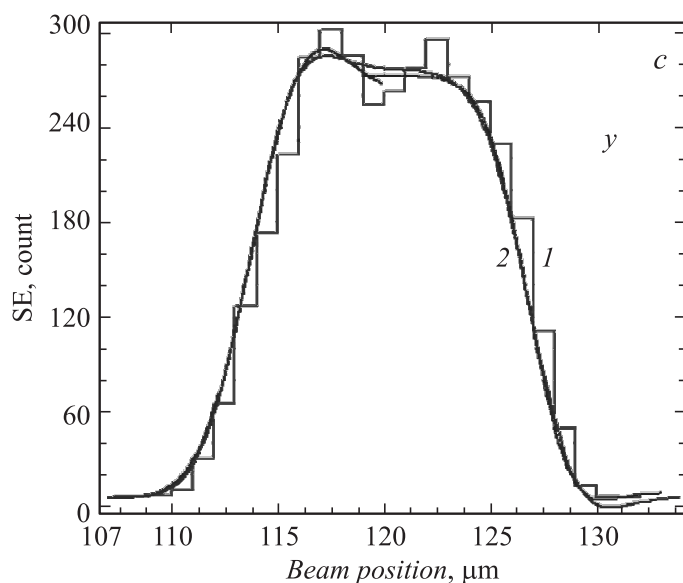
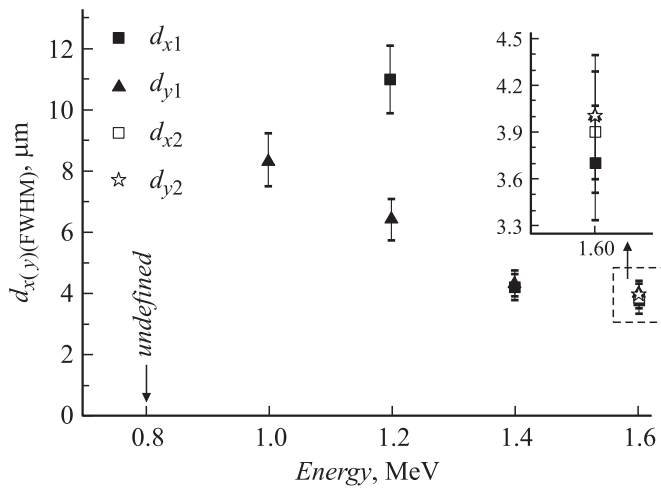


Рис. 2 (продолжение).

На рис. 2, *b, c* показаны экспериментальные и подгоночные профили выхода вторичных электронов для сфокусированного пучка протонов с энергией 1.6 MeV. За размеры зонда принимались усредненные значения нескольких обработанных профилей в направлениях  $x$  и  $y$ , при этом аномальные значения отбрасывались. Эти значения являются причиной недостаточной статистики при флуктуациях тока пучка. Как видно на данных графиках, размеры зонда, полученные с применением стандартной процедуры фокусировки, составляют  $d_{x(\text{FWHM})} \times d_{y(\text{FWHM})} = 2.9 \times 3.5 \mu\text{m}$ .

Впоследствии было отключено питание линз, а затем снова включено. При этом токи на катушках приняли прежние значения с точностью  $\pm 1 \text{ mA}$ . Такое действие привело к существенному уширению зонда, так как поле внутри линзы не вернулось к своей прежней конфигурации из-за явления гистерезиса на полюсах. Размер зонда по  $y$  стал  $16 \mu\text{m}$ , а по  $x$  и вовсе вышел за предел периода сетки в  $63.5 \mu\text{m}$ . Таким образом, влияние гистерезиса чрезвычайно сильно сказывается на размерах зонда в ядерном сканирующем микронзонде.



**Рис. 3.** Размеры зонда на мишени при изменении энергии пучка.  $d_{x1(\text{FWHM})} \times d_{y1(\text{FWHM})}$  обозначают размеры зонда при понижении энергии пучка с запитыванием линз расчетными значениями токов.  $d_{x2(\text{FWHM})} \times d_{y2(\text{FWHM})}$  обозначают размеры зонда при восстановлении начальной энергии с запитыванием линз реперными токами.

Как известно, остаточную магнитную индукцию можно убрать двумя способами: проходя по частным петлям гистерезиса в нулевую точку или за счет нагревания материала выше температуры Кюри. Второй способ в нашем случае неприменим. Для прохождения по частным петлям гистерезиса необходимо воздействовать на образец переменным магнитным полем с затухающей по определенному закону амплитудой.

Размагничивая и подбирая значение токов катушек, удалось получить следующие размеры пучка:  $d_{x(\text{FWHM})} \times d_{y(\text{FWHM})} = 3.7 \times 4 \mu\text{m}$  (рис. 3). Размагничивание осуществлялось вручную посредством коммутации запитки линз с одновременным уменьшением величины тока. Значение токов запитки линз, а также размеры полученного пучка были приняты за репер. Магнитопровод интегрированных дублетов линз изготовлен из магнитомягкого материала, который применяется для анализирующих магнитов в масс-спектрометрах. Этот материал имеет область изменения величины тока 0–960 А · т, в которой зависимость магнитной индукции от тока возбуждающих катушек близка к

линейному закону, поэтому соотношение (2) может быть переписано в виде

$$I_2 = I_1 \sqrt{E_2/E_1}. \quad (4)$$

При понижении энергии пучка задавались новые значения токов в возбуждающих катушках, которые рассчитывались с помощью равенства (4), при этом каждый раз предварительно проводилось размагничивание линз. При смене энергии с 1.6 на 1.4 MeV наблюдается незначительное уширение зонда (рис. 3). Уменьшение энергии до 1.2 MeV приводит к уже существенному увеличению размеров зонда. При этом размытие по  $x$  значительно сильнее, чем по  $y$ . При уменьшении энергии до 1 MeV характер изменения не нарушается: размер зонда продолжает расти, а размытие зонда по  $x$  координате больше, чем по  $y$ . При этом применяемый метод определения размеров зонда не позволяет получить адекватные результаты по  $x$  координате из-за неопределенности границы перемычки сетки. Дальнейшее уменьшение энергии приводит к полной деградации зонда и невозможности определения его размеров. В заключение была восстановлена начальная энергия 1.6 MeV, с которой начинали и установили реперные токи с предварительным размагничиванием линз (рис. 3). Оказалось, что размер зонда остался практически на прежнем уровне. Таким образом, эксперимент показывает, что перерасчет токов от начального реперного значения при изменении энергии согласно (4) не позволяет сохранять размеры зонда, несмотря на устранение остаточной магнитной индукции, вызванной явлением гистерезиса. Это связано, вероятно, с тем, что зависимость (3) недостаточно линейна. Однако возможность сохранять размер зонда, как видно из экспериментов, существует, что следует из восстановления размеров зонда для энергии 1.6 MeV в замкнутом цикле. Для подтверждения этого предположения были проведены следующие эксперименты. Были определены реперные токи запитывания линз для каждой энергии на основе точной фокусировки с использованием микрометрической сетки для выбранных значений энергии пучка, при этом предварительно размагничивались линзы. Затем при изменении энергии задавались заранее определенные реперные значения токов и определялись размеры зонда. В результате было установлено, что размеры зонда изменяются в пределах 10%. Таким образом, показано, что подход, основанный на предварительном определении реперных значений тока запитывания катушек полюсов линз для каждой энергии при условии точной фокусировки пучка на микрометрической сетке,

является приемлемым для перефокусировки пучка без изменения положения облучаемой мишени.

### Список литературы

- [1] *Yang T., Gao Y., Huang X.* et al. // *J. Non-Crystalline Solids*. 2011. V. 357. P. 3245.
- [2] *Погребняк А.Д., Пономарев А.Г., Шнак А.П., Куницкий Ю.А.* // *УФН*. 2012. Т. 182. № 3. С. 287.
- [3] *Magilin D.V., Ponomarev A.G., Rebrov V.A.* et al. // *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2009. V. 267. P. 2046.
- [4] *Rebrov V.A., Ponomarev A.G., Palchik V.K., Melnik N.G.* // *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2007. V. 260. P. 34.
- [5] *Дымников А.Д., Явор С.Я.* // *ЖТФ*. 1963. Т. 33. В. 7. С. 851.
- [6] *Udalagata C.N.B., Bettiol A.A., van Kan J.A.* et al. // *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2005. V. 231. P. 389.