

И. Г. Игнатьев, В. И. Мирошниченко, А. Г. Пономарев, В. Е. Сторижко

Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИОННОГО МИКРОЗОНДА

Представлены результаты оптимизации иммерсионной зондоформирующей системы ионного микрозонда для ускорителя на энергию ионов $H^+ 3$ МэВ при размерах пучка на мишени 0,4 мкм и нормализованном аксептансе $7 \text{ мкм}^2 \cdot \text{мрад}^2 \cdot \text{МэВ}$. Для достижения высокого разрешения микрозонда предложено разместить между системой коллиматоров и ускоряющей трубкой электростатическую линзу.

Ключевые слова: ионный пучок; иммерсионная зондоформирующая система, оптимизация, электростатический ускоритель.

В настоящее время в связи с развитием исследований в области микро- и нанотехнологий увеличивается потребность в малогабаритных ионных микрозондах малых и средних энергий [1]. Большинство современных микрозондов отличаются громоздкостью, большим энергопотреблением и недостаточной разрешающей способностью. Это является следствием того, что данные установки были построены на базе ускорительных комплексов для ядерных исследований, созданных десятки лет тому назад.

Для решения данной проблемы в работах [2 - 4] была предложена ионно-оптическая схема (ИОС) ионного микрозонда мегаэлектронвольтовых энергий с иммерсионной зондоформирующей системой (ИЗФС). В отличие от традиционных зондоформирующих систем (ЗФС) в ИЗФС ускоряющая трубка непосредственно участвует в процессе зондоформирования.

Математическое моделирование ИОС ИЗФС показало, что при небольших габаритах (метры вместо десятков метров) и меньшем энергопотреблении им свойственна более высокая по сравнению с традиционными ЗФС разрешающая способность [3 - 5].

В данной статье предлагается для первоначального формирования пучка использовать электростатическую линзу. Результаты сравниваются с ранее предложенным нами способом механического позиционирования блока коллиматоров и ускоряющей трубки [5].

Оптимизация проведена для ионного микрозонда на энергию ионов $H^+ E_0$ до 3 МэВ.

Постановка задачи, критерий, параметры и алгоритм оптимизации

Одна из возможных ИОС ИЗФС представлена на рис. 1, а. Пучок после выхода из ионного инжектора 6 попадает в блок коллиматора, состоящий из объектного 1 и углового 2 коллиматоров, затем ускоряется в ускоряющей трубке 3. На вы-

ходе из нее пучок окончательно формируется на мишени 5 системой магнитных квадрупольных линз 4. Далее рассматривается «русский» квадруплет [6]).

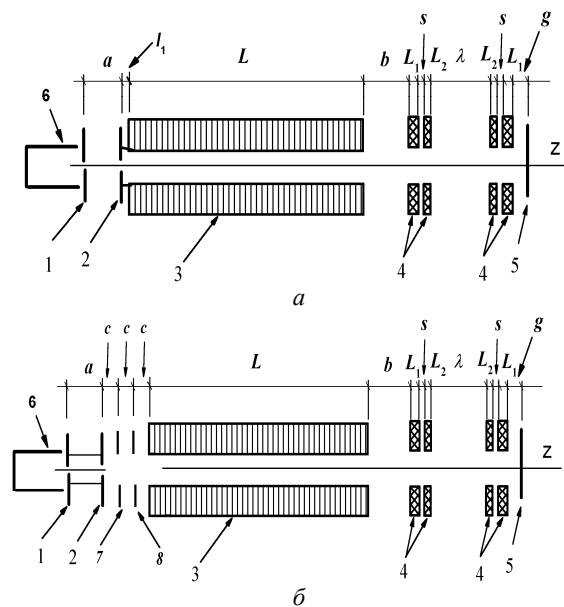


Рис. 1. Расчетные схемы иммерсионной зондоформирующей системы: а – базовая схема [5]; б – схема с электростатической системой предварительного формирования пучка; 1 и 2 – объектный и угловой коллиматоры; 3 – ускоряющая трубка; 4 – дублет магнитных квадрупольных линз; 5 – мишень; б – ионный инжектор; 7 и 8 – электроды системы формирования.

Рассмотрим альтернативный вариант решения задачи первоначального формирования фазового объема пучка (см. рис. 1, б). Отличие от схемы а состоит в том, что между угловым коллиматором 2 и ускоряющей трубкой располагаются дополнительные электроды 7 и 8, на которые при помощи источников высокого постоянного напряжения подаются потенциалы соответственно $+U_1$ и $-U_2$ относительно блока коллиматоров. Блок коллиматоров и первый электрод ускоряющей

трубки находятся под потенциалом кондуктора ускорителя U_0 . По ускоряющей трубке потенциал изменяется по линейному закону от U_0 до нуля. Таким образом, угловой коллиматор 2, электроды (7, 8) и первый электрод ускоряющей трубки образуют электростатическую линзу, оптическую силу которой можно изменять при помощи источников напряжения.

За критерий оптимизации принята величина максимального нормализованного аксептанса системы ε [7]:

$$\varepsilon = \frac{16r_x r_y A_x A_y}{a^2} E_l,$$

где $2r_x$, $2r_y$ – размеры прямоугольных окон объектного коллиматора; $2A_x$, $2A_y$ – углового коллиматора; E_l – энергия ионов на входе в блок коллиматоров; a – расстояние между коллиматорами.

Выбор такого критерия оптимизации связан с пропорциональностью тока на мишени (при заданных размерах пучка) нормализованному аксептансу [7].

Параметры ИЗФС: $a = 40$ см, $L = 2$ м – длина ускоряющей трубки; $E_0 = 3$ МэВ; $E_l = 30$ кэВ; разброс ионов по энергии на мишени $\Delta E/E_0 = 10^{-4}$; $\lambda = 50$ см – расстояние между дублетами квадрупольных магнитных линз; $b = 40$ см – расстояние между ускоряющей трубкой и первой линзой; $s = 3$ см – расстояние между линзами в дублете; $g = 10$ см – расстояние между последней линзой и мишенью; $L_1 = 9$ см и $L_2 = 7$ см – эффективные длины квадрупольных линз; радиус пятна пучка на мишени 0,2 мкм. Из соображений электрической прочности приняты расстояния между элементами, составляющими электростатическую линзу $c = 50$ мм.

Оптимизация проводилась по тому же алгоритму, что и в [5], при помощи программ, разработанных в ИПФ НАН Украины.

1. При помощи численного кода PROBFORM находились возбуждения B_1 и B_2 магнитных квадрупольных линз, обеспечивающие стигматичный пучок на мишени и соответствующие aberrации ЗФС. Код PROBFORM реализует метод матрицантов [8], при этом ионно-оптические характеристики ускоряющей трубки находятся методом челнок - сумм [6]. Распределение потенциала электростатического поля и его четырех производных на оптической оси УТ рассчитывалось при помощи численного кода Laplas - 2 [9].

2. Численным кодом MaxVemit по вычисленным коэффициентам aberrаций и заданному разбросу по энергиям определялись r_x , r_y , A_x , A_y , обеспечивающие максимальный нормализованный аксептанс пучка ε .

Результаты оптимизации

На рис. 2 и 3 представлены зависимости $\varepsilon(U_1, U_2)$ и коэффициента уменьшения $D(U_1, U_2)$. Зависимости имеют широкие максимумы, в результате упрощается выход системы на оптимальный режим. Между тем, зависимости $\varepsilon(l_1)$, полученные в [5], отличаются острыми максимумами, что делает трудоемким процесс юстировки.

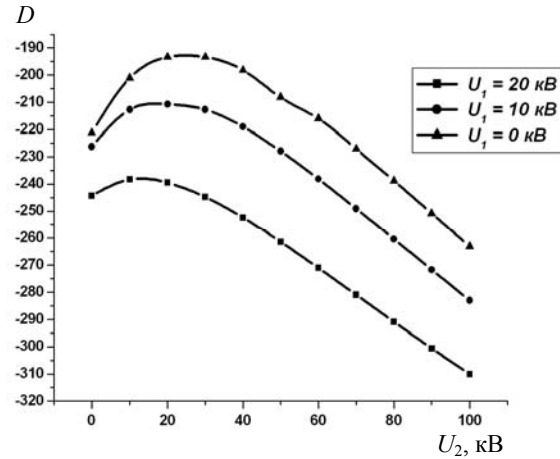


Рис. 2. Максимальный приведенный аксептанс как функция U_1 и U_2 .

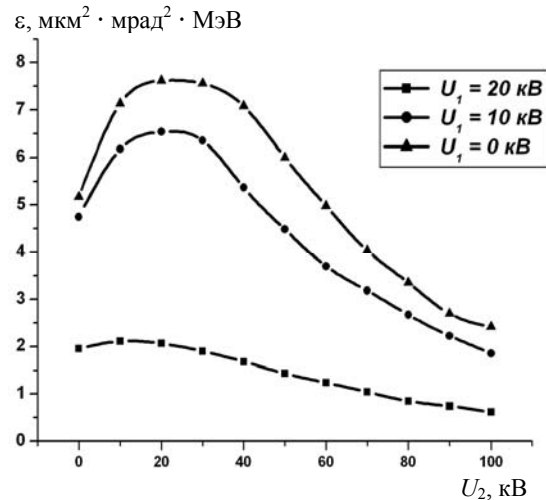


Рис. 3. Коэффициент уменьшения как функция U_1 и U_2 .

Согласно рис. 2 и 3 оптимальными являются значения $U_2 = 20 \pm 5$ кВ, $U_1 = 0$ кВ (одиночная линза), при этом $\varepsilon = 7 - 7,5 \text{ мкм}^2 \cdot \text{мрад}^2 \cdot \text{МэВ}$, $D = -190 \dots -200$. Данные значения при нормализованной яркости пучка $10^2 \text{ пкА}/(\text{мкм}^2 \cdot \text{мрад}^2 \cdot \text{МэВ})$ соответствуют току пучка порядка 1 нА, чего достаточно для решения большинства задач ядерного микроанализа.

Результаты оптимизационных исследований для варианта А (механическое перемещение блока коллиматоров, $l_1 = 15$ мм (оптимальное по

данным [5]) и варианта В (линза на входе, $U_2 = 20$ кВ, $U_1 = 0$ кВ) представлены в таблице. Оба варианта имеют приблизительно одинаковые ионно-оптические характеристики, но вариант В отличается почти вдвое большим коэффициентом уменьшения, что позволяет снизить технологические требования на минимальные размеры объектного коллиматора r_x, r_y .

Характеристики ИОС ИЗФС	Вариант А	Вариант В
B_1 , Тл	0,294	0,294
B_2 , Тл	0,225	0,225
Коэффициент уменьшения, $D = D_x = D_y$	-108	-195
Хроматические аберрации		
$\langle x / x' \delta \rangle$, мкм/мрад/%	182	200
$\langle y / y' \delta \rangle$, мкм/мрад/%	36	45
Сферические аберрации		
$\langle x / x'^3 \rangle$, мкм/мрад ³	-32	-92
$\langle x / x' y'^2 \rangle$, мкм/мрад ³	-4	-12
$\langle y / y'^3 \rangle$, мкм/мрад ³	-0,6	-1,0
$\langle y / y' x'^2 \rangle$, мкм/мрад ³	-4	-9
Нормализованный аксептанс, $\text{мкм}^2 \cdot \text{мрад}^2 \cdot \text{МэВ}$	10	7,5
$2r_x \times 2r_y$, мкм	44×40	78×80
$2A_x \times 2A_y$, мкм	84×280	50×100

Окончательный выбор способа первоначального формирования пучка ионов ИЗФС варианта А или варианта В зависит от конкретной задачи и технологических возможностей.

Заключение

Предлагаемый способ оптимизации ионно-оптической схемы ядерного микрозонда путем первоначального формирования пучка при помощи электростатической линзы в отличие от рассмотренного нами в [5] способа на основе оптимизации расположения блока коллиматоров и ускоряющей трубки обладает следующими преимуществами:

система отличается почти в 2 раза большим коэффициентом уменьшения;

отсутствуют прецизионные механизмы, в результате чего упрощается эксплуатация установки; упрощается изготовление блока коллиматоров (за счет увеличения размеров окон объектного коллиматора).

В заключение следует отметить, что согласно проведенной оптимизации в большинстве случаев, видимо, целесообразно остановиться на одиночной линзе (один электрод между блоком коллиматоров и ускоряющей трубкой).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сторижко В.Е.* Наноаналитика с использованием ускорителей заряженных частиц // Тез. докл. Междунар. совещ. «Микро- и нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий» (Обнинск, 16 - 18 октября 2007 г.). - Обнинск: ФЭИ, 2007. - С. 63.
2. *Деклараційний патент на винахід № 67341 Україна, МПК⁷ G 01 N23/00.* Спосіб дослідження структури і елементного складу речовини і пристрій для здійснення цього способу (мікрозонд іонний) / В.Ю. Сторижко, О.Г. Пономарьов, В.І. Мірошниченко; заявник і власник Інститут прикладної фізики НАН України. - № 2004021145; заявл. 01.09.2003; опубл. 15.06.2004. - Бюл. № 6. - 3 с.
3. *Ponomarev A.G., Ignat'ev I.G., Magilin D.V. et al.* The conceptual design of MeV ion microprobe with immersion probe-forming system // Вопросы атомной науки и техники. - 2003. - Сер. 3. - № 4. - С. 305 - 308.
4. *Ignat'ev I.G., Ponomarev A.G., Miroshnichenko V.I. et al.* Immersion probe-forming system as a way to the compact design of nuclear microprobe // Nucl. Instr. and Meth. - 2005. - Vol. B 201. - P. 637 - 644.
5. *Игнат'єв І.Г., Мірошниченко В.І., Пономарєв А.Г., Сторижко В.Е.* Оптимизация иммерсионной зондоформирующей системы ионного микрозонда мегаэлектронвольтовых энергий // Прикладная физика. - 2006. - № 5. - С. 47 - 50.
6. *Дымников А.Д., Осетинский Г.М.* Системы формирования пучков микронных размеров // Физика элементарных частиц и атомного ядра. - 1989. - Т. 20, вып. 3. - С. 694 - 733.
7. *Ponomarev A.G., Miroshnichenko V.I., Storizhko V.E.* Optimal collimator shape and maximum emittance for submicron focusing of ion beams. Determination of the probe-forming system resolution limit // Nucl. Instrum. Methods. - 2003. - Vol. A 506. - P. 20 - 25.
8. *Гантмахер Ф.П.* Теория матриц. - М.: Наука, 1967. - 602 с.
9. *Ponomarev A.G., Melnik K.I., Miroshnichenko V.I. et al.* Resolution limit of probe-forming system with magnetic quadrupole lens triplets and quadruplets // Nucl. Instr. and Meth. - 2003. - Vol. B 201. - P. 637 - 644.

І. Г. Ігнат'єв, В. І. Мірошніченко, О. Г. Пономар'єв, В. Ю. Сторіжко

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ІОННОГО МІКРОЗОНДА

Представлено результати оптимізації імерсійної зондоформуючої системи іонного мікрозонда для прискорювача на енергію іонів H^+ 3 MeV при розмірах пучка на мішені 0,4 мкм і нормалізованому акцептансі $7 \text{ мкм}^2 \cdot \text{мрад}^2 \cdot \text{MeV}$. Для досягнення високої роздільної здатності мікрозонда запропоновано розмістити між системою коліimatorів і прискорюючою трубкою електростатичну лінзу.

Ключові слова: іонний пучок, імерсійна зондоформуюча система, оптимізація, електростатичний прискорювач.

I. G. Ignat'ev, V. I. Miroschnyenko, O. G. Ponomarev, V. Yu. Storizhko

OPTIMIZATION OF THE ELECTROSTATIC STRUCTURE OF THE ION MICROPROBE

The paper presents optimization data obtained for an immersion probe-forming system of the ion microprobe to be used in 3 MeV H^+ ion accelerator generating 0,4 μm beam spot for normalized acceptance of $7 \mu\text{m}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot \text{MeV}$. To achieve higher microprobe resolution it is intended to place an electrostatic lens between the collimators and the accelerating tube.

Keywords: ion beam; immersion probe-forming system; optimizations; electrostatic accelerator.

Поступила в редакцію 31.01.2011.