

Электронные и ионные пучки

УДК 539.1.078:621.384.5

Оптимизация иммерсионной зондоформирующей системы ионного микрозонда мегаэлектронвольтовых энергий

И. Г. Игнатъев, В. И. Мирошниченко, А. Г. Пономарев, В. Е. Сторишко
Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины, г. Сумы

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 $10 \text{ мкм}^2 \cdot \text{мрад}^2 \cdot \text{МэВ}$. Показано, что для достижения высокого разрешения микрозонда необходимо точное позиционирование блока коллиматоров относительно входа пучка в ускоряющую трубку и дублета квадрупольных линз относительно выхода из ускоряющей трубки.

В работах [1—3] предложен проект ионного микрозонда мегаэлектронвольтовых энергий с иммерсионной зондоформирующей системой (ЗФС). В данной системе пучок ионов формируется ионным инжектором, и после прохождения блока коллиматоров (БК) ускоряется в ускоряющей трубке (УТ). Затем пучок окончательно фокусируется "Русским квадруплетом" магнитных квадрупольных линз. Ионно-оптическая схема (ИОС) такой ЗФС представлена на рис. 1.

Иммерсионная ЗФС имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными системами:

- улучшаются ионно-оптические характеристики микрозонда при одновременном уменьшении его габаритов,

вследствие того, что УТ совместно с БК участвует в процессе зондоформирования;

- снижается радиационная нагрузка, так как коллимирование пучка осуществляется на входе в УТ (где энергия пучка сравнительно невелика — порядка десятков килоэлектронвольт);

- уменьшается энергопотребление установки, сепарация пучка происходит в инжекторе ионов (например с помощью фильтра Вина).

В результате появляется возможность создания компактного ионного микрозонда мегаэлектронвольтовых энергий с длиной всей конструкции не более 5 м, меньшим энергопотреблением и большим (по сравнению с традиционными установками) разрешением.

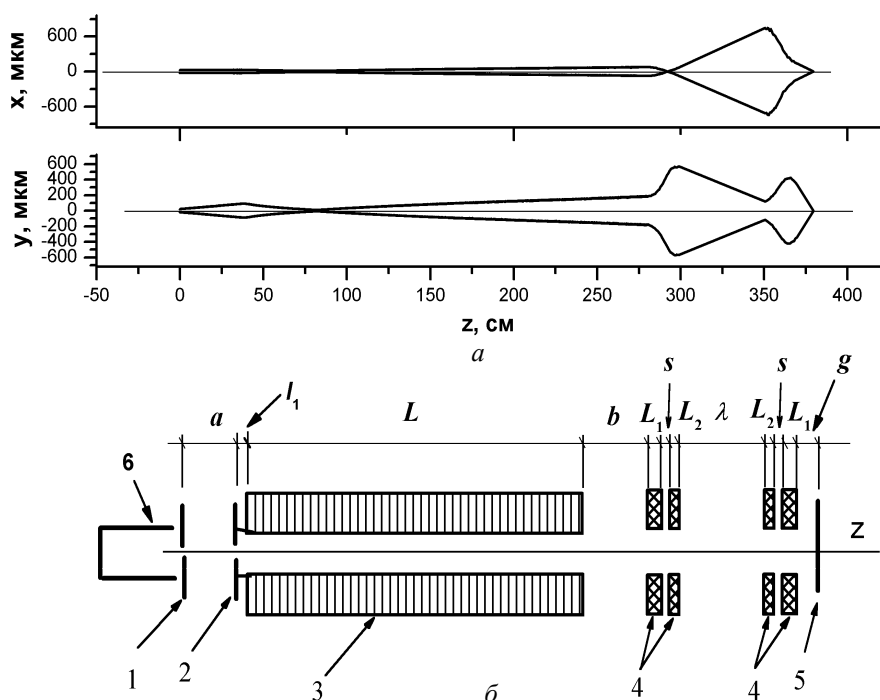


Рис. 1. Ионно-оптическая схема:

a — огибающие пучка ионов с учетом aberrаций при $a = 40 \text{ см}$, $l_1 = 22 \text{ мм}$, $b = 40 \text{ см}$, $\lambda = 50 \text{ см}$;

б — расчетная схема иммерсионной зондоформирующей системы;

1 и 2 — объектный и угловой коллиматоры; 3 — ускоряющая трубка;

4 — дублет магнитных квадрупольных линз; 5 — мишень; 6 — ионный инжектор

В данной работе рассмотрена оптимизация элементов ИОС иммерсионной ЗФС ионного микрозонда на энергию протонов до $E = 3$ МэВ.

Параметры и критерий оптимизации

Управление пучком заряженных частиц иммерсионной ЗФС наиболее эффективно на входе в УТ, где энергия ионов относительно невелика (порядка десятков килоэлектронвольт). В связи с этим целесообразно рассмотреть оптимизацию взаимного расположения элементов, находящихся в начале системы (блока коллиматоров и УТ), где на частицы оказывает сильное влияние краевое поле, созданное УТ и угловым коллиматором. Поэтому за параметры оптимизации приняты объектное расстояние a и расстояние l_1 между УТ и БК.

Остальные параметры ИОС (см. рис. 1) фиксированы: $L = 2$ м — длина УТ; $U_0 = 3$ МВ — потенциал высоковольтного электрода (а также блока коллиматоров и первого электрода УТ); $\lambda = 50$ см — расстояние между дублетами квадрупольных линз; $b = 40$ см — расстояние между УТ 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 линз; радиус пятна пучка на мишени $0,2$ мкм; энергия пучка протонов на выходе из инжектора $E_0 = 30$ кэВ; разброс ионов по энергии на мишени $\Delta E/E = 10^{-4}$. Распределение потенциала по длине УТ линейное:

$$U(z) = U_0 \left(1 - \frac{z - l_1 - a}{L} \right),$$

где z — координата центра электрода относительно объектного коллиматора.

Рассмотрена УТ, состоящая из 82 электродов кольцевого типа с диаметром апертуры 50 мм и внешним радиусом 100 мм.

За критерий оптимизации принята величина максимального приведенного аксептанса системы ε [4]:

$$\varepsilon = \frac{16r_x r_y A_x A_y}{a^2} E_0,$$

где $2\Box r_x$, $2\Box r_y$ — размеры прямоугольных окон объектного коллиматора,

$2\Box A_x$, $2\Box A_y$ — углового коллиматора.

Выбор такого критерия оптимизации связан с пропорциональностью тока на мишени (при заданных размерах пучка) приведенному аксептансу [2].

Результаты численной оптимизации взаимного расположения элементов зондоформирующей системы

На первом этапе оптимизации с помощью численного кода PROBFORM [4] определялись возбуждения B_1 и B_2 магнитных квадрупольных линз, обеспечивающие стигматичный пучок на мишени и соответствующие aberrации ЗФС. Расчет проводился методом матрицантов [5], ионно-оптические характеристики УТ находились методом челнок-сумм [6]. Распределение потен-

циала электростатического поля и его четырех производных на оптической оси УТ рассчитывалось с помощью численного кода Laplas-2 [7]. На втором этапе оптимизации с помощью численного кода MaxVemit [4] по вычисленным коэффициентам aberrаций и заданному разбросу по энергиям находились размеры окон коллиматоров, обеспечивающие максимальный приведенный аксептанс пучка ε . Результаты оптимизационных расчетов представлены на рис. 2 и 3. Зависимости $\varepsilon(l_1)$ имеют острые максимумы, происхождение которых объясняется влиянием углового коллиматора на краевое поле УТ. Увеличение l_1 сначала усиливает фокусирующее действие электростатического поля на входе в УТ (вследствие увеличения радиальной составляющей напряженности), что приводит к росту ε .

Дальнейшее, после достижения максимума, увеличение l_1 приводит к уменьшению неоднородности поля в области углового коллиматора — УТ, а следовательно к ослаблению фокусирующего эффекта и уменьшению ε . Такое резкое изменение $\varepsilon(l_1)$ требует обеспечения точного взаимного расположения БК и УТ в зависимости от объектного расстояния a и l_1 . Как видно из рис. 3, применение БК с объектным расстоянием $a < 40$ см нецелесообразно, так как необходимо чтобы коэффициент уменьшения системы $|D|$ был не менее 100 [1]. Это условие связано с технологическими ограничениями на минимальные r_x , r_y . В области максимумов $\varepsilon(l_1)$ при $|D| \approx 100$ значения ε не менее 10 мкм²·мрад²·МэВ. При нормализованной яркости пучка инжектора порядка 10 пкА/(мкм²·мрад²·МэВ) это соответствует току пучка порядка 1 нА.

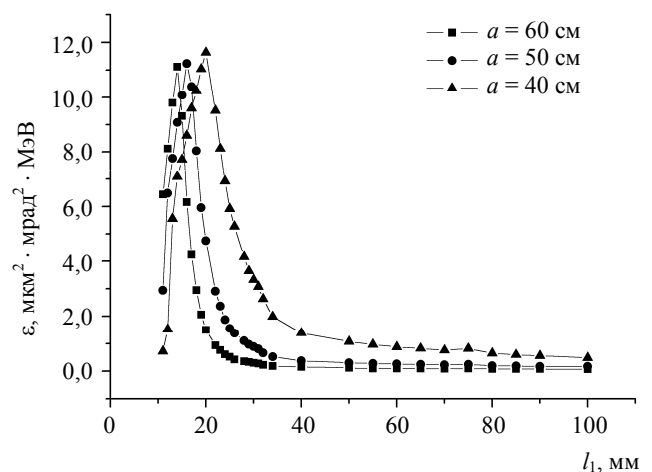


Рис. 2. Максимальный приведенный аксептанс как функция расстояния l_1

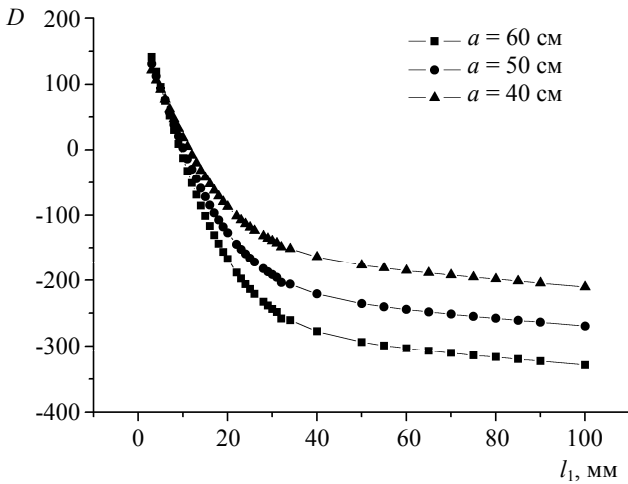


Рис. 3. Коэффициент уменьшения как функция расстояния l_1

Таким образом, при проектировании иммерсионной ЗФС необходимо точное позиционирование БК относительно УТ. Желательно для настройки установки на оптимальное значение аксептанса обеспечить возможность перемещения БК в диапазоне $l_1 = l_{01} \dots 100$ мм с шагом 0,5 мм, где l_{01} — минимальное конструктивно-возможное значение l_1 . Согласно рис. 2 при 40 см $<a < 60$ см $l_{01} < 15$ мм.

Далее поиск оптимальной иммерсионной зондоформирующей системы конфигурации, представленной на рис. 1, производился по параметрам λ и b при объектном расстоянии $a = 40$ см, $l_1 = 22$ см, что соответствует одному из максимумов $\epsilon(l_1)$ (см. рис. 2).

Результаты расчетов представлены на рис. 4 и 5, согласно которым увеличение значений $|D|$ и ϵ за счет λ и b вряд ли оправдано, так как в результате растут габариты установки при незначительном улучшении качества ионно-оптической системы. Поэтому оставлен вариант $\lambda = 50$ см, $b = 40$ см.

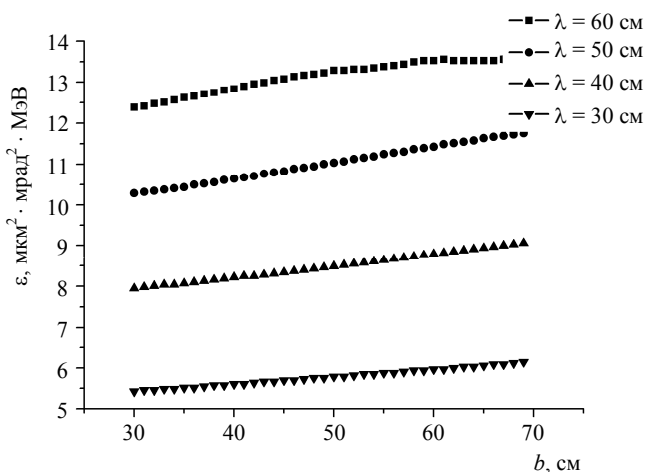


Рис. 4. Максимальный приведенный аксептанс как функция расстояния b

Данные для окончательного варианта представлены ниже:

B_1 , Тл	0,294
B_2 , Тл	0,225

Коэффициент уменьшения, $D=D_x=D_y$	108
Хроматические aberrации, мкм/мрад/%:	
$\langle x/x'\delta \rangle$	182
$\langle y/y'\delta \rangle$	36
Сферические aberrации, мкм/мрад ³ :	
$\langle x/x'^3 \rangle$	-32
$\langle x/x'y'^2 \rangle$	-4
$\langle y/y'^3 \rangle$	-0,6
$\langle y/y'x'^2 \rangle$	-4
Нормализованный аксептанс, мкм ² ·мрад ² ·МэВ	10
$2 \square r_x \times 2 \square r_y$, мкм	44×40
$2 \square A_x \times 2 \square A_y$, мкм	84×280

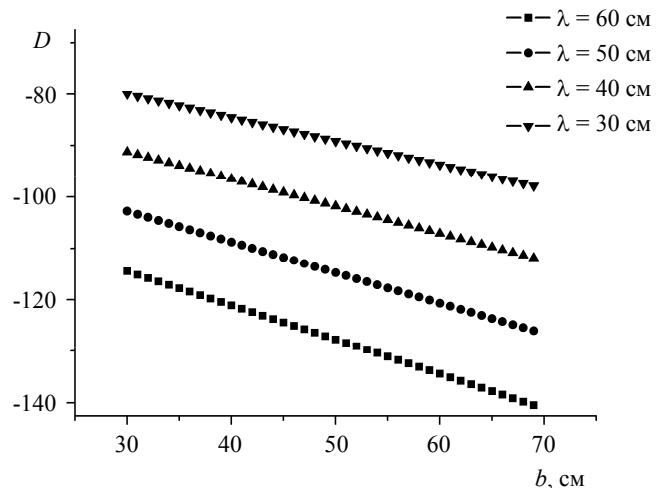


Рис. 5. Коэффициент уменьшения как функция расстояния b

Заключение

Оптимизация взаимного расположения элементов зондоформирующей системы показала, что для достижения наибольшего приведенного аксептанса ИОС необходимо точное взаимное позиционирование углового коллиматора и УТ. В результате ток пучка на мишени микронных размеров на порядок выше, чем в первоначальном варианте [2], что позволяет решать более широкий спектр задач ядерного микроанализа. Найдено приемлемое в конструктивном отношении положение линз квадруплета магнитных квадрупольных линз относительно выхода пучка из УТ.

Литература

1. Сторижко В. Е., Пономарев А. Г., Мирошниченко В. И. Пат. Украины, UA 67341A, G01N23/00, 2003038121 (15.06.2004. Бюллетень № 6).
2. Пономарев А. Г., Игнатов И. Г., Магиллин Д. В., Оторичко В. Е. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия. 3. 2003. № 4. P. 305—308.
3. Ignat'ev I. G., Ponomarev A. G., Miroshnichenko V. I., Magilin D. V., Storizhko V. E. // Nucl. Instr. and Meth. 2005. В 201. P. 637—644.
4. Ponomarev A. G., Miroshnichenko V. I., Storizhko V. E. // Nucl. Instr. and Meth. 2003. А 506. P. 20—25.
5. Гантмахер Ф. П. Теория матриц. — М.: Наука, 1967.
6. Дымников А. Д., Осетинский Г. М. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1989. Т. 20. Вып. 3. С. 694—733.

7. Ponomarev A. G., Melnik K. I., Miroshnichenko V. I. et al.// Nucl. Instr. and Meth. 2003. B201. P. 637—644.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Optimization of an immersion probe — forming system of a MeV — energy microprobe

I. G. Ignat'ev, A. G. Ponomarev, V. I. Miroshnichenko, V. E. Storizhko
Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine

The paper presents optimization data obtained for an immersion probe — forming system of an ion microprobe to be used in a 3 MeV H^+ ion accelerator generating a $0.4 \mu\text{m}$ beam spot for a normalized acceptance of $10 \mu\text{m}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot \text{MeV}$. It is shown that high resolution of the microprobe can be achieved by precisely positioning the collimators with respect to the accelerating tube entrance and the quadrupole lens doublet with respect to the accelerating tube exit.