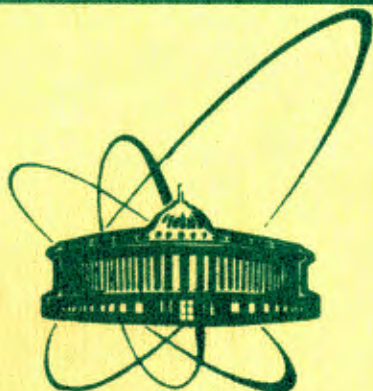


12873



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P9 - 12873

С.Н.Андрианов, А.Д.Дымников, Г.М.Осетинский

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ
МИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ

1979

Р9 - 12873

С.Н.Андрианов, А.Д.Дымников, Г.М.Осетинский

**СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ
МИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ**

Направлено в ПТЭ

Андрианов С.Н., Дымников А.Д., Осетинский Г.М. Р9 - 12873

Система формирования протонных пучков микронных размеров

Рассматривается вопрос о выборе оптимальной структуры протонного микрозонда, где в качестве оптической системы используется антисимметричная система квадрупольных линз. Результаты вычислений сведены в таблицы, позволяющие выбирать оптимальную структуру микрозонда в зависимости от требований к пучку и всей системе. Приводится таблица, дающая возможность оценить влияние допусков на изготовление и размещение элементов микрозонда.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Andrianov S.N., Dymnikov A.D., Osetinsky G.M. P9 - 12873

Forming System of Micron Size Proton Beams

A theory of an optimum proton microprobe consisting of two diaphragms and four quadrupole lenses taking into account chromatic and geometric aberrations is considered. The expressions are obtained which permit to choose microprobe parameters as a function of beam size on a target.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интенсивно развиваются методы определения элементного состава веществ, основывающиеся на детектировании вторичного излучения, образующегося при бомбардировке исследуемых образцов пучком электронов, протонов и тяжелых ионов. Это излучение может быть характеристическим рентгеновским излучением, упругим и неупругим рассеянием, излучением, связанным с переходами Оже, продуктами ядерных реакций, и т.д. Из указанных методов особенное развитие получил метод детектирования характеристического рентгеновского излучения на пучке протонов /или тяжелых ионов/, поскольку эти же измерения при возбуждении образца пучком электронов приводят к большому фону /в $10^3 \div 10^4$ раз больше, чем на пучке протонов/, резко снижающему чувствительность метода. При элементном анализе с использованием характеристического излучения на пучке протонов существенно возрос интерес к пучкам, сфокусированным на мишень до микронных размеров, поскольку открываются возможности исследования микроструктуры твердых тел и биологических объектов как на поверхности, так и в глубину. Этот интерес был в определенной мере стимулирован рядом экспериментальных и теоретических работ /1-4/, показавших возможность создания микропучков таких размеров. Принципиальная схема системы, которую в дальнейшем будем называть микрозондом, представлена на рис. 1.

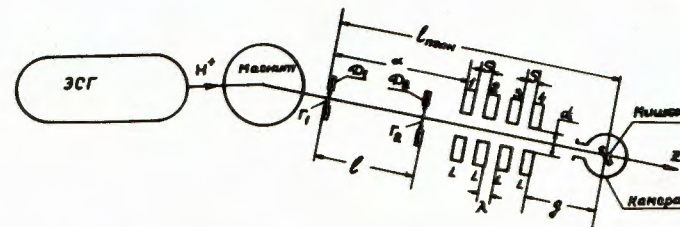


Рис. 1. Схема формирования пучков микронных размеров /протонный микрозонд/.

Как видно из рисунка, пучок протонов, ускоренных на электростатическом ускорителе Ван-де-Граафа, проанализированный по импульсам магнитным анализатором, пройдя ионопровод, попадает на мишень, находящуюся в центре камеры рассеяния. Формирование пучка до микронных размеров происходит на участке ионопровода от магнитного анализатора до мишени. Оно осуществляется входной диафрагмой малой апертуры / $r_1 = 10 \div 200$ мкм/ и системой фокусирующих магнитных или электростатических линз, находящихся от диафрагмы на расстоянии a . Этими фокусирующими системами могут быть электростатические или магнитные квадруполь, электрические или магнитные квадруплеты или триплеты. Так, например, J.A.Cocson и F.D.Pilling^{/1/} /1972 г/ получили микрозонд протонов с энергией $1 \div 3$ МэВ размером 4 мкм, используя магнитный квадруплет в комбинации с входной диафрагмой с апертурой 19 мкм /объект/. Линзы образуют уменьшенное изображение объекта диафрагмы, и, поскольку апертура диафрагмы больше результирующего изображения, интенсивность пучка возрастает, достигая, в частности, величины 0,3 пА.

В 1974 году Z.H.Cho и др.^{/5/} опубликовал теоретические и экспериментальные результаты по созданию микрозонда на пучке протонов с энергией 2 МэВ. Система состоит из диафрагмы и двух квадрупольных дублетов. Приведены результаты расчетов параметров системы в первом и втором порядках приближения для получения пучков микронных размеров /1,6x7 мкм/. Экспериментально получен пучок диаметром 40 мкм.

В работе R.Nobiling и др.^{/2/} для фокусировки пучка используются две пары пересекающихся щелей, окруженных специальными коллимационными щелями для подавления рассеяния на основных щелях и квадрупольного магнитного дублета /апертура дублета $2r = 5$ мм/. Система обеспечила получение микропучка размером $1 \div 2$ мкм на мишень при расходимости его ~ 1 мкрад.

В работе L.Cradzins и др.^{/3/} описана система, использующая простой магнитный квадруполь, и диафрагма с апертурой. Указанный пучок выводится из ионопровода в атмосферу.

В 1978 году была опубликована фокусирующая система H.R.Wilde и др.^{/4/}, в которой пучок от ЭГ с энергией 4 МэВ вырезается диафрагмой с апертурой 200 мкм, и затем фокусируется магнитным квадруплетом. Расчеты ионно-оптических параметров системы микрозонда проводились по программе, описанной в работе^{/8/}. Система обеспечивает уменьшенное изображение в фокальной плоскости в соотношении 5:1 при токе пучка 120 пА. В этом же году была опубликована работа W.M.Augnstyviak и др.^{/7/} по созданию микропучка, где для формирования используется электростатический квадрупольный триплет, который обеспечивает астигматическое изображение в плоскости мишени. В одном из режимов

работы при длине триплета 11 см во входной диафрагме 120 мкм пучок ионов $^4\text{He}^+$ с энергией 1,5 МэВ фокусируется до диаметра 15 мкм. Интенсивность тока пучка 5 пА.

Отметим, что система формирования микропучка является сложной прецизионной системой, и очень важно при расчетах провести оптимизацию всех его параметров с учетом геометрической и хроматической aberrаций. К сожалению, в цитируемых работах приводятся лишь конечные результаты расчетов, использование которых вряд ли оправдано, если учитывать различие в задачах исследования и экспериментальных возможностей их реализации. В этой связи, приступая к созданию проекта микрозонда, мы провели разработку метода расчета всех параметров, необходимых для проектирования всех элементов, входящих в эту систему.

Описанию метода и посвящена настоящая работа. Наряду с теоретическим его обоснованием приведен ряд таблиц, позволяющих рассчитать параметры системы. При разработке метода использовались результаты исследований, проведенных ранее одним из авторов настоящей работы^{/8,9/}.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сформулируем задачу расчета оптимального микрозонда, считая, что начальное фазовое множество частиц задается двумя круглыми диафрагмами, находящимися перед фокусирующей системой на расстоянии l друг от друга вдоль оси Z .

Заданы: диаметр пучка на мишени, общая длина системы l_{tot} /расстояние от первой диафрагмы до мишени/, минимальное реализуемое на практике расстояние между линзами S и λ , максимальный достижимый градиент магнитного /или электрического/ поля, максимальный разброс по энергиям частиц в пучке.

Требуется найти такое распределение градиентов поля вдоль оси Z , фокусное расстояние квадруплета, положение диафрагм, мишени, линз, которые при заданных ограничениях давали бы пучок с максимальным эмиттансом.

Поставленная задача является задачей оптимального управления пучком частиц, движение которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Для решения уравнений движения развит метод погружения в пространство фазовых моментов, предложенный в работе^{/10/}. На основе этого метода оказывается также возможным получать аналитические оценки на оптимальные параметры системы. Задача оптимального управления решается сведением к задаче математического программирования,

что позволяет целенаправленно, варьируя параметры системы, находить их оптимальные значения. Решение этой задачи осуществляется с помощью метода скользящего допущения^{11/} В качестве начального приближения удобно выбирать параметры системы на основании простых аналитических выражений, полученных с помощью приближения тонких линз.

2. МЕТОД ПОГРУЖЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВО ФАЗОВЫХ МОМЕНТОВ

В данной работе рассматриваются нелинейные уравнения движения частиц с точностью до членов третьего порядка включительно.

Для фазового вектора U , где

$$U = \| \| X, X', Y, Y' \| \|,$$

фазовым моментом $i_j + i_k$ - порядка назовем величину $U_j^{i_j} U_k^{i_k}$, $j, k = 1, 4$, $i_j, i_k = 0, 1, 2, \dots$. Определим следующие векторы в пространстве фазовых моментов I и III порядков:

$$X = \| \| X_1, X_2, X_3 \| \|, \quad X_1 = \| \| x, x' \| \|$$

$$X_2 = \| \| x_1^3, x^2 x', x x^{12}, x^{13} \| \|$$

$$X_3 = \| \| x y_1^2, x y y', x y^{12}, x' y y', x' y^{12} \| \|.$$

Заменяя x на y и y на x_1 , получим фазовый вектор Y .

Тогда, как показано в работе^{10/}, нелинейные уравнения движения с той же самой точностью, с которой получены эти уравнения, можно записать в виде систем линейных уравнений в пространстве фазовых моментов I и III порядков:

$$X' = P(k(z))X, \quad Y' = P(-k(z))Y, \quad /1/$$

где матрица P имеет блочный верхнедиагональный вид, $k(z)$ - функция распределения вдоль Z градиента поля.

Такой метод дает возможность независимо от начальных данных находить матрицант $(P, z/z_0)$ уравнений /1/ и искомые значения x, y, x', y' получая умножением матрицанта R на матрицу /вектор/ начальных данных, что при большом количестве прогоняемых частиц /большом количестве точек начального фазового множества/ существенно сокращает объем вычислительной работы.

С другой стороны, как уже указано, применение метода погружения в пространство фазовых моментов открывает возможности

получения аналитических результатов в нелинейной теории движения. В частности, таким образом можно получать выражения для коэффициентов геометрических и хроматических аберраций в приближении тонких линз. Последнее обстоятельство использовано в настоящей работе.

3. ОПИСАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ФАЗОВОГО МНОЖЕСТВА

Граница начального фазового множества, вырезаемого двумя диафрагмами, описывается уравнениями:

$$(x'_0 + x_0/\ell)^2 + (y'_0 + y_0/\ell)^2 = (r_2/\ell)^2 \quad /2/$$

$$x_0^2 + y_0^2 = r_1^2.$$

Здесь r_i ($r_i = 1, 2$) - радиус i -ой диафрагмы, ℓ - расстояние между диафрагмами. Сечениями контура /2/ плоскостями $x x'$ и $y y'$ являются параллелограммы, при $r_2 \gg r_1$ практически переходящие в прямоугольники. Площадь каждого из параллелограммов равна $S = \frac{r_1 r_2}{\ell}$.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ И ПОЛОЖЕНИЯ ДИАФРАГМ ДЛЯ МИКРОЗОНДА С МАКСИМАЛЬНЫМ ЭМИТТАНСОМ

Обозначим через a расстояние от плоскости входа в первую линзу до плоскости i -й диафрагмы, g - расстояние от плоскости выхода последней (IV) линзы до плоскости мишени, L - эффективную длину линзы /длины всех линз равны/. Введем также обозначения:

$$\cos \phi_1 = x_0/r_1, \quad \cos \phi_2 = x'_0 \ell / r_2.$$

Уменьшение диаметра пучка происходит при $a > g$. Поэтому будем рассматривать только такие случаи. На основании формул, приведенных в нашей работе^{12/}, и считая, что $r_2 \gg r_1$, получим уравнения границы пятна на мишени /для монохроматического пучка/:

$$\rho^2(\phi_1, \phi_2) = x^2 + y^2 = b_1 r_1^2 + b_2 \frac{1}{r_1^2} + b_3 \frac{1}{r_2}$$

$$b_1 = M^2, \quad b_2 = 2S(a_{11} a_{12} + a_{21} a_{22}), \quad b_3 = S^6(a_{12}^2 + a_{22}^2)$$

$$a_{11} = M \cos \phi_1, \quad a_{21} = M \sin \phi_1, \quad a_{12} = R_{16} \cos^3 \phi_2 + R_{112} \cos \phi_2 \sin^2 \phi_2,$$

$$a_{22} = V_{16} \sin^3 \phi_2 + V_{112} \sin \phi_2 \cos^2 \phi_2.$$

/3/

Здесь M - увеличение системы ($M < 1$), R_{16} , V_{16} , R_{112} и V_{112} - коэффициенты /элементы матрицантов $R = R(P(k))$ и $V = R(P(-k))$ в выражениях для x и y на мишени соответственно при членах: x_0^{13} , y_0^{13} , $x_0' y_0'^{12}$, $y_0' x_0'^{12}$.

Можно показать, что для каждого из значений ϕ_1 и ϕ_2 минимум ρ^2 достигается при определенном соотношении r_1 и r_2 . Обозначая через ρ_m минимум максимального размера пятна на мишени, $\rho_m = \min \max \rho$, получим:

$$r_1 = f_1(a, g) \rho_m, \quad f_1(a, g) = -\frac{3}{4M}$$

$$r_2 / L = f_2(a, g) (\rho_m / L)^{1/3}, \quad f_2(a, g) = 2^{-2/3} a^{-1/3} \quad /4/$$

$$r_2 / L = f_3(a, g) (\rho_m / L)^{1/3}, \quad f_3(a, g) = l / L f_2(a, g)$$

$$S / L = f_4(a, g) (\rho_m / L)^{1/3}, \quad f_4(a, g) = f_1 \cdot f_2$$

$$l = (a - g)(1 + M^2), \quad a = \max_{\phi_2} \frac{1}{L} \sqrt{a_{12}^2 + a_{22}^2}.$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1-3. Данные таблиц позволяют выбирать рабочие параметры микрозонда в зависимости от требуемых размеров пятна на мишени. Приведенные значения квадратов возбуждений линз κ_i^2 дают возможность определить требуемое число ампер-витков на полюс (NJ) или напряжение на электроде (U)

$$U_i = E_i \kappa_i^2 \left(\frac{d_i}{2L}\right)^2, \quad (NJ)_i = \frac{c(2mE_i)^{1/2}}{0,8\pi\mu l} \cdot \kappa_i^2 \left(\frac{d_i}{2L}\right)^2.$$

Здесь d_i - диаметр апертуры i -ой линзы; U_i выражается в вольтах, если энергия частиц E_i в эВ. В формуле для NJ все величины подставляются в единицах CGS, μ - коэффициент, учитывающий потери в ярме ($\mu \leq 1$).

На рис. 2 представлены x - и y -огибающие пучка в микрозонде.

Таблица 1

a/L \ g/L		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
10.0	κ_1^2		0.474	0.431	0.399	0.374	0.354
	κ_2^2		1.176	1.104	1.046	0.999	0.960
	SF		0.229	0.548	0.844	1.122	1.382
	HF		2.745	3.000	3.253	3.498	3.734
	l		9.771	9.451	9.155	8.878	8.618
15.0	κ_1^2	0.504	0.446	0.405	0.374	0.350	0.330
	κ_2^2	1.222	1.131	1.058	1.000	0.952	0.911
	SF	0.045	0.424	0.781	1.120	1.441	1.748
	HF	2.609	2.898	3.197	3.496	3.788	4.072
	l	14.954	14.575	14.219	13.881	13.558	13.253
17.5	κ_1^2	0.495	0.438	0.397	0.366	0.342	0.323
	κ_2^2	1.209	1.117	1.044	0.985	0.937	0.896
	SF	0.098	0.488	0.860	1.213	1.551	1.875
	HF	2.644	2.951	3.265	3.580	3.890	4.193
	l	17.403	17.011	16.642	16.287	15.950	15.623
20.0	κ_1^2	0.489	0.432	0.391	0.361	0.337	0.318
	κ_2^2	1.198	1.106	1.032	0.974	0.925	0.884
	SF	0.139	0.540	0.922	1.288	1.640	1.978
	HF	2.677	2.993	3.320	3.648	3.972	4.290
	l	19.861	19.460	19.073	18.712	18.361	18.020
25.0	κ_1^2	0.478	0.423	0.383	0.352	0.329	0.310
	κ_2^2	1.183	1.090	1.017	0.957	0.908	0.867
	SF	0.201	0.617	1.017	1.403	1.776	2.137
	HF	2.723	3.057	3.404	3.753	4.100	4.440
	l	24.799	24.384	23.984	23.596	23.223	22.035

На рис. 3 изображена зависимость размеров пятна на мишени (x_{\min} / L) от радиуса первой диафрагмы (r_1 / L) при постоянном эмиттансе пучка. Форма сечения пучка плоскостью мишени в плоскости XY представляет собой окружность для линейного микрозонда /пунктирная линия/ и более сложную фигуру для нелинейного /сплошная линия/. Как видно из рис. 4, на котором изображены эти сечения, в случае нелинейного микрозонда изображение пучка сохраняет симметрию относительно осей X и Y, что является следствием применения квадруплета вращения.

Таблица 2

a/L	g/L	g/L					
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
10.0	a		3124	3667	4090	4425	4696
	f ₁		2.670	2.363	2.111	1.903	1.731
	f ₂		0.043	0.041	0.039	0.038	0.038
	f ₃		0.421	0.386	0.361	0.341	0.324
	f ₄		0.115	0.096	0.083	0.073	0.065
15.0	a	5589	7552	8834	9690	10240	10564
	f ₁	4.300	3.772	3.336	2.978	2.683	2.440
	f ₂	0.036	0.032	0.031	0.030	0.029	0.029
	f ₃	0.531	0.468	0.433	0.410	0.393	0.380
	f ₄	0.153	0.121	0.102	0.088	0.078	0.070
17.5	a	7826	10687	12469	13555	14152	14170
	f ₁	4.932	4.324	3.823	3.412	3.074	2.813
	f ₂	0.032	0.029	0.027	0.026	0.026	0.026
	f ₃	0.552	0.486	0.452	0.430	0.415	0.407
	f ₄	0.156	0.124	0.104	0.090	0.080	0.073
20.0	a	10493	14499	16819	18170	18697	19268
	f ₁	5.565	4.875	4.319	3.845	3.466	3.151
	f ₂	0.029	0.026	0.025	0.024	0.024	0.024
	f ₃	0.572	0.503	0.469	0.448	0.436	0.423
	f ₄	0.160	0.126	0.106	0.092	0.082	0.074
25.0	a	17148	24307	28065	29629	32680	33570
	f ₁	6.833	5.984	5.284	4.715	4.250	3.861
	f ₂	0.024	0.022	0.021	0.020	0.020	0.019
	f ₃	0.606	0.530	0.497	0.480	0.461	0.449
	f ₄	0.167	0.130	0.110	0.096	0.084	0.075

5. ПРИБЛИЖЕНИЕ ТОНКИХ ЛИНЗ ($\kappa \ll 1$).

В приближении тонких магнитных линз, когда $a/L \gg 1$, получим выражение для максимального значения x на мишени (x_{\max}) при $y_0 = 0$, $y'_0 = 0$:

$$x_{\max} = c_1 r_1 + c_2 \frac{1}{r_1} + c_3 \frac{1}{r_1^3} \quad /5/$$

$$c_1 = \frac{(4L+g)^2 + g^2}{2(ag+2L(a+g))}, \quad c_2 = -\frac{\Delta E}{E} (a+g+4L)S$$

Таблица 3

Таблица увеличения М системы микронзонда

a/L	g/L	g/L					
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
10.0			0.281	0.317	0.355	0.394	0.433
15.0		0.174	0.199	0.225	0.252	0.280	0.307
17.5		0.152	0.173	0.196	0.220	0.244	0.268
20.0		0.135	0.154	0.174	0.195	0.216	0.238
25.0		0.110	0.125	0.142	0.159	0.176	0.194

$$C_3 = \frac{(49L+20g)(a+g+4L)}{8(ag+2L(a+g))} \left(\frac{a}{L}\right)^3 L \cdot S^3$$

$$M = -C_1, \quad \kappa_2^4 = \frac{27}{8} \frac{(a+g+4L)}{(ag+2L(a+g))} \quad /6/$$

$$\kappa_1^2 = \frac{1}{3} \kappa_2^2.$$

Для оптического квадруплета получим:

$$2r_1^2 = \frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{C_1} \sqrt{C_2^2 + 12C_1 C_3} \quad /7/$$

$$\rho_m = \min_{r_1} x_{\max} = \frac{2C_2 r_1^2 + 4C_3}{r_1^3} \quad /8/$$

где r_1 задается формулой /7/.

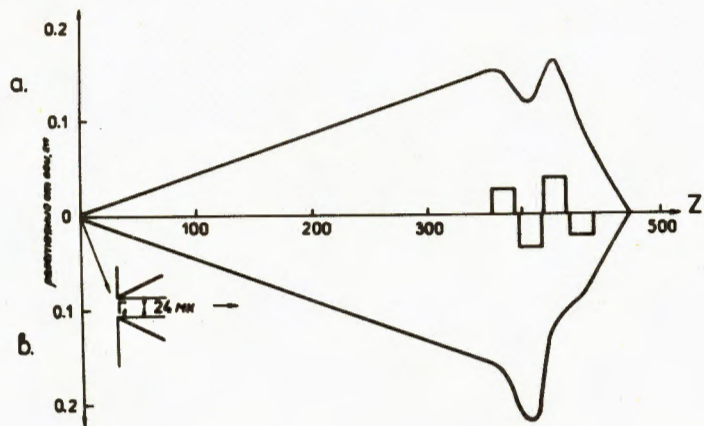


Рис. 2. Расчетные огибающие пучка микрозонда /максимальные отклонения пучка от оптической оси/: а/ в плоскости X; б/ в плоскости Y.

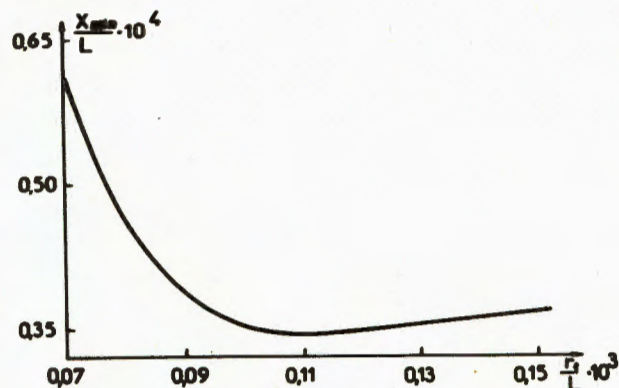


Рис. 3. Зависимость размеров пятна на мишени (x_{\min}/L) от радиуса первой диафрагмы (r_1/L) при постоянном эмиттансе пучка.

Если членом с $\frac{\Delta E}{E}$ в выражении /5/ пренебречь $C_2/r_1 \ll C_1 r_1$, $C_2/r_1 \ll C_3/r_1^3$ /, то можно получить выражения, аналогичные /4/:

$$r_1^2 = \sqrt{3C_3/C_1}$$

$$\rho_m = \frac{4}{3} r_1 C_1.$$

/9/

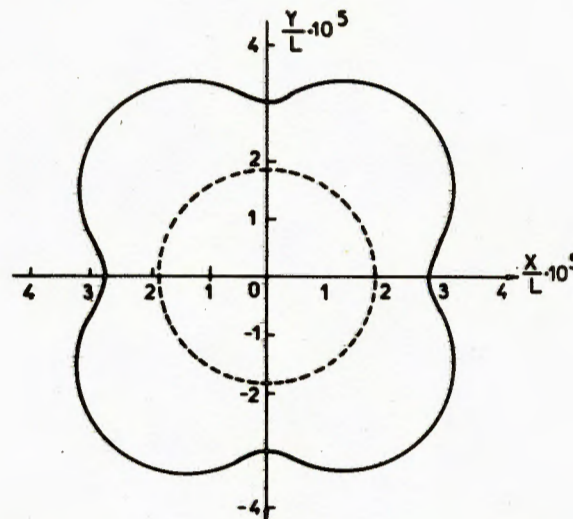


Рис. 4. Реальное изображение пучка в плоскости мишени. Пунктир - линейный микрозонд. Сплошная линия - нелинейный микрозонд.

6. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОТ ОПТИМАЛЬНЫХ

Приведенные выше формулы позволяют с помощью таблиц 1-3 подбирать оптимальные параметры микрозонда. Однако на практике не удастся осуществить точную установку магнитных элементов, и в процессе эксплуатации обычно наблюдается изменение первоначальных значений параметров, связанных, например, с изменением теплового режима. Поэтому очень важно определить степень влияния на характеристики пучка /в данном случае на максимальное отклонение пучка от оптической оси системы/ тех или иных отклонений параметров от их оптимальных значений. Предполагая малость этих отклонений, разлагая x_{\max} в ряд Тейлора, получим:

$$\delta X = \frac{x_{\max} - x_{\max}^{\text{ОПТ}}}{x_{\max}^{\text{ОПТ}}} = \sum_{k=1}^{n-m} \frac{\partial(x_{\max} / x_{\max}^{\text{ОПТ}})}{\partial a_k} \Delta a_k + O(\Delta a). \quad /10/$$

Здесь n - число магнитных элементов в системе, m - число параметров, изменение которых влияет на характеристики пучка, Δa_k - значение отклонения k -го параметра от оптимального. В табл. 4 приведены значения $\frac{\partial(x_{\max} / x_{\max}^{\text{ОПТ}})}{\partial a_k}$

для микрозонда в плоскости мишени, где a_x, a_y - углы поворота линз вокруг поперечной оси в плоскостях X и Y ; d_x, d_y - сдвиги электрических осей линз относительно оптической оси системы, для плоскостей X и Y ; a_0 - угол поворота линз вокруг ее электрической оси. Эти значения получены для одного из рассчитанных вариантов оптимального микрозонда для электростатического ускорителя ОИЯИ, имеющие параметры: $r_1 = 24$ мкм, $r_2 = 0,22$ см, $l = 335,34$ см, $a = 352,625$ см, $L = 20,15$ см, $g = 32,25$ см, $\kappa_1^2 = 0,394$, $\kappa_2^2 = 1,044$, $x_{\max}^{\text{ОПТ}} = 4,8$ мкм, $\lambda = 8 = 4$ см. Заметим, что при $a_x \neq 0$ $d_x \neq 0$ / $a_y \neq 0, d_y \neq 0$ / пучок испытывает отклонения в плоскости X /или

Таблица 4

Тип отклонений	Номер линзы	Таблица 4			
		1	2	3	4
a_x		41003	143302	67661	19778
a_y		34625	64849	96397	19083
d_x		70966	101599	193346	40497
d_y		115453	154129	134126	22695
a_0	x	1130	2970	2034	275
	y	1043	2871	2239	117

в плоскости Y /. При $a_0 \neq 0$ он изменяет свои характеристики в обеих плоскостях одновременно. Этим и объясняется, что в табл. 4 для a_0 приведены два значения производных: для X и Y плоскостей. Как видно из этой таблицы, на характеристику пучка наиболее сильно влияют вторая и третья линзы, что связано с большим значением градиентов в них по сравнению с первой и четвертой линзами.

Авторы выражают глубокую благодарность Ю.Л.Обухову и И.П.Юдину за ценные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cookson J.A., Pilling F.D. Thin Solid Films, 1973, 14, p.381.
2. Nobiling R. et al. Nucl. Instr. & Meth., 1977, 132, p.49.
3. Horowitz P., Grodzins L. Science, 1975, 189, p.325.
4. Wilde H.R. et al. Nucl. Instr. & Meth., 1978, 149, p.675.
5. Cho Z.H., Singhana M., Mohabbarizadch A. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1974, NS-21, p.622.
6. Brand K. Nucl. Instr. & Meth., 1970, 84, p.21.
7. Augustyniak W.M., Betteridge D., Brown W.L. Nucl. Instr. & Meth., 1978, 149, p.669.
8. Дымников А.Д., Явор С.Я. ЖТФ, 1963, 33, с.851.
9. Дымников А.Д., Фишкова Т.Я., Явор С.Я. ЖТФ, 1965, 35, с.431.
10. Дымников А.Д. В сб.: Программирование и математические методы решения физических задач. Дубна, 1978, с.300.
11. Хаммельблау Д.М. Прикладное нелинейное программирование. "Мир", М., 1975.
12. Андрианов С.Н., Дымников А.Д., Осетинский Г.М. ОИЯИ, Б1-9-12851, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 октября 1979 года.