

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНДЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА В МИКРОЗОНДЕ ИПФ НАНУ

К.И. Мельник

Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы, Украина

E-mail: melnik@ipflab.sumy.ua

Для повышения плотности ионного тока на мишени канала ядерного микрозонда в составе микроаналитического комплекса Института прикладной физики НАН Украины применена конденсорная система, состоящая из двух электростатических квадрупольных линз. Решена оптимизационная задача согласования эмиттанса пучка на входе зондоформирующей системы и акцептанса системы. Результаты использованы для настройки конденсорной системы. Проведены измерения величины тока и экспериментально определен коэффициент согласования эмиттанса и акцептанса при различных размерах зонда на мишени.

1. ВВЕДЕНИЕ

В микроаналитическом комплексе Института прикладной физики НАН Украины [1] используются непрерывные пучки заряженных частиц (обычно – протонов) с энергией от одного до двух мегаэлектронвольт для неразрушающего анализа состава и структуры реакторных материалов. Исследования на канале ядерного микрозонда проводятся с разрешением ионного зонда вплоть до одного микрометра. Величина тока пучка на мишени (образце) при этом должна составлять не менее 100 пкА для уверенной регистрации продуктов взаимодействия, таких как обратно рассеянные протоны и характеристическое рентгеновское излучение. При меньшей величине тока статистическая достоверность результатов становится сомнительной, что приводит к ухудшению разрешения.

До включения конденсорной системы в процесс формирования зонда получение приемлемого разрешения при заданной величине тока являлось сложной задачей. Суть проблемы состоит в следующем. На выходе ускорителя имеется кроссовер пучка. Если после кроссовера отсутствуют активные ионно-оптические элементы, то пучок расходится, и в плоскости объектного коллиматора фазовый портрет пучка приобретает форму эллипса, сильно вытянутого из I в III квадрант фазовой координатной плоскости. В то же время, акцептанс системы прямоугольного объектного и углового коллиматоров в той же самой плоскости имеет форму параллелограмма, протянувшегося из II в IV квадрант. Эта рассогласованность видна на Рис.1, где в фазовых плоскостях XX' и YY' (X – горизонтальная ось, Y – вертикальная ось, X' и Y' – соответствующие углы наклона траекторий) показан эллипс, соответствующий измеренному эмиттансу и содержащий 95% тока, а также акцептанс зондоформирующей системы, настроенной на создание пучка размерами 100 мкм на мишени в камере анализа канала ядерного микрозонда.

Несмотря на то, что ускоритель обеспечивает достаточную величину тока, рассогласованность формы фазового портрета пучка и акцептанса системы приводит к фатальному уменьшению плотности тока, прошедшего систему коллиматоров,

уменьшению фазового объема на входе фокусирующей системы, а также к ограничению достижимых размеров зонда на мишени.

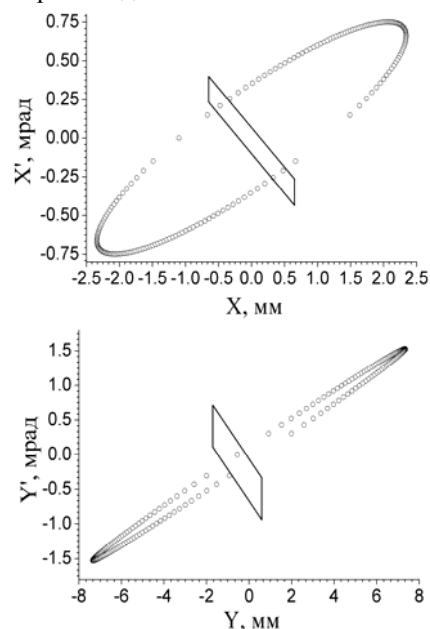


Рис.1. Фазовый контур пучка в плоскости объектного коллиматора (эллипс) и акцептанс зондоформирующей системы (параллелограмм)

2. КОНДЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КАНАЛА МИКРОЗОНДА

Микроаналитический комплекс ИПФ НАН Украины [1] построен на базе электростатического ускорителя «СОКОЛЬ» и имеет несколько аналитических каналов. Задача согласования эмиттанса пучка и акцептанса зондоформирующей системы решалась для двух каналов – резерфордского обратного рассеяния и ядерного микрозонда. В данной статье предлагаются результаты согласования для канала микрозонда, так как требования к параметрам пучка здесь являются наиболее строгими.

Канал микрозонда подробно описан в [2]. Его схема показана на Рис.2. Зондоформирующая система состоит из объектного (поз.6), углового (поз.8) коллиматоров и двух дублетов магнитных квадрупольных линз (поз.9), осуществляющих фокусировку пучка в пятно микрометровых размеров.

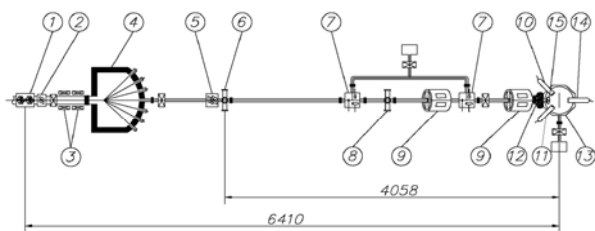


Рис.2. Схема канала ядерного микрозонда.

1 – дублет электростатических квадрупольных линз; 2 – горизонтальная щель; 3 – корректоры направления движения пучка; 4 – раздаточный магнит; 5 – щелевой прибор; 6 – объектный коллиматор; 7 – блок диагностики пучка; 8 – угловой коллиматор; 9 – дублет магнитных квадрупольных линз; 10, 11, 15 – детекторы; 12 – сканирующая система; 13 – камера взаимодействия пучка с образцом (мишенью); 14 – микроскоп

Магнитные линзы не изменяют фазовый объем пучка, поэтому аксептанс зондоформирующей системы определяется коллиматорами. То есть, тот фазовый объем, который будет вырезан коллиматорами, будет полностью определять величину тока пучка. Поэтому, в полном согласии с Рис.1, необходимо осуществить такой поворот фазового портрета пучка, который позволит наилучшим образом согласовать эмиттанс и аксептанс.

Решить эту задачу можно, только если использовать активные ионно-оптические элементы. С этой целью в микроаналитическом комплексе установлена конденсорная система (Рис.2, поз.1), которая состоит из двух (дублета) электростатических квадрупольных линз. Фотография конденсорной системы приведена на Рис.3.

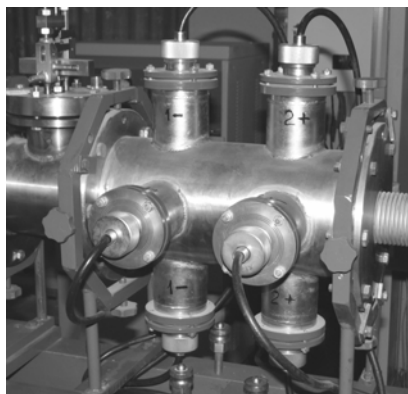


Рис.3. Конденсорная система

Основные характеристики линз следующие: эффективная длина линз 14 см, диаметр апертуры 4 см, максимальное напряжение на электродах 30 кВ. Следует отметить, что эта система смонтирована на одной базе с корректорами положения пучка, а также несколькими массивными и почти неподвижными деталями. Поэтому механическая юстировка линз исключена, а юстировка положения пучка возможна только при помощи корректоров (Рис.2, поз.3).

Задача данной работы следующая: определить параметры питания электростатических линз конденсорной системы, чтобы для известных фазовых характеристик пучка в канале обеспечить наилучшее согласование эмиттанса пучка и аксептанса зондоформирующей системы.

3. ЭМИТТАНС НА ВХОДЕ КАНАЛА

Исходные данные об эмиттансе протонного пучка с энергией один мегаэлектронвольт – фазовый портрет распределения плотности частиц пучка – получены при помощи эмиттансометра, установленного в насосном кубе вакуумного поста ускорителя. Эмиттансометр состоит из щелевой диафрагмы размером 0,1 мм и проволочного зонда диаметром 0,1 мм. Данные измерений показаны на Рис.4.

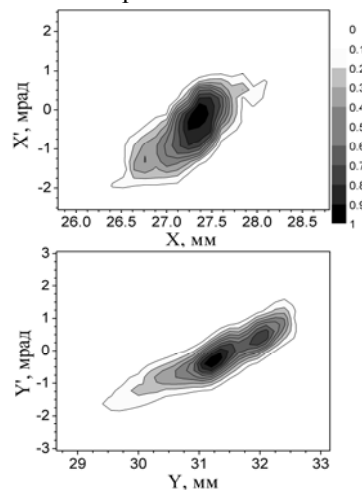


Рис.4. Измеренный эмиттанс и распределение плотности частиц пучка

Из Рис.4 можно определить характеристики фазового объема, занятого пучком, в первом из кроссоверов, расположенном непосредственно после ускорительной трубки. Здесь еще имеет место аксиальная симметрия, поэтому характеристики в плоскостях XX' и YY' должны быть одинаковыми. Полуоси фазового эллипса примем равными 0,55 мм и 1,53 мрад.

По результатам измерения эмиттанса распределение плотности частиц в фазовых плоскостях XX' и YY' является близким к двумерному нормальному распределению,

$$\rho(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_v} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}\right)\right], \quad (1)$$

где пара (u, v) может обозначать пару (x, x') или (y, y') . Параметры распределения σ_u, σ_v определяются через полуоси фазового эллипса в кроссовере. Таким образом, плотность тока пучка может быть определена в любом месте оптического тракта. Это позволит учитывать распределение плотности частиц пучка при математическом описании задачи.

Размещение кроссовера после ускорителя задается величиной вытягивающего напряжения. В работающей системе вытягивающее напряжение задается таким образом, чтобы первый кроссовер размещался после ускорителя, за 250 мм до входа анализирующего магнита. Анализирующий магнит производит фокусировку в плоскости XX' , поэтому после магнита и в районе стабилизирующей щели (расположена на расстоянии 1 м от выхода анализирующего магнита) имеем второй кроссовер в горизонтальной плоскости. Магнит настраивается таким образом, что в этом кроссовере расходимость пучка уменьшается в два раза вследствие двукратного рас-

та линейных размеров, поэтому полуоси фазового эллипса в плоскости XX' равны 1,1 мм и 0,75 мрад.

Для полного описания геометрии ионно-оптического тракта следует задать несколько линейных размеров. Полное расстояние от плоскости последнего кроссовера до объектного коллиматора в сечении XX' составляет 2757 мм, а в сечении YY' – 4792 мм. Расстояние от выхода анализирующего магнита до середины первой из линз конденсорной системы равно 1330 мм, расстояние от середины второй линзы до объектного коллиматора – 2500 мм.

Для определения аксептанса системы и размеров щелей коллиматоров использовались алгоритм [3,4] и программа “MaxVEmit” [3], разработанные в ИПФ НАНУ. Расстояние между коллиматорами равно 1960 мм, размеры щелей рассчитывались программой для заданного размера зонда на мишени и для существующей геометрии оптического тракта канала микрозонда ИПФ НАНУ [2].

4. МЕТОД РАСЧЕТА

Поставленная задача является экстремальной. Прежде всего определим функцию, подлежащую максимизации, и ее параметры.

В качестве независимых параметров следует избрать безразмерные возбуждения k_1 и k_2 электростатических линз конденсорной системы. До объектного коллиматора расположены также такие активные элементы как: корректоры направления движения пучка, анализирующий и раздаточный магнит, однако, эти элементы обеспечивают юстировку положения оптического тракта и их настройки зависят от напряжения в линзах конденсорной системы.

Использование именно безразмерных возбуждений k при проведении теоретических исследований является оправданным, поскольку они не зависят от варьируемых параметров, таких как энергия пучка E и заряд частиц пучка Q . Для перехода от безразмерного возбуждения линзы k к напряжению на электродах U следует использовать соотношение

$$U = r_a^2 \frac{k^2 E}{L_{eff}^2 Q}, \quad (2)$$

где r_a – радиус апертуры линзы, L_{eff} – эффективная длина линзы (протяженность поля).

Последовательный физический подход к выбору критерия оптимальности при решении задачи однозначно требует учета измеренного распределения плотности частиц в фазовом объеме, аппроксимированного при помощи (1). Наилучшей характеристикой при этом является интеграл по площади аксептанса от распределения частиц. Такой подход является наиболее физическим и позволяет максимизировать величину ионного тока (3), прошедшего систему коллиматоров.

Плотность тока в сечении объектного коллиматора равна

$$j = \rho(x, x') \cdot \rho(y, y'), \quad (3)$$

$$\rho(u, v) = \frac{q}{S(u, v)} \iint_{S(u, v)} \varphi(u, v) du dv,$$

где через $S(u, v)$ обозначена площадь аксептанса в плоскости XX' или YY' . Граничные точки, определяющие аксептанс в фазовом пространстве в сечении объектного коллиматора, определяются через

$$x = Ox_i,$$

$$x' = (Ax_j - Ox_i) / L_{oac}, \quad (i = 1 \dots 2, j = 1 \dots 2) \quad (4)$$

$$y = Oy_i,$$

$$y' = (Ay_j - Oy_i) / L_{oac},$$

где Ox_i, Oy_i – координаты положения щелей объектного коллиматора, Ax_i, Ay_i – координаты щелей углового коллиматора, L_{oac} – расстояние между коллиматорами.

Таким образом, алгоритм решения задачи требует проведения двукратного интегрирования функции (1) (обозначим этот интеграл как V) по площади аксептанса в фазовых плоскостях XX' и YY' :

$$V = \iint_{S(u, v)} \varphi(u, v) du dv. \quad (5)$$

Интеграл (5) не может быть найден аналитически, но в то же время существует достаточное число возможностей для полуаналитического или численного вычисления (5). Значительно упростить вычислительную процедуру можно, если вместо того, чтобы вычислять V в плоскости объектного коллиматора, определять V в плоскости последнего перед конденсорной системой кроссовера, поскольку в плоскости кроссовера распределение частиц имеет простейший вид (1). Транспортировать границы аксептанса назад по оптическому тракту можно при помощи обратной матрицы преобразования конденсорной системы; при этом аксептанс сохраняет свою форму 4-мерного параллелепипеда (Рис.5). Интеграл (5) и в этом случае не может быть найден аналитически, однако, его численное вычисление значительно упрощается.

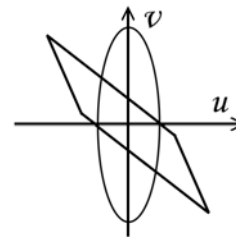


Рис.5. Эмиттанс и аксептанс в плоскости кроссовера

Уравнения (3) и (5) позволяют ввести критерий качества согласования эмиттанса пучка и аксептанса зондоформирующей системы как соотношение плотности ионного тока на мишени при включенной конденсорной системе к плотности тока при отсутствии согласования. Размеры зонда и аксептанс системы (площадь интегрирования) для выражений в числителе и знаменателе одинаковы, таким образом, варьируются только значения интегралов V для обеих фазовых плоскостей XX' и YY' . Назовем это соотношение коэффициентом согласования и обозначим как

$$t = \frac{j(k_1, k_2)}{j(0, 0)} = \frac{V_{xx'}(k_1, k_2) \cdot V_{yy'}(k_1, k_2)}{V_{xx'}(0, 0) \cdot V_{yy'}(0, 0)}, \quad (6)$$

где k_1, k_2 – безразмерные коэффициенты возбуждения первой и второй электростатических квадрупольных линз конденсорной системы.

Таким образом, имеем оптимизационную задачу с физически обоснованным критерием качества (6), а процедура решения задачи состоит в следующем циклическом алгоритме:

- определить обратную матрицу преобразования конденсорной системы;
- определить точки (4), задающие границы аксептанса в плоскости объектного коллиматора;
- задать безразмерные возбуждения, равными нулю;
- при помощи обратной матрицы преобразования конденсорной системы транспортировать границу аксептанса в плоскость кроссовера;
- провести интегрирование (5) с учетом (1) и вычислить коэффициент согласования (6) для текущего возбуждения;
- с некоторым шагом изменить возбуждения и перейти к шагу 4.

Процедуру необходимо провести для различных размеров зонда на мишени.

5. СОГЛАСОВАНИЕ ЭМИТТАНСА ПУЧКА И АКСЕПТАНСА ЗОНДОФОРМИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

5.1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В результате решения оптимизационной задачи получим зависимость коэффициента согласования от безразмерных возбуждений линз конденсорной системы для заданного размера зонда на мишени. На Рис.6 показана эта зависимость для зонда 100 мкм. Первая электростатическая квадрупольная линза конденсорной системы фокусирует пучок в вертикальной плоскости, вторая – в горизонтальной. Оптимум имеет место при $k_1=0,6$ и $k_2=0,58$ (при энергии пучка протонов 1 МэВ это соответствует напряжению на электродах 7,6 и 6,8 кВ соответственно), $t=7,3$. Согласование фазового контура и аксептанса в плоскости объектного коллиматора для этого случая показано на Рис.7.

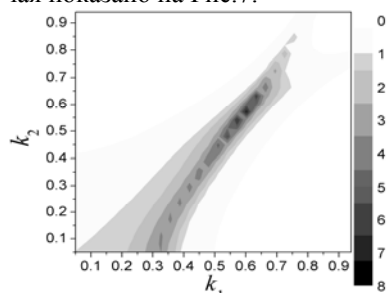


Рис.6. Зависимость коэффициента согласования t от безразмерных возбуждений линз конденсорной системы

Результаты вычислений для других размеров зонда показали, что коэффициенты возбуждения линз оптимальной конденсорной системы слабо зависят от размеров зонда на мишени (несмотря на значительное изменение размеров щелей коллиматоров и определяемого ими аксептанса), напряжение на электродах обеих линз близко по величине и составляет величину 6...7 кВ для протонного пучка с энергией один мегаэлектронвольт.

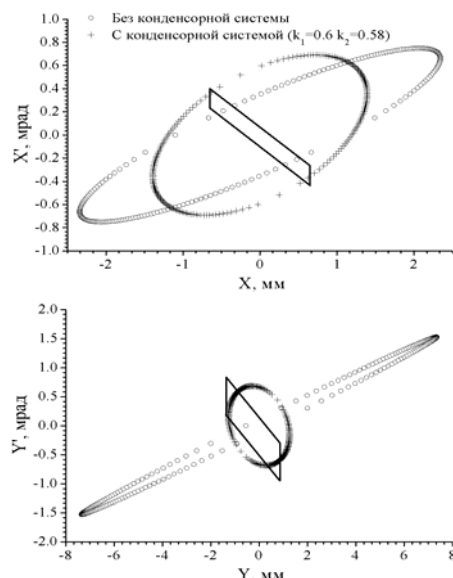


Рис.7. Налучшее согласование эмиттанса и аксептанса при размерах зонда на мишени 100 мкм

5.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ВКЛЮЧЕНИЯ КОНДЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ

Эксперимент проводился на пучке протонов с энергией один мегаэлектронвольт. Сначала было проведено измерение тока пучка для разных размеров зонда на мишени при выключенной конденсорной системе. Таким образом было получено значение тока $I_0 = I(k_1 = 0, k_2 = 0)$ для известных размеров зонда, что дает возможность определить плотность тока.

Вторым этапом эксперимента было включение конденсорной системы в процесс формирования зонда. Сначала устанавливались размеры щелей коллиматоров, затем на линзах конденсорной системы устанавливалось расчетное напряжение, после чего проводилась коррекция положения пучка и общая юстировка микропучка. Измеренный ток пучка $I_B = I(k_1, k_2)$, как и следовало ожидать, вырос.

Учтя, что плотность тока есть величина тока, деленная на размер зонда на мишени S , получим выражение, позволяющее экспериментально определять коэффициент согласования:

$$t = \frac{j(k_1, k_2)}{j(0,0)} = \frac{I_B}{I_0} \frac{S}{S} = \frac{I_B}{I_0}. \quad (7)$$

По результатам измерений был определен этот коэффициент. Результаты сравнения расчетов и эксперимента представлены на Рис.8. Во время измерений ток пучка не остается неизменным, а подвержен значительным колебаниям (как это показано в [4]). На Рис.8 экспериментальные точки приведены как результат обработки с указанием погрешности измерения.

Точность установки напряжения U на электродах линз составляла ± 100 В. Отклонение установленного напряжения U более чем на 500 В от расчетного значения приводит к существенному уменьшению регистрируемого тока, однако, в полной мере вопрос соответствия реального и расчетного напряжения U , соответствующего максимуму тока, не исследовался.

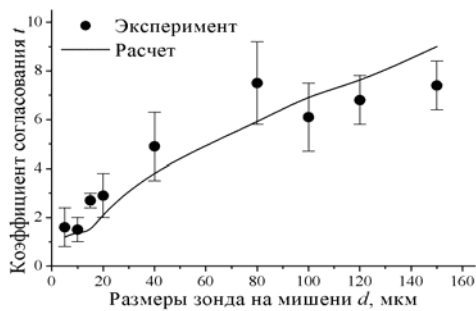


Рис.8. Сравнительные результаты расчетов и эксперимента

Сравнивая результаты расчетов и эксперимента, видим, что расчетный коэффициент согласования несколько завышен для размеров зонда, больших 100 мкм. Это связано с неточностью представления плотности частиц в фазовом пространстве через аналитическое двумерное гауссово распределение (1), наиболее точно описывающее центральную часть эмиттанта и неточно – его периферию.

Для размеров зонда, меньших, чем 100 мкм, имеет место другая тенденция: расчетный коэффициент согласования является несколько заниженным. Следует отметить объективные сложности регистрации малых токов, характерных для этих режимов. Особенно это касается измерения тока I_0 . Любая неточность юстировки пучка уменьшает и без того малое значение I_0 и приводит к завышению коэффициента согласования (7).

ВЫВОДЫ

Из вышеизложенного следует отметить совпадение результатов расчетов и эксперимента с точностью около 10%. Это говорит в пользу выбранной методики исследования, а результаты дают возможность значительно улучшить качество сформированного пучка, повысить плотность тока пучка на мишени и улучшить разрешающую способность микрозонда. Так, даже в субмикронных зондах, использование конденсорной системы приводит к увеличению плотности тока в 1,5 раза, а для зондов, больших 100 мкм, плотность тока возрастает уже в

шесть раз. Таким образом, получим увеличение числа детектируемых событий при взаимодействии пучка с образцом. Или же для того же самого тока пучка можем уменьшить размеры зонда на мишени (улучшить разрешение).

В настоящее время конденсорная система постоянно включена во время работы на каналах ядерного микрозонда и обратного резерфордовского рассеяния.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Батурин, А.Б. Дудник, О.И. Ехичев, М.И. Захарец, В.И. Мирошниченко, А.Г. Нагорный, В.Е. Сторишко, А.И. Шимко. Аналитический ускорительный комплекс Института прикладной физики НАН Украины // *Труды XIV Межд. конф. по электр. уск. и пучковым технологиям. Физика и техника ускорителей*. Обнинск, 2002, с.264-269.
2. А.Г. Пономарев, В.А. Ребров, Н.А. Сайко, А.Б. Дудник, П.А. Павленко, А.А. Дрозденко, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторишко. Протонный сканирующий микрозонд с интегрированной зондоформирующей системой // *Прикладная физика*. 2008, №2, с.28-33.
3. A.G. Ponomarev, V.I. Miroshnichenko, V.E. Storizhko. Optimum collimator shape and maximum emittance for submicron focusing of ion beams. Determination of the probe-forming system resolution limit // *Nuclear Instruments in Physics Research A (506)*. 2003, p.20-25.
4. А.Г. Пономарев. Оптимальное коллимирование пучка заряженных частиц в зондоформирующих системах // *Журнал технической физики (79)*. 2009, в.2, с.112-116.
5. D.V. Magilin, A.G. Ponomarev, V.A. Rebrov, N.A. Sayko, K.I. Melnik, V.I. Miroshnichenko, V.Y. Storizhko. Performance of the Sumy nuclear microprobe with the integrated probe-forming system // *Nuclear Instruments in Physics Research. B. (267)*. 2009, p.2046-2049.

Статья поступила в редакцию 28.05.2010 г.

USING OF A CONDENSING SYSTEM FOR ION CURRENT DENSITY INCREASE IN THE MICROPROBE OF IAP OF NAS OF UKRAINE

K.I. Melnik

A condensing system of a microanalytical complex of Institute of Applied Physics of NAS of Ukraine consists of two electrostatic quadrupole lenses. It is used for increasing of ion current density on a target of nuclear microprobe line of the complex. An optimization task of agreement of beam emittance and probe-forming system acceptance has been solved. The results have been used for adjustment of the condensing system. Beam current measurements were performed and a coefficient of adjustment of emittance and acceptance was determined experimentally for different probe sizes.

ВИКОРИСТАННЯ КОНДЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ГУСТИНИ ІОННОГО СТРУМУ В МІКРОЗОНДІ ІПФ НАНУ

К.І. Мельник

Для підвищення густини іонного струму на мішені каналу ядерного мікрозонду в складі мікроаналітичного комплексу Інституту прикладної фізики НАН України застосована конденсорна система, що складається з двох електростатичних квадрупольних лінз. Вирішено оптимізаційну задачу узгодження емітансу пучка на вході зондоформуючої системи і аксептансу системи. Результати використано для налагодження конденсорної системи. Проведено вимірювання величини струму і експериментально визначено коефіцієнт узгодження емітансу і аксептансу при різних розмірах зонду на мішені.