

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИТТАНСА ПУЧКА РЕРРЕГ-РОТ-МЕТОДОМ

М. Э. Долинская, Н. Л. Дорошко, А. К. Зайченко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Предложен новый алгоритм определения эмиттанта и параметров Твисса пучка ускоренных частиц по результатам измерения распределения интенсивности пучка по поперечному сечению, полученным реррег-рот диагностической установкой.

Введение

Ранее измерение эмиттанта, как правило, проводилось щелевыми методами [1]. Эти методы достаточно просты и надежны, однако требуют отдельных измерений распределений интенсивности пучка по двум взаимно перпендикулярным поперечным направлениям, что занимает много времени. Недавно был предложен новый так называемый реррег-рот-метод, прошедший успешные испытания на линейном ускорителе UNILAC, GSI (Дармштадт, ФРГ) [2].

Основой этого метода является измерение распределения интенсивности пучка по поперечному сечению с помощью реррег-рот-пластины (решетки) с отверстиями диаметром 0,2 мм, расположенными в виде сетки на расстоянии 2,5 мм друг от друга и устанавливаемыми на некотором расстоянии позади экрана (рис. 1). Пройдя через решетку, пучок создает на экране множество световых пятен, характеризующих распределение интенсивности пучка по поперечному сечению. Определение положения, размеров, формы и яркости отдельных пятен позволяет находить представляющие фигуры горизонтальной и вертикальной фазовых плоскостей. Площади представляющих фигур определяют значения вертикального и горизонтального эмиттанта пучка, а уравнения эллипсов, аппроксимирующих эти фигуры, описываются инвариантами Куранта - Снайдера, параметры которых определяют параметры Твисса. Для калибровки установки используется параллельный световой пучок от лазера.

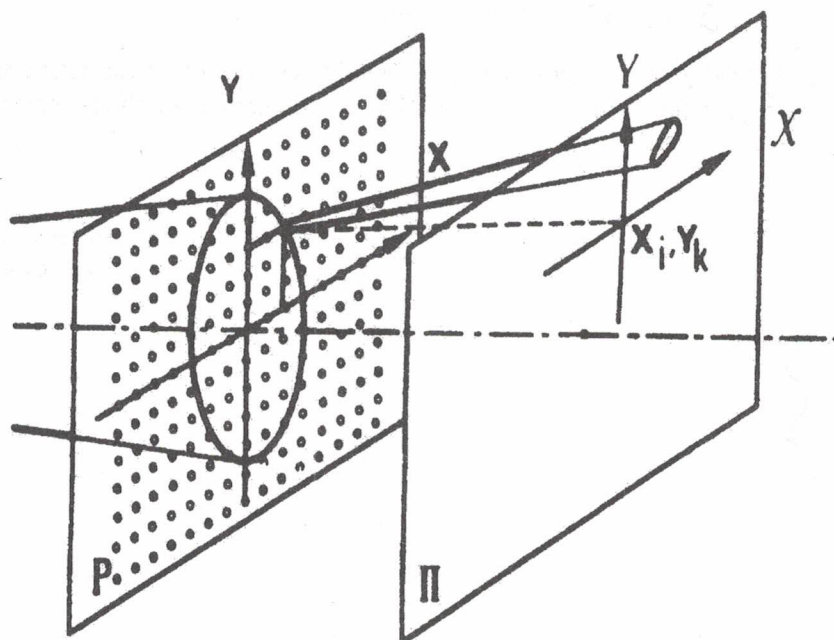


Рис. 1. Принцип работы реррег-рот диагностической установки: P – плоскость реррег-рот-пластины; Π – плоскость фиксирующего экрана, на котором изображено пятно, соответствующее отверстию с координатами (X_i, Y_k) .

При испытании установки использовался упрощенный алгоритм обработки результатов измерений, описанный в [3]. В настоящей работе предложен более совершенный алгоритм, на основе которого может разрабатываться математическое обеспечение диагностики пучков.

1. Принцип работы алгоритма

Калибровка диагностической установки. Калибровка заключается в определении координат центра пучка (X_c, Y_c) и центров отверстий (Xh_m, Yh_n), $m \in [1, M]$, $n \in [1, N]$, где M и N - количество отверстий по горизонтали и вертикали соответственно. Съем информации с экрана осуществляется цифровой камерой. В результате получается матрица распределения интенсивности по поперечному сечению пучка I размерностью $P \times Q$. В качестве центра отверстий выбирается наиболее яркая точка соответствующего пятна, а в качестве центра пучка - наиболее яркая точка всей лазерной картины. Элемент матрицы $I_{p,q}$ соответствует интенсивности пучка в точке с координатами (x_p, y_q) , $p \in [1, P]$, $q \in [1, Q]$. Для диагностической установки UNILAC GSI [1] $M = N = 15$, $P = 1280$, $Q = 1024$.

В качестве примера на рис. 2 приведены изображения, созданные лазерным лучом и пучком ионов O^{3+} , полученные на диагностической установке UNILAC GSI [1].

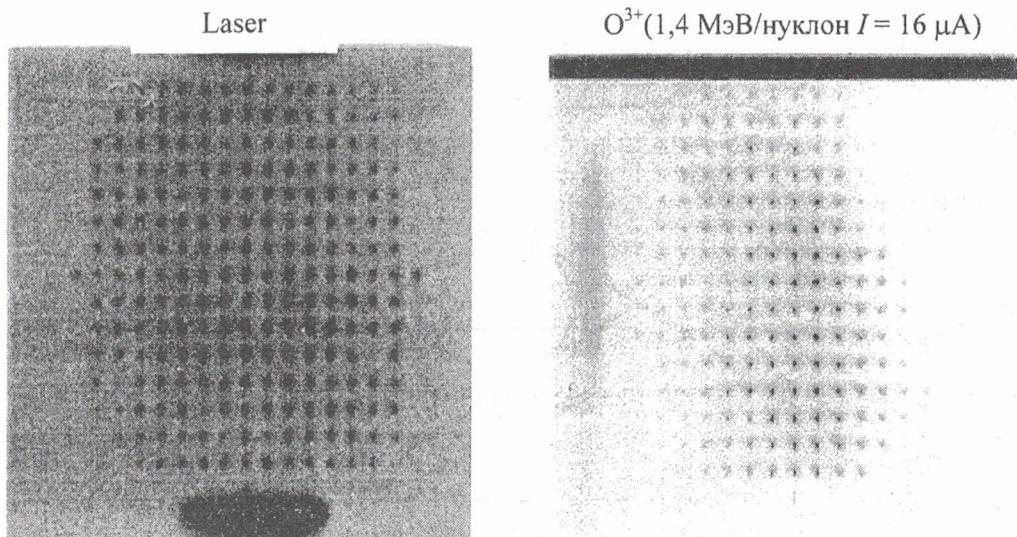


Рис. 2. Изображения от лазерного луча при калибровке (слева) и от ионного пучка O^{3+} с энергией 1,4 МэВ/нуклон (справа), полученные на репер-рот диагностической установке (UNILAC, GSI, Дармштадт).

Определение параметров пучка. Параметры пучка предлагаем определять следующим образом:

формируется матрица распределения интенсивности по площади экрана $I_{ij} = I(x_i, y_j)$;
выделяются отдельные пятна;

находятся горизонтальное и вертикальное распределения максимумов интенсивности каждого пятна;

полученные распределения аппроксимируются гауссианами;

определяются центры этих распределений;

рассчитываются отклонения центров световых пятен, создаваемых пучком, от центров лазерных пятен;

определяются угловые отклонения пятен;

рассчитываются эмиттанс и параметры Твисса пучка.

2. Процедура сглаживания

При необходимости распределения интенсивности вдоль оси x при каждом фиксированном значении y сглаживаются методом наименьших квадратов, при этом в качестве базиса используются полиномы Лежандра [4]. Дискретная функция $I(x, y)$ на интервале $[x_0, x_n]$ представляется в виде

$$IF(x, y_j) = \sum_{k=0}^m c_k \cdot L_k(x), \tag{1}$$

где $m \leq n$, а $L_k(x)$ - полиномы Лежандра. Неизвестные коэффициенты c_k определяются минимизацией суммы квадратов отклонений $\sum_{k=0}^n [IF(x_k, y_j) - I(x_k, y_j)]^2$, где $x_k \in [x_0, x_n]$ - узлы аппроксимации. Полученную таким образом систему нормальных уравнений решаем

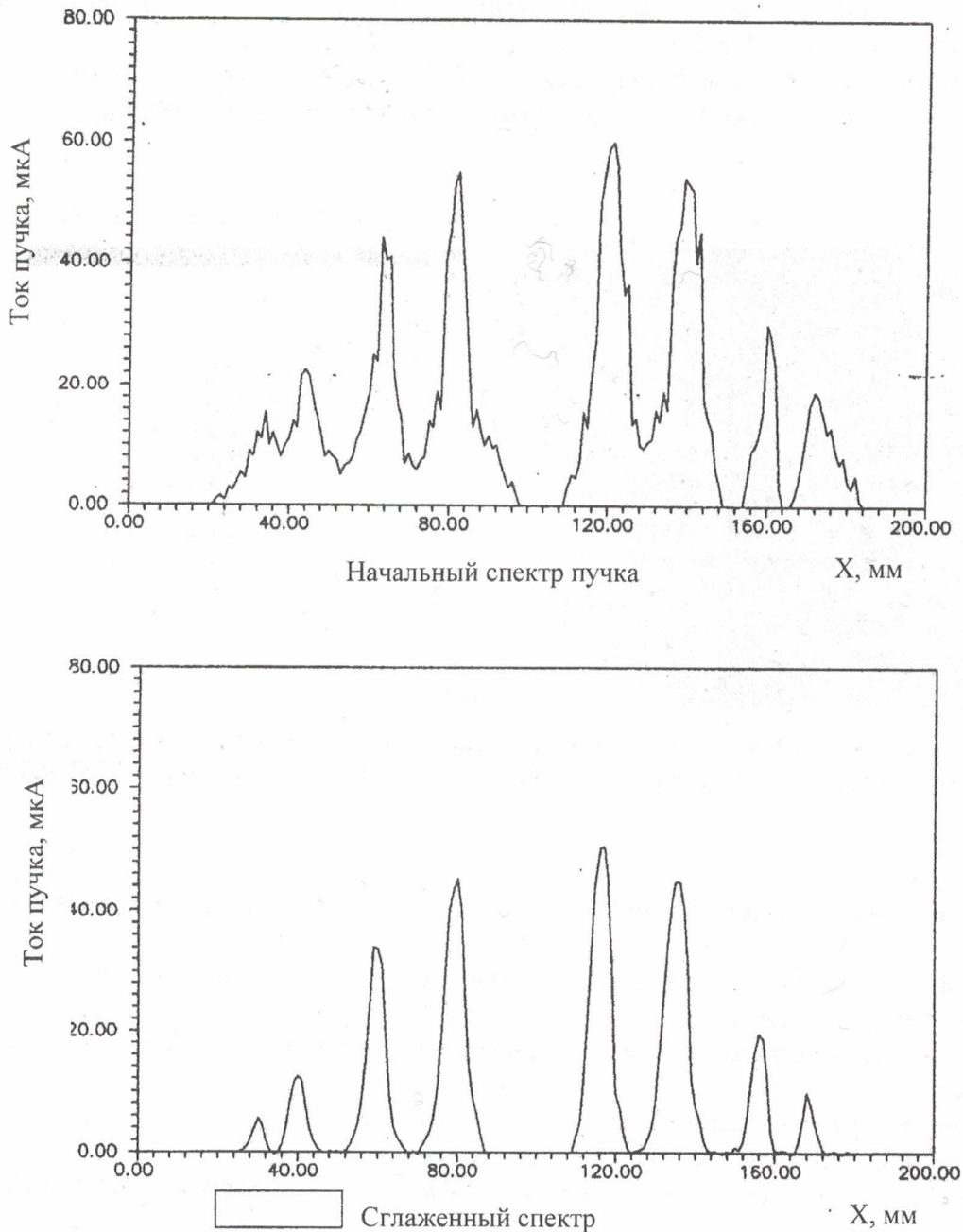


Рис. 3. Пример работы процедуры сглаживания.

методом Гаусса без выбора главного элемента [4]. В результате получаем новые сглаженные значения интенсивности.

Проделав такую же операцию вдоль оси y при каждом фиксированном значении x , получим новые, сглаженные данные, которые представляются матрицей с элементами $IF_{ij}=IF(x_i,y_j)$, $i = 1...P$, $j = 1...Q$. Результат работы вышеописанной процедуры показан на рис. 3.

3. Аппроксимация распределения интенсивности пятна гауссианами

Анализируя элементы матрицы I или IF , выделяем отдельные пятна. Методика выделения детально описана в [3]. На рис. 4 показано распределение интенсивности выделенного пятна.

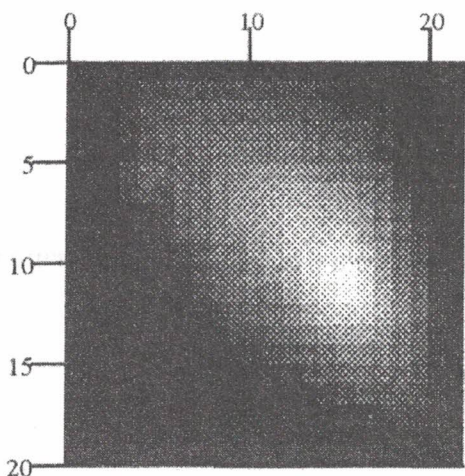


Рис. 4. Распределение интенсивности внутри одного выделенного пятна.

Для определения эмиттанса и параметров Твисса каждое пятно анализируется отдельно. Определив положение максимума интенсивности на каждой вертикальной линии пятна, получим распределение максимумов интенсивности по горизонтали, а определив положение максимума интенсивности на каждой горизонтальной линии, получим вертикальное распределение максимумов интенсивности пятна.

Полученные распределения аппроксимируем гауссианами. Горизонтальное распределение представляем в виде

$$IS(x) = IS_0 \cdot \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right], \quad (2)$$

где IS_0 – максимальное значение интенсивности; σ – стандартное отклонение; x_0 – положение максимума интенсивности.

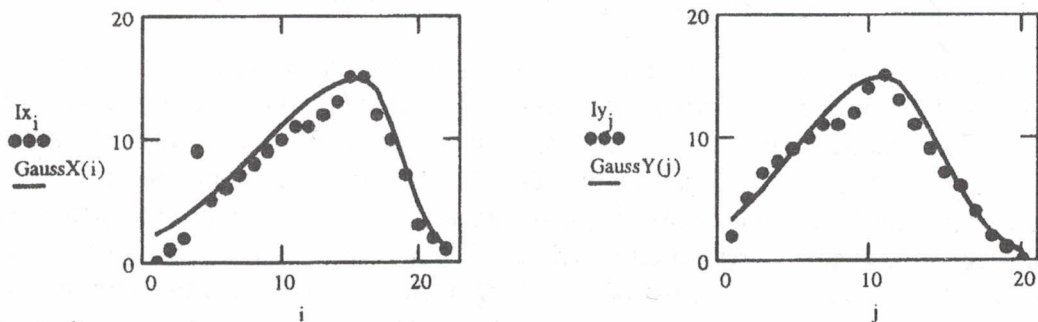


Рис. 5. Горизонтальная и вертикальная проекции распределения интенсивности пятна, представленного на рис. 4: векторы I_x и I_y (точечные изображения) и аппроксимирующие их гауссианы (сплошные линии).

Распределения, как правило, несимметричны, поэтому левая и правая части аппроксимируются отдельно. В результате получаем левое σ_l и правое σ_r стандартные отклонения этого распределения. Аналогично вычисляются верхнее σ_u и нижнее σ_d стандартные отклонения вертикального распределения интенсивности пятна.

Рис. 5 наглядно демонстрирует аппроксимацию гауссианами экспериментальных значений распределения интенсивности пятна, изображенного на рис. 4.

4. Определение угловых отклонений пятна

Используя представления, полученные в виде функций Гаусса, находим отклонение каждой координаты от положения максимальной интенсивности. Формула линейного отклонения выводится из (2)

$$\Delta x = \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \frac{IS_0}{IS(x)}}, \tag{3}$$

где $\Delta x = x - x_0$.

Угловые отклонения для каждого пятна в горизонтальном направлении определяем по формулам

$$XR' = \frac{(dx + \Delta xr) \cdot h}{L},$$

$$XL' = \frac{(-dx + \Delta xl) \cdot h}{L}, \tag{4}$$

где $dx = x_0 - x_{hole}$. Аналогичные расчеты по определению YD' , YU' проводим и в вертикальном направлении для $dy = y_0 - y_{hole}$, где x_0, y_0 - координаты максимума интенсивности выделенного пятна, x_{hole}, y_{hole} - координаты соответствующего ему отверстия, а $\Delta xr, \Delta xl, \Delta yd$ и Δyu вычисляются с помощью (3). Значения h и L определяются параметрами установки. L - расстояние между решеткой и экраном, фиксирующем изображение, а $h = \frac{\Delta h}{N_p}$, где Δh - расстояние между центрами соседних отверстий, N_p - количество точек

между двумя отверстиями.

С помощью вышеописанных процедур формируем матрицы правых $XR'_{m,n}$, левых $XL'_{m,n}$, верхних $YU'_{m,n}$ и нижних $YD'_{m,n}$ угловых отклонений, а также матрицу, представляющую суммарные интенсивности пятен $IST_{m,n}$.

5. Формирование фазовых эллипсов

Для определения горизонтального эмиттанса находим средние статистические значения XRP и XLP элементов столбцов матриц XR' и XL' при каждом фиксированном значении m , а для расчета вертикального эмиттанса вычисляем средние статистические значения YDP и YUP элементов строк матриц YD' и YU' при каждом значении n .

В результате каждому значению горизонтальной координаты центра отверстия Xh_m будут соответствовать угловые отклонения XRP_m и XLP_m , а каждому значению Yh_n - угловые отклонения YDP_n и YUP_n . Таким образом формируются представляющие фигуры горизонтальной и вертикальной фазовых плоскостей. На рис. 6 изображен пример такой фигуры.

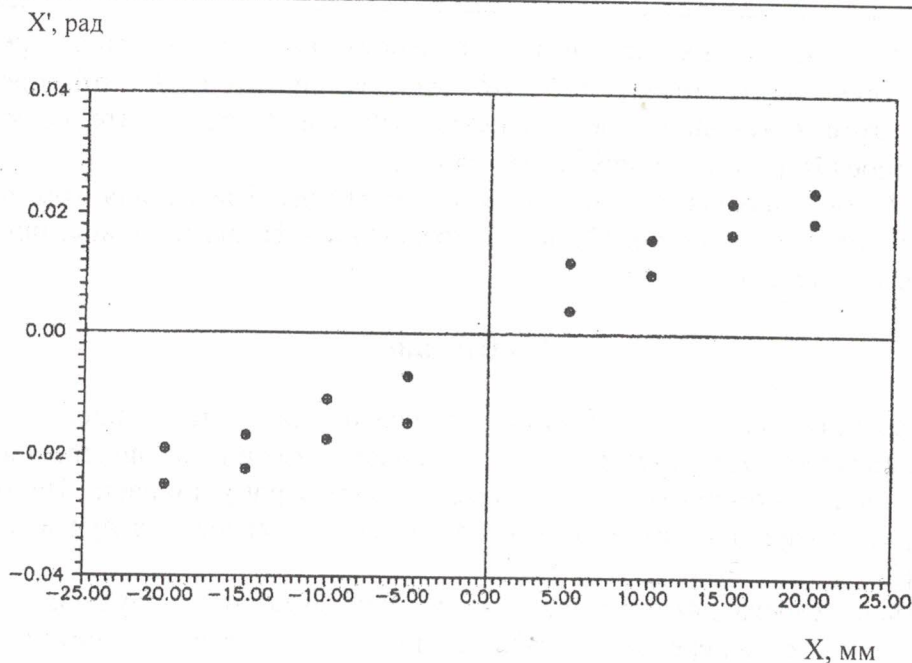


Рис. 6. Пример представляющей фигуры фазовой плоскости.

6. Определение параметров пучка

Определение эмиттанса. Полученную на горизонтальной фазовой плоскости фигуру аппроксимируем эллипсом с центром в начале координат, ось которого наклонена к абсциссе на некоторый угол θ . Тангенс угла наклона θ и площадь фигуры SX определяем численно. Тогда горизонтальный эмиттанс пучка будет определяться выражением [5]: $\varepsilon_x = SX / \pi$.

Подобным образом вычисляется и вертикальный эмиттанс пучка.

Определение параметров Твисса. Уравнение горизонтального представляющего эллипса описывается инвариантом Куранта - Снайдера [5]

$$\gamma \cdot x^2 + 2 \cdot \alpha \cdot x \cdot x' + \beta \cdot x'^2 = \varepsilon, \quad (6)$$

где α , β и $\gamma = (1 + \alpha^2) / \beta$ – параметры Твисса.

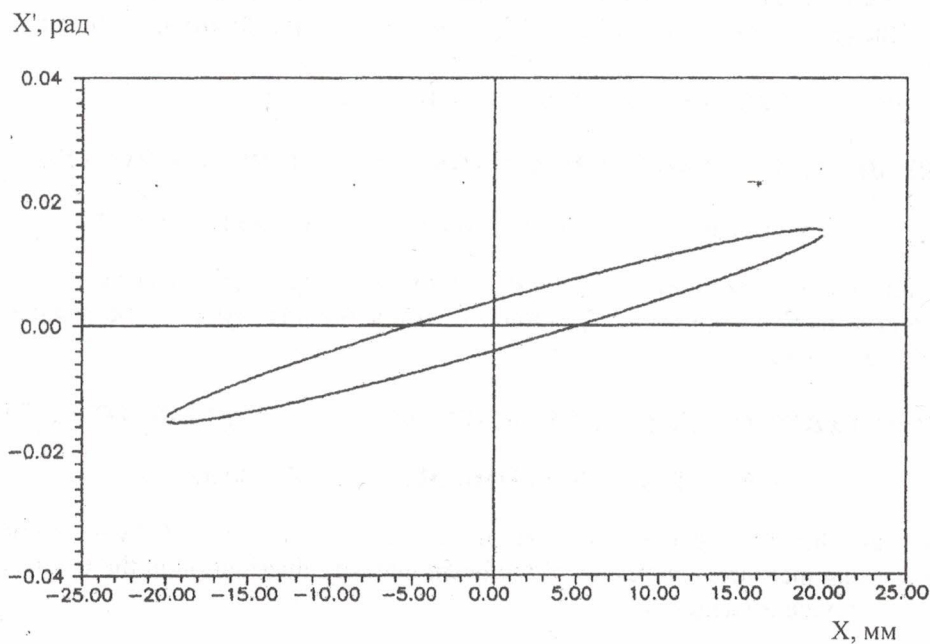


Рис. 7. Фазовый эллипс, приближающий фигуру, изображенную на рис. 6.

Для определения этих параметров в явном виде проводится преобразование координат, которое осуществляет поворот эллипса на угол θ . Это преобразование подставляется затем в каноническое уравнение эллипса. В результате получается соотношение, подобное (7), которое и определяет параметры α , β и γ .

Таким образом находятся эмиттансы и параметры Твисса для горизонтальной и вертикальной фазовых плоскостей. На рис. 7 представлен фазовый эллипс, приближающий фигуру, изображенную на рис. 6.

Заключение

В работе предложен новый алгоритм определения параметров Твисса и эмиттанса по результатам измерения распределения интенсивности частиц по поперечному сечению пучка, полученным с помощью диагностической pepper-pot-установки. На основе этого алгоритма разрабатывается математическое обеспечение диагностики пучка на ускорителе UNILAC, GSI [3].

Вследствие своего быстродействия и возможности получения информации одновременно в двух поперечных фазовых плоскостях pepper-pot-метод определения эмиттанса является более эффективным, чем применявшиеся ранее щелевые методы диагностики пучка. Такая установка может работать и на ускорителях ИЯИ.

Применение описанного в данной работе метода определения параметров фазового эллипса позволит получать более точные результаты при проведении пучковой диагностики.

Отдельные процедуры предложенного алгоритма могут использоваться и при обработке результатов измерений параметров пучка щелевыми методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Strehl P.* Beam instrumentation and diagnostic // Joint Universities Accelerator School. - 1999.
2. *Domke M., Dorn Chr, Forck P. et al.* // A single shot emittance measuring system for intense heavy ion beams // Proc. of the 3rd European Workshop on beam Diagnostics and Instrumentation for partial accelerators. - Frascati (Rome), Italy, Oct. 1997.
3. *Dolinska M., Domke M., Forck P. et al.* // Emittance measurements at the new UNILAC pre-stripper using a pepper-pot with a pc-controlled CCD-camera // Pros. of the 4th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, 16th - 18th May 1999, Chester, UK.
4. *Мудров А. Е.* Численные методы для ПЭВМ для языков Бейсик, Фортран, Паскаль. - Томск, МП "Раско", 1991.
5. *Брук Г.* // Циклические ускорители заряженных частиц. - М., 1970. - С. 73 - 77.

ВИЗНАЧЕННЯ ЕМІТТАНСА ПУЧКА PEPPER-POT-МЕТОДОМ

М. Е. Долінська, Н. Л. Дорошко, А. К. Зайченко

Запропоновано новий алгоритм визначення еміттанса й параметрів Твісса пучка прискорених частинок за результатами вимірювання розподілів інтенсивності пучка з поперечного перерізу, отриманих pepper-pot діагностичною установкою.

DETERMINATION OF THE BEAM EMITTANCE BY PEPPER-POT-METHOD

M. E. Dolinska, N. L. Doroshko, A. K. Zaichenko

The new algorithm for the determination of the beam emittance and Twiss parameters of the accelerate particles, using measurement results of the beam intensity distribution in the transverse plane with pepper-pot diagnostic device is suggested.

Поступила в редакцию 25.02.02,
после доработки – 05.04.02.