

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 539.1.05

ИЗМЕРЕНИЕ ЭМИТТАНСА МЕТОДОМ PERPER-ROT НА ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ИОНОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ И-4

© 2021 г. А. А. Лосев^a, *, Ю. А. Сатов^a, А. В. Шумшуров^a,
А. Н. Балабаев^a, И. А. Хрисанов^a, А. А. Васильев^a

^aИнститут теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Москва, 117218 Россия

*E-mail: anton.losev@itep.ru

Поступила в редакцию 27.11.2020 г.

После доработки 21.06.2021 г.

Принята к публикации 01.07.2021 г.

Разработана компьютерная программа для обработки первоначальных изображений по методике «perper-rot», позволяющей измерить эмиттанс пучка ионов за один выстрел лазера. При обработке используется изображение маски, получаемое на сцинтилляторе от рентгеновской вспышки плазмы мишени, что позволяет восстановить положения отверстий маски. Приведена схема измерений эмиттанса пучка ионов углерода, извлекаемого из лазерной плазмы, создаваемой импульсами CO₂-лазера при плотности потока излучения 10¹¹ Вт/см². Приведены некоторые результаты обработки и вычисления эмиттанса пучка ионов C⁺.

Ключевые слова: лазерный источник ионов, CO₂-лазер, измерение эмиттанса, методика perper-rot

DOI: 10.56304/S207956292006038X

ВВЕДЕНИЕ

Величина поперечного эмиттанса — одна из важнейших характеристик пучка заряженных частиц. Одним из способов его измерения является метод “perper-rot” [1]. Данная работа посвящена использованию этой методики на лазерно-плазменном источнике ионов линейного ускорителя И-4.

На рис. 1 приведена общая схема установки И-4. Она состоит из двухмодульного импульсно-периодического CO₂-лазера 1. Параметры лазерной системы следующие: пиковая мощность 60–70 МВт, длительность пика ≈ 30 нс, расходимость пучка близка к дифракционному пределу. Лазерное излучение транспортируется к вакуумной камере 3 с помощью четырех медных плоских зеркал 2, имеющих диаметр 300 мм, и фокусируется на цилиндрическую мишень 4 с помощью сферической линзы с фокусным расстоянием 900 мм. Углеродная мишень 4 из графита диаметром 130 мм может вращаться вокруг своей оси и смещаться в вертикальном направлении для предотвращения образования кратера на поверхности. Лазерный пучок падает на поверхность под углом 30° к ее нормали, совпадающей с осью пролетной трубы и направлением разлета плазмы. Система извлечения пучка — трехэлектродная, с положительным 5, отрицательным 6 и земляным потенциалами. Электростатическая линза 7, расположенная на входе в ускоритель, используется для согласо-

вания пучка с ускоряющей секцией 8. Параметры секции RFQ линейного ускорителя И-4 следующие [2]: рабочая частота 81.5 МГц, $z/A \geq 1/3$, входная энергия 0.02 МэВ/н, выходная энергия 1.57 МэВ/н, максимальный ток инжекции 100 мА.

В системе извлечения пучка расстояния между положительным, отрицательным и заземленным электродами 20 и 40 мм соответственно. Положительный электрод расположен на расстоянии 2640 мм от поверхности мишени, диаметр отверстия в нем составляет 10 мм и может быть установлена сетка. Измерения проводились при потенциале положительного электрода 60 кВ и отрицательного — 10 кВ. Плотность мощности лазерного излучения на поверхности мишени была 10¹¹ Вт/см². С помощью цилиндра Фарадея был предварительно измерен полный ток пучка ионов углерода. Временная форма плотности тока ионов в плоскости положительного электрода экстракции, где происходит извлечение пучка, показана на рис. 2.

Диаметр пучка в этом месте задается диаметром отверстия в электроде, и плотность тока при полном прохождении пучка до измерителя тока вычисляется делением на площадь отверстия. Измеритель эмиттанса и цилиндр Фарадея устанавливались сразу позади заземленного электрода системы извлечения пучка.

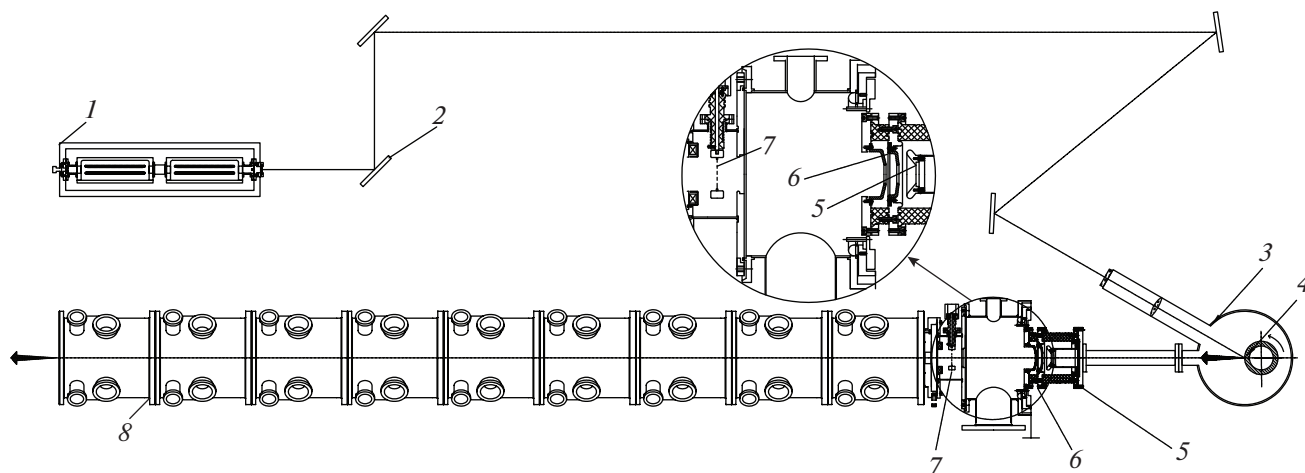


Рис. 1. Общая схема лазерно-плазменного источника ионов и ускорителя И-4.

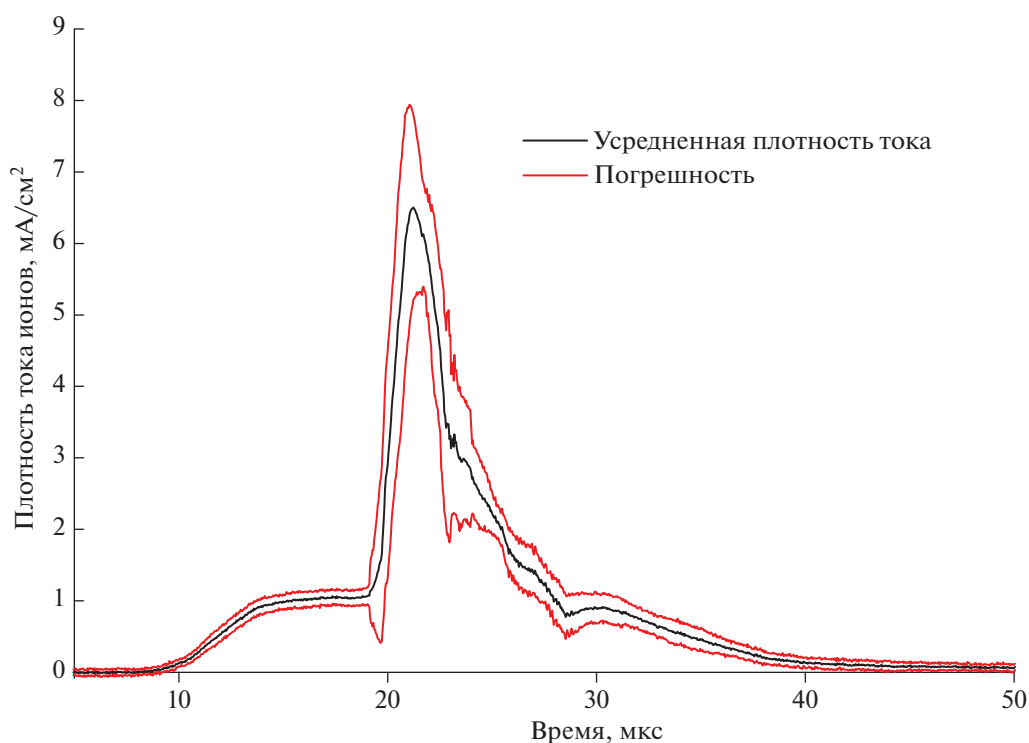


Рис. 2. Плотность тока ионов углерода в плоскости положительного электрода экстракции.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭМИТТАНСА

Для измерения поперечного эмиттansa ионных пучков применена методика “perfor-pot”, которая заключается в том, что на пути пучка устанавливается маска с отверстиями. Фазовые характеристики пучка извлекаются из изображения пучка на экране, расположенном на некотором заранее известном расстоянии от маски. Размеры отверстий маски малы и отсекают от пучка такие его части, что влияние пространственного заряда этих ча-

стей пренебрежимо мало. Расплывание отдельных частей пучка за маской зависит только от поперечных составляющих скорости частиц. Методика позволяет измерить эмиттанс одного сгустка, получать фазовый портрет пучка в плоскостях $x-x'$ и $y-y'$ одновременно. В работе применялся измеритель эмиттansa со следующими параметрами: период отверстий 5 мм, диаметр отверстий ≈ 180 мкм, расстояние между маской и экраном 29.4 мм, сцинтиллятор CsI, ПЗС-камера SDU-415.



Рис. 3. Восстановление координат отверстий маски: изображение отверстий маски в лучах плазмы (а); восстановленные координаты отверстий (б).

Оценить увеличение радиуса микропучка r из-за его пространственного заряда можно по формуле из работы [3]:

$$f\left(\frac{r}{r_0}\right) = 88 \left(\frac{M}{m}\right)^{\frac{1}{4}} I^{\frac{1}{2}} U_0^{-\frac{3}{4}} \frac{z}{r_0}; \quad f(x) = \frac{1}{2} \int_1^x \frac{dy}{\sqrt{\ln y}}, \quad (1)$$

где M/m — отношение массы иона к массе электрона, I — ток микропучка, U_0 — энергия ионов в вольтах, z — расстояние, на которое распространился пучок, r_0 — начальный радиус пучка. Взяв максимальную плотность тока из рис. 2, приняв ее падающей на маску (в реальности плотность пучка на маске меньше из-за увеличения его диаметра при прохождении системы экстракции) и подставив в (1) соответствующие значения получим $f\left(\frac{r}{r_0}\right) \approx 0.01$, $\frac{r}{r_0} < 1.001$. Таким образом, распылением микропучка под действием собственного заряда можно пренебречь.

На первом этапе работы программы определяются координаты отверстий маски. Лазерная плазма — источник ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Этот источник имеет размер ≈ 1 мм и находится на расстоянии более 2 м от источника. Учитывая величину расстояния между маской и экраном, можно считать, что лучи от отверстий параллельны, а их изображения на экране дают координаты отверстий. Чтобы получить изображение маски в лучах плазмы (рис. 3а) достаточно отключить извлекающее поле или производить экспозицию перед прилетом частиц пучка, который запаздывает относительно света.

Достаточно засветить хотя бы два отверстия, чтобы восстановить координаты остальных. В программе используется библиотека компьютерного зрения OpenCV [4]. С помощью порогового фильтра и морфологических операций над пиксе-

лями находятся контуры отдельных отверстий. По центрам изображений можно устанавливаются период повторения в пикселях и угол поворота маски относительно матрицы камеры. Оставшиеся отверстия лежат на серии параллельных и перпендикулярных прямых и отстоят друг от друга на период повторения отверстий, как на рис. 3б.

На втором этапе программы обрабатываются изображения микропучков. Контуры изображений отдельных микропучков выделяются таким же способом из первого этапа. По найденным областям изображения находятся координаты центр тяжести целого пучка. Далее устанавливается соответствие микропучков отверстиям маски, как ближайшее по направлению в сторону центра тяжести (рис. 4). Угол между прямой, на которой лежат центр области и центр всего пучка, и прямой, на которой лежат центр области и соответствующее отверстие, не должен быть велик.

Далее используется формула (2) для эмиттанса, полученная в работе [5]. Из подготовленного изображения можно получить все входящие в нее параметры.

$$\epsilon_x^2 = \frac{1}{N^2} \left\{ \left[\sum_{j=1}^p n_j (x_j - \bar{x}) \right] \times \left[\sum_{j=1}^p n_j \left[\sigma_{x_j}^2 - n_j (\bar{x}_j' - \bar{x}') \right] \right] - \left[\sum_{j=1}^p n_j x_j \bar{x}_j' - \bar{x} \bar{x}'' \right]^2 \right\}^2, \quad (2)$$

где x_j — положение j ряда отверстий в плоскости маски; p — количество рядов отверстий; n_j — количество частиц пролетевших через отверстия в j ряду (пропорционально сумме интенсивности свечения всех пикселей изображений отверстий в j ряду); $\bar{x}$ — средняя координата всех отверстий маски; $\bar{x}_j'$ — средняя расходимость микропучков в

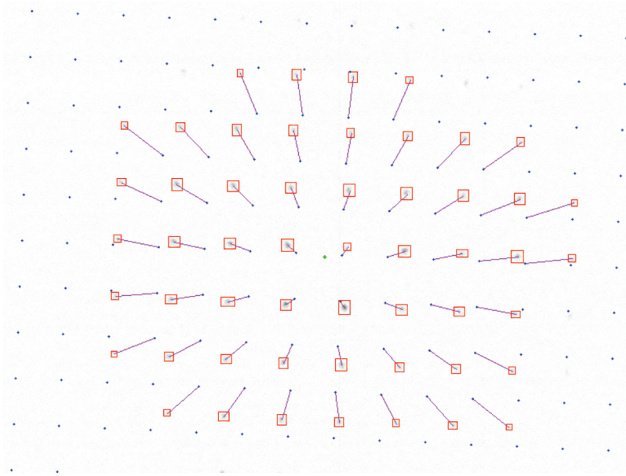


Рис. 4. Подготовленное изображение.

j ряду; $\bar{x}''$ – средняя расходимость всех микропучков; $\sigma_{x'_j}$ – ср.кв. расходимость микропучков в j ряду.

Сложив проекции микропучков на соответствующие оси можно получить профили пучка, прошедшего через маску, а также координаты точек $\left(x_j; \bar{x}_j \pm \sigma_{x'_j}\right)$, лежащих на контуре фазового эллипса. Уравнение эллипса, соответствующего границам пучка на фазовой плоскости дается уравнением:

$$\beta x'^2 + 2\alpha x x' + \gamma x^2 = \varepsilon_x, \quad (3)$$

где параметры α, β, γ являются элементами матрицы Твисса и связаны между собой соотношением:

$$\beta\gamma - \alpha^2 = 1. \quad (4)$$

С помощью оптимизатора входящего в состав пакета ROOT [6] находится уравнение эллипса в каноническом виде:

$$\frac{\left((x - x_c)\cos\theta + (x' - x'_c)\sin\theta\right)^2}{a^2} + \frac{\left((x' - x'_c)\cos\theta - (x - x_c)\sin\theta\right)^2}{b^2} = 1, \quad (5)$$

где x, x'_c – координаты центра, θ – угол поворота, a, b – полуоси эллипса. После перемещения центра эллипса в начало координат параметры из (5) связаны с каноническим уравнением соотношениями:

$$\beta = \frac{a}{b}\sin^2\theta + \frac{b}{a}\cos^2\theta, \quad (6)$$

$$\alpha = \left(\frac{b}{a} - \frac{a}{b}\right)\sin\theta\cos\theta, \quad (7)$$

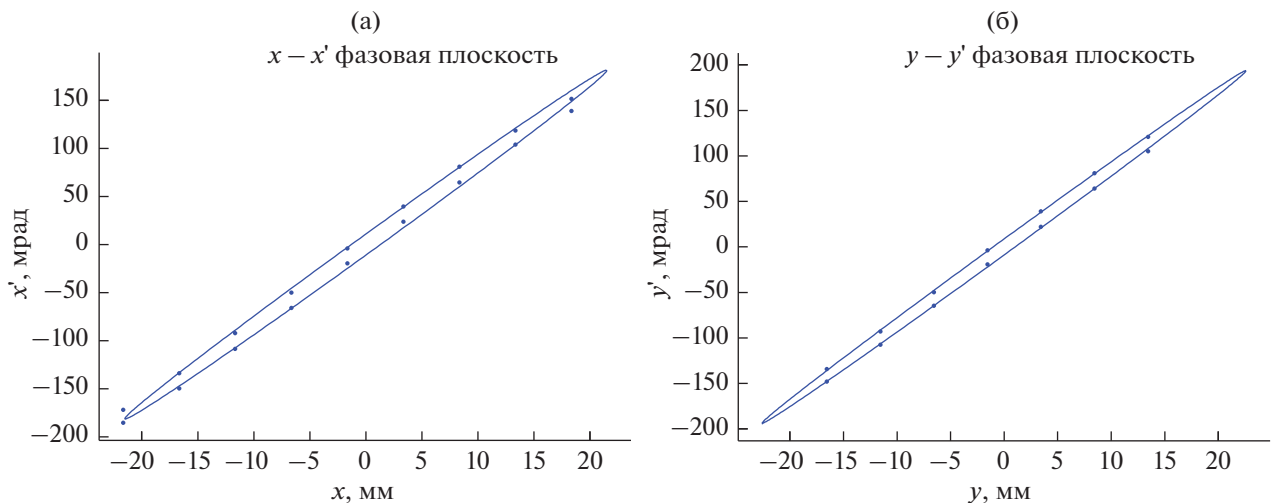
$$\gamma = \frac{a}{b}\cos^2\theta + \frac{b}{a}\sin^2\theta, \quad (8)$$

$$\varepsilon = ab. \quad (9)$$

На рис. 5 сплошной линией изображены эллипсы, построенные по рассчитанным параметрам, точки соответствуют рядам отверстий на рис. 4.

Для оценки размытия изображений отверстий, вносимого пластиной сцинтиллятора, были сделаны снимки, когда маска установлена вплотную к пластине.

На рис. 6 показано изображение отверстия при попадании на маску пучка ионов. Диаметр отверстия составляет 180 мкм. Наблюдается сильное размытие, а поскольку маска стоит вплотную, то

Рис. 5. Восстановленный фазовый портрет пучка: плоскость $x-x'$ (а); плоскость $y-y'$ (б).

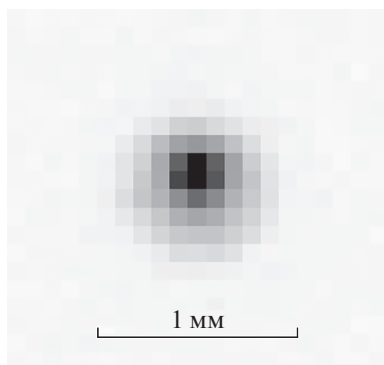


Рис. 6. Изображение отверстия маски, установленной вплотную к сцинтиллятору.

оно, по-видимому, вызвано рассеянием света в пластине сцинтиллятора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭМИТТАНСА

Измерен среднеквадратичный эмиттанс пучков ионов по 68% частиц для условий с сеткой периодом 500 мкм и 2 мм, установленной в положительном электроде системы экстракции. Длительность экспозиции при измерениях соответствовала полной длительности пучка. Средние значения по 10 снимкам без устранения эффекта размытия изображений микропучков приведены в табл. 1.

Расчетный входной аксептанс линейного ускорителя И-4 составляет 327 мм мрад. Перед инжекцией пучок должен быть собран электростатической линзой.

Необходимо отметить, что в отсутствие сетки пучок сильно расходится, имеет больший диаметр на маске, занимая всю видимую площадь сцинтиллятора, и поэтому имеет большую площадь на фазовой плоскости из-за наличия постоянного размытия изображения, вызванного пластиной сцинтиллятора. По этой причине результаты измерений при отсутствии сетки в табл. 1 не приведены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана программа, реализующая обработку изображений для методики “pepper-pot” для измерения поперечного эмиттанта пучка ионов лазерного источника. Приведено два способа восстановления эмиттанта из изображения

пучка прошедших через маску. Один из них использует нахождение уравнения фазового эллипса по точкам, лежащим на его границе. Этот способ применим, когда распределение частиц в фазовой плоскости близко к нормальному в эллиптической области. Второй использует среднеквадратичные характеристики пучка и может быть применим в случаях более сложного фазового портрета. Для восстановления координат отверстий использована засветка маски излучением лазерной плазмы.

Изменяющаяся во времени плотность тока ионов извлеченного пучка (рис. 2) вносит добавку в эмиттанс из-за изменяющегося во времени угла расходимости. Длительность экспозиции при измерениях соответствовала полной длительности пучка из-за ограничений длительности экспозиции используемой ПЗС-камеры SDU-415 в 5 мкс. Расстояние от мишени до системы извлечения пучка определяет плотность плазмы на входе в нее и длительность пучка. Оно было выбрано из предварительных экспериментов на более короткой длине пролета и расчета с помощью программы, описываемой в работе [7], которые показали, что для более короткой длины плотность тока ионного пучка превышает оптимальную для уже существующей системы экстракции, и извлекаемый пучок сильно расходится, задевая электроды, а также не собирается полностью электростатической линзой перед входом в ускоритель И-4. Этот дефект измерений эмиттанта может быть устранен использованием ПЗС-камеры с более короткой экспозицией и сцинтиллятором с соответствующим временем высвечивания для измерений с разрешением по времени.

Показана неточность в определении эмиттанта пучка, вызываемая рассеянием света в пластине сцинтиллятора. При использовании ПЗС-камеры с более высоким пространственным разрешением можно попытаться найти функцию рассеяния и устранить эту неточность.

В будущем планируется работа над устранением указанных выше дефектов измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Barabin S.V. et al. // Proc. 26th Russian Particle Accelerator Conference. 2018. P. 443–445.
2. Alexeev N.N. et al. // Proc. IPAC’10. 2010. P. 801–803.
3. Gabovich M.D. Fizika i tehnika plazmennyyh istochnikov ionov. 1972. Moscow: Atomizdat (in Russian).
4. OpenCV library. <https://opencv.org/>.
5. Zhang M. Emittance Formula for Slits and Pepper-Pot Measurement. Tech. Report. 1996. Fermilab.
6. James F., Winkler M. // C++ MINUIT User’s Guide. 2004.
7. Roudskoy I. et al. // Rev. Sci. Inst. 2008. V. 79 (1). P. 02B313.

Таблица 1. Результаты измерения эмиттанта

Сетка, мм	$\epsilon_{x \text{ ср.кв.}}$, мм мрад	$\epsilon_{y \text{ ср.кв.}}$, мм мрад
2	122	130
0.5	184	226

Pepper-Pot Emittance Measurement at Laser-Plasma Ion Source for I-4 Accelerator

A. A. Losev^{1, *}, Yu. A. Satov¹, A. V. Shumshurov¹, A. N. Balabaev¹, I. A. Khrisanov¹, and A. A. Vasiliev¹

¹*Institute for Theoretical and Experimental Physics named by A.I. Alikhanov
of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 117218 Russia*

**e-mail: anton.losev@itep.ru*

Received November 27, 2020; revised June 21, 2021; accepted July 1, 2021

Abstract—Description of computer code developed for processing images obtained in pepper-pot emittance measurement technique, which allows estimating emittance in single measurement. The code uses pepper-pot mask image on a scintillator screen obtained by means of laser-plasma radiation. This image is used to find positions of holes of the mask and its rotation angle. Pepper-pot technique is applied to measure emittance of carbon ion beam extracted from laser produced plasma, generated by CO₂-laser pulses with the focal power density on the target of about 10¹¹ W/cm². Results of image processing and calculating emittance are presented.

Keywords: laser ion source, CO₂-laser, emittance measurement, pepper-pot technique