



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2015–12

А.В. Максимов, Ю.С. Федотов

**О возможности создания протонного микроскопа
на базе радиографического комплекса
на синхротроне У-70**

Направлено в *ПЖТФ*

Протвино 2015

Аннотация

Максимов А.В., Федотов Ю.С. О возможности создания протонного микроскопа на базе радиографического комплекса на синхротроне У-70. Препринт ИФВЭ 2015-12, Протвино, 2015. – 6 с., 3 рис., библиогр.: 5.

Представлена схема магнитной оптики протонного микроскопа на базе действующего радиографического комплекса на ускорителе У-70. Достижимый коэффициент увеличения изображения исследуемого объекта составляет не менее 10 при энергии пучка 60 ГэВ. Этого достаточно для получения пространственного разрешения изображений, равного 10–20 мкм.

Abstract

Maximov A.V., Fedotov Y.S. Proton Microscope Based on of the IHEP Radiographic Facility. IHEP Preprint 2015-12 – Protvino, 2015 – p.6, fig 3, refs.: 5.

The magnetic optics of the proton microscope based on the operational proton radiographic facility of the accelerator U-70 is presented. Achievable magnification is about 10 for a proton energy of 60 GeV which is sufficient to attain spatial resolution of the images equal to 10–20 micron.

Введение

При исследованиях в области высокой плотности вещества и энергии важной задачей является определение плотности и давления вещества в каждой точке объекта. В таких исследованиях, когда размер объекта составляет 10–30 мм при массовой толщине до 50 г/см^2 , требуется регистрировать распределение плотности вещества с микронным пространственным разрешением. Как правило, пространственное разрешение обычной протонной радиографической установки существенно хуже и составляет сотни мкм [1, 2]. Реальное разрешение определяется целым рядом факторов: точностью настройки магнитооптической системы, чувствительностью (разрешением) ПЗС - матриц в системе регистрации изображений, рассеянием света в сцинтилляторе, конвертирующем протонное изображение в оптическое, а также такими факторами как диафрагмы вакуумной системы в месте расположения объекта, воздушные промежутки в ионопроводе, хроматические и геометрические aberrации магнитной оптики и т.д. Лучшее разрешение позволяют получить радиографические установки с увеличением изображения, построенные по схеме протонного микроскопа [3]. В данной статье рассмотрено предложение по созданию протонного микроскопа на базе действующей установки ПРГК – протонного радиографического комплекса [4] на выведенном пучке синхротрона У-70.

В 2014 г. в институте введена в эксплуатацию установка ПРГК [5]. На рис. 1 приведена ее оптическая схема. Установка состоит из трех квартетов квадрупольных линз. Первый квартет представлен линзами Q1–Q4. В начале квартета находится подсистема регистрации протонного изображения ПРПИ1(1). Данная система предназна-

чена для регистрации параметров входного (просвечивающего) пучка. В конце первого квартета размещается объект для радиографического исследования. В конце второго (линзы Q5–Q8) и третьего (Q9–Q12) квартетов расположены подсистемы регистрации ПРПИ2(2) и ПРПИ3(3). Они предназначены для наблюдения и фиксации изображений объекта. Матрицы квартетов обеспечивают минус–единичное преобразование изображения объекта.

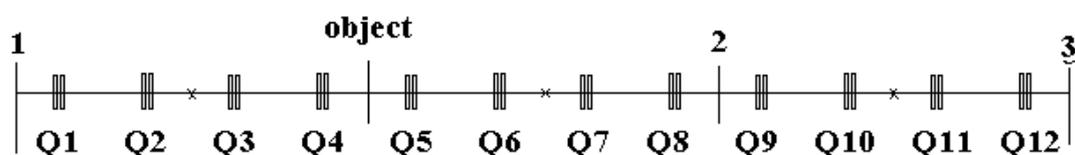


Рис. 1. Оптическая схема ПРГК

1, 2, 3 – три подсистемы для регистрации протонных изображений (ПРПИ), Q1–Q4, Q5–Q8-и Q9–Q12 – первый, второй и третий квартеты соответственно.

Акцептанс квартетов позволяет получить поле обзора не менее 220 мм при энергии протонного пучка $E = 50\text{--}70$ ГэВ. Разрешение установки составляет ~ 200 мкм для объектов с массовыми толщинами до 450 г/см². Перестройка магнитной оптики квартетов ПРГК для получения увеличенного изображения исследуемого объекта с коэффициентом увеличения ~ 10 позволит обеспечить желаемый уровень разрешения при исследованиях плотных объектов. Диаметр вакуумной камеры ионопровода равен 350 мм. С некоторыми ограничениями поле наблюдения в ПРГК при штатной настройке оптики может составлять $\sim 300 \times 300$ мм². Отсюда следует, что максимальный поперечный размер исследуемого объекта в режиме микроскопа (т.е. его поле обзора) может быть не более 30 мм.

Расчет протонного микроскопа выполнен для энергии протонов $E = 60$ ГэВ. В силу того, что компоновка элементов комплекса не может быть изменена и ввиду слабости градиентов линз с точки зрения задач реализации режима микроскопа, возможности настройки ограничены. В предложенном варианте микроскопа первый квартет квадрупольных линз по-прежнему используется для регистрации параметров облучающего пучка. Матрица преобразования данного квартета равна минус единице. Следующие два квартета линз используются для организации собственно микроскопа. Преоб-

разование исходных координат (x, x') и (y, y') поперечных фазовых плоскостей в конечные точки изображения x_f, y_f осуществляется матрицей преобразования R размером 4×4 (R_{ij} – элементы матрицы передачи от начала второго до конца третьего квартета):

$$x_f = R_{11} \cdot x + R_{12} \cdot x'; \quad y_f = R_{33} \cdot y + R_{34} \cdot y'.$$

В режиме микроскопа матрицы преобразования должны удовлетворять следующим условиям:

$$R_{11} = R_{33} = K = \pm 10 \quad (\text{коэффициент увеличения изображения});$$

$$R_{12} = 0; \quad R_{34} = 0 \quad (\text{условие фокусировки из "точки в точку"}).$$

В середине 2-го квартета располагается коллиматорное устройство барабанного типа, позволяющее дистанционно выбрать и выставить коллиматор нужного диаметра.

Матричное преобразование координат частиц от начала до середины 2-го квартета (точка коллимации) имеет вид:

$$X = M_{x11} X_0 + M_{x12} X'_0; \quad Y = M_{y11} Y_0 + M_{y12} Y'_0.$$

Пусть $X'_0 = W_x X_0 \pm \frac{\varepsilon_b}{x_{\max}} \pm \varphi$, где W_x – наклон фазового эллипса пучка на входе 2-го квартета, ε_b – эмиттанс облучающего пучка, x_{\max} – его полуразмер, φ – угол многократного кулоновского рассеяния пучка на объекте. Второе слагаемое учитывает угловую расходимость облучающего пучка. Тогда имеем:

$$X = \pm M_{x12} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_{\max}} + \varphi \right) + (M_{x11} + W_x M_{x12}) X_0.$$

Входной пучок должен быть согласован таким образом, чтобы в середине 2-го квартета (в точке коллимации пучка) образовалась плоскость Фурье:

$$M_{x11} + W_x M_{x12} = 0; \quad M_{y11} + W_y M_{y12} = 0. \quad (1)$$

Здесь $M_{x11}, M_{x12}, M_{y11}, M_{y12}$ – элементы первых строк матриц передачи (по горизонтали и вертикали соответственно) от начала 2-го квартета до точки коллимации (середина 2-го квартета), W_x, W_y – наклоны фазовых эллипсов входного пучка. Из равенств (1) определяется наклоны W_{xy} фазового портрета согласованного пучка. Полуразмер об-

лучающего пучка x_{\max} принят равным 15 мм, а эмиттанс $\varepsilon_b=2\cdot 10^{-6}$ мм·мрад. Матрицы M_x и M_y равны:

$$M_x = \begin{pmatrix} -2.14 & 18.46 \\ -0.174 & 1.03 \end{pmatrix}; \quad M_y = \begin{pmatrix} 1.5 & 24.2 \\ -0.15 & -1.74 \end{pmatrix}.$$

В точке фокуса (в плоскости Фурье) полуразмер пучка без учета кулоновского рассеяния на объекте равен:

$$\Delta X = M_{x12} \frac{\varepsilon_b}{x_{\max}} = 2.46 \text{ мм}, \quad \Delta Y = M_{y12} \frac{\varepsilon_b}{y_{\max}} = 3.22 \text{ мм}.$$

На рис. 2 представлен ход лучей в микроскопе в горизонтальной плоскости. В вертикальной плоскости ход лучей такой же.

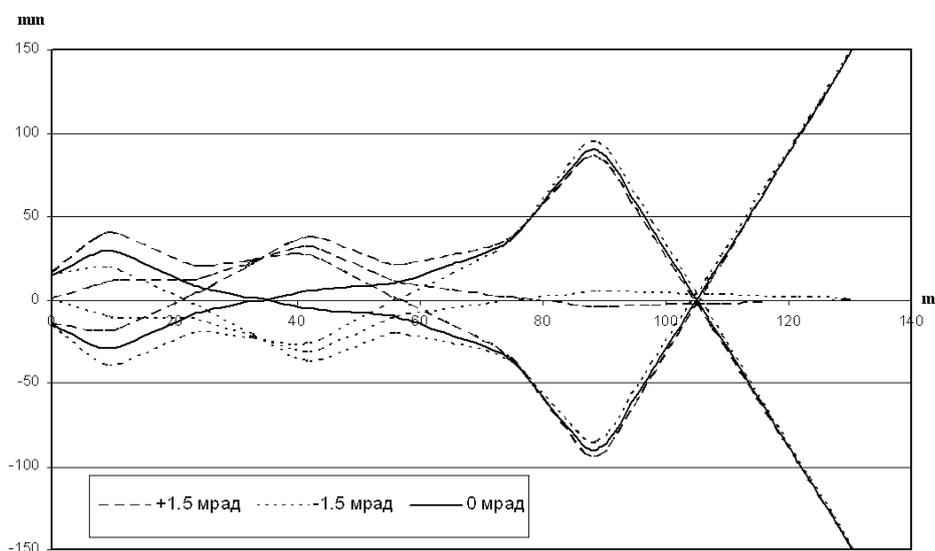
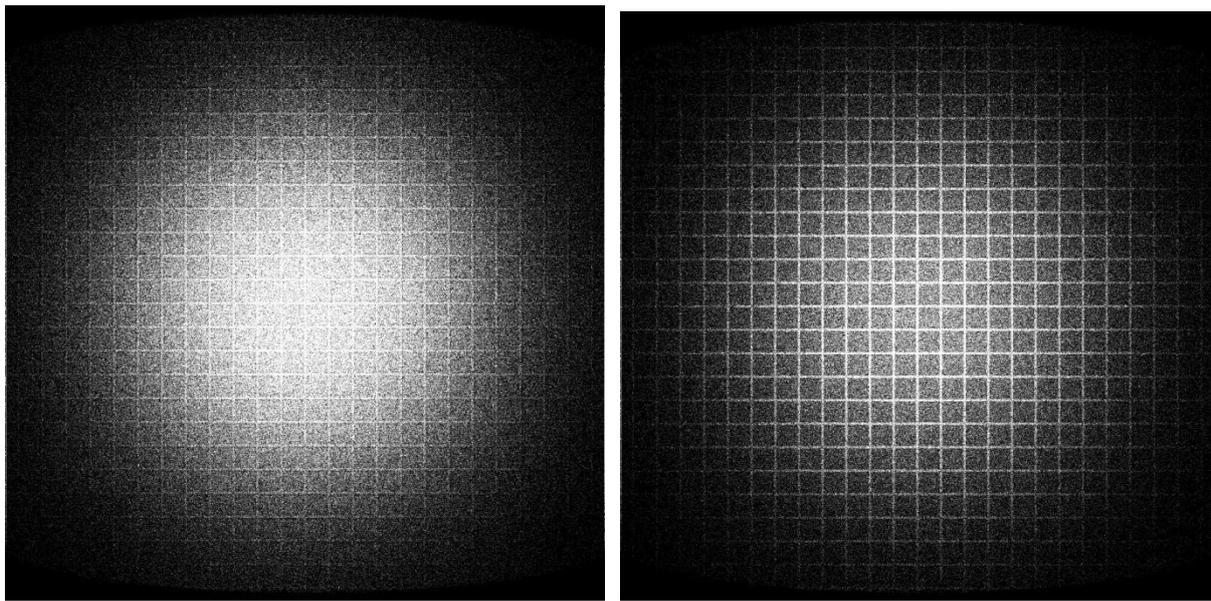


Рис. 2. Ход лучей (горизонтальная плоскость) в микроскопе (± 1.5 мрад соответствует ± 2 стандартных отклонения по углу кулоновского рассеивания на объекте).

Увеличение изображения объекта равно 10 для энергии протонов $E = 60$ ГэВ. Результаты численного моделирования действия микроскопа показаны на рис. 3. Слева приведено изображение объекта в виде решетки из свинца длиной 30 мм с поперечными размерами 30×30 мм², размер щелей решетки 0.1 мм и расстояние между щелями 0.9 мм. Справа показаны результаты численного моделирования изображения объекта “решетка” в конце оптического тракта. В полученном изображении размер щелей равен 1 мм, расстояние между щелями 9 мм. Отсюда коэффициент увеличения системы равен 10.



а)

б)

Рис. 3. Результат численного моделирования изображений щелевой мишени из свинца длиной 30 мм с поперечными размерами 30×30 мм²: а) мишень, б) результат моделирования изображения щелевой мишени (введен коллиматор диаметром 30 мм).

Коэффициент увеличения микроскопа ~ 10 является максимально возможным для данной магнитооптической схемы. Предел накладывается ограничениями на максимальные токи квадрупольных линз комплекса. Большие величины коэффициентов увеличения возможны только при меньшей энергии просвечивающего пучка. Например, для энергии пучка 50 ГэВ коэффициент увеличения изображения составит ~ 20 .

Заключение

При использовании магнитооптической системы действующего комплекса ПРГК на ускорителе У-70 возможен режим протонного микроскопа. Достижимый коэффициент увеличения изображения исследуемого объекта составляет не менее 10 при энергии протонов 60 ГэВ (при энергии 50 ГэВ — не менее 20). Это позволит обеспечить пространственное разрешение в ~ 20 мкм для анализа внутренней структуры объектов при экспериментальных исследованиях в области высокой плотности вещества.

Список литературы

- [1] *King N., Ables E., Adams K. et. al.* An 800-MeV Proton Radiography Facility for Dynamic Experiment, // NIM in Phys. Research, 1999, v. A424, p.84–88.
- [2] *Morris S., Alrick K., Aufderheide M. et. al.* Flash Radiography with 24 GeV/c Proton. // J. Appl. Phys. 2011, v. 109, p.104905–104909.
- [3] *Mottershead T., Barlow D. et. al.* Design and operation of proton microscope for radiography at 800 MeV. 0-7803-7739-9, 2003 IEEE.
- [4] *Максимов А.В., Тюрин Н.Е., Федотов Ю.С.* Оптическая система протонной облучательной установки на ускорителе У-70 ГИЦ ИФВЭ. // ЖТФ, 2014, том 84, вып.9, стр. 132-138.
- [5] *Андрянов А.И., Афонин А.Г., Гусев И.А. и др.* Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГИЦ ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 2015-3, 2015. 13 с.

Рукопись поступила 7 июля 2015 г.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2015-12,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2015
