

15

## Схема магнитной оптики протонного микроскопа на базе радиографического комплекса на синхротроне У-70

© А.В. Максимов, Ю.С. Федотов

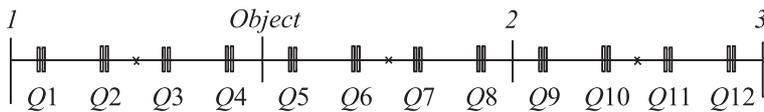
Государственный научный центр Российской Федерации — Институт физики высоких энергий НИЦ „Курчатовский институт“, Протвино, Московская обл.  
E-mail: Yury.Fedotov@ihep.ru

Поступило в Редакцию 28 сентября 2016 г.

Представлена схема магнитной оптики протонного микроскопа на базе действующего радиографического комплекса на ускорителе У-70. Микроскоп создается в магнитной структуре радиографического комплекса только изменением сил квадрупольных линз без изменения их положения. Достижимый коэффициент увеличения изображения исследуемого объекта составляет не менее 10 при  $E = 60 \text{ GeV}$ . Этого достаточно для пространственного разрешения изображений  $10\text{--}20 \mu\text{m}$ .

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  $10\text{--}30 \text{ mm}$  при массовой толщине до  $50 \text{ g/cm}^2$ , требуется регистрировать распределение плотности вещества с микронным пространственным разрешением. Как правило, пространственное разрешение обычной протонной радиографической установки существенно хуже и составляет сотни  $\mu\text{m}$  [1,2]. Реальное разрешение определяется целым рядом факторов: точностью настройки магнито-оптической 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 аберрации магнитной оптики и т. д.

Лучшее разрешение позволяют получить радиографические установки с увеличением изображения, построенные по схеме протонного



**Рис. 1.** Оптическая схема ПРГК: 1–3 — помещения регистрации протонных изображений; Q1–Q4 — 1-й квартет, Q5–Q8 — 2-й квартет, Q9–Q12 — 3-й квартет.

микроскопа [3]. В данной статье рассмотрено предложение по созданию протонного микроскопа на базе действующей установки ПРГК — протонного радиографического комплекса ГНЦ ИФВЭ НИЦ „Курчатовский институт“ [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 предназначена 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.

Акцептанс квартетов позволяет получить поле обзора не менее 220 mm при энергии протонного пучка  $E = 50–70$  GeV. Разрешение установки составляет  $\sim 200 \mu\text{m}$  для объектов с массовыми толщинами до  $450 \text{ g/cm}^2$ . Перестройка магнитной оптики квартетов ПРГК для получения увеличенного изображения исследуемого объекта с коэффициентом увеличения  $\sim 10$  позволит обеспечить желаемый уровень разрешения при исследованиях плотных объектов. Диаметр вакуумной камеры ионопровода равен 350 mm. С некоторыми ограничениями поле наблюдения в ПРГК при штатной настройке оптики может составлять  $\sim 300 \times 300$  mm. Отсюда следует, что максимальный поперечный размер исследуемого объекта в режиме микроскопа (т.е. его поле обзора) может быть не более 30 mm.

Расчет протонного микроскопа выполнен для энергии протонов  $E = 60$  GeV. 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  $-1$ . Следующие два квартета линз используются для организации собственно микроскопа. Преобразование исходных координат  $x, x'$  и  $y, y'$  поперечных фазовых плоскостей в конечные точки изображения  $x_f, y_f$  осуществляется матрицей преобразования  $R$  размером  $4 \times 4$  ( $R_{ij}$  — элементы матрицы передачи от начала второго до конца третьего квартета)

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

В режиме микроскопа матрицы преобразования должны удовлетворять следующим условиям:

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

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

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

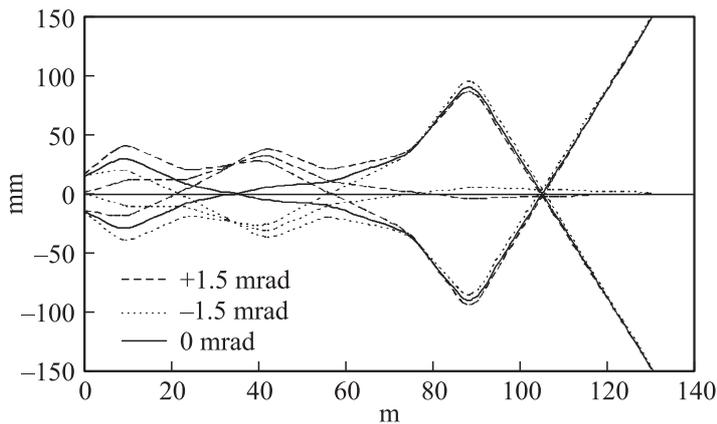
$$X = M_{X11}X_0 + M_{X12}X'_0; \quad Y = M_{Y11}Y_0 + M_{Y12}Y'_0.$$

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,  $\varepsilon_b$  — эмиттанс облучающего пучка,  $x_{\max}$  — его полуразмер,  $\varphi$  — 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:

$$M_{X11} + W_X M_{X12} = 0, \quad M_{Y11} + W_Y M_{Y12} = 0. \quad (1)$$



**Рис. 2.** Ход лучей (горизонтальная плоскость) в микроскопе ( $\pm 1.5$  mrad соответствует  $\pm 2$  стандартным отклонениям по углу рассеивания на объекте).

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) определяются наклоны  $W_{XY}$  фазового портрета согласованного пучка. Полуразмер облучающего пучка  $x_{\max}$  принят равным 15 mm, а эмиттанс  $\epsilon_b = 2 \cdot 10^{-6}$  mm · mrad. Матрицы  $M_X$  и  $M_Y$  равны

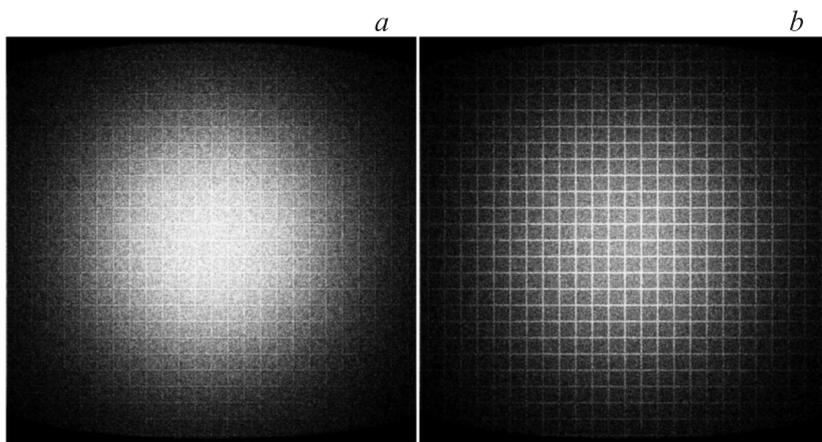
$$M_X = \begin{pmatrix} -2.14 & 18.46 \\ -0.174 & 1.03 \end{pmatrix}, \quad M_Y = \begin{pmatrix} 1.5 & 24.2 \\ -0.15 & -1.74 \end{pmatrix}.$$

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

$$\Delta X = M_{X12} \frac{\epsilon_b}{x_{\max}} = 2.46 \text{ mm}, \quad \Delta Y = M_{Y12} \frac{\epsilon_b}{y_{\max}} = 3.22 \text{ mm}.$$

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

Увеличение изображения объекта равно 10 для энергии протонов  $E = 60$  GeV. Результаты численного моделирования действия микроскопа показаны на рис. 3. Слева приведено изображение объекта в виде решетки из свинца длиной 30 mm с поперечными размерами  $30 \times 30$  mm,



**Рис. 3.** Результат моделирования щелевой мишени из свинца длиной 30 mm с поперечными размерами  $30 \times 30$  mm: *a* — мишень, *b* — результат моделирования изображения щелевой мишени (введен коллиматор диаметром 30 mm).

размер щелей решетки 0.1 mm и расстояние между щелями 0.9 mm. Справа показаны результаты численного моделирования изображения объекта „решетка“ в конце оптического тракта. В полученном изображении размер щелей равен 1 mm, расстояние между щелями 9 mm. Отсюда коэффициент увеличения системы равен 10.

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

Таким образом, в рамках магнитооптической системы действующего комплекса ПРГК на базе ускорителя У-70 возможен режим протонного микроскопа. Достижимый коэффициент увеличения изображения исследуемого объекта составляет не менее 10 при энергии 60 GeV (при энергии протонов 50 GeV — не менее 20). Это позволит обеспечить пространственное разрешение в  $\sim 20 \mu\text{m}$  для анализа внутренней структуры объектов при исследованиях в области высокой плотности вещества.

## Список литературы

- [1] *King N., Ables E., Adams K.* et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 1999. V. 424. P. 84–88.
- [2] *Morris S., Alrick K., Aufderheide M.* et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 104 905–104 909.
- [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., Торин Н.Е., Федотов Ю.С.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 9. С. 132–138.
- [5] *Андрянов А.И., Афонин А.Г., Гусев И.А.* и др. Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 2015-3, 2015. 13 с.