

УДК 621.384.663

## СИСТЕМА СКАНИРОВАНИЯ ПУЧКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

*Б. Н. Гикал, Е. В. Горбачев, Н. Ю. Казаринов, В. И. Казаха,  
Г. С. Казаха, Н. И. Лебедев, А. А. Макаров, В. А. Мельников,  
В. И. Миронов, С. В. Рабцун, А. А. Фатеев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Для развертки выведенных из циклотронов ионных пучков разработана сканирующая система. Она состоит из двух отклоняющих магнитов, создающих горизонтальное и вертикальное магнитные поля. Магниты запитываются генераторами пилообразного тока с четко фиксированными частотами. При синхронной работе обоих генераторов центр масс пучка «рисует» фигуры Лиссажу на мишени, где неоднородность распределения частиц не превосходит требуемой величины  $\pm 5\%$ . Приводится описание конструкции отклоняющих магнитов, их параметров и результаты стендовых испытаний.

The system for scanning of ion beams extracted from a cyclotron has been worked up. It consists of two deflecting dipole magnets creating horizontal and vertical magnetic fields. Generators of saw-tooth current having the definitely fixed frequencies supply the magnets. As a result of synchronous work of both generators the center of mass of the ion beam «draws» a pattern on the target. Heterogeneity of the particle density distribution does not exceed the required value of  $\pm 5\%$ . The short description of the deflection magnets construction, their parameters, and results of their stand tests are presented.

Ускоренные в циклических имплантаторах (циклотронах) тяжелые ионы планируется использовать для обработки поверхности пленки. Одним из основных требований к системе развертки пучка является получение однородной плотности распределения пучка ионов на мишени.

Расчеты проводились для пучка ионов криптона, выведенного из циклотрона ИЦ-100 [1]. Пучок имеет следующие основные параметры: кинетическая энергия ионов криптона — 1,2 МэВ/нуклон, заряд иона  $Z = +15$ ; массовое число иона  $A = 84$  ( $A/Z = 5,6$ ), ток пучка — 5 мкА, минимальный диаметр пучка на мишени, в котором содержится 90 % частиц,  $\sim 4$  см. В расчетах предполагалось, что плотность пучка по радиусу меняется по закону Гаусса, его среднеквадратичный размер равен 1 см.

Условия облучения мишени в выводном канале следующие: ширина мишени  $a = 60$  см, высота  $b = 30$  см. Расстояние от сканеров до мишени  $\sim 800$  см. Мишень может быть а) неподвижной, б) движущейся со скоростью  $U$  от 20 до 100 см  $\cdot$  с $^{-1}$ . Неоднородность плотности распределения ионов по площади мишени не должна превышать уровня  $\pm 5\%$ . Допустимые потери пучка от 10 до 50 % (предельно допустимые).

Кроме того, в циклотроне в результате возможных электрических пробоев с дуантов выведенный пучок ионов может прерываться на время до 0,3 с. При этом требуется, чтобы система развертки выведенного пучка обеспечила за время пробоя провал в распределении плотности пучка на мишени не более 50 %.

Для решения этой задачи предложена схема, состоящая из двух отклоняющих магнитов, один из которых разворачивает пучок по линейному закону по горизонтали с частотой  $f_x$ , а другой — по вертикали с частотой  $f_y$  [2].

## 1. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЧАСТИЦ НА МИШЕНИ

При одновременной работе отклоняющих магнитов центр масс (ЦМ) пучка будет «рисовать» фигуры Лиссажу на плоскости мишени. В результате при линейной развертке по обеим координатам поверхность мишени окажется покрытой сетью параллелограммов с шагом  $h$  ( $h$  — диагональ параллелограмма) [3].

На рис. 1 показана траектория ЦМ пучка на плоскости мишени, рассчитанная для  $f_x = 100$  Гц и  $f_y = 210$  Гц. Получились ячейки с шагом  $h_x \approx h_y = h = 3$  см.

Неоднородность облучения неподвижной мишени резко возрастает с увеличением шага ячейки  $h$ . Допустимый уровень неоднородности облучения мишени  $\pm 5\%$  достигается при величине шага  $h \approx 3,2$  см. При этом потери пучка на краях неподвижной мишени составляют величину  $\sim 3\%$ .

Если включить в расчет движение мишени, то при ее облучении (при указанных выше условиях) получается распределение плотности ионов по оси  $x$ , показанное на рис. 2 (при фиксированной координате  $y$ ). Скорость мишени в этом расчете равнялась  $20 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ .

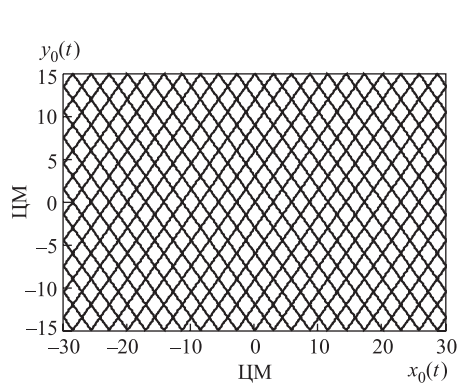


Рис. 1

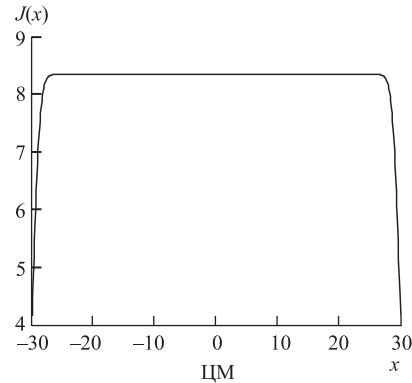


Рис. 2

Если в произвольный момент времени пучок ионов прерывается на время  $\Delta t = 0,3$  с, то соответствующий участок движущейся мишени оказывается недостаточно облученным. Относительная величина провала в распределении плотности ионов  $\delta$  зависит от скорости движения мишени и может быть оценена как  $\delta \approx U \cdot \Delta t / b$ . Этот участок будет «закрашен» фигурами Лиссажу, которые пучок «рисует» частично до его прерывания и частично — после его повторного включения. Таким образом, отсутствие пучка оказывается до некоторой степени компенсированным.

При увеличении скорости мишени с  $20$  до  $100 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  величина провала в уровне распределения плотности частиц увеличивается. Постепенно появляется полностью необлученный участок. Расчеты также показали, что для различных скоростей движения

мишени необходимо подбирать оптимальное соотношение между частотами  $f_x$  и  $f_y$ , при котором достигается необходимый уровень однородности ее облучения.

## 2. ОТКЛОНЯЮЩИЙ МАГНИТ

Конструкция отклоняющего магнита представляет собой распределенную обмотку, расположенную непосредственно на поверхности ионопровода и окруженную плотно прилегающим шихтованным магнитопроводом из электротехнической стали. Плотность витков в обмотке изменяется по азимуту по косинусоидальному закону, что позволяет добиться высокой однородности магнитного поля во всем объеме ионопровода.

Магниты для вертикального и горизонтального отклонений пучка ионов идентичны и отличаются только длиной (40 и 80 см соответственно). Максимальная индукция магнитного поля  $B \cong 400$  Гс. Максимальная рабочая частота 250 Гц. Измеренное распределение магнитного поля представлено на рис. 3.

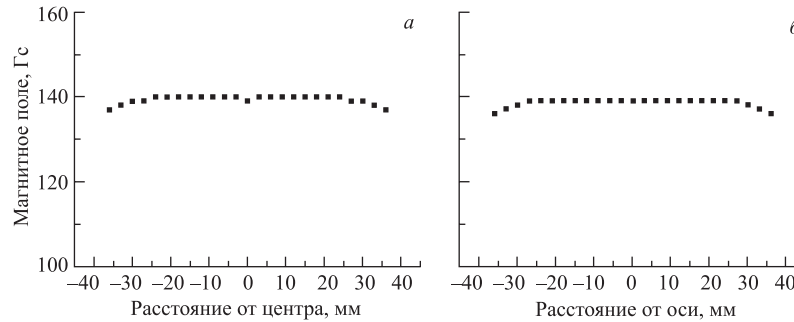


Рис. 3. Распределение магнитного поля в поперечном сечении: а) вертикальное; б) горизонтальное

Полные тепловые потери в магните составляют  $\sim 300$  Вт. Из них 60% приходится на нагрев ионопровода, изготовленного из тонкостенной нержавеющей трубы. Потери мощности в этой трубе могут быть оценены как

$$W = \frac{\sigma}{c^2} \frac{16\pi r_0^3 h B^2}{T^2} 10^{-7} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1}.$$

Здесь  $\sigma$  — удельная проводимость материала трубы;  $c$  — скорость света (для нержавеющей стали  $\sigma/c^2 \approx 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ с} \cdot \text{см}^{-2}$ );  $r_0$  — радиус трубы;  $h$  — толщина стенки трубы;  $T$  — длительность периода колебаний тока в обмотке магнита. Подставляя в эту формулу  $r_0 = 4,5$  см,  $h = 0,08$  см,  $B = 400$  Гс,  $T = 10^{-3}$  с, получаем, что  $W \approx 4,6 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1}$ . Эта оценка погрешностью  $\sim 20\%$  совпадает с измеренным значением тепловых потерь.

Проведенные расчеты также показали, что искажения линейной зависимости отклоняющего магнитного поля от времени, возникающие при его проникновении внутрь нержавеющей трубы, малы и практически не искажают линейную зависимость магнитного поля от времени.

Имеющаяся же всегда нелинейность токов в обмотках сканеров (из-за конечной величины их индуктивности) приводит к искажению сетки, которую «рисует» ЦМ пучка (см. рис. 1), что заметно сказывается на степени однородности облучения ионами неподвижной мишени. В нашем случае максимальное отклонение производной по времени реального тока в обмотке от идеального составляет  $\sim 12,4\%$ . На рис. 4, а приведен вид сетки, получающейся с учетом нелинейностей токов в обмотках отклоняющих магнитов, а на рис. 4, б показано получающееся распределение плотности ионного пучка на мишени. При этом среднеквадратичный полуразмер пучка был равен 1 см.

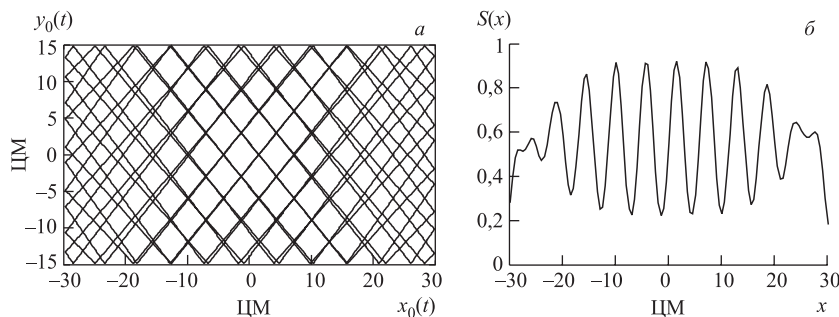


Рис. 4

Как видно из рис. 4, б, неоднородность в распределении частиц на мишени в нашем случае составляет уже величину порядка  $\pm 62\%$ . Уменьшить эту неоднородность на неподвижной мишени до требуемой величины  $\pm 5\%$  можно, увеличив диаметр пучка на мишени в  $\sim 2$  раза (до 80 мм).

В случае движущейся мишени нелинейность токов в обмотках магнитных сканеров сказывается гораздо меньше. Так неоднородность распределения плотности частиц при скорости мишени  $20 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  составляет  $\pm 1,5\%$ . С увеличением скорости движения ленты эта неоднородность возрастает и для  $U > 40 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  начинает превышать  $\pm 5\%$ . Так же, как и в случае неподвижной мишени, эта неоднородность устраняется при увеличении размеров пучка на мишени.

### 3. МОДУЛЬ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Модуль питания и управления системы сканирования пучка включает в себя блоки стабилизированного питания, генераторы пилообразного тока, выполненные на базе мостовых инверторов напряжения для вертикальной и горизонтальных обмоток, и микропроцессорный модуль управления и контроля.

Модуль управления генерирует частоты, зависящие от режима работы системы, с точностью не хуже  $0,01\%$ . Режим работы системы задается либо локально с помощью клавиатуры и LC-дисплея, либо с удаленного компьютера по протоколу RS485. Кроме того, модуль измеряет токи в отклоняющих устройствах и напряжения питания, осуществляя обратную связь и блокировку аварийных ситуаций.

Оциллограмма тока в обмотке магнита показана на рис. 5. Внешний вид установки представлен на рис. 6.

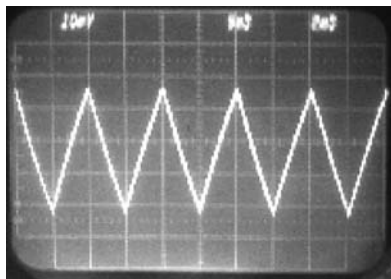


Рис. 5.

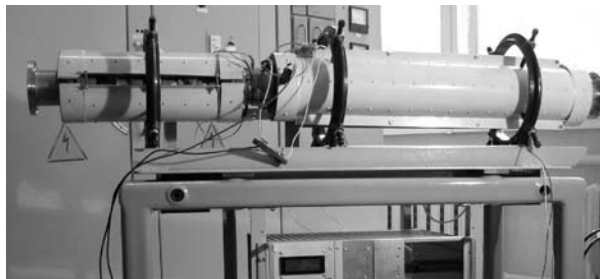


Рис. 6. Система сканирования во время стендовых испытаний

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гикал Б. Н. и др. Модернизация циклического имплантатора ИЦ-100. Сообщение ОИЯИ Р9-2003-121. Дубна, 2003. 18 с.
2. Chapelle S. et al. Testing of the Raster Magnet System for Expanding the APT Proton Beam // Proc. of the PAC-1999, New York, 1999. P. 3758.
3. Гикал Б. Н. и др. Анализ методов получения однородного распределения частиц на мишени при облучении ее пучком ионов криптона, выведенного из имплантатора ИЦ-100. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-240. Дубна, 2002. 14 с.