

P13-2002-193

Ю. Г. Тетерев, Ф. Косцьельняк*

**ИОНИЗАЦИОННЫЙ ПРОФИЛОМЕТР
ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА НА МИШЕНИ
ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОРА КОМБАС**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

*Институт ядерной физики, Краков, Польша

Введение

Профиль пучка ионов и положение пучка на мишени фрагмент-сепаратора [1] являются важными параметрами, так как от них зависят такие важные характеристики сепаратора, как коэффициент трансмиссии, разрешение и др. Из-за некоторой нестабильности циклотрона профиль пучка и его положение на мишени необходимо наблюдать непрерывно, чтобы своевременно вносить коррективы. Сам профилометр при этом не должен оказывать влияния на пучок или помимо мишени быть источником продуктов ядерных реакций. Профилометр должен безотказно работать во всем диапазоне используемых в эксперименте интенсивностей пучка (10^{10} - 10^{13} частиц в секунду).

Таким требованиям наиболее полно удовлетворяет ионизационный профилометр, работающий на принципе сбора молекул остаточного газа, ионизированных пучком [2-4]. К сожалению, профилометры, описанные в работах [2,3], не позволяют наблюдать реальную форму пучка. Наша попытка использовать профилометр, описанный в работе [4], также не увенчалась успехом, так как он отлично работал только в отсутствие мишени. При введении мишени в пучок изображение полностью размывалось из-за паразитного тока микроканальных пластин, возникающего под действием мощного фона гамма-квантов и нейтронов из мишени. Кроме того, выяснилось, что конструкция этого прибора не предназначена для непрерывного контроля за пучком, так как с течением времени начинал разрушаться люминофор.

В данной статье описана новая конструкция ионизационного профилометра, созданная нами с учетом всех вышеизложенных требований.

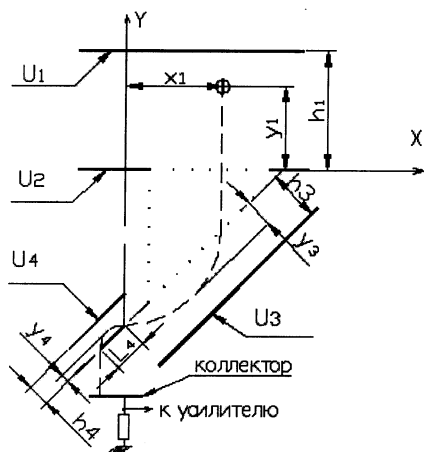


Рис. 1

Принцип работы профилометра

Принцип работы созданного нами профилометра (рис. 1) близок к описанному в работе [4]. Отличие заключается в том, что для достижения пространственного разрешения используется не один, а два последовательных анализирующих конденсатора. С их помощью извлекающего конденсатора, окружающего анализируемую область, на коллектор собираются только ионы узкого пространственного диапазона размером примерно 1×1 мм. Это достигается за счет того, что в обоих анализирующих конденсаторах для

прохождения ионов оставлена только узкая щель шириной 1 мм. Сканирование всей анализируемой области достигается путем периодического изменения приложенных к конденсаторам напряжений U_1 , U_3 и U_4 . Второе отличие заключается в том, что ток с коллектора измеряется с использованием высокочувствительного усилителя тока или напряжения.

Условия прохождения образованного в точке с координатами (x_1, y_1) иона остаточного газа до коллектора могут быть описаны с помощью системы уравнений, полученных из закона сохранения энергии иона при движении его в каждом из конденсаторов. При размещении анализирующих конденсаторов под углом 45° эти уравнения имеют следующий вид:

$$(U_1 - U_2) y_1 / 2h_1 = (U_3 - U_2) y_3 / h_3 = (U_4 - U_2) y_4 / h_4,$$

где h_1 , h_3 и h_4 – расстояние между пластинами конденсаторов;

y_3 и y_4 – высоты траекторий в анализирующих конденсаторах.

Также очевидно, что $x_1 = 4y_3 / \sqrt{2}$, а $4y_4 = L_4$, где L_4 – расстояние между щелями.

Зависимость координаты иона, дошедшего до коллектора, от приложенных напряжений может быть выражена в более простой форме, если наложить дополнительное условие: $(U_4 - U_2) = k (U_1 - U_2) (U_3 - U_2)$, где k – коэффициент пропорциональности. Тогда можно записать:

$$x_1 = k (U_1 - U_2) (h_3 / h_4) (L_4 / \sqrt{2}),$$

$$y_1 = k (U_3 - U_2) (h_1 / h_4) (L_4 / 2).$$

Профиль пучка может быть получен, если откладывать значения тока, измеренные на коллекторе, на координатной плоскости с осями $(U_1 - U_2)$ и $(U_3 - U_2)$.

Работоспособность профилометра удовлетворяется при таких вакуумных условиях, при которых средняя длина свободного пробега ионов остаточного газа λ_+ будет много больше пути собираемого на коллектор иона из любой точки анализируемого объема. Учитывая утверждение авторов работы [5], что длина свободного пробега ионов λ_+ только чуть меньше длины свободного пробега молекул λ , для оценки можно принять их равными. Из работы [6] имеем, что λ [м] = $6,51 \cdot 10^{-3} / p$, где p – давление остаточного газа в Па. В разработанной нами конструкции профилометра, в которой анализируемая область в плоскости, перпендикулярной пучку, имеет размер 50×50 мм, наибольший путь иона составляет менее 18 см, из чего следует, что давление остаточного газа, при котором профилометр еще остается работоспособен, не должно превышать $3 \cdot 10^{-2}$ Па. Такие условия являются вполне обычными вблизи мишени, бомбардируемой пучком высокой интенсивности.

Ток I_k собранных на коллектор положительных ионов остаточного газа в единицах тока пучка I_b может быть рассчитан по формуле

$$I_k / I_b = L (p/p_0) (dE/dx) \rho / \epsilon q,$$

где p/p_0 – относительное к атмосферному давление остаточного газа;

(dE/dx) – удельные потери энергии частиц пучка в воздухе при атмосферном давлении; $\rho = 1,3 \cdot 10^{-3}$ г/см³ – плотность воздуха; $\epsilon = 95$ эВ – средняя энергия [2], затрачиваемая на образование пары электрон-ион при давлениях около 10^{-4} Па; q – заряд иона пучка и L – длина пути пучка через анализируемую область профилометра. В отличие от конструкции работы [4], где эта величина составляла

1 мм, в нашей конструкции для повышения чувствительности длина увеличена до 40 мм. Для пучков, обычно имеющих угловое расхождение $\sim 1^0$, это не приводит к ухудшению разрешения.

При проведении экспериментов на фрагмент-сепараторе КОМБАС используются пучки ионов от бора до кальция с энергией 25 - 50 МэВ на нуклон. В этом случае отношение токов I_K / I_B при прохождении пучков через профилометр составляет величину $10^{-2} - 10^{-3}$. Это означает, что для измерения профиля пучка с плотностью тока порядка нА/мм^2 необходимо использовать усилитель тока с коэффициентом передачи $10^{12} - 10^{13}$ В/А.

Экспериментальное исследование профилометра

Работоспособность созданного нами профилометра была проверена во время сеанса работы фрагмент-сепаратора КОМБАС на пучке тяжелых ионов ^{40}Ar , ускоренных на циклотроне У-400М ЛЯР ОИЯИ до энергии 30 МэВ/нуклон. Принимая во внимание конструктивные особенности мишенного узла и то, что при работе фрагмент-сепаратора исходный пучок не поглощается мишенью, профилометр установили сразу после мишени. В этом случае мы имели возможность наблюдать за местоположением пучка на мишени и его профилем. В прежних сеансах в этом месте обычно располагался люминофор с пневмоприводом, с помощью которого мы могли периодически наблюдать за пучком. Для проведения эксперимента в конструкцию профилометра введено дополнительное устройство. Прежний люминофор был закреплен на верхней пластине извлекающего конденсатора (пластины, на которую обычно подается напряжение U_1). Для введения его в действие предварительно снимали напряжения U_1 и U_2 , верхнюю пластину опускали на нижнюю, и люминофор оказывался в области прохождения пучка. После работы с люминофором ионизационный профилометр приводился в обычное рабочее состояние.

В качестве источников напряжений U_1 , U_2 , U_3 и U_4 были использованы серийные дистанционно-управляемые блоки высоковольтного питания [7]. Источники напряжений U_1 и U_3 управлялись с помощью двух низковольтных генераторов пилообразного напряжения, изготовленных на базе микросхемы ICL8038. Причем частота генератора для управления высоковольтным блоком, с которого подавалось напряжение U_3 , была в 50 раз больше, чем для управления напряжением U_1 . Для управления напряжением U_4 на базе микросхемы AD 633 был построен смеситель, выходной сигнал с которого пропорционален произведению выходных сигналов генераторов для управления напряжениями U_1 и U_3 .

Для измерения тока с коллектора был использован серийный электрометрический усилитель напряжения постоянного тока У5-11.

Сбор информации с профилометра осуществлялся с использованием серийного 12 - разрядного АЦП с 16 - канальным электронным коммутатором на входе [8]. На входы АЦП подавались сигналы с контрольных выходов источников высоковольтного напряжения U_1 и U_3 , с выхода усилителя У5-11и датчика

измерения тока пучка на мишени. Показания датчика тока пучка использовались в качестве монитора при измерении профиля пучка с низкой частотой работы генераторов управления напряжениями. Частота опроса амплитуды сигналов, поступающих на вход АЦП, могла быть выбрана в диапазоне 0,2 - 1000 Гц. Информация с АЦП записывалась в ЭВМ.

Для создания трехмерного изображения профиля пучка была использована широко распространенная сервисная программа ORIGIN 6.1. На координатных осях x и y были отложены зарегистрированные текущие значения U_1 и U_3 , а на оси z откладывался измеренный при этих значениях ток коллектора. Размерности на координатных осях приводились в кодах АЦП.

На рис. 2 показано полученное распределение профиля пучка при токе 35 нА (это составляло примерно $1,2 \cdot 10^{10}$ частиц в секунду) и давлении остаточного газа в мишенной камере $7 \cdot 10^{-3}$ Па. Для демонстрации деталей профиля здесь приведен только фрагмент поля измерения 20×20 мм, который приходится на область пучка. Полное поле измерения имеет размеры 50×50 мм. На рис. 3 приведено изображение этого пучка на люминофоре.

Профиль пучка был измерен и при давлении остаточного газа $2 \cdot 10^{-3}$ Па. В результате измерения установлено, что амплитуды токов коллектора при одинаковых значениях U_1 и U_3 пропорциональны давлению, а формы измеренных профилей идентичны.

Минимальное значение тока пучка, при котором мы еще могли измерить профиль пучка, составило 3 нА. Ограничения на верхнее значение тока пучка не достигнуто, и есть основания предполагать, что профилометр будет работоспособен при измерении любых существующих в настоящее время интенсивных пучков ускоренных частиц с энергией несколько МэВ и более.

Заключение

Первые результаты эксперимента показали, что с помощью разработанной конструкции профилометра могут быть успешно решены поставленные в начале статьи задачи. Отсутствие в данной конструкции таких деликатных приборов, как микроканальная пластина и телекамера, дает возможность использовать этот профилометр для рутинного применения. Он не боится больших уровней радиации, плохого вакуума с большим содержанием паров масла и даже срыва вакуума. Нет в приборе и люминесцентного экрана, свечение которого далеко не всегда имеет линейную зависимость от плотности потока бомбардирующих его частиц.

Конечно, для измерения профилей пучков с очень низкой интенсивностью, когда уровень радиационного фона невелик, возникает возможность и необходимость установки перед коллектором микроканальной пластины для усиления тока до измеряемых величин или поштучного счета количества собранных ионов.

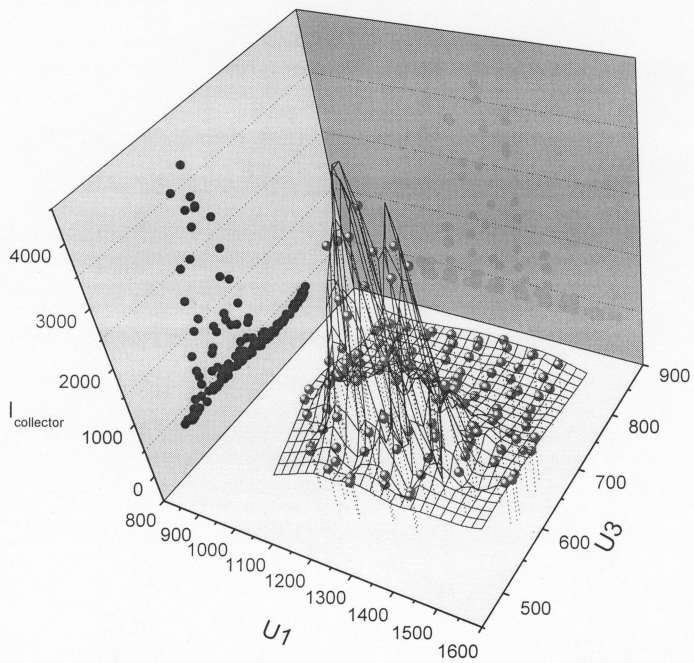


Рис.2



Рис. 3

Необходимо отметить, что все соображения, приведенные в описании принципа работы профилометра, относятся и к работе его в режиме сбора электронов, образовавшихся в процессе ионизации остаточного газа. Отличие заключается только в том, что длина свободного пробега электронов в остаточном газе примерно на один - два порядка больше, чем длина свободного пробега ионов [5]. Это означает, что в режиме сбора электронов профилометр может быть работоспособен и в условиях форвакуума. С одной стороны, это приводит к возможности увеличения чувствительности профилометра также на один - два порядка, а с другой позволяет сделать профилометр в виде отдельного отпаянного прибора для работы с выведенными в атмосферу пучками заряженных частиц, например, медицинскими.

Недостатком конструкции является сравнительно низкая скорость измерения профиля, так как измерение токов порядка 10^{-12} А довольно медленная операция. Этот недостаток можно устранить, если сделать профилометр многоканальным. В настоящее время нами проводится эта работа.

Авторы выражают благодарность Ю.М.Середе, который написал для нас программу сбора информации с АЦП и дал ценные советы в организации сбора и обработки этой информации, также авторы благодарят А.Г.Артюха за поддержку и интерес к работе.

Литература

1. A.G.Artukh, et al., NIM, 1991, A 306, 123:
A.G.Artukh, et al., NIM, 1999, A 426, 605.
2. W.N.De Luca IEEE Transactions on Nuclear Science, 1969, v.NS-16, N3, part I, p.813.
3. W.Hain, et al., Proc. EPAC-90. Nice, June 12-16, 1990, v.1, p.759.
4. В.Г. Михайлов и др. ПТЭ, 1995, №6, с.39.
5. Ю.А.Будагов, Г.И.Мерзон, Б.Ситар, В.А.Чечин. Ионизационные измерения в физике высоких энергий. – М.: Энергоатомиздат, 1988, стр. 59-74
6. Вакуумная техника: Справочник. Под общ. ред. Е.С.Фролова, В.Е.Минайчева. – М.: Машиностроение, 1992.
7. И.А.Голутвин, А.А.Попов, В.С.Хабаров. ОИЯИ, 13-82-95, Дубна, 1982.
8. С.А.Попов. ОИЯИ, P10-86-398, Дубна, 1986.

Получено 9 августа 2002 г.

Тетерев Ю. Г., Косцьельняк Ф.
Ионизационный профилометр положения пучка
на мишени фрагмент-сепаратора КОМБАС

P13-2002-193

Описаны принцип работы ионизационного профилометра новой конструкции и результаты испытаний его на пучке ионов ^{40}Ar с энергией 30 МэВ/нуклон. Приведено полученное с его помощью распределение плотности пучка по сечению. Пространственное разрешение при измерении распределения с помощью данной конструкции профилометра составляло 1×1 мм. Для сравнения приведено изображение этого пучка на люминофоре. Установлено, что минимальное значение тока пучка, при котором еще можно измерить его профиль, составляет 3 нА. Распределение профиля измерено при двух давлениях остаточного газа $2 \cdot 10^{-3}$ и $7 \cdot 10^{-3}$ Па.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Teterev Yu. G., Koscielniak F.
Ionization Profilemeter of the Beam Position
on the Target of the Fragment-Separator COMBAS

P13-2002-193

The work principle of new ionization profilemeter design and results of its testing at the 30 MeV/n ion ^{40}Ar beam are described. The beam density distribution over its cross-section obtained with using this equipment is showed. The space resolution of this profilemeter design is 1×1 mm. The beam image obtained with using the fluorescent screen is showed in this paper for the comparison. It is fixed that the minimum value of the current of the beam, for which its profile can be measured, is 3 nA. The profile distribution is measured at two pressures of the residual gas $2 \cdot 10^{-3}$ and $7 \cdot 10^{-3}$ Pa.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 20.08.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,37. Уч.-изд. л. 0,53. Тираж 315 экз. Заказ № 53484.

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.**