

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИОНОВ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЕ

В. В. Пархомчук, А. В. Петрожицкий, С. А. Растигеев

Институт ядерной физики Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

В работе описаны конструкция и результаты тестирования тонкопленочных детекторов ионов для ускорительного масс-спектрометра (УМС). Спектрометр разработан и построен в ИЯФ СО РАН для Сибирского отделения РАН. Телескоп из нескольких последовательно проходимых счетчиков позволяет добиться малого фона.

Design and results of measuring the fine film detectors for Accelerator Mass Spectrometer (AMS) are discussed. AMS was made at BINP for Siberian Division of RAS. The serious signals from few detectors at line after passing ion help one to obtain very low noise signal.

PACS: 07.75.+h

ВВЕДЕНИЕ

При регистрации микроканальной пластиной (МКП) вторичных электронов, выбитых из пленки, сравнительно легко получить временное разрешение $\tau = 0,5$ нс. При шумовой нагрузке одной МКП $f_0 = 100$ Гц скорость случайных совпадений трех последовательных счетчиков составит $f_{\text{noise}} = f_0^3 \tau^2 = 2,5 \cdot 10^{-13}$ Гц. При измерении изотопа ^{14}C , составляющего менее 10^{-12} от основного изотопа ^{12}C , нужно подавить фон от перезарядных процессов до уровня лучше $10^{-14} - 10^{-15}$. При токе $^{12}\text{C}^{+3}$ 1 мкА на выходе УМС поток ^{14}C от современного образца составляет 2 Гц, а при измерении образца с радиационным возрастом 50 000 лет — $5 \cdot 10^{-3}$ Гц. Как видно, телескоп из трех детекторов с большим запасом обеспечивает подавление фона случайных совпадений. Использование тонких пленок позволяет частицам низких энергий (углерод $^{14}\text{C}^{+3}$, 4 МэВ) проходить последовательно через несколько детекторов.

В детекторах использовались пленочные мишени из нитроцеллюлозы собственного изготовления. Пленка изготавливалась по известной технологии [1] расплывания на поверхности воды раствора нитроцеллюлозы в изоамилацетате с последующим осаждением на кольцо с поддерживающей сеткой. При среднем весе капли (25 ± 2) мг, концентрации раствора нитроцеллюлозы 6% (по весу) и среднем диаметре пятна 14 см толщина пленки составляет 10 мкг/см^2 . Вес капли раствора контролировался внутренним диаметром наконечника пипетки. Для придания проводимости на поверхность мишеней

производилось напыление тонкого слоя алюминия. Толщина слоя контролировалась по поглощению инфракрасного света. Для длины света 589 нм показатель поглощения $\alpha = 10^6 \text{ см}^{-1}$, таким образом, поглощение 10 % соответствует толщине слоя алюминия 1 нм, или 0,27 мкг/см².

Для оценки торможения ионов в мишени использовались табличные данные SRIM [2]. Для торможения ионов углерода с энергией 4 МэВ в углероде толщиной 10 мкг/см² потери энергии составляют 73,8 кэВ.

Оценка флуктуаций потерь энергии в мишени составляет 10 кэВ. Таким образом, вклад во временное разрешение энергетического разброса ионов после прохождения мишени составляет около 0,04 нс.

Оценка угла многократного рассеяния ионов углерода в углеродной мишени толщиной 10 мкг/см² составляет 3,6 мрад. Моделирование рассеяния в SRIM дает величину 3,4 мрад. Таким образом, рассеяние в пленке достаточно мало.

В первых экспериментах мы использовали детекторы на основе электростатического зеркала [3]. В этой конструкции четырьмя сетками на пути ионного пучка обеспечивался изохронный транспорт вторичных электронов с мишени на МКП. Для уменьшения числа сеток был сконструирован детектор с использованием дрейфа вторичных электронов в скрещенных магнитном и электрическом полях (циклоидальный детектор) [4]. В результате удалось вдвое повысить прозрачность детектора по сравнению с конструкцией электростатического зеркала.

Важной особенностью построенного детектора является двусторонний сбор вторичной эмиссии с пленки на две сборки МКП. Это позволяет повысить эффективность регистрации ионов по сравнению с односторонним сбором в конструкции электростатического зеркала.

КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА

Оконечный детектор УМС представляет собой времяпролетный телескоп, состоящий из трех пролетных промежутков (рис. 1), образованных соответственно электростатическим, циклоидальным, электростатическим и торцевым детекторами. Последний детектор есть сборка двух МКП, поставленная непосредственно под пучок; в настоящий момент не используется. Два пролетных промежутка имеют расстояния между мишенями 24 и 19 см соответственно.

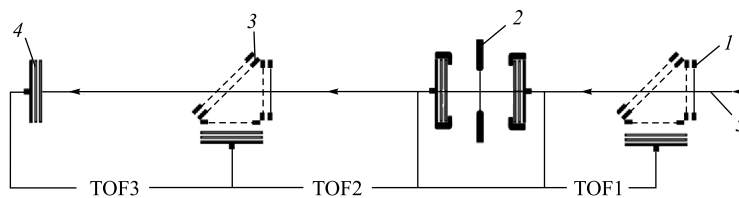


Рис. 1. Схема окончательного детектора УМС. 1 — первое электростатическое зеркало; 2 — циклоидальный детектор (вид в разрезе сбоку); 3 — второе электростатическое зеркало; 4 — торцевой детектор; 5 — направление движения ионов

Конструкция циклоидального детектора. В циклоидальном детекторе осуществляется двусторонний сбор вторичной эмиссии с пленки на отдельные МКП с использованием дрейфа электронов в скрещенных электрических и магнитных полях (траектория движения — циклоида). Изохронность транспортировки электронов из различных мест мишени достигается благодаря однородности полей (рис. 2).

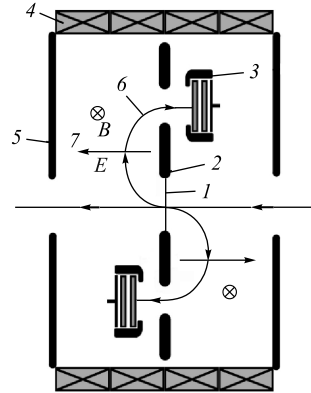


Рис. 2. Схема полей и траекторий в циклоидальном детекторе. 1 — мишень; 2 — центральный электрод; 3 — сборки МКП; 4 — сборки постоянных магнитов; 5 — торцевые электроды; 6 — траектория вторичных электронов; 7 — продольное электрическое и поперечное магнитное поле

Однородное поперечное магнитное поле в области движения электронов создается четырьмя сборками постоянных магнитов NdFeB, расположенных между магнитными полюсами. Это решение не требует внешнего источника тока, поэтому такую конструкцию можно целиком поместить в вакуум. Магнитные полюса имеют приливы для компенсации краевых эффектов. Величина магнитного поля составляет 145 Гс. Магнитная система детектора находится под нулевым потенциалом и является силовой частью конструкции.

Благодаря небольшим размерам области однородного электрического поля, для упрощения конструкции было решено отказаться от использования распределительных электродов в пользу массивных краевых приливов на единственном центральном электроде. Электрод выфрезерован из дюралюминия и электрически изолирован от магнитной системы. Напряжение на нем составляет -7 кВ, что соответствует электрическому полю $2,2$ кВ/см в области движения электронов.

Для запираения вторичной эмиссии на поверхности МКП используется ускоряющий потенциал детектора. Для этого сборки изолированы от центрального электрода и установлены с противоположной стороны относительно траектории вторичных электронов (рис. 2). В центральном электроде для этого сделаны сквозные отверстия. Каждая сборка состоит из двух МКП, разделенных медной прокладкой толщиной 50 мкм. Сборки крепятся к торцевым электродам за коллекторы через изоляторы (рис. 3). Лицевая поверхность первой МКП электрически соединена с корпусом сборки, напряжение на котором $-2,6$ кВ.

Напряжения на детектор подаются от двух высоковольтных источников. Центральный электрод и две сборки МКП запитаны через отдельные делители. Ввод напряжения в вакуум сделан через стеклянный 32-штырьковый разъем. Сигналы с коллекторов МКП выводятся через разъемы CP-50.

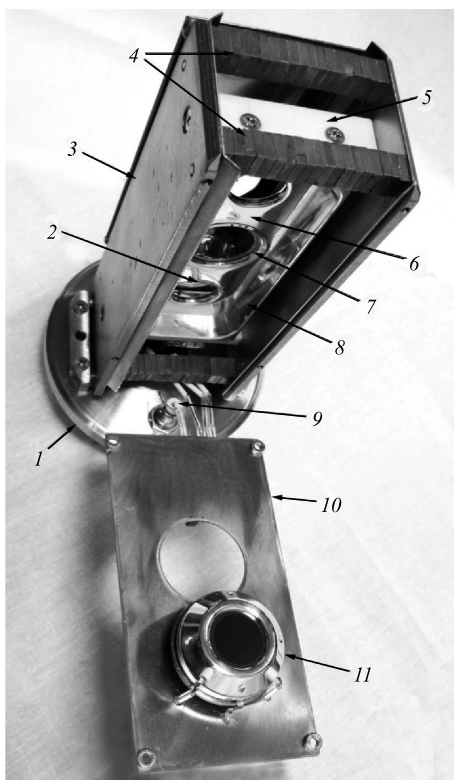


Рис. 3. Вид детектора изнутри. 1 — детекторный фланец; 2 — отверстие для прохода вторичной эмиссии; 3 — магнитный полюс; 4 — сборки постоянных магнитов; 5 — изолятор; 6 — центральный электрод; 7 — мишень; 8 — краевой прилив; 9 — разъем СР-50; 10 — торцевой электрод; 11 — сборка МКП

Детектор имеет апертуру мишени 28 мм. Для изготовления поддерживающей сетки использованы нити из золоченого вольфрама диаметром 30 мкм, наваренные с шагом 1 мм на кольцо из нержавеющей стали. Это соответствует прозрачности мишени 97%. Для предотвращения провалов электрического поля через входную апертуру торцевых электродов на них установлены разреженные сетки (30 мкм, шаг 3 мм). В итоге прозрачность циклоидального детектора составляет 95%.

Конструкция электростатического зеркала. Первый и третий детекторы времяпролетного телескопа выполнены по традиционной схеме углового электростатического отражателя. Изохронность транспортировки вторичной эмиссии от мишени до МКП достигается геометрическим равенством пройденных путей. В детекторе организован односторонний сбор вторичной эмиссии. Вторичные электроны из мишени отклоняются на 90° и усиливаются в тандеме из двух МКП. Апертура детектора 20 мм, мишень изготовлена по описанной ранее технологии. Напряжение между мишенью и ускоряющей сеткой — 1,5 кВ, зазор — 5 мм. Лицевая и нижняя грани призмы имеют размер 45 мм. Поддерживающая и ускоряющая сетки наварены из нитей золоченого вольфрама диаметром 30 мкм с шагом 1 мм, сетки электростатического зеркала имеют шаг 1,5 мм. Напряжение между ними — 3 кВ, зазор — 7 мм. В итоге прозрачность детектора составляет 90%.

ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРА

Поскольку основным назначением созданного УМС является радиоуглеродная датировка, то оконечный детектор должен разделять массы, близкие к 14 а.е.м. На рис. 4 представлена осциллограмма сигналов с четырех датчиков оконечного детектора после пролета иона ^{13}C .

В настоящий момент напряжение на терминале УМС составляет 1 МВ. Зарядовое состояние ионов после перезарядки $3+$. Энергия отрицательных ионов на выходе из источника — 25 кВ. Таким образом, энергия ионов на входе во времяпролетный детектор составляет 4,025 МэВ. На рис. 5 представлен спектр времен пролета между первым и

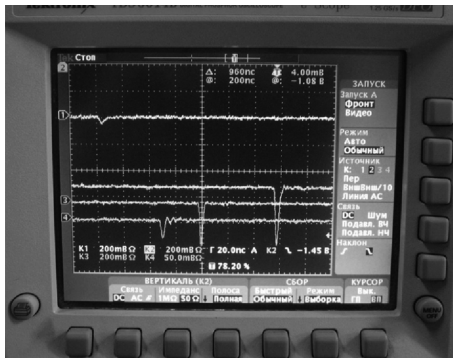


Рис. 4. Осциллограмма сигналов. 1 — сигнал с первого электростатического датчика; 2, 3 — сигналы с циклоидального датчика; 4 — сигнал со второго электростатического зеркала

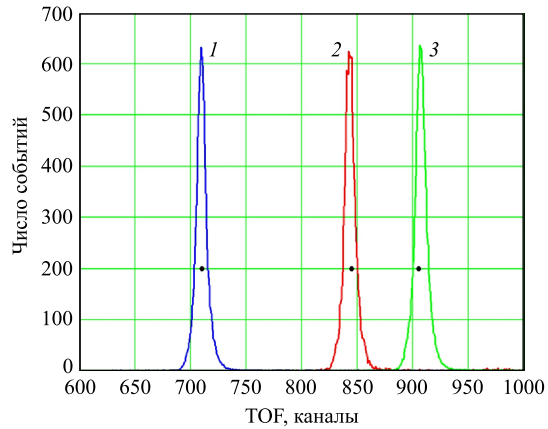


Рис. 5. Спектр времен пролета между первым и третьим детекторами. 1 — TOF-спектр ^{10}B ; 2 — TOF-спектр ^{14}C ; 3 — TOF-спектр ^{16}O

третьим детекторами (TOF 1–3) при настройке выпускного магнита УМС на разные изотопы. При этом сам УМС настроен на прохождение 14-й массы.

Для исследования стабильности работы УМС была проведена серия измерений 12 образцов из углеродных нитей, исследуемых на предмет использования в качестве хорошо воспроизводимого стандарта современного углерода. На рис. 6 представлены двумерные спектры времен пролета ионов ^{14}C двух промежутков. По горизонтальной оси — время пролета (в каналах, 0,07 нс/канал) от первого до третьего счетчика, в верхней половине

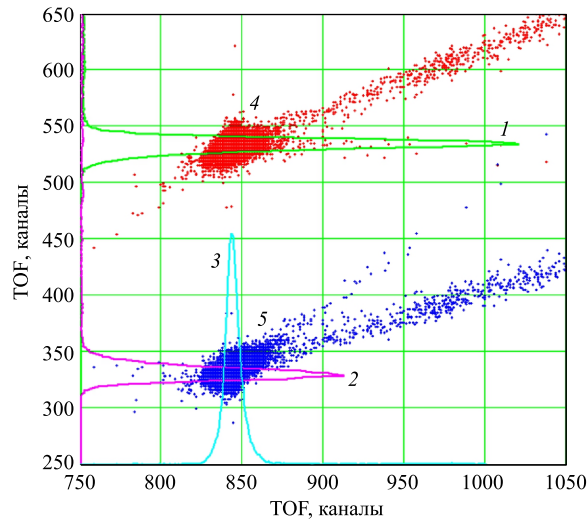


Рис. 6. Двумерный времяпролетный спектр

по оси Y — время пролета первого промежутка, в нижней — время пролета второго. Гистограммы соответствующих времен пролета представлены сплошными линиями. Хорошо заметны «хвосты» рассеянных ионов на первой пленке и менее заметны на второй. Временное разрешение по каналу $I-2$ составляет 0,65 нс, а по каналу $I-3$ — 0,45 нс.

На текущий момент эффективность регистрации ионов циклоидальным детектором с двусторонним сбором выбиваемых электронов близка к 100 %, эффективность детектора с электростатическим зеркалом составляет примерно 80 %. При попадании на пленки детекторов пучка ионов ^{13}C с током 10 нА происходит быстрое, частичное разрушение пленок, что приводит к уменьшению эффективности счета. Разрушение, вероятно, связано с низкой проводимостью пленок и требует увеличения напыляемого слоя. Следует отметить, что детекторы работоспособны в диапазоне скоростей счета вплоть до 50 кГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы был создан прототип времяпролетного детектора. В настоящий момент временное разрешение 0,45 нс вполне достаточно. В целом, проведенные исследования показывают, что создана работоспособная система, однако характеристики созданного детектора нуждаются в последующем улучшении. Необходим переход на более тонкие углеродные мишени, что поможет улучшить временное разрешение и поднять эффективность регистрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ангерер Э. Техника физического эксперимента. М.: Физматгиз, 1962. С. 128.
2. Ziegler J. F. // Nucl. Instr. Meth. В. 1998. V. 136. P. 141.
3. Алиновский Н. И. и др. Времяпролетный детектор ионов малой энергии для ускорительного масс-спектрометра // ПТЭ. 2009. № 2. С. 90–93.
4. Bowman J. D., Heffner R. H. A Novel Zero Time Detector for Heavy Ion Spectroscopy // Nucl. Instr. Meth. 1978. V. 148. P. 503–509.