

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.384.8

ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ ДЕТЕКТОР ИОНОВ МАЛОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

© 2009 г. **Н. И. Алиновский, Е. С. Константинов, В. В. Пархомчук,
А. В. Петрожицкий, С. А. Растигеев, В. Б. Рева**

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11*

E-mail: S.A.Rastigeev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 22.07.2008 г.

Описаны результаты экспериментов с времяпролетным детектором для регистрации редких ионов на выходе ускорительного масс-спектрометра Института ядерной физики СО РАН. Работа детектора основана на регистрации электронной эмиссии из тонких пленок с помощью микроканальных пластин. Благодаря малой толщине пленки ионы могут последовательно проходить несколько пленок – на этом основана времяпролетная система для идентификации изотопов. Высокое временное разрешение детекторов позволяет заметно уменьшить фон от внешней радиации по сравнению с одним полупроводниковым датчиком полного поглощения, измеряющим энергию ионов.

PACS: 07.75.+h

ВВЕДЕНИЕ

Основная проблема при исследовании редких изотопов в образце – это надежное отделение фоновых событий, возникающих при прохождении анализируемого ионного пучка по вакуумному тракту спектрометра. Рассеяние на атомах остаточного газа и процессы перезарядки ионов с потерей или захватом электронов приводят к появлению фонового пучка совместно с выделяемым изотопом. Так, например, при измерении изотопа ^{14}C , составляющего $<10^{-12}$ от основного изотопа ^{12}C , нужно подавить фон от перезарядных процессов до уровня $<10^{-14}$ – 10^{-15} . Сечения перезарядки иона углерода на остаточном газе может составлять 10^{-15} см² [1], и при пролете расстояния 1 м при вакууме 10^{-6} Торр вероятность перезарядки $\geq 10^{-3}$. Даже после многократных ступеней фильтрации магнитными и электростатическими спектрометрами в детектирующем канале может оставаться достаточно большой фон, и на финальный детектор накладываются серьезные требования по его отделению. Первые опыты по регистрации проводились с использованием полупроводниковых детекторов в надежде, что после финального магнитного спектрометра фоновые частицы с другой массой, но тем же импульсом можно отличить, если энергетическое разрешение детектора достаточно хорошее. Но оказалось, что разрешения доступных полупроводниковых детекторов недостаточно при энергии ионов ~ 1 МэВ. Энергетический разброс, вероятно, вызван входной проводящей пленкой на полупроводниковом детекторе. Кроме того, шумы и фон от космического излучения остаются доста-

точно высокими, что не позволяет надежно выделить сигнал от ^{14}C . Уровень фонового счета на датчике составлял по порядку величины 0.1–0.01 с⁻¹. Полупроводниковые детекторы оказались чувствительными к легированию ионными пучками и довольно быстро выходят из строя.

КОНСТРУКЦИЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ДЕТЕКТОРА

Для регистрации ионов создан детектор эмиссии от тонкой пленки, использующий известный принцип [2] изохронного электростатического отражения электронов на микроканальную пластину (м.к.п.). Конструкция детектора, схематично приведенного на рис. 1, позволяет обеспечить одновременный приход электронов на м.к.п. независимо от места эмиссии в поперечном положении пленки. Эмиссионные электроны, выбитые из пленки 1 ионом, ускоряются в электрическом поле, приложенным между ускоряющей сеткой 2 и пленкой (1.5 кВ на зазоре 5 мм). После ускорения электроны вторичной эмиссии попадают внутрь призмы, где дрейфуют в нулевом поле до входа в область электростатического зеркала 3, где отражаются на 90° и опять попадают внутрь призмы в нулевое поле, где они дрейфуют в направлении тандема из двух микроканальных пластин. На окна электростатического зеркала и двух сторон призмы натянуты нити из золоченого вольфрама толщиной ~ 30 мкм с шагом 1.5 мм. Зазор между сетками, образующими электростатическое зеркало, составляет 7 мм, напряжение на зазоре 3 кВ. Грани призмы изготовлены из не-

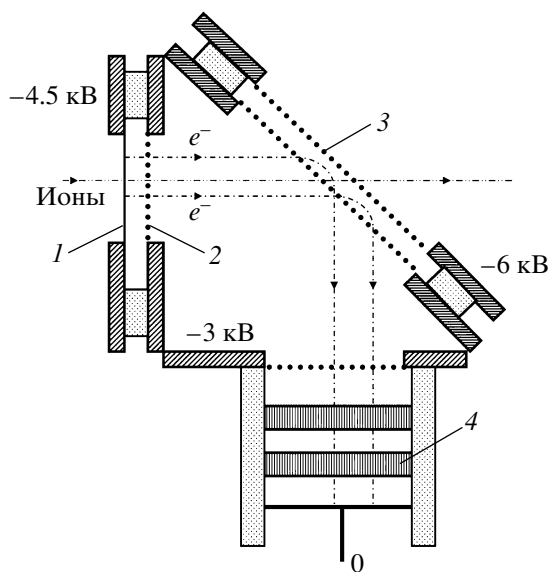


Рис. 1. Времяпролетный детектор: 1 – пленка, 2 – ускоряющая сетка, 3 – электростатическое зеркало, 4 – м.к.п.

ржавеющей стали толщиной 1 мм, основание и ребра призмы имеют одинаковый размер – 45 мм. Прозрачность одного детектора ~95%, диаметр канала 20 мм.

Пленка изготавливалась по известной технологии [3]: капля раствора растекалась на поверхности воды в тонкую пленку $\varnothing \sim 10$ см. Пленка осаждалась на кольцо $\varnothing 20$ мм с сеткой из W-нитей, натянутых через 1 мм. При первых опытах выяснилось, что даже поток ионов с интенсивностью 1000 ионов/с быстро заряжает такую пленку, что приводит к уменьшению эффективности детектора из-за искажения электрического поля, вытягивающего вторичные электроны. Для снятия электростатических зарядов на пленки дополнительно напылялся магний, испаряемый с помощью электрического разряда. Второй проблемой был фон эмиссии электронов с W-сеток, натянутых для формирования электростатического зеркала. Уже при 6 кВ наблюдался быстро растущий с напряжением фон со скоростью счета 10–100 с⁻¹, сильно зависящий от распределения потенциалов на сетках. Оптимизация вытягивающих и отражающих напряжений с уменьшением напряженности поля между сетками позволила ограничить этот источник фона в разумных пределах.

На рис. 2 показаны сигналы при пролете иона сквозь три последовательно расположенных детектора (расстояния между соседними детекторами равны 22 и 32 см). Последний детектор – это м.к.п.-сборка, на поверхность которой ионы непосредственно попадали. Видно, что характерная амплитуда импульсов равна 100 мВ, и сигнал за-

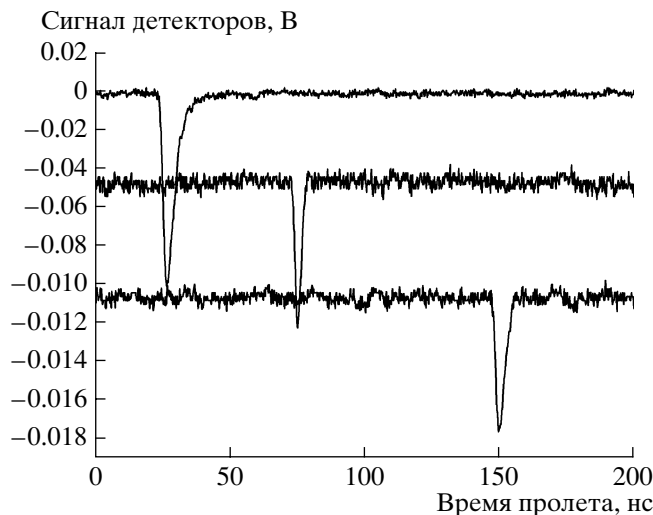


Рис. 2. Сигналы на трех времяпролетных детекторах при последовательном пролете иона с энергией 1 МэВ.

метно превосходит шум, что позволяет проводить цифровую обработку сигналов без предварительного усиления.

Для регистрации сигналов использовались дискриминаторы, формирователи импульсов, схема совпадений, времяцифровые преобразователи и счетчики импульсов, разработанные (в стандарте КАМАК) в ИЯФ СО РАН для экспериментов по физике высоких энергий. Сигналы с трех детекторов подавались на дискриминатор, затем на формирователи задержки и схему совпадений. Величина порога дискриминаторов составляла 15 мВ, длительность импульсов на входе схемы совпадений увеличивалась до 300 нс. Схема совпадений запускала времяцифровые преобразователи, сигналом конца измеряемых временных интервалов служили сигналы с дискриминаторов, задержанные на ~400 нс посредством кабельных линий. В такой системе запуск происходит при приходе импульса от последнего счетчика, и более медленно движущиеся ионы будут иметь меньший по величине временной интервал, измеренный времяцифровым преобразователем. Дискретность измерения временных интервалов составляла ~0.5 нс. Калибровка каждого канала проводилась генератором импульсов. После срабатывания цифровые сигналы записывались в компьютер через крейт КАМАК. Скорость набора такой системы ограничивалась взаимодействием РС-КАМАК и не превышала 10 Гц, что, в принципе, ограничивало изучение фона, но было достаточно для набора редких ионов, поступающих с частотами <1 Гц.

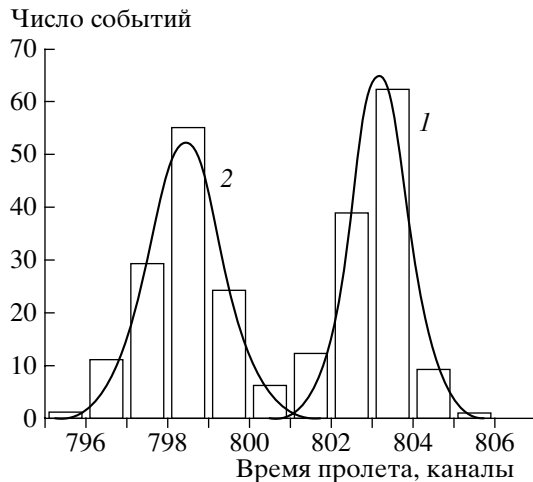


Рис. 3. Распределение времени пролета (0.5 нс на канал) ионов без пленки (1) и с дополнительной пленкой на входе в детектор (2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РЕГИСТРАЦИИ ИОНОВ

Экспериментальные исследования возможностей времяпролетного детектора по регистрации спектра ионов на выходе ускорительного масс-спектрометра проводились на установке ИЯФ СО РАН [4]. Анализируемые ионы образуются в результате бомбардировки графита ионами цезия. Настройки ускорительного масс-спектрометра соответствовали 1 МэВ энергии пучка на входе во времяпролетный детектор. Для тестирования детектора использовались ионы бора, содержащиеся в графите на уровне 10^{-6} .

На рис. 3 кривой 1 представлена гистограмма времени пролета ионов ^{11}B через 32-сантиметровый участок свободного пространства. Аппроксимируя гистограмму функцией Гаусса, получаем среднеквадратичный разброс по времени пролета 0.35 нс, при этом соответствующий разброс по энергии равен 9.1 кэВ. Для оценки влияния используемой в детекторе пленки на энергетический разброс пучка другая пленка, выполненная по той же технологии, располагалась на входе (на подвижном пробнике) во времяпролетный датчик. При вводе пленки (кривая 2) среднее время пролета ионов увеличивается на 2.39 нс, что соответствует потере энергии частиц при прохождении пленки ~ 60 кэВ. Такая потеря энергии частиц соответствует толщине С-пленки 13 мкг/см^2 [5]. Дополнительная пленка увеличивает разброс времени пролета до 0.46 нс, т.е. измеряемый разброс по энергии ионов становится равным 11.8 кэВ. Таким образом, энергетический разброс, вносимый пленкой, равен 7.5 кэВ. Моделирование по программе SRIM [6] для ионов ^{11}B , прошедших С-пленку толщиной 13 мкг/см^2 , дает среднюю потерю энергии частиц 63 кэВ и энергетический раз-

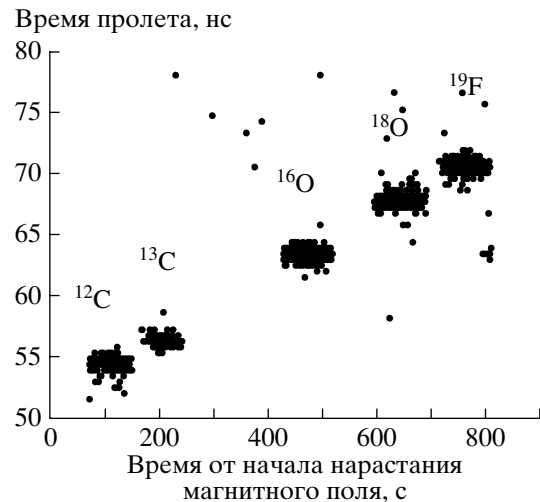


Рис. 4. Последовательное изменение времени пролета при изменении магнитного поля в выходном магните спектрометра.

брос прошедших ионов 5.4 кэВ. Расстояние от пленки до последнего детектора составляло 54 см, и уменьшение на 20% скорости набора при вводе пленки позволяло оценить поперечное рассеяние. Вышеуказанное моделирование дает 13%-ное уменьшение числа ионов, попавших на последний детектор за счет процесса рассеяния, при нулевом начальном эмиттансе пучка, без учета пленки, расположенной на первом детекторе. Таким образом, основной вклад во временное разрешение вносит энергетический разброс, возникающий при прохождении пленки. Эксперименты с увеличением расстояния между детекторами показали, что разрешение не улучшалось, а эффективность регистрации падала за счет рассеяния на пленках. При необходимости улучшения временного разрешения необходимо использовать более тонкие пленки. Следует отметить, что при малом энергетическом разбросе ионизационных потерь при прохождении ионами пленки влияние разброса энергии за счет перезарядки ионов на пленке, находящейся под потенциалом, может стать доминирующим. Это приводит к необходимости понижения напряжения на пленке и, возможно, к сдвигу сигнала с анода м.к.п. под положительным потенциалом.

При масс-спектрометрии углерода времяпролетный датчик частиц должен разделять массы, близкие к 14 а.е.м. Таких ионов перед последним 90° -ным магнитным фильтром достаточно много. На рис. 4 показаны записанные системой сигналы при медленном сканировании магнитным полем (от 4 до 5.4 кГс) выходного магнита, меняющим разрешенный для прохождения ионов интервал импульса. Видно, как изменяется время пролета в соответствии с изменением массы (изменение массы с 12 до 19 а.е.м.). При этом основная часть

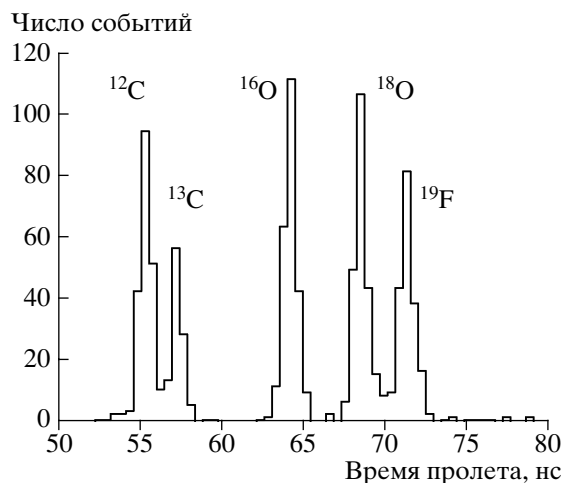


Рис. 5. Спектр временных интервалов для смешанного ионного пучка.

системы ускорительного масс-спектрометра (до выходного магнита) настроена на прохождение ^{14}C , выбиваемого из графитового образца (отметим, что графит относится к категории “мертвых образцов”, так как содержание в нем радиоуглерода незначительно). Соответствующие временные гистограммы приведены на рис. 5. Временное разрешение составляет ~ 0.4 нс, что достаточно для идентификации ионов. Фон от рассеянных ионов с другой массой составлял $\sim 0.1\text{--}0.01$ с $^{-1}$, что при потоке первичных ионов ^{12}C на выходе 10^{11} с $^{-1}$ составляет в относительных единицах $10^{-12}\text{--}10^{-13}$. Разрешение 0.4 нс при расстоянии до соседнего пика 2 нс дает дополнительное подавление (при гауссовском распределении) $3 \cdot 10^{-6}$. Однако такая оценка слишком оптимистична, и мы предполагаем использовать двойную систему измерения временных интервалов на основе трех последовательных счетчиков. Система из нескольких последовательно расположенных датчиков прохождения частиц позволяет заметно снизить количество случайных совпадений. Результирующее распределение времен пролета ионов ^{11}B и ^{10}B в плоскости двух пролетных промежутков представлено на рис. 6 (времяпролетное расстояние равно 54 см и 22 см для TOF1 и TOF2 соответственно). Времяпролетный телескоп, состоящий из трех последовательно расположенных детекторов, позволил практически полностью подавить случайные совпадения и надежно измерить скорость ионов. Следует отметить, что измерения потока ионов проводились и для достаточно высокой интенсивности пучков, и детекторы оказались работоспособны в диапазоне скоростей счета вплоть до 50 кГц.

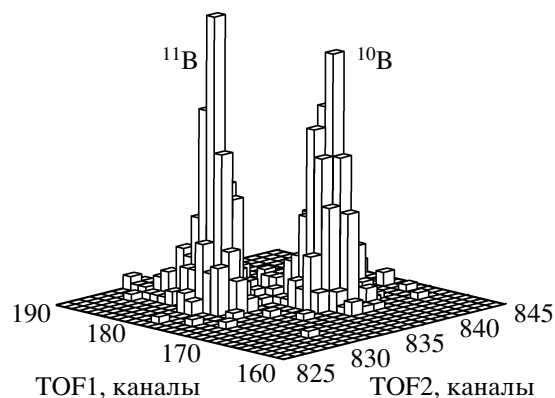


Рис. 6. Распределение ионов в плоскости двух временных интервалов (0.5 нс на канал).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт регистрации ионов детекторами с тонкими пленками показал, что они вполне соответствуют требованиям для финальных детекторов ускорительного масс-спектрометра. При относительно малых затратах на создание детектора его энергетическое разрешение составляет $\sim 1\%$ и позволяет надежно отличать изотопы друг от друга в ионном пучке. Одним из способов фильтрации ионных пучков может быть использование сильного торможения ионов в серии последовательно установленных пленок, что расширяет возможности ускорительного масс-спектрометра для выделения изобар, например, таких как ^{14}C и ^{14}N .

Авторы выражают признательность В.М. Аульченко, Ю.А. Тихонову, А.Р. Фролову за советы, а также за предоставленную электронную аппаратуру для регистрации; А.С. Попову, Н.М. Рыскулову, Б.Н. Хазину за полезное обсуждение проблем регистрации ионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rottmann L.M., Bruch R., Neill P. et al. // Phys. Rev. A. 1992. V. 46. № 3. P. 3883.
2. Busch F., Pfeffer W., Kohlmeyer B. // Nucl. Instrum. and Methods. 1980. V. 171. P. 71.
3. Ангерер Э. // Техника физического эксперимента. М.: Физматгиз, 1962. С. 128.
4. Alinovsky N.I., Klyuev V.F., Konstantinov E.S. et al. // Proc. EPAC 2004. Lucerne, Switzerland. 2004. P. 2389.
5. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. // Физические величины. М.: Энергтоиздат, 1991. С. 1152.
6. Ziegler J.F. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. B136. P. 141.