

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P13-85-637

А.Н.Кузнецов, В.Ф.Кушнирук, О.К.Нефедьев,
А.В.Рыхлюк, В.Г.Субботин, В.И.Томин,
Ю.П.Харитонов, Ю.С.Цыганов

СПЕКТРОМЕТР РЕДКИХ СОБЫТИЙ α -РАСПАДА

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"
и на Совещание по полупроводниковым детекторам,
Дубна, сентябрь 1985 г.

1985

Исследования последних лет показали, что многие изотопы трансактинидных элементов с $Z \geq 104$ наряду со спонтанным делением в значительной степени испытывают и α -распад^[1+4]. В целом ряде случаев после нескольких быстрых α и β -превращений эти изотопы переходят в удобные для детектирования относительно долгоживущие изотопы актинидных элементов от Cm до Fm^[2+4]. Этот факт использован в ЛЯР СИБИ при разработке методики исследования ветви α -распада изотопов элементов с $Z \geq 104$. Методика основана на радиохимическом поэлементном выделении изотопов Cm, Cf, Es, Fm - конечных продуктов распада изотопов трансактинидных элементов с последующей их идентификацией по спектру α -частиц и периоду полураспада^[2].

С учетом высокой интенсивности пучков ускоренных ионов от ^{40}Ar до ^{36}Fe на ускорителе У-100 эта методика позволяет получить наиболее высокую чувствительность выделения канала α -распада составных ядер по сравнению с другими методами. Для достижения чувствительности около 10^{-36} см^2 помимо высокой интенсивности пучков необходимо обеспечить следующие значения основных характеристик спектрометра: эффективность регистрации не менее 70%, энергетическое разрешение 1%, собственный фон в области энергий 6 + 7 МэВ не более одного отсчета за 10-20 суток, высокая стабильность в течение нескольких суток или даже недель непрерывных измерений в зависимости от времени жизни идентифицируемых изотопов.

В настоящей работе дается описание и приводятся характеристики разработанного нами низкофонового полупроводникового α -спектрометра.

Источники фона и идентификация фоновых событий

При облучении мишени из Pb или Bi ионами от Ti до Fe наряду с образованием составных ядер трансактинидных элементов (с сечениями $\sigma = 10^{-35} + 10^{-33}\text{ см}^2$) в реакциях многонуклонных передач с сечениями $\sigma \leq 10^{-20}\text{ см}^2$ ^[5,6] образуется много изотопов, включая α -активные в области от Po до U. Возможными источниками фона являются изотопы с временами жизни порядка суток и более, в радиоак-

тивном ряду которых есть α -излучатели с энергией 6+7 МэВ (рис.1). Например, в цепочке α -распадов ^{223}Ra

$$^{223}\text{Ra} \xrightarrow[11 \text{ дней}]{5,71 \text{ МэВ}} ^{219}\text{Rn} \xrightarrow[3,96 \text{ с}]{6,82 \text{ МэВ}}$$

есть излучатель

^{215}Po с энергией $E = 6,82$ МэВ, очень близкой к энергии α -распада изотопа ^{246}Cf (конечный продукт распада изотопа $^{258}\text{105}$). Поэтому, несмотря на высокую степень очистки при радиохимическом выделении фракции Cf, окончательная идентификация редких событий α -распада в спектре Cf-фракции должна проводиться с учетом возможного присутствия в ней отдельных атомов ^{223}Ra , ^{224}Ra .

Даже при полном исключении из выделенной фракции продуктов многонуклонных передач, спектрометр может иметь собственный фон, обусловленный следовыми количествами урана, тория и продуктов их распада в конструкционных материалах счетной камеры.

Общей характерной особенностью всех приведенных на рис.1 возможных фоновых α -излучателей с энергией 6+7 МэВ является их короткое время жизни (от долей до десятков секунд) и еще более короткие времена жизни их дочерних продуктов (миллисекунды). Поэтому за короткий интервал времени около 20-25 секунд в рассмотренном примере ^{223}Ra происходят три последовательных α -распада с энергиями 5,71; 6,82; 7,39 МэВ. Вводя наряду с измерением энергии α -частиц регистрацию момента времени каждого α -распада, мы получаем возможность по времени и энергетическим корреляциям идентифицировать фоновые распады, т.е. фактически измерить фон и при высокой эффективности регистрации существенно его подавить. Действительно, используя биномиальное распределение, легко показать, что отсчеты с $E_\alpha = 6,82$ МэВ в случае распада ^{223}Ra будут с эффективностью $q = \epsilon^2(2-\epsilon)$ регистрироваться в совпадении с одной или двумя другими α -частицами цепочки (5,71 и 7,39 МэВ), т.е. идентифицироваться и исключаться как явно фоновые, и с вероятностью $p = \epsilon(1-\epsilon)^2$ - как одиночные (остаточный фон). Фактор подавления фона $K = 1/(1-\epsilon)^2$, где ϵ - эффективность регистрации спектрометра. При $\epsilon = 0,7 + 0,8$ фон подавляется в 10-25 раз. Именно с точки зрения подавления фона при регистрации редких событий крайне важно иметь эффективность регистрации $\epsilon \geq 70\%$ (рис.2). Кроме того, использование временных и энергетических корреляций по-

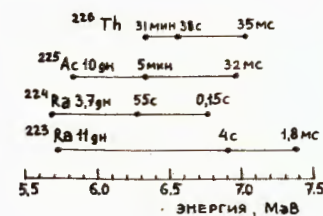


Рис.1. Возможные первоисточники фона в области энергий 6+7 МэВ. Указаны времена жизни и энергии генетически связанных изотопов.



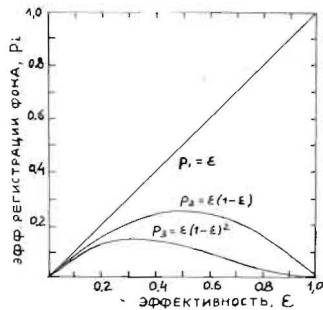


Рис.2. Вероятность регистрации остаточного фона P_i в зависимости от эффективности детектирования ε : P_1 - без учета амплитудно-временных корреляций; P_2 - с учетом корреляций для события из двух последовательных α -распадов; P_3 - с учетом двойных и тройных корреляций для события из трех последовательных α -распадов.

эволюет буквально по нескольким двойным или тройным отсчетам идентифицировать нуклид (ряд), ответственный за фон, и внести необходимые корректировки в процедуру химической очистки.

Форма спектра и эффективность регистрации

Для получения максимальной эффективности используют так называемую 4 π -геометрию, помещая источник на тонкой подложке между двумя полупроводниковыми детекторами. Геометрическая эффективность регистрации в этом случае может быть получена близкой к 100%. Однако, рассмотренные формы спектра с учетом потерь во входном окне детектора и в подложке источника показывает, что реальная "спектрометрическая" эффективность в этой геометрии всегда ниже геометрической и может существенно отличаться от 100%.

Рассмотрим это на примере точечного источника (рис.3). Частица с энергией E_0 , попавшая в детектор под углом θ к нормали, зарегистрируется как частица с энергией:

$$E(\theta) = E_{\max} - \Delta E_0 \frac{1 - \cos\theta}{\cos\theta}, \quad (I)$$

где $E_{\max} = E_0 - \Delta E_0$ - максимальная зарегистрированная энергия в спектре (при нормальном падении частицы на детектор), ΔE_0 - потери энергии в мертвом слое при нормальном падении. Все частицы, попавшие в детектор внутри конуса с раствором θ , зарегистрируются с энергией выше некоторой пороговой энергии $E(\theta)$, т.е. в энергетическом окне $E(\theta) < E < E_{\max}$. Их доля от полного числа частиц источника составит (при регистрации од-

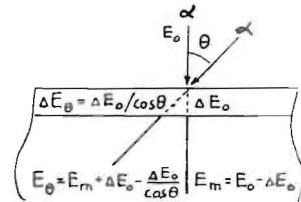


Рис.3. Потери энергии в мертвом слое и в чувствительном объеме детектора в зависимости от угла падения θ .

ним детектором):

$$\varepsilon(\theta)_{\text{спектр.}} = 0,5 (1 - \cos\theta), \quad (2)$$

Используя очевидное из рис.3 соотношение $\cos\theta = \frac{\Delta E_0}{E_{\max} - E(\theta) + \Delta E_0}$,

формулу для спектрометрической эффективности можно записать в виде:

$$\varepsilon_{\text{спектр.}} = 0,5 \frac{E_{\max} - E(\theta)}{E_{\max} - E(\theta) + \Delta E_0}, \quad (3)$$

Видно, что спектрометрическая эффективность регистрации в заданном окне энергий $E_{\max} - E(\theta)$ зависит от толщины мертвого слоя (окно детектора, подложка источника), толщины источника и заданного допустимого порога $E(\theta)$. Так, при величине потерь ΔE_0 около 70 кэВ (20кэВ во входном окне детектора и 50 кэВ в подложке) и заданном окне $E_{\max} - E(\theta) = 50$ кэВ эффективность регистрации одним детектором составляет только около 28%, тогда как геометрическая эффективность близка к 50%. Поэтому мы решили вообще отказаться от подложки источника и наносить источник непосредственно на поверхность детектора.

Дифференциальную форму спектра в некотором приближении можно описать формулой:

$$\frac{dN}{dE}(E) = 0,5 \frac{E_0}{(E_{\max} - E + \Delta E_0)^2}, \quad (4)$$

которую легко получить, используя выражения (1) и (3). Это распределение несколько деформируется из-за шумов системы и флуктуаций числа образованных в детекторе электронно-дырочных пар, а также степени их собирания. Однако при малых расстояниях источник - детектор выражение (4), в основном, определяет форму спектра.

Для оценки предельно достижимой эффективности мы провели измерения с поверхностно-барьерным Si(Au) детектором ($\phi = 20$ мм, толщина золотого контакта около 50 мкг/см², разрешение около 25 кэВ) и "идеально" тонким источником ²¹⁴Po, нанесенным непосредственно на поверхность детектора за счет диффузии атомов отдачи при распаде ²²⁶Ra. Форма полученного спектра (рис.4) действительно хорошо описывается выражением (4) с параметром $\Delta E_0 = 13$ кэВ. Видно, что, из-за максимального приближения источника к детектору энергетическое разрешение ухудшилось незначительно, но низкоэнергетический "хвост" ниже порога $E(\theta) =$

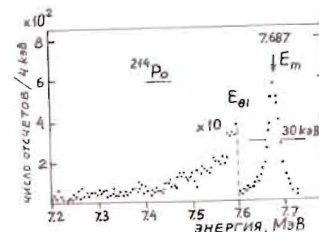


Рис.4. Форма спектра для источника, нанесенного непосредственно на чувствительную поверхность детектора.

$= 7,6$ МэВ составляет около 13 %. Таким образом, спектрометрическая эффективность в этом предельном случае 2π -геометрии в энергетическом окне $E_{\text{max}} - E(\theta_1) = 90$ кэВ составляет около 44 %. Помещая второй детектор на расстоянии 1 мм от первого, можно в пределе для 4π -геометрии получить спектрометрическую эффективность около 80 %.

Конструкция счетных камер

Основными условиями получения низкого уровня фона являются: малое содержание естественных α -активных нуклидов в конструкционных материалах и исключение возможности попадания внутрь счетных камер из окружающей среды таких радиоактивных газов, как радон. Абсолютное содержание примесей урана и тория в кремнии, согласно нашим измерениям и литературным данным, пренебрежимо мало^{/8/}. Камера, в которой размещены детекторы, изготовлена в виде двух изолированных объемов. Внутренний объем и почти все детали крепления в нем изготовлены из фторопласта с содержанием тория и урана не более 10^{-9} г/г. Для исключения электромагнитных наводок камера из фторопласта помещается в корпус из нержавеющей стали; пространство между камерами периодически откачивается механическим насосом. В состав спектрометра входят четыре такие камеры.

В рабочих экспериментах мы использовали в каждой камере по два поверхностно-барьерных детектора, имеющих диаметр рабочей поверхности 30 мм и энергетическое разрешение для α -частиц 30 ± 45 кэВ. Детекторы располагаются на расстоянии 1 мм друг от друга. Непосредственно на рабочую поверхность одного из них методом электрораспыления^{/9/} наносится исследуемый α -источник диаметром 10 ± 12 мм. После установки детекторов внутренняя камера постоянно откачивается сорбционным насосом.

Система регистрации

Блок-схема спектрометра изображена на рис. 5. Пара детекторов одной камеры обеспечивает измерение одной энергии в 4π -геометрии. Каждый канал спектрометра включает детектор, предусилитель и усилитель. Предусилитель содержит вторичный источник питания, наличие которого исключает проходящие поlex по проводам питания в сигнальные цепи предусилителя. В цепях, определяющих коэффициенты передачи предусилителя, усилителя^{/10/} и мультимплексора, применены резисторы типа СЭ-208 с высокой температурной стабильностью. Температурная нестабильность преобразования энергии α -частиц в код для каждого тракта, включающего мультимплексор и аналого-цифровой преобразователь^{/11/}, не превышала $0,01$ %/ $^{\circ}\text{C}$. Температура помещения, в котором размещен спектрометр, стабилизируется с точностью до нескольких градусов кондиционером.

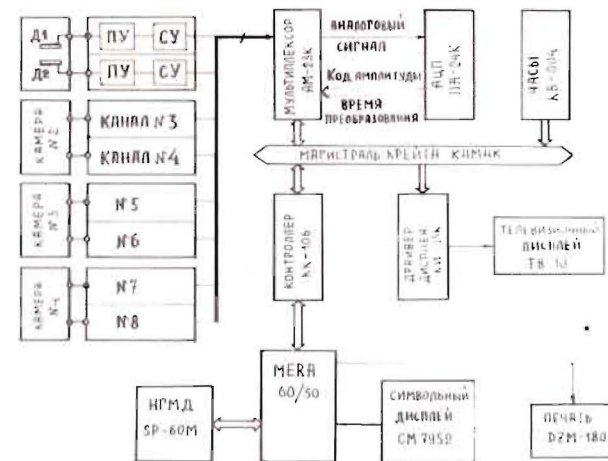


Рис. 5. Блок-схема низкофонного α -спектрометра.

В спектрометре используется специальный 8-канальный аналоговый мультимплексор, линейная часть которого подобна разработанной ранее^{/11/}. Блок включает восемь дискриминаторов нижнего уровня с общей регулируемой порогом. Дискриминатор, сработавший в то время, когда система регистрации свободна, подключает соответствующий тракт на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Мультимплексор имеет схему запрета регистрации событий, совпадающих по двум или более трактам во временном интервале менее 50 нс. Вне этого интервала включается только первый из сработавших трактов. Моментом появления события считается при этом срабатывание дискриминатора нижнего уровня.

АЦП работает в режиме связи с внешним устройством^{/11/}, в данном случае мультимплексором. Связь между блоками осуществляется по разъемам на лицевых панелях. АЦП принимает сигнал с аналогового входа мультимплексора и генерирует сигнал "Время преобразования", по началу которого в выходной регистр мультимплексора заносится информация о номере канала. К ней по сигналу готовности АЦП добавляется код амплитуды (десять младших разрядов). Мультимплексор отвечает АЦП сигналом, подтверждающим запись кода амплитуды. Единный код амплитуды и номера тракта из выходного регистра мультимплексора считывается контроллером КК-106, после чего в ЭВМ передается также код времени регистрации события относительно начала измерения с блока КВ-0С4^{/12/}.

9. Hussonnois M., Brillard L., Constantinescu O. Nucl. Instr. and Meth., 1984, v.224, p.355.
10. Кузнецов А.Н., Субботин В.Г. В кн.: X International Symposium on Nuclear Electronics, Dresden, GDR, p.148.
11. Кузнецов А.Н., Субботин В.Г. ОИЯИ, 13-83-67, Дубна, 1983.
12. Антохов В.А. и др. ОИЯИ, 10-10567, Дубна, 1977.
13. Нефедьев О.К. ОИЯИ, 10-83-650, Дубна, 1983.
14. Кузнецов А.Н. ОИЯИ, 13-81-731, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 августа 1985 года.

Кузнецов А.Н. и др.

P13-85-637

Спектрометр редких событий α -распада

Описан низкофоновый α -спектрометр с 4π -геометрией регистрации. Обсуждаются вопросы эффективности, пути понижения фона, форма спектральной линии. Дается описание системы регистрации с использованием ЭВМ MERA-60/30. За счет введения временных измерений уровень фона в области 6-7 МэВ доведен до 0,02-0,03 отсчетов в сутки.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Kuznetsov A.N. et al.

P13-85-637

α -Decay Rare Event Spectrometer

Low level background 4π -geometry α -spectrometer is described. The efficiency of registration, spectral line form and the ways of background lowering are discussed. The system for registering α -particles using MERA-60/30 computer is described. The lowering of background to 0.02-0.03 count/day at 6-7 MeV has been achieved due to the application of time measurement of events.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985