

СЗУЧ. 1М

Б-484

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 6830

967/2-73



Е.Береги, Ц.Вылов, Й.Крацикова, Ли Чен Сон,  
Б.П.Осипенко, Л.А.Пермякова, В.Г.Тишин

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ БЕТА-ЧАСТИЦ

1972

P13 - 6830

Е.Береги, Ц.Вылов, Й.Крацикова, Ли Чен Сон,  
Б.П.Осипенко, Л.А.Пермякова, В.Г.Тишин

**ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ БЕТА-ЧАСТИЦ**

### Введение

В настоящее время магнитный анализ является наиболее точным методом определения энергии электронов в ядерной спектроскопии. С переходом к изучению более короткоживущих изотопов с периодом полураспада несколько часов и меньше проявились недостатки этих приборов: одноканальность и малая светосила. В связи с этим все более широкое применение находят полупроводниковые спектрометры, отличающиеся большой светосилой, многоканальностью и сравнительно высоким энергетическим разрешением /для  $E_{\beta} = 481,6 \text{ кэВ}$  ( $^{207}\text{Bi}$ )— $1,9 \text{ кэВ}^{1/1}$ ; для  $E_{\beta} = 976 \text{ кэВ}$  ( $^{207}\text{Bi}$ )— $2,1 \text{ кэВ}^{2/1}$ ./

В полупроводниковом  $\beta$ -спектрометре измеряемый энергетический диапазон определяется толщиной чувствительного слоя, который зависит от типа детектора. Для измерения низких энергий / $<1 \text{ МэВ}$ / применяют поверхностно-барьерные детекторы, имеющие тонкое входное окно. Недостатками таких детекторов являются:

- зависимость емкости и толщины чувствительного слоя от величины напряжения смещения;
- сравнительная ограниченность величины чувствительного слоя /до  $2-3 \text{ мм}$ /, зависящей от удельного сопротивления материала.

Для измерения спектров  $\beta$ -частиц более высоких энергий применяют  $\text{Si(Li)}$  поверхностно-барьерные детекторы. Здесь величина чувствительного слоя больше, но толщина входного окна превосходит примерно в  $2-4$  раза толщину поверхностно-барьерных детекторов /3/.

Основным недостатком полупроводниковых спектрометров при измерении спектров конверсионных электронов является фон от сопровождающих излучений / $X$ -лучи,  $\gamma$ -лучи,  $\alpha$ -частицы, позитроны/. Применение магнитной системы /дисперсионной и бездисперсионной/ является лучшим способом фильтрации этих излучений,

однако такие системы, известные в настоящее время, также обладают некоторыми недостатками: нет фильтрации всех фоновых частиц /позитроны <sup>4</sup>/; время дрейфа электронов сильно зависит от энергии <sup>5</sup>; мала светосила <sup>6</sup>.

Ниже мы рассмотрим вопросы применения кремниевых детекторов для измерения спектров конверсионных электронов или позитронов. В тех случаях, когда необходима фильтрация фонового излучения, применяется магнитное устройство, предложенное в работе <sup>6</sup>.

### Вакуумная система

Назначение системы состоит в создании необходимого давления в спектрометрических камерах, а также в обеспечении /при необходимости/ замены источника без нарушения вакуума. Давление  $\sim 10^{-3}$  мм рт.ст. создается с помощью системы, состоящей из форвакуумного насоса с азотной ловушкой и магнитного электро-разрядного насоса НЭМ-100. Все применяемые вакуумные уплотнения и шлюзы безмасленные. Тем самым удовлетворены высокие требования к чистоте вакуума в рабочем объеме, которые необходимы для нормальной работы кремниевых охлаждаемых детекторов <sup>7</sup>.

### Детекторы

В наших спектрометрах применены два типа детекторов:

- диффузионно-дрейфовые поверхностно-барьерные  $Si(Li)$  детекторы с рабочей площадью  $\sim 1$  см<sup>2</sup> и толщиной чувствительного слоя  $\sim 4$  мкм;

- поверхностно-барьерные  $Si(Au)$  детекторы из высокоомного кремния  $n$ -типа с рабочей площадью  $\sim 1$  см<sup>2</sup> и толщиной чувствительного слоя до 3 мкм.

$p-i-n$  переходы для  $Si(Li)$  -детекторов изготавливались по технологии, описанной в работе <sup>8</sup>. У изготовленных диодов шлифовался оставшийся слой базового материала. После проявления перехода, обезжиривания, химического травления, мойки кристалла и выдерживания в течение суток /для образования окисной пленки/ термическим испарением в вакууме наносился

тонкий /~ 0,1 мк/ слой золота. Далее кристалл упаковывался в тефлоновую оправу, к электродам контактолом /серебряной пастой/ крепились вводы из тонкой / $\phi$  0,1 мм/ медной проволоки. После проверки вольт-амперных и вольт-емкостных характеристик измерялось энергетическое разрешение на  $\alpha$ -частицах и толщина входного окна. Измерение толщины входного окна выполнялось по методу, описанному в работе /9/, под углами 45 и 60°. Проверенные детекторы упаковывались в металлический /обычно латунный/ корпус с винтом М6. Детектор в разрезе показан на рис. 1.

$Si(Au)$ -детекторы изготавливались, испытывались и упаковывались аналогичным образом, исключая только операции диффузии, дрейфа и сошлифовки базового материала.

На рис. 1 приведены типовые характеристики детекторов и зависимость толщины входных окон от приложенного напряжения. Как видно, толщина входного окна больше у детекторов, изготовленных из более высокоомного материала.

#### *Бета-спектрометр с кремниевыми детекторами*

Общий вид спектрометра приводится на рис. 2. Применяемая электроника описана в работе /10/. Для обеспечения оптимальной загрузки спектрометрической системы расстояние источник - детектор можно изменять в больших пределах /от 0,5 до 20 см/. Заметим, что в рабочих измерениях учитывалось влияние телесного угла на отношение  $K'L/MN$ , которое может заметно искажаться из-за совпадений между  $K$ -электронами и  $K_{\alpha}$ -лучами. На рис. 3 приведены спектры комперсионных электронов  $^{152}Eu$  и  $^{207}Bi$ , снятые с помощью различных кремниевых детекторов.

#### *Полупроводниковый бета-спектрометр с однородным магнитным полем*

Для фильтрации фонового излучения при изучении спектров  $\beta$ -частиц изготовлено бездисперсионное устройство, предложенное в работе /6/. Здесь используется движение электронов /позитронов/ по винтовой линии в однородном магнитном поле. Энергетический участок собираемых детектором электронов определяется геометрическими размерами вакуумной камеры и величиной магнитного

поля. Применяя соответствующие диафрагмы и изменяя величину магнитного поля, можно дискриминировать низкоэнергетические электроны и, не перегружая детектор, исследовать более слабые высокоэнергетические переходы.

Новый прибор создан на базе бета-спектрометра с трехкратной фокусировкой на  $540^{\circ} / 111^{\circ} / \text{С}$  помощью полупроводникового выпрямителя ток в обмотках магнита можно менять от 0 до 3а, что соответствует изменению напряженности магнитного поля от 0 до 1500 гаусс. Диаметр вакуумной камеры равен 470 мм, высота - 135 мм. Детектор помещается под источником /рис. 4/, причем защита от прямого попадания излучения осуществляется слоем из  $\text{Pb} / 15 \text{ мм} /$ ,  $\text{Cd} / 2 \text{ мм} /$ ,  $\text{Cu} / 1 \text{ мм} /$ ,  $\text{Al} / 1 \text{ мм} /$ . Возможность дискриминации электронов /позитронов/ ниже определенного порога /зависящего от напряженности магнитного поля/ осуществляется тефлоновым /4 мм/ экраном, расположенным по диаметру на 100мм от стенки камеры. Этот же экран играет роль защиты от частиц противоположного знака, которые должны фокусироваться на поверхность детектора симметрично относительно источника. Существенна роль этого экрана и для уменьшения фона детектора при измерении конверсионных электронов позитронных излучателей, так как прошедшие через подложку источника позитроны фокусируются на обратной части детектора, где аннигилируют.

На рис. 4 показаны проекции моноэнергетических электронов при одном полном шаге. Очевидно, что шаг винта зависит от начального направления траектории, и на детектор попадают частицы, вылетевшие под разными углами относительно плоскости симметрии поля. Выражение для телесного угла устройства можно записать в виде

$$\Omega = \omega_1 \omega_2 = \frac{\delta}{L} \omega_2 = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi r)^2 + A^2}} \omega_2,$$

где  $\omega_1 = \frac{\delta}{L}$  - вертикальный телесный угол, зависящий от высоты

детектора и длины траектории  $L$ ;  $\omega_2$  - горизонтальный телесный угол, геометрическое определение которого сильно затруднено;  $r$  - радиус окружности, по которой движутся регистрируемые частицы;  $A$  - расстояние источник - детектор.

Эффективность спектрометра определяется двумя факторами:

- эффективностью детектора - сравнительно плавная функция от энергии для чувствительных толщин порядка 3-5 мм;
- телесным углом устройства  $|\Omega|$  - функция, сильно зависящая от энергии /т.е. от радиуса кривизны и, следовательно, от величины магнитного поля/.

В связи с этим целесообразной является работа при определенных значениях магнитного поля, что дает возможность пользоваться кривыми относительных эффективностей от калибровочных источников  $^{206}\text{Po}$ - $^{206}\text{Bi}$ ,  $^{160}\text{Er}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  и т.д./ Абсолютная эффективность спектрометра для  $E_{\beta}$ -1000 кэв и  $I = 2,0$  а равна  $0,2\%$  от  $4\pi$ . На рис. 5 приведен спектр конверсионных электронов  $^{206}\text{Po}$ - $^{206}\text{Bi}$ , снятый в разных режимах работы спектрометра.

### Определение разности масс $^{169}\text{Lu}$ - $^{169}\text{Yb}$

Радиоактивный распад  $^{169}\text{Lu}$  /  $T_{1/2} = 32$  ч / изучался достаточно полно <sup>18,19/</sup>, в то время как позитронное излучение исследовалось только в начальных экспериментах <sup>20/</sup>. Была обнаружена одна компонента с граничной энергией  $1250 \pm 30$  кэв. При построении схемы распада и вычислении приведенных вероятностей при  $E_{\beta} = 1270 \pm 30$  кэв появились сомнения относительно правильности этой величины. Поэтому нами проведено исследование спектра позитронного излучения.

Изотоп  $^{169}\text{Lu}$  получен в реакции глубокого расщепления тантала протонами с энергией 660 Мэв на синхротронном ОИЯИ, с последующим химическим и изотопным разделением на электромагнитном масс-сепараторе. Спектр позитронов изучался с помощью бета-спектрометра с  $\text{Si}(\text{Li})$  -детектором в однородном магнитном поле. На рис. 6 приведен график Кюри-Ферми и соответствующие ему компоненты:  $E_{\beta_1} = 1800 \pm 100$  кэв,  $E_{\beta_2} = 1320 \pm 50$  кэв и  $E_{\beta_3} = 850 \pm 50$  кэв, причем  $I_{\beta_1} : I_{\beta_2} : I_{\beta_3} = 1 : 5 : 5$ .

При условии, что компонента  $\beta_1$  заселяет основное состояние  $^{169}\text{Yb}$ , а компонента  $\beta_3$  - состояние  $960$  кэв  $/7/2^- /^{19/}$ , разность масс  $^{169}\text{Lu}$ - $^{169}\text{Yb}$  равна

$$\Delta M (^{169}\text{Lu} - ^{169}\text{Yb}) = 2840 \pm 50 \text{ кэв.}$$

Отсюда вытекают следствия:

- в некоторой степени изменяются значения указанных приведенных вероятностей в работе <sup>19/</sup>;

- полученное экспериментальное значение  $\epsilon/\beta^+ = 76$  для уровня 960 кэВ хорошо согласуется с теоретическим значением для разрешенного /первого порядка запрещения/ бета-перехода

$$\epsilon/\beta^+ = 78^{+20}_{-12};$$

- из теоретического значения  $\epsilon/\beta^+$  для основного состояния  $^{162}\text{Yb}$  можно определить долю  $\epsilon$ -захвата в основное состояние: 0,46%;

- без дополнительных результатов по  $\beta^+-\gamma$  совпадениям размещение компоненты  $\beta_2$  затруднительно.

### Заключение

Созданные бета-спектрометры с кремниевыми детекторами эксплуатировались в течение двух лет. С их помощью были получены экспериментальные данные о спектрах конверсионных электронов и позитронов ряда изотопов:  $\text{Tb}$ ,  $\text{Ru}$ ,  $\text{At}$ ,  $^{194}\text{Tl}$ ,  $^{157}\text{Ho}$ ,  $^{173}\text{Lu}$  /12-17/.

Авторы выражают благодарность Л.Ермолиной и В.Жуковой за помощь в изготовлении детекторов, а также С.Минькову и Г.Илиеву за изготовление вакуумной системы и камер спектрометра.

### Литература

1. R.F.Wood et al. *N.I. and Meth.*, 94, 245 (1971).
2. O.Meyer. *Nucl. Instr. and Meth.*, 33, 164 (1965).
3. J.Walbers. ORTEC, Private communication.
4. E.B.Shera, M.P.Bedesam and K.Y.Casner. *Rev.Sci.Instr.*, 38, 1110-1114 (1967).
5. R.L.Wadson et al. *Rev.Sci.Instr.*, 38, 905 (1967).
6. P.Paris, J.Treherne. *Rev.Sci.Appl.*, 4, 291 (1969).
7. Б.Амов, Ц.Вылов и др. ОИЯИ, Дб-5783, Дубна, 1971.
8. Л.П.Бабенко, Б.М.Головин, Ван Чжень-ва, И.М.Иглицик, Б.П.Осипенко, А.И.Сидоров. ОИЯИ, 6-796, Дубна, 1961.
9. Дж.Дирили, Д.Нортрон. Полупроводниковые счетчики ядерного излучения. Мир, 1966.
10. Ц.Вылов, И.Н.Егошин и др. ОИЯИ, 13-6440, Дубна, 1972.
11. Б.С.Джеленов, Ж.Желев и др. ОИЯИ, 587, Дубна, 1960.
12. Ц.Вылов и др. ОИЯИ, Р6-6511, Дубна, 1972.
13. В.П.Афанасьев и др. Программа и тезисы докладов XXII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 164, Наука, Ленинград, 1972.
14. Ц.Вылов и др. ОИЯИ, Р6-6512, Дубна, 1972.



15. Б.Амов и др. ОИЯИ, Р6-6250, Дубна, 1972.
16. Ц.Вылов и др. ОИЯИ, Р6-6441, Дубна, 1972.
17. Ц.Вылов и др. Изв. АН СССР, сер.физ., п. XXXVI, №4, 718, 1972.
18. В.А.Балалаев и др. Изв. АН СССР, сер.физ., 34, 1, 1970.
19. Н.А.Бонч-Осмоловская и др. Препринт ОИЯИ, Р6-6649, Дубна, 1972.
20. Б.С.Джелепов и др. Изв. АН СССР, сер.физ., 24, 802, 1960.

*Рукопись поступила в издательский отдел  
6 декабря 1972 года.*

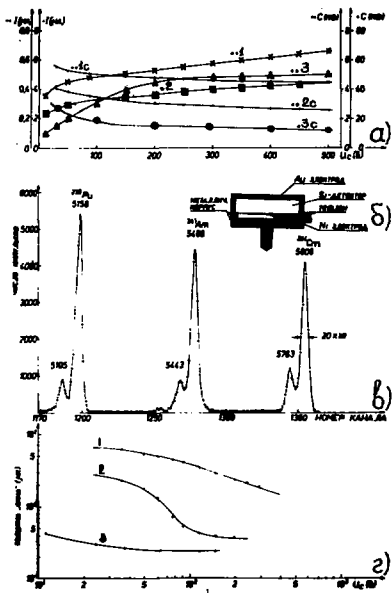


Рис. 1. Характеристики и упаковка кремнивых детекторов. "а" - вольт-амперные и вольт-емкостные характеристики: 1 в 1с - Si(Au)-детектора из высокоомного кремния / $\rho$  = 150 ком/; 2 и 2с - Si(Li)-детектора; 3 и 3с - Si(Au)-детектора / $\rho$  = 10 ком/. "б" - упакованный детектор в разрезе. "в" - альфа-спектры, снятые с помощью Si(Li)-детектора, "г" - зависимость толщины входного окна от приложенного к детектору напряжения. 1 - для Si(Au)-детектора из высокоомного кремния / $\rho$  = 150 ком/, 2 - для Si(Li)-детектора, 3 - для Si(Au)-детектора / $\rho$  = 10 ком/.

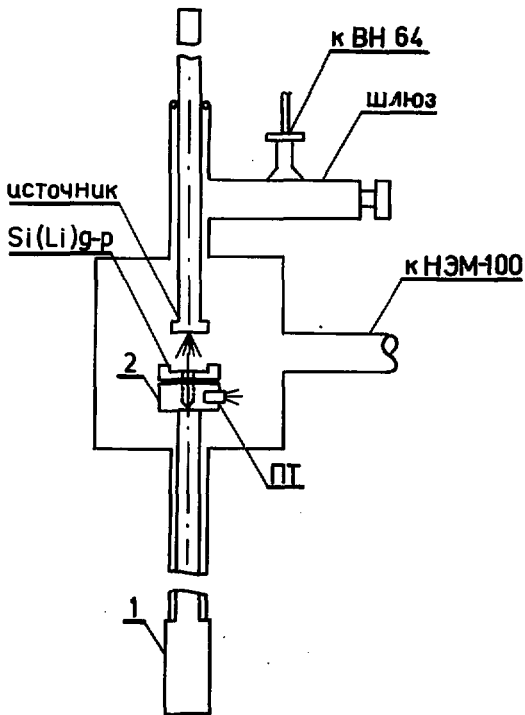


Рис. 2. Общий вид бета-спектрометра с полупроводниковым детектором.

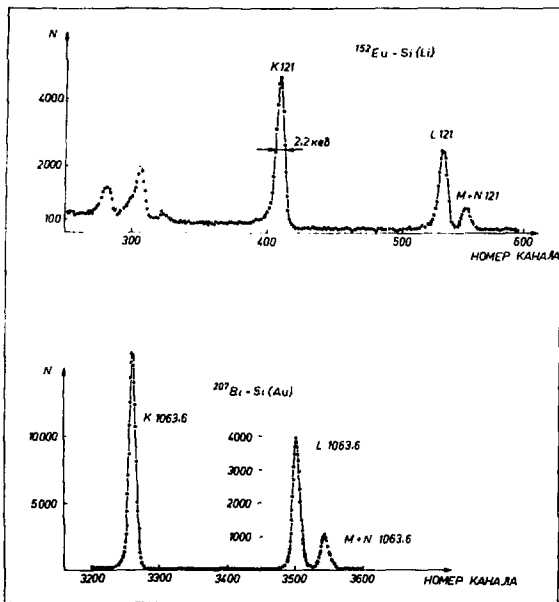


Рис. 3. Спектры конверсионных электронов  $^{152}\text{Eu}$  и  $^{207}\text{Bi}$ , снятые с помощью различных кремниевых детекторов.

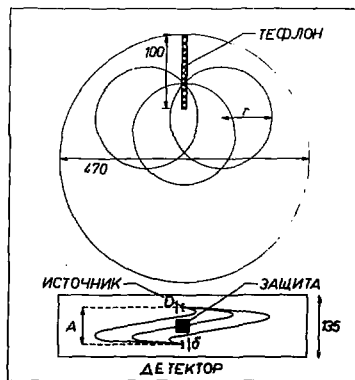


Рис. 4. Проекция моноэнергетических электронов в однородном магнитном поле при одном полном шаге.



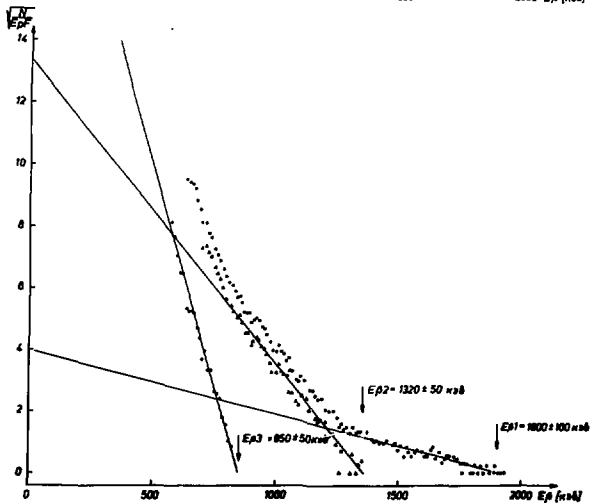
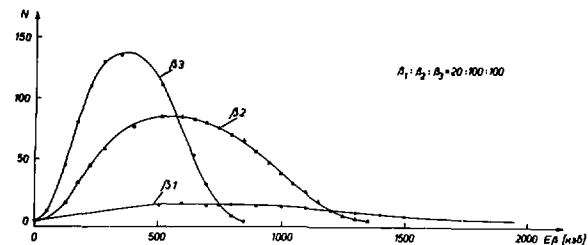


Рис. 6. График Кюри-Ферми для спектра позитронов при распаде  $^{169}\text{Lu}$ .