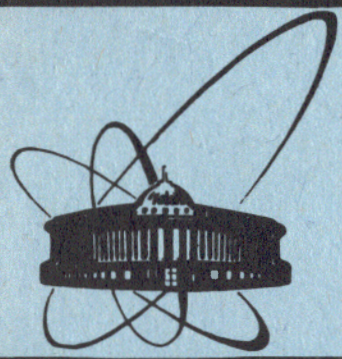


341

84-711



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

С 344.1 м

6-84-711

231/85

И.Адам, Д.Венос, А.Куклик, Б.П.Осипенко,  
В.Г.Сандуковский, А.Шпалек

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
В МАГНИТНОМ  $\beta$ -СПЕКТРОМЕТРЕ

Направлено в журнал  
"Nuclear Instruments and Methods"

1984

## ВВЕДЕНИЕ

Основным преимуществом магнитных  $\beta$ -спектрометров перед полупроводниковыми является их высокая избирательность, т.е. способность выделять анализируемые электроны от электронов других энергий и сопутствующих излучений изучаемого источника. Этот факт при использовании хорошей защиты между источником и детектором позволяет получать высокое отношение эффект/фон. Кроме того, магнитные спектрометры обладают хорошим разрешением по импульсу  $\Delta p/p = 0,05 \pm 0,3\%$  /соответствующее энергетическое разрешение  $\Delta E/E = \Delta p/p(1 + \frac{m_0 c^2}{m_0 c^2 + E})/$ . Так, например, для спектрометра с двойной фокусировкой типа  $\pi\sqrt{2}/r_0 = 30 \text{ см}^{1/1}$  можно получить  $\Delta p/p = 0,2\%$  при светосиле порядка  $10^{-2}$ , что сравнимо с характеристиками полупроводниковых спектрометров.

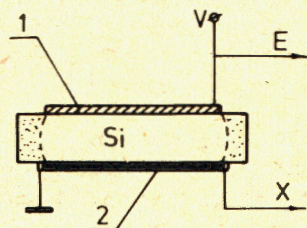
Главный недостаток магнитных спектрометров, если не используется координатная регистрация, - это одноканальный способ измерения электронных спектров. Применение полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов может существенным образом устранить этот недостаток при сохранении разрешающей способности спектрометра. Настоящая работа посвящена изучению возможностей использования в фокальной плоскости магнитного  $\beta$ -спектрометра типа  $\pi\sqrt{2}$  кремниевых позиционно-чувствительных детекторов <sup>2/</sup>.

### 1. ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР

В фокальной плоскости спектрометра использовался полупроводниковый позиционно-чувствительный детектор, координатная информация с которого получалась за счет деления создаваемого  $\beta$ -частицами заряда на резистивном электроде детектора /рис.1/.

Рис.1. Структура позиционно-чувствительного детектора.

- 1 - выпрямляющий контакт,
- 2 - резистивный слой ( $R_D$ ).



Использовались два типа детекторов с резистивными слоями, изготовленными различными методами: имплантацией и диффузией. Первый детектор /PI 60/ с чувствительной областью  $32 \times 10 \times 1$  мм был изготовлен из кремния  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $18 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ . Образцы кремния вначале обрабатывались по технологии изготовления поверхностно-барьерных детекторов, затем проводилась имплантация ионов фосфора для создания резистивного слоя. Имплантация ионов /с энергией  $18 \text{ кэВ}$ / осуществлялась с использованием электростатического и механического сканирования пучка по поверхности образца. В итоге неоднородность сопротивления по длине резистивного слоя была  $< 1\%$ . Отжиг образцов проводился в вакууме при температуре  $380^\circ\text{C}$  в течение 15 мин. В целях повышения надежности омические контакты на краях резистивного слоя имели шлифованную поверхность, а доза внедряемых ионов на этих участках была увеличена до  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  при энергии  $8 \text{ кэВ}$ . После отжига резистивный слой защищался кислотостойким материалом и для создания  $p$ - $n$ -перехода проводилось травление образца с последующим напылением золота.

Второй испытываемый детектор /PD 45/ был изготовлен из кремния  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $\sim 6 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ . Резистивный слой получен с помощью метода низкотемпературной диффузии лития <sup>3</sup>/ . Размеры чувствительной области детектора PD 45 -  $30 \times 8 \times 0,45 \text{ мм}$ .

Координатное разрешение ( $\Delta_x$ ) непрерывных позиционно-чувствительных детекторов длиной  $l$  для данной энергии  $E$  исследуемых частиц определяется шумом позиционного канала  $\Delta E_x$  ( $\Delta_x = \Delta E_x \cdot l / E$ ), который, как известно, подчиняется следующей зависимости <sup>4</sup>/:

$$\Delta E_x \propto (T\tau / R_D)^{1/2}, \quad /1/$$

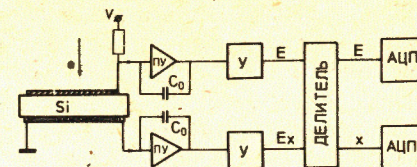
где  $T$  - температура;  $\tau$  - время формирования сигналов основным усилителем /как правило,  $\tau = 0,5 \div 3 \text{ мкс}$ /;  $R_D$  - сопротивление резистивного слоя. Для получения линейного отклика детекторов необходимо выполнение условия <sup>5</sup>/:

$$R_D \cdot C_D \leq 2\tau. \quad /2/$$

Емкость детектора  $C_D$  в нашем случае определяется его геометрическими размерами при напряжении полного обеднения чувствительной области детектора. При изготовлении резистивных слоев параметры имплантации, отжига и диффузии выбирались с учетом <sup>1</sup>/ и <sup>2</sup>/ . Детектор PI 60 имел величину  $R_D = 20 \text{ кОм}$ , PD 45 -  $R_D = 50 \text{ кОм}$ .

В процессе работы в фокальной плоскости  $\beta$ -спектрометра детекторы охлаждались до  $T = 170 \text{ К}$ . Охлаждение осуществлялось жидким азотом через медный хладопровод. Съем сигналов с детектора проводился с помощью неохлаждаемой электроники. Блок-схема съема сигналов показана на рис.2. В энергетическом и позицион-

Рис.2. Блок-схема амплитудного метода съема сигналов с позиционно-чувствительного детектора.



ном каналах использовались предусилители ORTEC 142А и ORTEC 142В соответственно, усилители ORTEC 452 и аналоговый делитель ORTEC 464.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Испытания детекторов в составе магнитного  $\beta$ -спектрометра  $\pi\sqrt{2}^{-1/1}$  проводились в энергетическом диапазоне  $300 \div 1000 \text{ кэВ}$  с использованием источников электронов внутренней конверсии /ЭВК/ <sup>152</sup>Eu, <sup>137</sup>Cs и <sup>207</sup>Pb. Измерялось координатное разрешение, т.е. ширина аппаратной линии на полувысоте ( $\Delta_x$ ) и соответствующее ему импульсное разрешение:

$$\Delta r / r = \Delta_x / 4r_0, \quad /3/$$

где  $r_0 = 30 \text{ см}$  - равновесная орбита магнитного спектрометра.

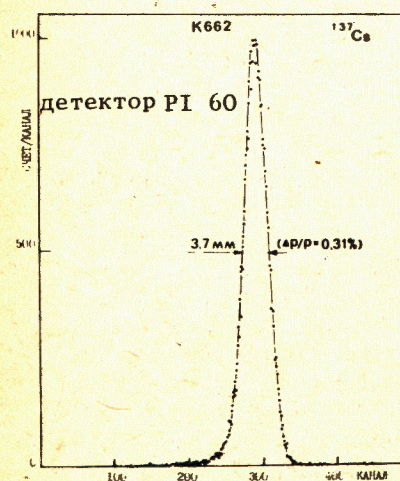


Рис.3. Фрагмент аппаратного спектра ЭВК (<sup>137</sup>Cs), полученного с помощью детектора PI 60.

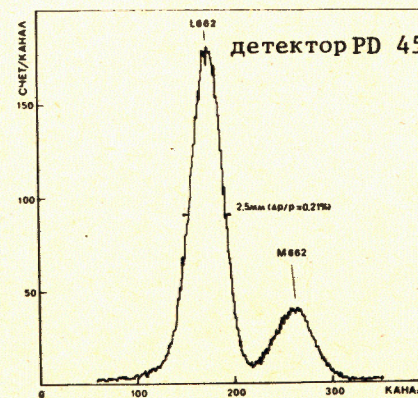


Рис.4. Фрагмент аппаратного спектра ЭВК (<sup>137</sup>Cs), полученного с помощью детектора PD 45.

На рис.3 показана аппаратурная линия К 662  $^{137}\text{Cs}$ , полученная с помощью детектора PI 60. Видно, что это почти идеальный гауссиан, лежащий на очень низком фоне /-2 имп./мин/, который в 5 раз ниже фона, получаемого в одноканальном режиме с ранее использованным счетчиком Гейгера-Мюллера. Отметим при этом, что эффективность измерения за счет многоканальности увеличилась более чем в 50 раз. Рис.4 демонстрирует аппаратурные линии L, M 662, полученные с детектором PD 45. Этот детектор имел лучшее координатное разрешение, но из-за недостаточной толщины чувствительной области /0,45 мм/ эффективность регистрации ЭВК  $^{137}\text{Cs}$  была значительно меньше /-20%/ , в отличие от PI 60 /-80%/ . Поэтому PD 45 в основном использовался для измерений низкоэнергетических электронов. Результаты измерения разрешающей способности спектрометра с детекторами PI 60 и PD 45 для различных энергий ЭВК приведены в табл.1.

Таблица 1

Источник	Энергия	Детектор PI 60			Детектор PD 45		
		$\Delta_x$ /мм/	$\Delta p/p$ / % /	$\Delta E$ /кэВ/	$\Delta_x$ /мм/	$\Delta p/p$ / % /	$\Delta E$ /кэВ/
$^{152}\text{Eu}$	K344	-	-	-	4,7	0,39	1,9
$^{137}\text{Cs}$	K662	3,7	0,31	2,8	2,8	0,23	2,1
$^{207}\text{Bi}$	K1064	3,1	0,26	3,4	-	-	-

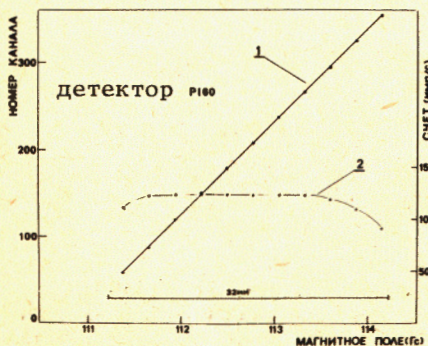


Рис.5. Зависимости положения пика ЭВК /1/ и интенсивности /2/ от величины магнитного поля спектрометра.

Отметим, что исследуемые источники ЭВК давали с используемой в спектрометре диафрагмой / $\Omega = 0,64\% 4\pi$ / электронный фокус на поверхности детектора шириной 2 мм.

Одной из важных характеристик любого спектрометра является линейность отклика. В нашем случае нелинейность не превышала 1%. На рис.5 приведена зависимость положения пика от величины магнитного поля спектрометра, отражающая нелинейность прибора. Здесь же показана зависимость

интенсивности аппаратурной линии от позиции на детекторе. Видно падение интенсивности при прохождении электронного фокуса через края детектора.

### УЧЕТ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

При работе с непрерывными полупроводниковыми позиционно-чувствительными детекторами желательно знать влияние многократного рассеяния электронов в чувствительной области детектора на его координатное разрешение. Для оценки вклада этого эффекта в разрешение были проведены расчеты, симулирующие методом Монте-Карло рассеяние электронов в кремнии. Метод расчета был ранее описан в /8/. Предполагалось нормальное падение электронов данной энергии на кремниевую пластину заданной толщины. Во время расчетов определялись потери энергии электронами на различных расстояниях X от места падения на поверхность кремния. Расчеты были выполнены для  $3 \cdot 10^8$  электронных траекторий. Типичный результат такого расчета для электронов с энергией 624 кэВ /K662  $^{137}\text{Cs}$  /, падающих на пластину кремния толщиной 1,0 мм, показан на рис.6. В табл.2 приведены величины FWHM /ширина на полувысоте/ и FWTM /ширина на 1/10 высоты/, вычисленные для многократного рассеяния электронов в кремнии толщиной 0,45 и 1,00 мм. Выбранная в расчете толщина кремниевых пластин соответствует чувствительной области PD 45 и PI 60 соответственно.

Рис.6. Распределение вероятности поглощения электронов с энергией 624 кэВ в зависимости от расстояния X до места падения на пластину кремния толщиной 1,0 мм, полученное с помощью метода Монте-Карло /ось ординат в произвольных единицах/.

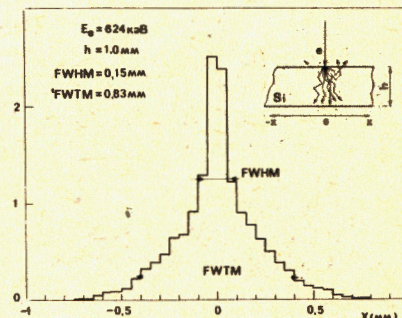


Таблица 2

Результаты расчетов по методу Монте-Карло рассеяния электронов в кремнии

$E_e$ кэВ	$h = 0,45$ мм			$h = 1,00$ мм		
	FWHM /мм/	FWTM /мм/	$\mu_a^*$	FWHM /мм/	FWTM /мм/	$\mu_a^*$
300	0,13	0,4	0,83	-	-	-
624	0,13	0,9	0,31	0,15	0,83	0,83

\*  $\mu_a$  - коэффициент полного поглощения электронов в кремнии.

Уширение позиционной линии за счет многократного рассеяния вносит определенный вклад в величину координатного разрешения. Результаты, приведенные в табл.2, дают представление о пределах возможного координатного разрешения кремниевых детекторов при регистрации электронов энергией 300-600 кэВ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показана возможность использования непрерывных позиционно-чувствительных детекторов для спектрометрии электронов магнитным  $\beta$ -спектрометром. В области энергий 300-1000 кэВ описанная система позволяет получать разрешение  $\Delta p/p = 0,2 \pm 0,3\%$  с эффективностью регистрации электронов детектором ~80%. За счет многоканальности измерения эффективность спектрометрии увеличена более чем в 50 раз по сравнению с ранее использовавшимся одноканальным методом. При этом фон снизился в ~5 раз. Это открывает новые возможности использования спектрометра такого типа в режиме на пучке ускорителя для экспериментов по измерению времени жизни возбужденных состояний ( $T_{1/2}$ ) в наносекундной области методом задержанных совпадений, по измерению  $T_{1/2}$  методом доплеровского сдвига или доплеровского уширения линий ЭВК и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Plajner Z., Maly L. Cas.Fyz., 1960, 10, p.47.
2. Сандуковский В.Г. ОИЯИ, 13-82-90, Дубна, 1982.
3. Бельцаж Е., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г. ОИЯИ, 13-11355, Дубна, 1978; ОИЯИ, 13-12766, Дубна, 1979.
4. Elad E., Sareen R. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1974, NS-21, p.75.
5. Doehring A., Kalbitzer S., Melzer W. Nucl.Instr. and Meth., 1968, 59, p.40.
6. Spalek A. Nucl.Instr. and Meth., 1982, 198, p.399.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 ноября 1984 года.

СООБЩЕНИЯ, КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ, ПРЕПРИНТЫ И СБОРНИКИ ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИЙ, ИЗДАВАЕМЫЕ ОБЪЕДИНЕННЫМ ИНСТИТУТОМ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ЯВЛЯЮТСЯ ОФИЦИАЛЬНЫМИ ПУБЛИКАЦИЯМИ.

Ссылки на СООБЩЕНИЯ и ПРЕПРИНТЫ ОИЯИ должны содержать следующие элементы:

- фамилии и инициалы авторов,
- сокращенное название Института /ОИЯИ/ и индекс публикации,
- место издания /Дубна/,
- год издания,
- номер страницы /при необходимости/.

Пример:

1. Первушин В.Н. и др. ОИЯИ, P2-84-649, Дубна, 1984.

Ссылки на конкретную СТАТЬЮ, помещенную в сборнике, должны содержать:

- фамилии и инициалы авторов,
- заглавие сборника, перед которым приводятся сокращенные слова: "В кн."
- сокращенное название Института /ОИЯИ/ и индекс издания,
- место издания /Дубна/,
- год издания,
- номер страницы.

Пример:

Колпаков И.Ф. В кн. XI Международный симпозиум по ядерной электронике, ОИЯИ, Д13-84-53, Дубна, 1984, с.26.

Савин И.А., Смирнов Г.И. В сб. "Краткие сообщения ОИЯИ", № 2-84, Дубна, 1984, с.3.

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.

Адам И. и др.

6-84-711

Использование полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов в магнитном  $\beta$ -спектрометре

Экспериментально показана возможность использования непрерывных позиционно-чувствительных полупроводниковых детекторов для спектрометрии электронов магнитным бета-спектрометром типа  $\pi\sqrt{2}$ . Описана технология изготовления используемых позиционно-чувствительных детекторов из кремния с различными резистивными слоями. В области энергий электронов 300-1000 кэВ получено разрешение спектрометра по импульсу  $\Delta p/p = 0,2 \pm 0,3\%$ . Эффективность измерения по сравнению с одноканальным методом увеличена более чем в 50 раз. Методом Монте-Карло проведены расчеты многократного рассеяния электронов в кремнии и показано его влияние на координатное разрешение детекторов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод Г.Г.Сандуковской

Adam J. et al.

6-84-711

Application of Position-Sensitive Semiconductor Detectors in Magnetic Beta-Spectrometer

The possibility to use the continuous position-sensitive semiconductor detectors for the magnetic beta-spectrometer of  $\pi\sqrt{2}$ -type is shown. The technique of fabrication of silicon position sensitive detectors with different resistive layers is described. The momentum resolution of spectrometer for the electron energy region of 300  $\div$  1000 keV is  $\Delta p/p = 0.2 \pm 0.3\%$ . The spectrometer measuring efficiency is increased by more than 50 times in comparison with the single-channeling method. The Monte-Carlo calculations of electron multiple scattering in silicon is made and its influence on position resolution is shown.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984