

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХСТОРОННЕГО СТРИПОВОГО Si-ДЕТЕКТОРА В ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ СЕПАРАТОРА ВАСИЛИСА

© 2011 г. А. В. Исаев*, А. В. Ерёмин*, Н. И. Замятин**, А. Н. Кузнецов*,
О. Н. Малышев*, А. И. Свирихин*, М. Л. Челноков*, В. И. Чепигин*,
К. Hauschild***, A. Lopez-Martens***, O. Dorvaux****

Объединенный институт ядерных исследований

**Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова*

***Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина*

Россия, 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

Institut national de physique nucléaire et de physique des particules –

Centre national de la recherche scientifique (IN2P3–CNRS)

****Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse, F-91405, Orsay Campus, France*

***** Institut de recherches subatomiques de strasbourg, F-67037, Strasbourg, France*

E-mail: isaev@jinr.ru

Поступила в редакцию 09.06.2010 г.

Описаны новый двухсторонний многостриповый Si-детектор (48 × 48 стрипов) и первые результаты его использования в экспериментах по спектроскопии трансфермиевых элементов на сепараторе ВАСИЛИСА.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы α -, β -, γ -спектроскопия с применением пучков тяжелых ионов и сепараторов ядер отдачи интенсивно используется для получения данных о свойствах радиоактивного распада и внутренней структуре ядер в плохо изученной области изотопов с $Z \geq 100$ [1]. Работы по изучению свойств радиоактивного распада изотопов тяжелых элементов ведутся во многих мировых научных центрах, таких как GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) (Дармштадт, Германия), RIKEN (Rikagaku Kenkyusho) (Вако, Япония), Университет Ювяскюля (Ювяскюля, Финляндия), GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) (Канн, Франция), LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) (Беркли, США) и др.

В ОИЯИ (Дубна, Россия) в 2004 г. стартовал совместный с IN2P3 (Франция) проект по спектроскопии трансфермиевых элементов на сепараторе ВАСИЛИСА. В рамках этой международной коллаборации была создана многофункциональная детектирующая система GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the Electromagnetic Analyser) [2].

Комбинированная установка GABRIELA располагается в фокальной плоскости сепаратора ВАСИЛИСА [3] и включает в себя 7 детекторов из сверхчистого германия для регистрации рентгеновского излучения и γ -квантов, а также сборку из полупроводниковых стриповых Si-детекторов,

обеспечивающих регистрацию α -, β -частиц и осколков деления в геометрии, близкой к 4л. Для увеличения эффективности регистрации α - и β -частиц, а также осколков деления, вылетевших из фокального Si-детектора, вокруг последнего в обратной полусфере дополнительно смонтированы четыре боковых стриповых детектора, которые образуют “колодец” [4]. Внешний вид установки GABRIELA показан на рис. 1. Один Ge-детектор помещен позади фокального стрипового Si-детектора, остальные шесть детекторов расположены вокруг камеры с кремниевыми детекторами.

С использованием системы GABRIELA был выполнен ряд экспериментов, направленных на детальное изучение свойств радиоактивного распада и особенностей ядерной структуры изотопов Ra, Fm, Md, No и Lr, основные результаты которых представлены в работах [5–8]. В описанных экспериментах конверсионные электроны, испускаемые в процессе радиоактивного распада исследуемых изотопов, регистрировались “боковыми” детекторами. Фокальный детектор (размер 60 × 60 мм, 16 резистивных позиционно-чувствительных стрипов), в который имплантировались ядра отдачи, использовался для регистрации α -частиц и осколков спонтанного деления с пространственным разрешением $\sim 1 \times 3.6 \text{ мм}^2$ (гранулярность 928 пикселей). Вдоль направления отдельно взятого стрипа пространственное разре-

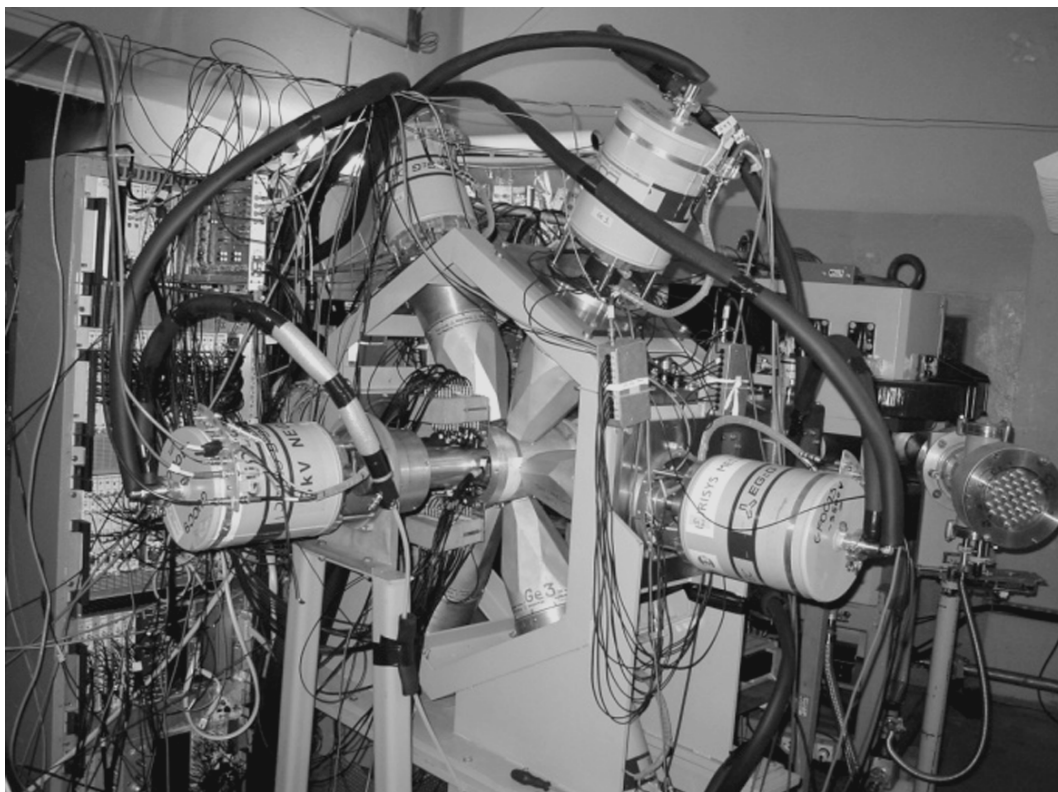


Рис. 1. Детектирующая сборка GABRIELA.

шение ухудшалось пропорционально росту загрузки детектора. Плохое пространственное разрешение затрудняло анализ корреляционных зависимостей между имплантированным в детектор ядром отдачи и частицами от его последующих распадов. Кроме того, свойства указанного фокального детектора не позволяли во время эксперимента регистрировать конверсионные электроны с энергиями 30–300 кэВ с разрешением на уровне 4–5 кэВ.

Для улучшения пространственного разрешения и повышения эффективности регистрации конверсионных электронов с хорошим энергетическим разрешением фокальный детектор был заменен на двухсторонний стриповый Si-детектор (48 × 48 стрипов) размером 60 × 60 мм. Позиционное и энергетическое разрешение такого детектора существенно лучше, чем детектора с резистивными стрипами, а уровень шумов меньше. Настоящая работа посвящена описанию результатов первых экспериментов с новым фокальным детектором.

СБОРКА ИЗ СТРИПОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Детектирующая сборка из полупроводниковых Si-детекторов (“колодец”) представляет

собой фокальный двухсторонний (48 × 48)-стриповый детектор (рис. 2а), по периметру которого расположены четыре боковых 32-стриповых детектора. Внешний вид сборки показан на рис. 2б.

Все кристаллы кремниевых стриповых детекторов были изготовлены по планарной технологии в НИИ МВ (Зеленоград). Топология кремниевых стриповых детекторов была разработана в НИИ МВ совместно с ЛФВЭ ОИЯИ (Дубна).

Двухсторонний стриповый кремниевый детектор имеет 48 × 48 взаимно перпендикулярных стрипов, его габаритные размеры 60 × 60 мм, толщина 300 ± 15 мкм, чувствительная область 58 × 58 мм. Рабочее напряжение детектора 100 В при напряжении полного обеднения 60 В. Пробивное напряжение более 200 В. Ниже приведены характеристики стрипов.

	Лицевая сторона p^+ -стрипа	n^+ -стрип
Ширина, мкм	1148	972
Шаг, мкм	1208	1207
Зазор между соседними стрипами, мкм	40 (с инверсией) 60 (без инверсии)	235

Заметим, что емкость стрипа при напряжении полного обеднения составляет ~22 пФ, а темно-

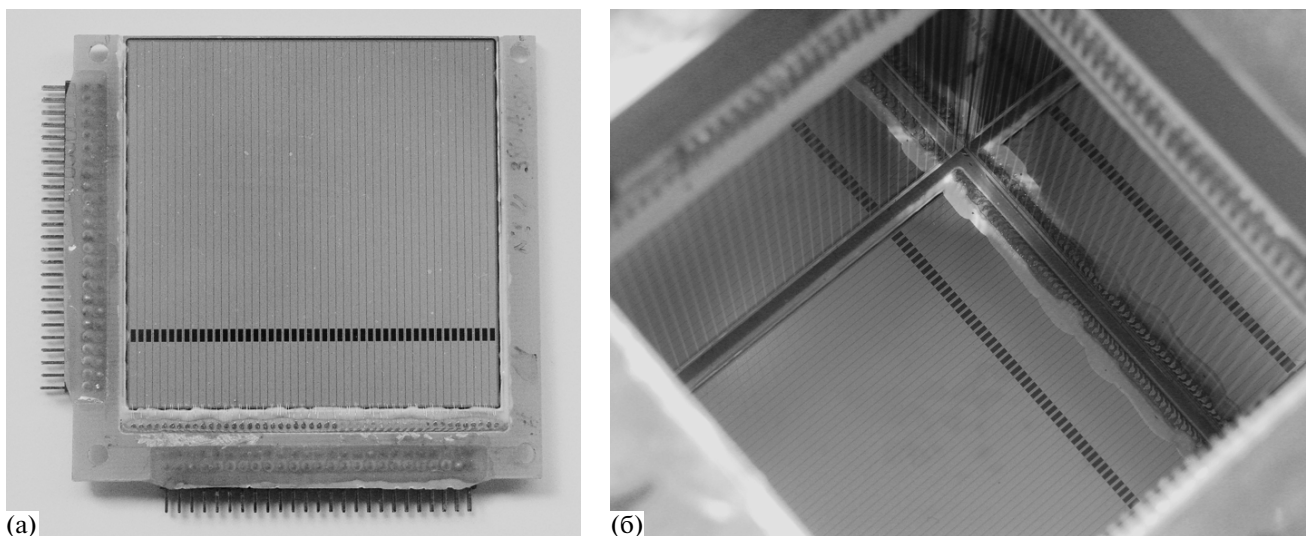


Рис. 2. Фокальный (48 × 48)-стриповый детектор, вид со стороны p^+ -стрипов (а) и сборка из полупроводниковых детекторов, вид сверху (б).

вой ток одного стрипа детектора – 20 нА при напряжении 100 В и температуре 20°С.

Шаг размножения p^+ -стрипов больше, чем n^+ -стрипов, поскольку активная площадь p^+ -стороны, откуда растет область пространственного заряда, должна быть больше активной площади n^+ -стороны с учетом возможной несовместности сторон (до 30 мкм). Детектор имеет систему охранных p^+ -колец, расположенных по периметру его чувствительной площади и предназначенных для снижения поверхностных токов. Согласно условиям эксперимента, охранные кольца могут либо находиться под плавающим потенциалом, либо на них подается приложенный к детектору потенциал. Детекторы собраны на печатной плате с двумя разъемами; стрипы детектора соединены с контактами печатной платы методом ультразвуковой сварки. Разработка конструкции, сборка и тестирование детекторных модулей проводились в ЛФВЭ ОИЯИ.

Двухсторонний стриповый детектор измеряет две координаты падающих на детектор частиц в прямоугольной системе координат, так как стрипы на противоположных сторонах детектора взаимно ортогональны. Пространственное разрешение фокального детектора составляет $\sim 1.208 \times \times 1.208 \text{ мм}^2$ для обеих сторон детектора.

Для создания контакта с минимальным электрическим сопротивлением с имплантированной p^+ -областью стрипы детектора запылены слоями алюминия, что позволяет улучшить быстродействие. На каждом p^+ -стрипе на “лицевой” стороне имеется окно без алюминиевой металлизации, через которое можно импульсно подавать свет

для тестирования собранного детектора. Толщина алюминиевой металлизации стрипов лицевой и обратной сторон детектора составляет 0.7 и 1 мкм соответственно.

Из-за алюминиевой металлизации на поверхности стрипов энергетическое разрешение отдельно взятого стрипа фокального детектора для α -частиц с энергией 5.499 МэВ от ^{238}Pu -источника, удаленного на расстояние $\sim 5 \text{ см}$, составляет $\sim 25 \text{ кэВ}$. Однако в реальных экспериментальных условиях, когда прошедшие сепарацию ядра отдачи имплантируются в фокальный детектор на глубину $\sim 3\text{--}5 \text{ мкм}$ и лишь затем испытывают α -распад, энергетическое разрешение детектора составляет $\sim 15 \text{ кэВ}$ (например, см. рис. 3).

Разрешение отдельно взятого стрипа фокального детектора для β -частиц с энергией 322 кэВ от ^{133}Ba -источника составляет $\sim 5.5 \text{ кэВ}$ (рис. 4). Фокальный детектор позволяет с хорошим разрешением регистрировать конверсионные электроны, образующиеся в процессе девозбуждения ядра. Это важно для уточнения схемы уровней возбужденного тяжелого ядра и возможных переходов между ними, а также для подтверждения истинности найденных событий с корреляцией между ядрами отдачи и γ -квантами от их распадов.

В качестве боковых детекторов используются односторонние 32-стриповые детекторы толщиной 700 мкм с габаритными размерами $65 \times 65 \text{ мм}$ и активной площадью $61 \times 61 \text{ мм}^2$. Каждые четыре стрипа боковых детекторов соединены между собой для экономии. Энергетическое разрешение бокового детектора (стрипы соединены по четы-

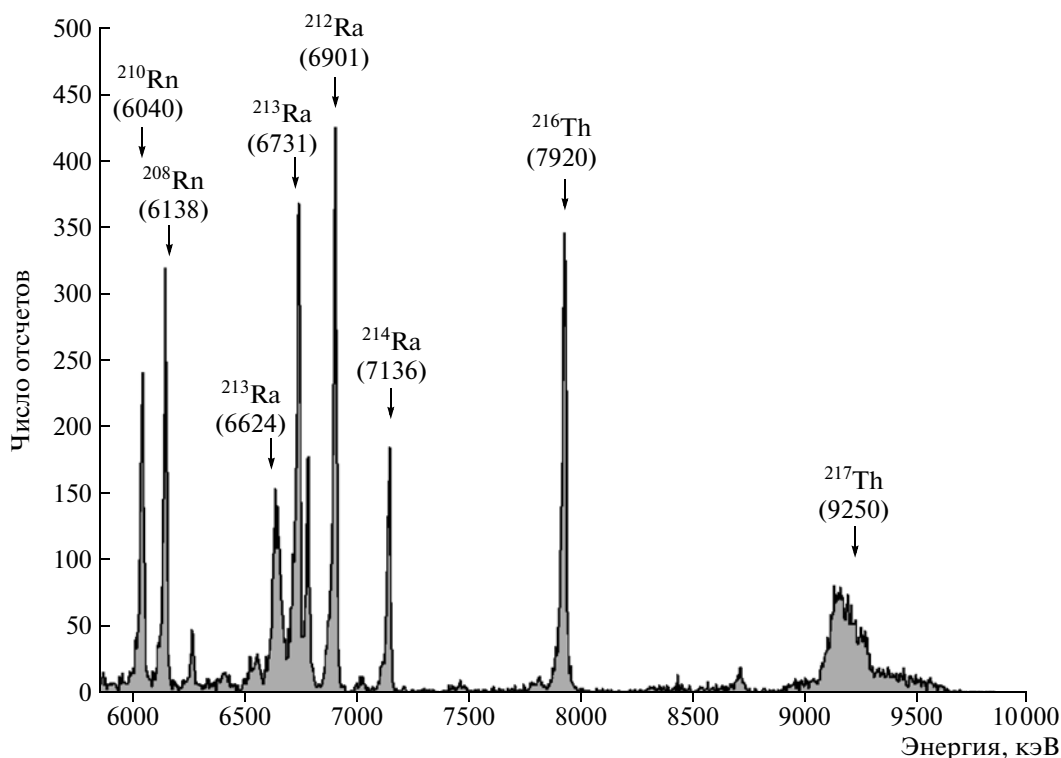


Рис. 3. Спектр α -частиц, полученный с отдельно взятого стрипа лицевой стороны фокального детектора. Калибровочная реакция $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb} \rightarrow ^{222}\text{Th}^*$.

ре) для α -частиц от ^{238}Pu -источника с энергией 5.499 МэВ составляет ~ 25 кэВ, а для отдельно взятого стрипа ~ 15 кэВ. Энергетическое разрешение бокового детектора для β -частиц от ^{133}Ba -источника с энергией 322 кэВ составляет ~ 12 кэВ, а для отдельно взятого стрипа ~ 6 кэВ. При регистрации частиц, вылетевших с фокального детектора, энергетическое разрешение боковых детекторов будет существенно хуже из-за значительного разброса потерь энергии частицами в приповерхностных слоях фокального и боковых детекторов, обусловленного широким диапазоном углов вылета из фокального детектора.

Эффективность регистрации α -частиц и осколков деления сборкой из полупроводниковых Si-детекторов составляет $\sim 83\%$. Для β -частиц эффективность регистрации будет меньше, $\sim 75\%$, поскольку в кремнии длина пробега β -частиц с энергией более 500 кэВ превышает толщину фокального детектора.

Комплект электроники для сбора и усиления сигналов со стрипов содержит: 16-канальные зарядово-чувствительные предварительные усилители; усилители со встроенными мультиплексорами, содержащие по 16 трактов для сигналов от α - и β -частиц (или от α -частиц и осколков спонтанного деления); дополнительные линейные усилители; регистратор, содержащий по четыре

13-разрядных а.ц.п. для сигналов от α - и β -частиц (или от α -частиц и осколков спонтанного деления). Фиксированное время преобразования а.ц.п. составляет 2 мкс. Для регистрации β -частиц с энергией от 50 до 500 кэВ используется дополнительный линейный усилитель сигналов со стрипов после предусилителей с коэффициентом усиления $k = 10$. Более подробно используемые модули спектрометрической электроники описаны в работе [9]. Схемы двух вариантов включения электроники показаны на рис. 5.

Спектрометрические усилители, используемые для усиления сигналов со стрипов, были спроектированы и произведены в ООО «Техинвест» (г. Москва) и имеют два выхода с разной величиной усиления:

– $k = 1$ – для осколков спонтанного деления с энергией до 200 МэВ, а также для α -частиц в режиме дополнительного усиления;

– $k = 11$ – для α -частиц и ядер отдачи с энергией до 20 МэВ, а также для β -частиц в режиме дополнительного усиления.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗУЧЕНИЮ СВОЙСТВ РАСПАДА НОБЕЛИЯ

В 2009 г. был выполнен эксперимент по спектроскопии ^{253}No и его дочернего продукта распада

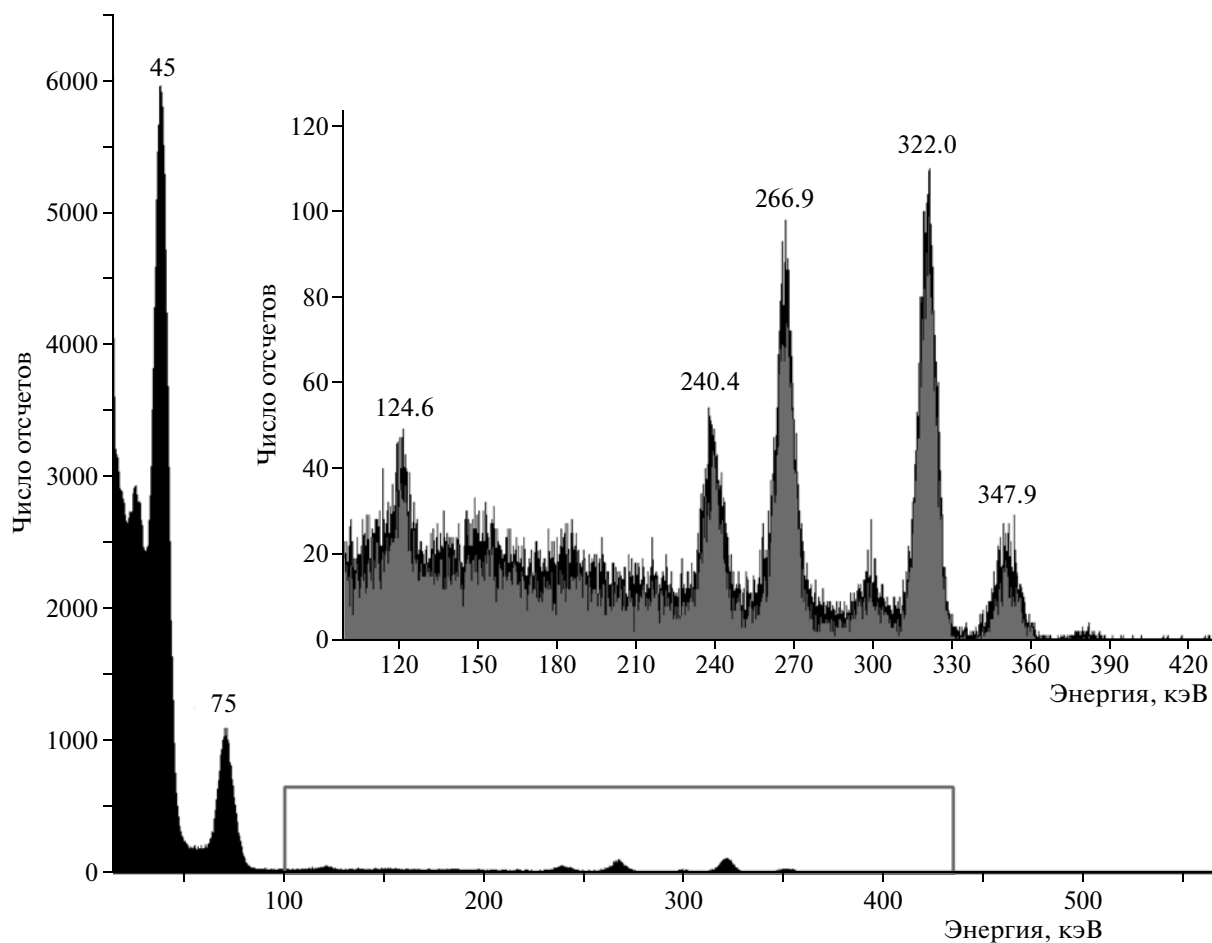


Рис. 4. Спектр β -частиц от ^{133}Ba , измеренный фокальным детектором толщиной 300 мкм. Источник удален от детектора на расстояние ~ 5 см. На вставке представлен увеличенный фрагмент рисунка.

^{249}Fm . Ускоренные на циклотроне У-400 ионы ^{48}Ca с энергией 243 МэВ (на половине толщины мишени) и интенсивностью $\sim 3.5 \cdot 10^{12}$ частиц/с бомбар-

дировали мишень из ^{207}Pb толщиной ~ 450 мкг/см². Образующиеся в реакциях полного слияния ядра $^{255}\text{No}^*$ девозбуждались посредством испарения нейтронов, пролетали сквозь сепаратор ВАСИЛИСА и имплантировались в фокальный (48 × 48)-стриповый Si-детектор. Детектор регистрировал α -частицы, осколки деления и конверсионные электроны, образующиеся в процессе радиоактивного распада ядер.

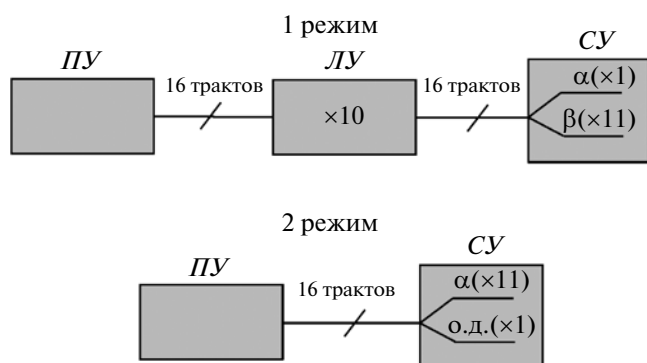


Рис. 5. Схемы включения спектрометрической электроники: 1 режим – регистрация α - и β -частиц; 2 режим – регистрация α -частиц и осколков деления (о.д.). ПУ – предварительный усилитель; ЛУ – линейный усилитель; СУ – спектрометрический усилитель.

В ходе эксперимента была набрана рекордная статистика по α -распадам ^{253}No из основного и изомерного состояний в совпадениях с ядрами отдачи, порядка 100000 и 10000 соответственно. В спектре частиц, зарегистрированных фокальным детектором, наблюдаются α -линии ^{253}No и ^{252}No , а в низкоэнергетической области – конверсионные электроны, образующиеся после α -распада ^{253}No из изомерного состояния (рис. 6). Наблюдение корреляций между γ -квантами от распада нобелия и образующимися после снятия остаточного возбуждения конверсионными электронами подтвердило существование у ^{253}No

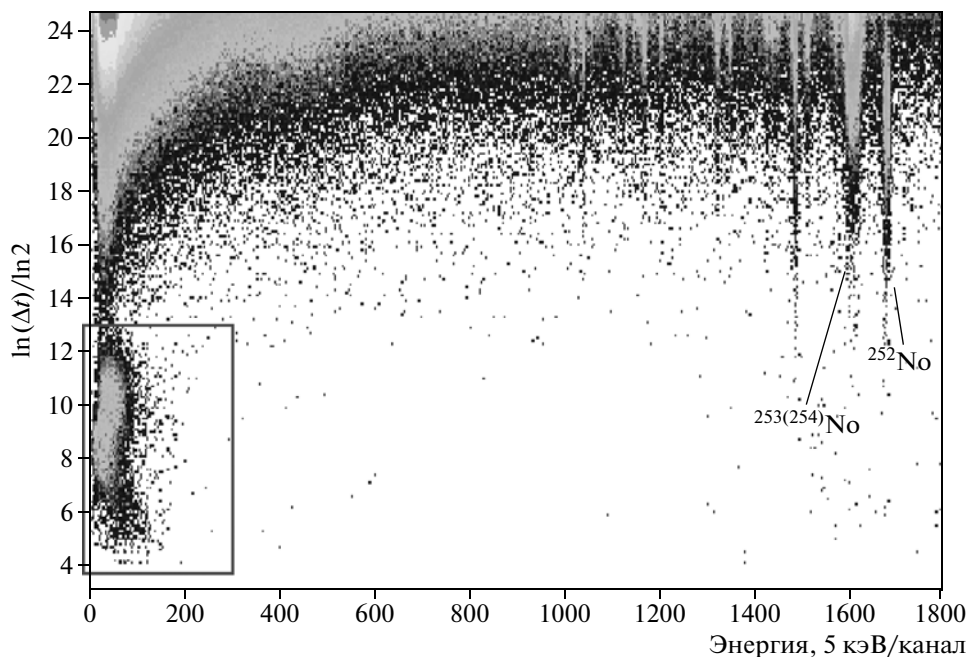


Рис. 6. Логарифмы временных интервалов между сигналами от ядер отдачи в (48×48) -стриповом фокальном детекторе и сигналами от их распадов в зависимости от энергии частиц. Конверсионные электроны, образующиеся после α -распада ^{253}No из изомерного состояния, выделены прямоугольником.

K -изомерного состояния с характеристиками $5/2^+[622]$ и периодом полураспада ~ 31.1 мкс [8], а также выявило наличие второго изомерного состояния со спином $>19/2$ и энергией возбуждения >1.2 МэВ этого ядра с периодом полураспада ~ 0.7 мс [10]. В настоящее время значительная часть экспериментальных данных находится в процессе обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали исследования, двухсторонний стриповый детектор обладает рядом достойных характеристик, но прежде всего, отличным пространственным и энергетическим разрешениями для α - и β -частиц. Хорошее энергетическое разрешение для β -частиц позволило зарегистрировать конверсионные электроны в эксперименте по изучению свойств распада изотопов нобелия. Предварительные результаты первого эксперимента с использованием нового детектора показали, что он может быть успешно использован в дальнейших исследованиях по изучению свойств радиоактивного распада изотопов трансфермиевых элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 08-02-00116.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Herzberg R.D.* // J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 2004. V. 30. P. R123.
2. *Popeko G., Belozarov A.V., Briançon Ch. et al.* // Physics of Atomic Nuclei. 2006. V. 69/7. P. 1183.
3. *Yeremin A.V., Andreyev A.N., Bogdanov D.D. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 1994. V. 350. P. 608.
4. *Malyshev O.N., Chelnokov M.L., Chepigin V.I. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2000. V. 440/1. P. 86.
5. *Hauschild K., Lopez-Martens A., Yeremin A.V. et al.* // Phys. Rev. C. 2008. V. 77. P. 047305.
6. *Lopez-Martens A., Hauschild K., Yeremin A.V. et al.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 044303.
7. *Hauschild K., Lopez-Martens A., Yeremin A.V. et al.* // Phys. Rev. C. 2008. A. V. 78. P. 021302R.
8. *Lopez-Martens A., Hauschild K., Yeremin A.V. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 32. P. 245.
9. *Исаев А.В., Дмитриев С.Н., Ерёмин А.В. и др.* // ПТЭ. 2010. № 5. С. 28.
10. *Hauschild K., Lopez-Martens A., Briançon Ch. et al.* // AIP Conference Proc. EXON-2009 (Sochi, Russia). Melville, N.Y.: American Institute of Physics, 2010. V. 1224. P. 269.