

P13-2014-20

Г. А. Кононенко^{1,*}, А. Г. Артюх¹, А. Н. Воронцов^{1,2},
Д. А. Кислуха^{1,3}, С. А. Клыгин¹, В. Е. Ковтун³,
В. В. Осташко², Ю. Н. Павленко², Ю. М. Серeda^{1,2},
Б. Эрдэмчимэг^{1,4}

**ДЕТЕКТИРУЮЩАЯ СИСТЕМА
ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОРА КОМБАС**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

³ Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Харьков, Украина

⁴ Монгольский государственный университет,

Центр ядерных исследований, Улан-Батор

* E-mail: Kononenko_gennad@mail.ru

Кононенко Г. А. и др.

P13-2014-20

Детектирующая система фрагмент-сепаратора КОМБАС

Представлены результаты разработки и тестирования многодетекторного телескопа ($\Delta E_1, \Delta E_2, E$). Телескоп представляет собой компактную телескопическую комбинацию из двух 32-стриповых кремниевых ΔE -детекторов и сцинтилляционных CsI/Tl E -детекторов высокой гранулярности (девять модулей) с возможностью получать из Si-детектора сигналы для временных измерений (TOF). Для обслуживания мультidetекторного модуля разработаны и изготовлены как одноканальные, так и 32-канальные зарядочувствительные предусилители для кремниевых ΔE - и сцинтилляционных CsI/Tl E -детекторов высокой чувствительности и эффективности. В эксперименте получена однозначная идентификация по A и Z продуктов ядерных реакций, полученных в реакции ^{40}Ar (35 МэВ/нуклон) + ^9Be .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2014

Kononenko G. A. et al.

P13-2014-20

Detection System of the COMBAS Fragment Separator

The results of design and testing of multi-detector telescope ($\Delta E_1, \Delta E_2, E$) are given. The compact telescope consists of 32-strip Si ΔE -detectors and CsI/Tl E -scintillation detectors of high granularity (nine modules) and allows one to obtain timing signal from Si detectors for TOF measurements. The single channel and 32-channel charge-sensitive preamplifiers were developed and manufactured to serve the Si ΔE -detectors and CsI/Tl scintillation E -detectors with high efficiency and sensitivity. Unambiguous A and Z identification of reaction products, produced in the ^{40}Ar (35 MeV/nucleon) + ^9Be reaction system, is implemented.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Исключительное многообразие ядерных реакций с тяжелыми ионами, огромное число возможных комбинаций «ион – ядро мишени» открывают благоприятные перспективы как для получения и формирования вторичных пучков ускоренных радиоактивных ядер с аномальным отношением N/Z , так и для исследования структуры экзотических ядер. Реакции с тяжелыми ионами являются весьма эффективными в синтезе неизвестных изотопов, лежащих на границе или даже за границей нуклонной стабильности.

В настоящее время для получения и сепарации вторичных пучков радиоактивных ядер с определенными значениями A (массовое число) и Z (атомный номер) используются в основном кинематические (in-flight) сепараторы [1, 2]. Однако получить моноизотопные пучки вторичных радиоактивных ядер достаточной интенсивности методом in-flight-сепарации невозможно без значительных потерь их интенсивности. Известно, что в реакциях передачи и фрагментации продукты ядерных реакций получаются с широкими импульсными распределениями и в различных зарядовых состояниях (Q). Вследствие этого моноизотопную сепарацию продуктов ядерных реакций невозможно обеспечить только магнитной жесткостью $B\rho$, поскольку магнитная жесткость сепаратора $B\rho$ является функцией нескольких параметров анализируемых частиц, а именно:

$$B\rho \sim P/Q = Av/(Z - n). \quad (1)$$

Здесь B — магнитное поле сепаратора (Тл), а ρ — радиус центральной траектории сепарируемой частицы (м), P — импульс частицы, а $Q = (Z - n)$ — зарядовое состояние иона, равное разности заряда ядра Z и числа подхваченных n -электронов, v — скорость транспортируемых частиц (м/с).

Следовательно, для однозначной идентификации по A и Z продуктов ядерных реакций, включая и их зарядовые состояния, требуется многопараметровая система их регистрации. По этой причине детектирующая система фрагмент-сепаратора КОМБАС формируется из каскада прострельных X - и Y -координатных детекторов различной толщины, измеряющих ионизационные потери энергии ΔE частицами, детектора поглощения остаточной энергии E_r , высокой гранулярности и измерения времени пролета TOF, а именно:

$$\Delta E \sim (Z/v)^2, \quad \Delta E + E_r \sim (A/v^2)/2 \quad \text{и} \quad \text{TOF} \sim (1/v). \quad (2)$$

Такой вариант детектирующей системы в комбинации с магнитным анализом позволяет одновременно регистрировать весь спектр транспортируемых частиц: легкие длиннопробежные продукты (занята вся толщина детекторов) и короткопробежные сильноионизирующие частицы с большими атомными номерами (используется только несколько передних ΔE -детекторов). Анализ показывает, что набор параметров $B\rho$, ΔE , E_r и TOF является достаточным для однозначной идентификации по A и Z продуктов ядерных реакций, включая и их зарядовые состояния.

Целью данной работы является создание серии детектирующих модулей ($\Delta E_1, \Delta E_2, E_r$), которые могли бы обеспечить достаточный телесный угол регистрации, высокое угловое разрешение и однозначную идентификацию всего спектра продуктов ядерных реакций, транспортируемых в выходную фокальную плоскость сепаратора КОМБАС. Каждый модуль представляет собой компактную телескопическую комбинацию из 32-стриповых (X, Y) кремниевых ΔE -детекторов и сцинтилляционных CsI/Tl E -детекторов высокой гранулярности (девять детекторов) с возможностью получать из Si-детекторов сигналы для TOF-измерений. Для обслуживания гибридного (Si и CsI/Tl) телескопа было необходимо разработать и создать многоканальные (32-канальные) зарядочувствительные предусилители высокой чувствительности и эффективности.

1. КОНСТРУКЦИЯ ТЕЛЕСКОПА

Телескопический модуль монтируется в вакууме приемной камеры фрагмент-сепаратора КОМБАС [2]. Детекторная часть телескопа состоит из двух кремниевых прострельных X - и Y -координатных стриповых ΔE -детекторов большой площади (66×66 мм каждый) и расположенной за ними гранулированной стенки из девяти (матрицы 3×3) сцинтилляционных ΔE -детекторов полного поглощения энергии. Стриповые детекторы предназначены как для спектрометрических и угловых измерений потока частиц, так и для определения профиля их распределения в позиции ахроматического выходного фокуса фрагмент-сепаратора. Сцинтилляционные детекторы полного поглощения необходимы для измерения энергии длиннопробежных продуктов ядерных реакций, которые простреливают оба стриповых детектора. Фотографии телескопа приведены на рис. 1.

На рис. 1, *a* в качестве первого по пучку установлен тонкий (380 мкм) стриповый Si-детектор, ориентированный так, чтобы стрипы располагались вертикально (X -координатный детектор). Вслед за ним на расстоянии 10 мм

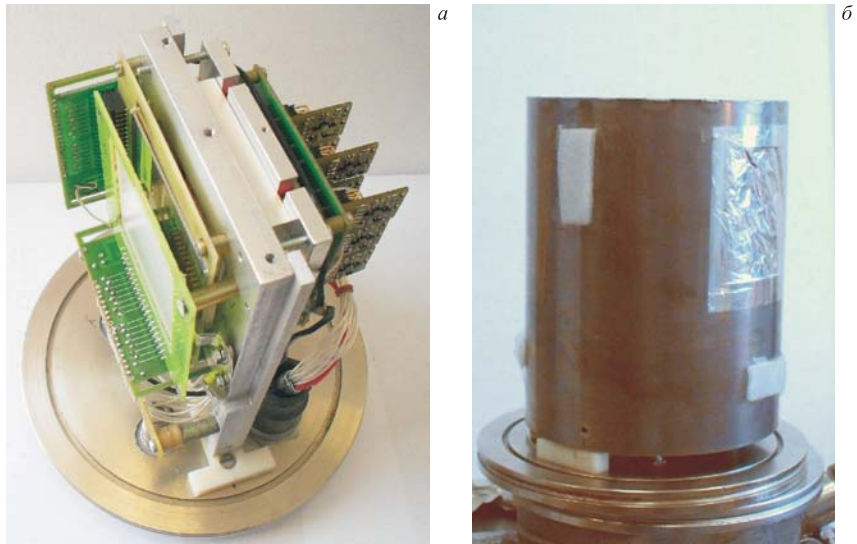


Рис. 1. Телескоп детекторов с предусилителями, смонтированный на вакуумной заглушке диаметром 180 мм: *a* — со снятым кожухом; *б* — в полной сборке. Размеры кожуха: диаметр 135 мм, высота 170 мм

размещен стриповый Si-детектор толщиной 1 мм. Он установлен с ортогональным расположением стрипов по отношению к первому детектору (Y-координатный детектор). Фотография одного из стриповых детекторов приведена на рис. 2. Размеры стриповых детекторов по плоскости 66×66 мм. Они содержат по 32 стрипа длиной 60 мм и шириной 1,9 мм каждый. Шаг стрипов 2 мм.

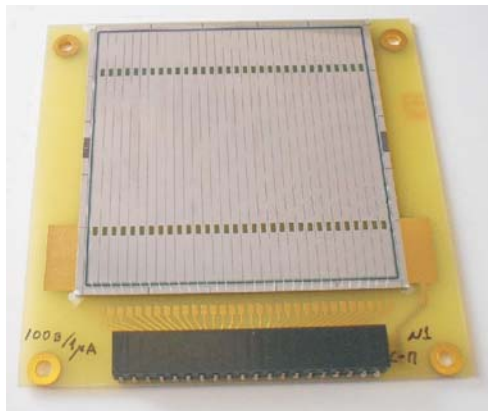


Рис. 2. Стриповый детектор

В телескопе стриповые детекторы устанавливаются в разъемы на текстолитовых платах, которые закреплены на прямоугольной рамке с окном. Рамка крепится к двум стойкам. Стойки через изолирующую прокладку фиксируются на диске вакуумной заглушки (рис. 1). Детекторы изготовлены группой ФТИ–НИИМВ (Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе и Научно-исследовательский институт материаловедения).

Вслед за Y -стриповым детектором на расстоянии 10 мм размещена матрица из девяти сцинтилляционных детекторов полного поглощения энергии частиц. Каждый из них состоит из сцинтилляционного кристалла CsI/Tl в сочетании с кремниевым p - i - n -фотодиодом (PD) (рис. 3).

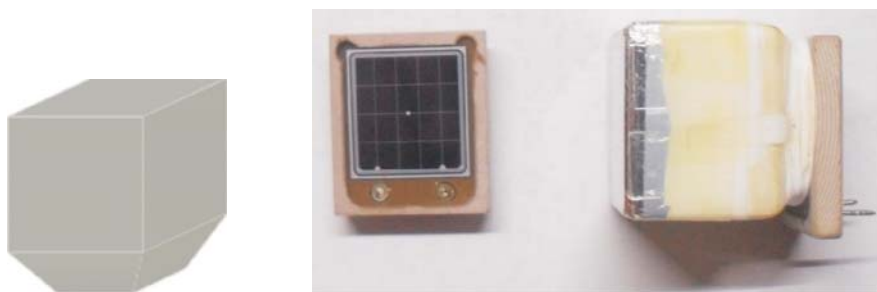


Рис. 3. Внешний вид кристалла сцинтиллятора CsI/Tl, кремниевого p - i - n -фотодиода и собранного детектора

Для сцинтилляционных детекторов нами были использованы бескорпусные p - i - n -диоды с площадью поверхности $S = 10,6 \times 11,6$ мм и толщиной чувствительного слоя $d_0 = 300$ мкм. Емкость фотодиодов составляет $C_D \approx (1 \text{ пФ/см} \cdot S)/d_0 \approx 40$ пФ. Отдельно изготавливался керамический корпус, в котором устанавливались контакты. После установки и распайки в нем фотодиода он заливался эпоксидной смолой.

Фрезеровкой сцинтилляционному кристаллу CsI/Tl придавалась сложная форма, состоящая из прямоугольного параллелепипеда с размерами $18 \times 18 \times 13,5$ мм и пирамидальной части. Высота пирамидальной части составляет 3,6 мм. Верхнее основание 18×18 мм, а нижнее — 11×11 мм, совпадающее с размерами окна фотодиода. Полный объем сцинтиллятора составляет таким образом $5,1 \text{ см}^3$. Боковые стенки кристалла обрабатываются наждачной бумагой (№ 400) до получения матовой поверхности. И в дальнейшем покрываются диффузным материалом, не пропускающим свет. В данном случае используются 2–3 слоя тефлоновой ленты толщиной 0,1 мм.

Передняя поверхность, обращенная к пучку, обрабатывается более мелкой (№ 1500) наждачной бумагой с уайт-спиритом и покрывается майларовой фольгой толщиной 2–5 мкм. Применение растворителя обусловлено тем, что

он позволяет избежать грубых повреждений поверхности кристалла и сделать ее рельеф более однородным. Поверхность кристалла, прилегающая к фотодиоду, полируется до блеска. В дальнейшем сцинтиллятор с помощью оптического клея крепится к фотодиоду.

Девять кристаллов с приклеенными фотодиодами объединяются в матрицу 3×3 и закрепляются в рамке-держателе, которая размещается вблизи прострельных стриповых Si-детекторов. Фотографии CsI/Tl-кристалла сцинтиллятора, кремниевого фотодиода, установленного в керамическую оправку, и собранного детектора приведены на рис. 3.

На рис. 4 представлена сборка из девяти сцинтилляционных CsI/Tl PD-детекторов. Детекторы устанавливаются в ячейки с разъемами на общей печатной плате. На этой же плате в разъемах устанавливаются зарядочувствительные предусилители. Печатная плата с детекторами и предусилителями крепится к несущей рамке, в которой выбрано окно под кристаллы. С лицевой части несущей рамки в пазах установлены четыре обжимающие планки с уплотнителями из вакуумной резины. Они могут перемещаться по пазам рамки и жестко закрепляться на ней. С их помощью происходит механическая фиксация детекторов. Несущая рамка со сцинтилляционными детекторами крепится винтами с обратной стороны к прямоугольной рамке со стриповыми детекторами.

Сигналы с каждого стрипа X- и Y-детекторов, а также с их общих электродов короткими кабелями заведены на свои (X или Y) вакуумные 50-штырьковые разъемы ОСРС50ТВ. Ответные части (проходные разъемы) РСГСП 50-В установлены на диске вакуумной заглушки. Напряжения смещения для каждого из детекторов подаются через два герметичных разъема СРГ-50-82фв, которые также установлены на диске. На отдельный разъем

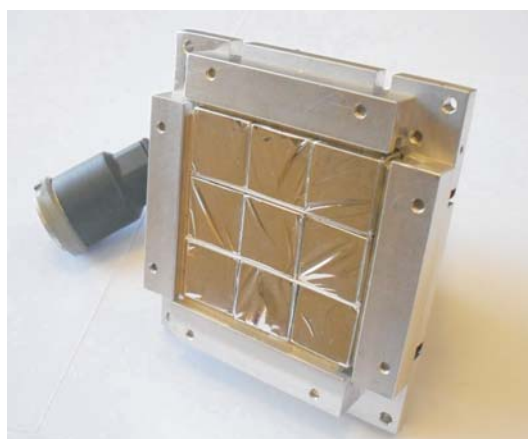


Рис. 4. Матрица 3×3 сцинтилляционных CsI/Tl PD-детекторов

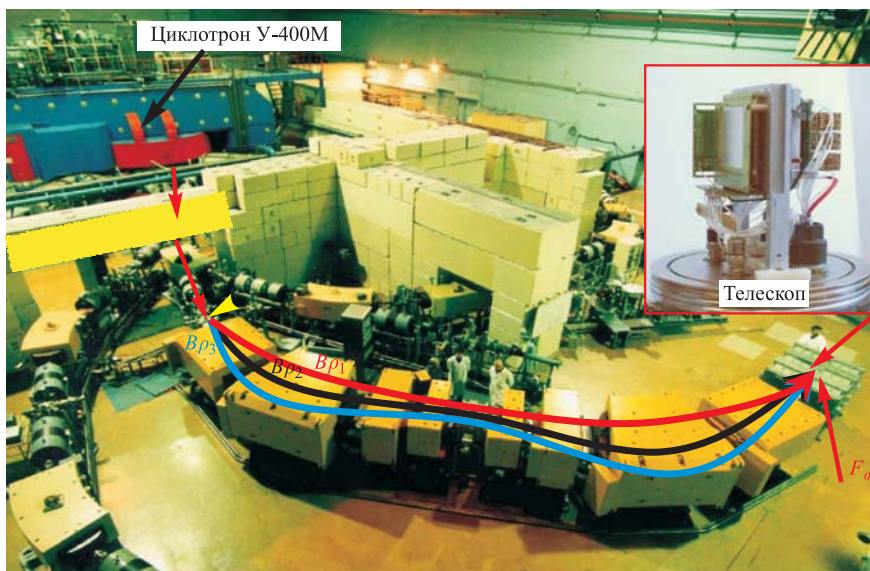


Рис. 5. Фрагмент-сепаратор КОМБАС, размещенный в экспериментальном зале циклотрона У-400М Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (Дубна)

ОСРС50ТВ выведены выходные сигналы предусилителей сцинтилляционных детекторов. На этот же разъем заведены выходы с общих электродов стриповых детекторов, напряжение смещения (+60 В) CsI/Tl PD-детекторов, тестовый сигнал и напряжения питания для предусилителей сцинтилляционных детекторов.

Телескоп крепится в вакууме приемной камеры на фланце, которая располагается в позиции выходного ахроматического фокуса F_α фрагмент-сепаратора КОМБАС (рис. 5).

2. ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРЕДУСИЛИТЕЛИ

Детекторный модуль имеет 75 спектрометрических каналов регистрации, каждый из которых снабжен своим зарядочувствительным предусилителем с возможностью индивидуального считывания. Так как емкости сцинтилляционных детекторов (≈ 40 пФ) и отдельных стрипов (≈ 26 пФ — для 380-мкм детектора и ≈ 12 пФ — для 1-мм) можно считать небольшими, для них предусилители были выполнены по простейшей классической схеме [3, 4]. Предусилитель состоит из входного каскада с каскадным включением (JFET-pnp) транзисторов [5] и составного эмиттерного повторителя на выходе. Пред-

усилители изготовлены на элементах поверхностного монтажа в виде небольших модулей со штыревыми разъемами размерами 25×11 мм (рис. 6).

Со стороны общих электродов емкость стриповых детекторов гораздо выше: ≈ 1000 пФ для 380-мкм и ≈ 390 пФ для 1-мм детекторов. Поэтому для регистрации сигналов с общих электродов были изготовлены несколько зарядочувствительных предусилителей с более высокими коэффициентами усиления при разомкнутой отрицательной обратной связи. Входной каскад в них выполнен аналогично, а вместо нагрузочного резистора в коллекторе каскада включена активная нагрузка на отдельном транзисторе (генератор тока) [6] и на выходе установлен буферный элемент (рис. 7).

Во входных каскадах предусилителей для сцинтиляционных детекторов, работающих в вакууме, применены полевые транзисторы VF861A с низким рабочим током стока (5 мА). Это позволило добиться мощности потребления

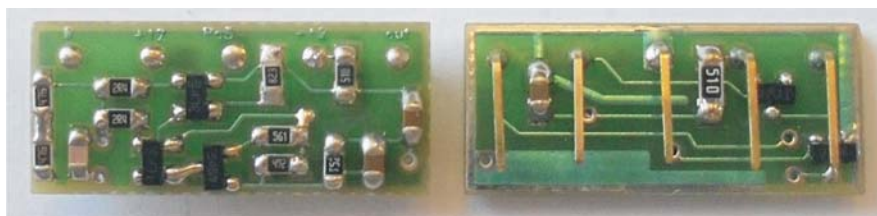


Рис. 6. Предусилитель крупным планом

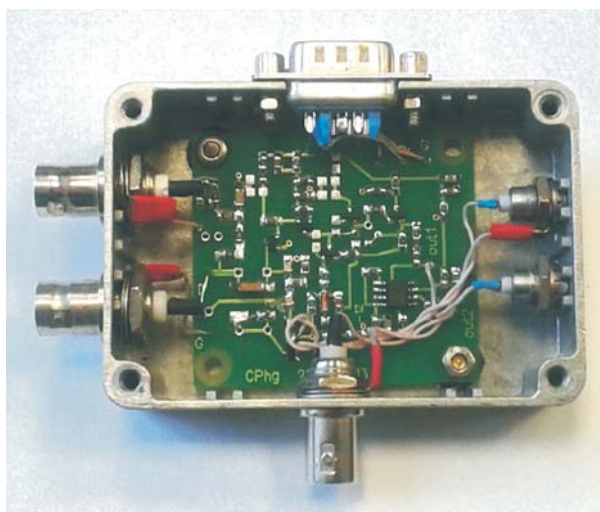


Рис. 7. Предусилитель для общих электродов стриповых детекторов

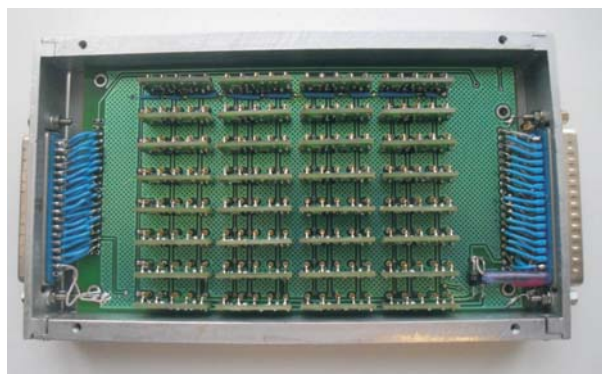


Рис. 8. Кассета с 32 предусилителями для стрипового детектора, размещаемая вне вакуумной камеры приемного устройства фрагмент-сепаратора КОМБАС

от источников питания для одного предусилителя в 100 мВт. В предусилителях для стриповых детекторов использованы транзисторы ВF862.

В детекторном модуле установлены предусилители только для девяти CsI/Tl PD-детекторов (рис. 4). Предусилители для стриповых детекторов размещены в индивидуальных гнездах со штыревыми разъемами по 32 штуки в кассетах (рис. 8), которые расположены вне вакуумной камеры приемного устройства фрагмент-сепаратора КОМБАС и соединяются с соответствующими разъемами детекторов короткими (20 см) кабелями. Рядом с ними расположены два предусилителя, подключаемых к общим электродам стриповых детекторов.

Тестирование предусилителей и детекторов осуществлялось на стенде, показанном на рис. 9. Помимо стандартного в таких случаях спектрометрического оборудования он включал вакуумную камеру с телескопом (рис. 1)

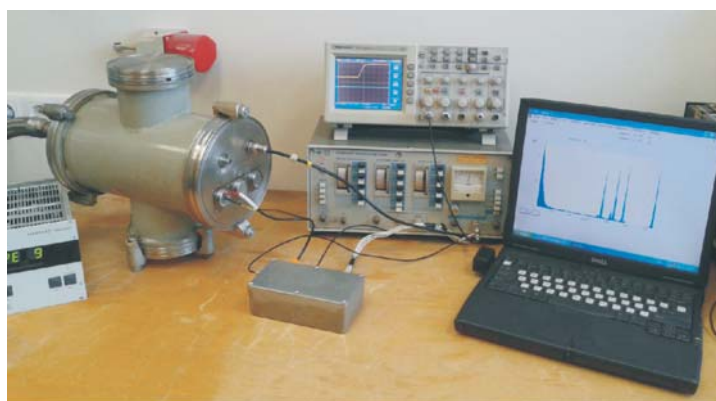


Рис. 9. Стенд для тестирования предусилителей и детекторов

и электронным экранированным блоком, в котором через разъем устанавливался необходимый предусилитель.

Все предусилители при измерении их шумовых характеристик тестировались без подключения детектора ($C_D = 0$) и были настроены на коэффициент преобразования $G_p \approx 1,0$ В/пКл, что соответствует чувствительности в энергетических единицах $G_E \approx 44$ мВ/МэВ для кремниевого детектора.

Шум предусилителя, приведенный ко входу в виде эквивалентного шумового заряда ENC (Equivalent Noise Charge) в среднеквадратичных (r. m. s.) электронах, вычислялся как

$$ENC = U_N(\text{r. m. s.})/G_p G_{\text{amp}} e^-,$$

где U_N (r. m. s.) — среднеквадратичное значение напряжения шума на выходе спектроскопического усилителя, G_{amp} — коэффициент усиления спектрометрического усилителя, а e^- — заряд электрона.

Так как измеряемый шумовой сигнал представляет собой белый шум с гауссовым распределением и нулевым средним значением, для него стандартное отклонение σ равно среднеквадратичному значению измеряемого параметра U_N (r. m. s.). Поэтому с точностью 99,73 % ($\pm 3\sigma$) U_N (r. m. s.) = U (peak-to-peak) : 6 [7]. Амплитудный размах U (peak-to-peak) шумового напряжения измерялся цифровым осциллографом TDS 2024 на выходе спектрометрического усилителя БУИ-3К с постоянной времени формирования в 1 мкс и коэффициентом усиления $G_{\text{amp}} = 100$ с подключенным предусилителем и затем без него.

Для примера на рис. 10 приведены две типичные осциллограммы шумовых сигналов, полученные при исследовании одного из предусилителей. Слева — шумы на выходе усилителя БУИ-3К с подключенным предусилителем

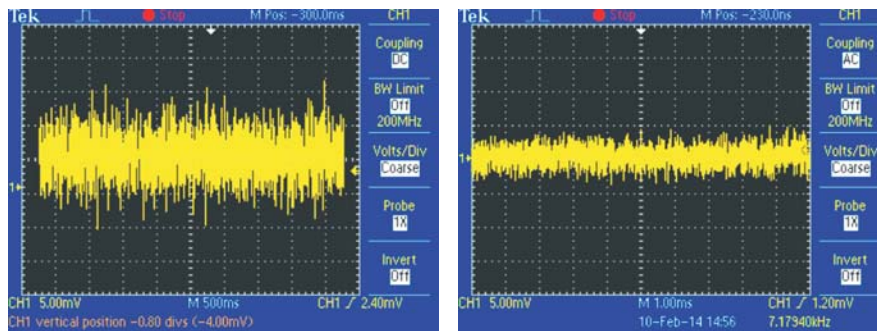


Рис. 10. Шумовые сигналы на выходе спектрометрического усилителя с подключенным к нему предусилителем (левая осциллограмма) и без предусилителя (правая осциллограмма)

лем; справа — шумы на выходе усилителя без предусилителя. Амплитудные размахи этих сигналов составили: U_{N1} (peak-to-peak) = 23 мВ — амплитудный размах шумового сигнала левой осциллограммы и U_{N1} (peak-to-peak) = 8 мВ — амплитудный размах сигнала по правой осциллограмме.

По этим данным среднеквадратичное значение напряжения шума U_N (r. m. s.) $\approx 3,6$ мВ, а значение ENC ≈ 225 электронов r. m. s.

В энергетических единицах в пересчете для кремниевого детектора: FWHM = $2,355 \cdot \varepsilon \cdot \text{ENC} = 2,355 \cdot 3,61 \cdot 225 \approx 1,9$ кэВ.

Здесь $\varepsilon = 3,61$ эВ — энергия, затрачиваемая на образование одной пары заряженных частиц в кремнии.

Наклон шумовой характеристики предусилителей, предназначенных для общих электродов стриповых детекторов, составляет 16 эВ/пФ.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ

Сцинтилляционные CsI/Tl-детекторы. *p-i-n*-фотодиоды для сцинтилляционных детекторов отбирались с минимально возможным темновым током (1–3 нА). До постановки диода в керамический корпус для каждого из них измерялось напряжение смещения, обеспечивающее полное обеднение *p-n*-перехода. Для этого диоды облучались с обратной стороны источником альфа-излучения (^{241}Am), и при разных напряжениях смещения измерялось положение пика альфа-частиц в амплитудном спектре (рис. 11).

После установки в керамический корпус, распайки и заливки эпоксидной смолой каждый фотодиод проверялся на уровень шумов и величину темнового тока.

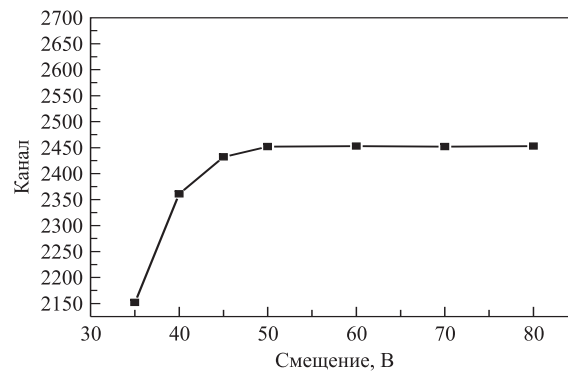


Рис. 11. Положение пика альфа-частиц ^{241}Am , $E_\alpha = 5,485$ МэВ, в зависимости от напряжения смещения на *p-i-n*-диоде. Диод облучался с обратной стороны

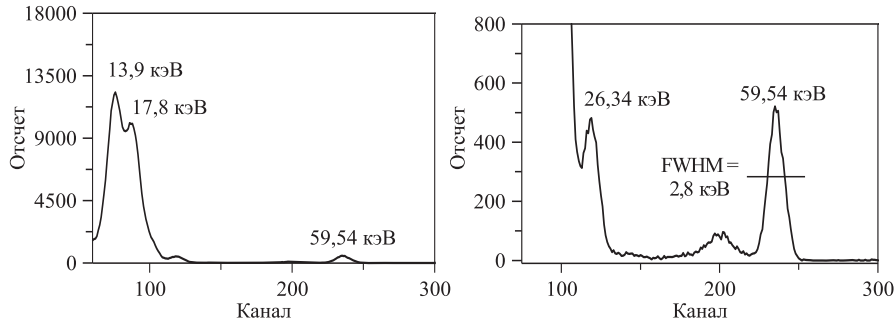


Рис. 12. Рентгеновский спектр ^{241}Am , измеренный кремниевым $p-i-n$ -фотодиодом $C_D \approx 40$ пФ, площадью $S = 10,6 \times 11,6$ мкм и толщиной 300 мкм

Шумовые свойства PD оценивались по значению полуширины рентгеновского пика 59,54 кэВ в спектре ^{241}Am , получаемого от исследуемого фотодиода. На рис. 12 представлен один из таких рентгеновских спектров. Данный спектр был получен для диода с темновым током в 3 нА и напряжением смещения $U_B = 60$ В. Спектрометрический тракт состоял из рассмотренного выше предусилителя, спектрометрического усилителя БУИ-3К с коэффициентом усиления $K = 100$ и постоянной времени формирования $\tau = 1$ мкс. Энергетическое разрешение $\Delta E(\text{FWHM})/E$ для линии 59,54 кэВ составило 4,7 %.

Качество изготовленных сцинтилляторов оценивалось по получаемому энергетическому разрешению $R = \Delta E(\text{FWHM})/E$ для γ -линий полного поглощения 1332 кэВ (^{60}Co).

На рис. 13 приведен типичный γ -спектр ^{60}Co , полученный для одного из сцинтилляторов CsI/Tl PD-детекторов, входящих в матрицу телескопа.

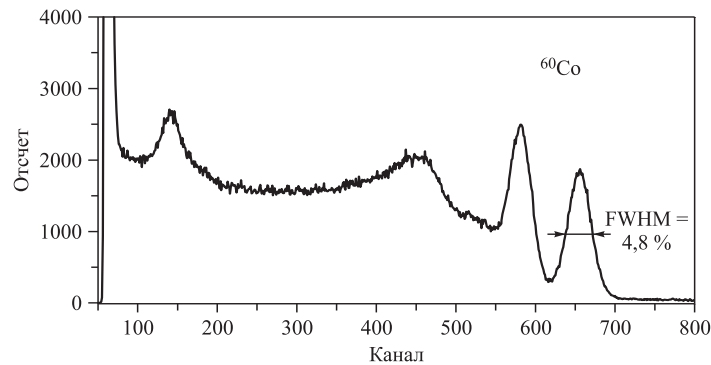


Рис. 13. Гамма-спектр ^{60}Co , измеренный CsI/Tl PD-детектором с объемом кристалла $5,1 \text{ см}^3$

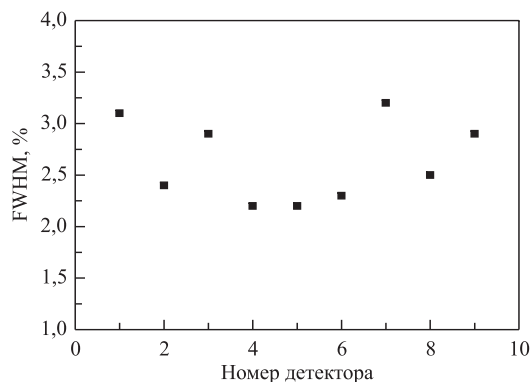


Рис. 14. Разрешение FWHM (%) матрицы из девяти CsI/TL PD-детекторов. Источник ^{226}Ra в вакууме

На рис. 14 представлено распределение разрешений CsI/Tl PD-детекторов в матрице из девяти (3×3) телескопов. Разрешение определялось как полуширина (FWHM, %) пика α -частиц с энергией 7687 кэВ источника ^{226}Ra . Детекторы облучались источником в вакууме.

Стриповые детекторы. Напряжение полного обеднения для обоих детекторов было измерено по такой же методике. Для 380-мкм стрипового детектора оно составило $U_B = 120 \text{ В}$ и $U_B = 150 \text{ В}$ — для 1-мм детектора. Для этих напряжений значения темновых токов (I_0) для тонкого детектора составило 240 нА, а для 1-мм детектора 0,95 мкА.

Постриповое разрешение детекторов измерялось через коллимированный источник ^{226}Ra на стенде (рис. 9) в вакуумном боксе. Среднее значение разрешения для обоих детекторов составило 1 %. На рис. 15 приведено постриповое разрешение 1-мм детектора. Как и в случае со сцинтилляционными

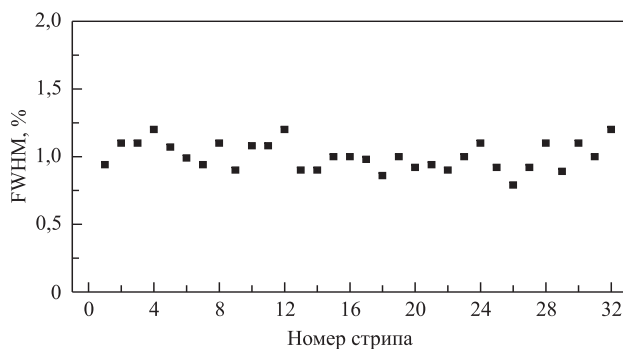


Рис. 15. Постриповое разрешение FWHM (%) 1-мм детектора ($U_B = 150 \text{ В}$, $I_0 = 950 \text{ нА}$). Источник ^{226}Ra в вакууме

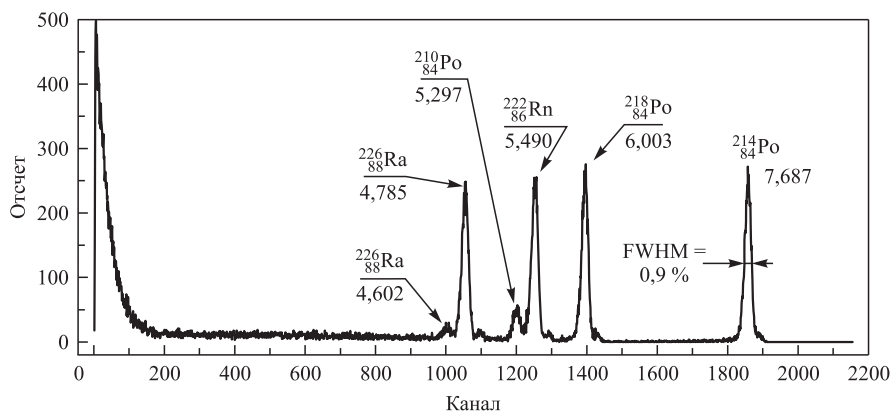


Рис. 16. Спектр альфа-частиц ^{226}Ra , полученный от одного стрипа детектора толщиной 1 мм

CsI/Tl PD-детекторами, разрешение определялось по полуширине пика α -частиц с энергией 7687 кэВ источника ^{226}Ra .

На рис. 16 показан α -спектр источника ^{226}Ra , полученного от одного из стрипов 1-мм детектора при облучении в вакууме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты создания и тестирования многодетекторного измерительного телескопа ($\Delta E_1, \Delta E_2, E$), который в состоянии обеспечить значительный телесный угол регистрации и однозначную идентификацию по A и Z продуктов ядерных реакций, транспортируемых в выходную фокальную плоскость фрагмент-сепаратора КОМБАС. Модуль представляет собой компактную телескопическую комбинацию из двух 32-стриповых кремниевых ΔE -детекторов и сцинтилляционных CsI/Tl E -детекторов высокой гранулярности (девять модулей) с возможностью получать из Si-детектора сигналы для временных измерений TOF. Для обслуживания мультidetекторного модуля были разработаны и изготовлены зарядочувствительные предусилители для кремниевых ΔE - и сцинтилляционных CsI/Tl E -детекторов высокой чувствительности и эффективности.

Качество изотопной идентификации продуктов ядерных реакций, полученных в реакции ^{40}Ar (35 МэВ/нуклон) + ^9Be с помощью фрагмент-сепаратора КОМБАС и рассмотренной детектирующей системы, иллюстрирует рис. 17.

Как видно из представленной матрицы на рис. 17, комбинация фрагмент-сепаратора КОМБАС с созданным телескопическим измерительным модулем

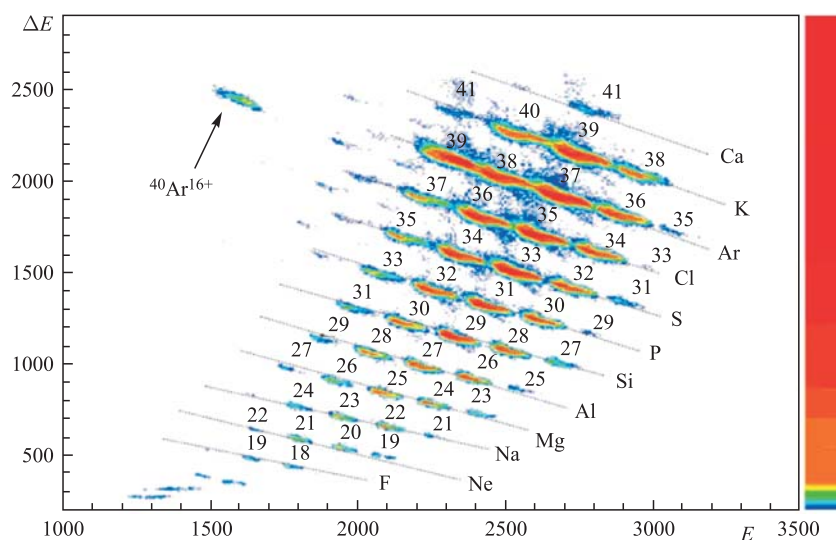


Рис. 17. Идентификационная матрица продуктов ядерных реакций с атомными номерами $4 < Z < 20$, полученная в реакции ^{40}Ar ($E = 35$ МэВ/А) с мишенью ^9Be (15 мг/см 2). Продукты реакций выделялись фрагмент-сепаратором КОМБАС и транспортировались в выходной фокус в позицию телескопа ΔE - E -детекторов

обеспечивает высокую разрешающую способность и позволяет однозначно определять значения массовых чисел A нуклидов и атомных номеров Z широкого спектра продуктов ядерных реакций.

Детектирующая система фрагмент-сепаратора КОМБАС, созданная из комплекса таких телескопических измерительных модулей, является чрезвычайно перспективной для измерения редких многочастичных распадов экзотических ядер. Исследования таких процессов могут быть эффективными, если детектирующая система в состоянии обеспечить регистрацию частиц в конусе максимально большого телесного угла и высокое угловое разрешение коррелированных кластеров многочастичного распада нестабильного ядра. По своей идентификационной способности и информативности такой комплекс является уникальным в изучении структуры экзотических ядер, получаемых в реакциях с ультрамалыми выходами вблизи границ ядерной стабильности. Высокая гранулярность каждого детекторного модуля может быть эффективно использована в изучении угловых, энергетических и временных корреляций многочастичных распадов экзотических ядер.

Авторы выражают благодарности В. В. Авдейчикову и Е. А. Шевчику за плодотворную помощь в изготовлении сцинтилляционных детекторов и испытании их на пучках тяжелых ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Artukh A. G. et al.* Wide aperture kinematic separator COMBAS realized on the strong focusing principle // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 426. P. 605.
2. *Артюх А. Г. и др.* Фрагмент-сепаратор КОМБАС // ПТЭ. 2011. № 5. С. 74–87.
3. *Fabris L., Madden N. W., Yaver H.* A fast, compact solution for low noise charge preamplifiers // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 424. P. 545–551.
4. *Bertuccio G., Rehak P., Xi D.* A novel charge sensitive preamplifier without the feedback resistor // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 326. P. 71–76.
5. *Немчинов В. М. и др.* Усилители с полевыми транзисторами. / Под ред. И. П. Степаненко. М.: Сов. радио, 1980.
6. *Гусев В. Г., Гусев Ю. М.* Электроника. М.: Высш. шк., 1991.
7. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 2003.

Получено 17 марта 2014 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 14.04.2014.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 245 экз. Заказ № 58239.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/