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. Середа^{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

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.

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.

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: *а* — 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, кремниевое 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, кремниевое 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_a 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-рnp) 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 сцинтилляционных детекторов, работающих в вакууме, применены полевые транзисторы BF861A 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 BF862.

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

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

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 предусилите-

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 (г. м. с.) $\approx 3,6$ мВ, а значение $ENC \approx 225$ электронов г. м. с.

В энергетических единицах в пересчете для кремниевого детектора: $FWHM = 2,355 \cdot \varepsilon \cdot ENC = 2,355 \cdot 3,61 \cdot 225 \approx 1,9$ 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 $U_B = 120$ В и $U_B = 150$ 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 ($U_B = 150$ В, $I_0 = 950$ 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/