

## АКТИВНЫЕ КОЛЛИМАТОРЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ПУЧКАМИ ЭКЗОТИЧЕСКИХ ЯДЕР

© 2011 г. Ю. Г. Соболев, М. П. Иванов, Н. А. Кондратьев, Ю. Э. Пенионжкевич

*Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6*

*E-mail: sobolev@nrmail.jinr.ru*

Поступила в редакцию 21.12.2010 г.

Описывается метод активного коллиматора для проведения экспериментов с пучками экзотических ядер с энергиями вблизи кулоновского барьера ядерных реакций. Методика основана на использовании детекторов из микроканальных пластин (м.к.п.) и тонких полосок металлических фольг толщиной не более 200–300 мкг/см<sup>2</sup> (Au, Ag, Al), ориентированных по X- и Y-осям (ось Z коллинеарна оси пучка). М.к.п. регистрируют проходящие через фольги экзотические ядра по электронной эмиссии из этих фольг, что дает возможность определять пространственную информацию о траектории частицы и временную отметку для регистрации событий. Предложенная установка имеет наименьшее (из существующих методик) количество вещества ( $\leq 8.0 \cdot 10^{17}$  атом/см<sup>2</sup>) в зоне траекторий детектируемых частиц, обладает высокой эффективностью ( $\epsilon \sim 90\%$  по каждому м.к.п.-тракту) и временным разрешением, достаточным для осуществления дополнительной идентификации радиоактивных ядер по времени пролета.

### ВВЕДЕНИЕ

Непрерывно возрастающий интерес к исследованию реакций с экзотическими ядрами стимулирует дальнейшее развитие экспериментальных методик с пучками радиоактивных ядер, причем наблюдается тенденция их развития в двух направлениях. В первом реализуются экспериментальные методики, ранее отработанные на пучках стабильных ядер и успешно проверенные временем. Поэтому основные требования экспериментальных методик данного направления к пучкам радиоактивных ядер остаются такими же, как и к пучкам стабильных ядер, а именно: это требования к их высокой интенсивности и качеству. Первое требование существенно ограничивает область применения данных методик вследствие низкой интенсивности пучков радиоактивных ядер, так как в настоящее время только ограниченное число изотопов вторичных пучков может частично удовлетворить условию требования высокой интенсивности.

Второе направление характеризуется развитием новых подходов и методик с целью их адаптации к таким параметрам пучков радиоактивных ядер, как низкая интенсивность, сложный состав и низкие оптические параметры.

Наблюдаемая ситуация обусловлена процессом развития методов получения и ускорения пучков радиоактивных ядер, суть которого в том, что к данному моменту, в основном, интенсивно используются и развиваются два метода получения таких пучков [1]. Первый, метод “фрагмент-

сепаратора”, состоит в том, что первичный пучок ионов с кинетической энергией, оптимизированной на максимум выхода продуктов реакции канала фрагментации, взаимодействует с тонкой производящей мишенью, в результате чего образуется вторичный пучок ионов ядер с широкими массовым и зарядовым распределениями. Последующая очистка вторичного пучка осуществляется с помощью фрагмент-сепаратора. Преимущество метода в том, что он позволяет получать пучки короткоживущих радиоактивных ядер, значительно удаленных от линии стабильности. Однако полученные этим методом пучки обладают рядом характерных свойств, осложняющих его применение:

- удельный импульс пучка радиоактивных ядер близок к удельному импульсу первичного пучка;

- широкие импульсное и угловое распределения продуктов фрагментации обуславливают низкие оптические параметры пучка радиоактивных ядер;

- широкие массовое и зарядовое распределения продуктов фрагментации налагают жесткие требования на систему очистки пучка, и в результате пучки радиоактивных ядер имеют сложный элементный состав;

- интенсивность пучка радиоактивных ядер ограничена эффективной толщиной производящих мишеней и составляет не более  $10^6$  с<sup>-1</sup>.

Второй, ISOL-метод (Isotope separation on-line), имеет целью получение пучка радиоактив-

ных ядер максимальной интенсивности. Он основан на применении составной производящей мишени максимально возможной толщины. Полученные продукты реакции выводятся из мишени, формируются для транспортировки в последующий ускоритель, где они ускоряются до необходимой величины кинетической энергии. Преимущество этого метода основывается на возможности получения им моноизотопных пучков ряда радиоактивных ядер высокой интенсивности (до  $10^{11} \text{ с}^{-1}$ ) с оптическими параметрами пучка, соответствующими пучкам стабильных изотопов. В качестве существенного недостатка ISOL-метода отметим существенное ограничение его применимости на область радиоактивных ядер, обусловленное как их временем жизни, так и суммарным временем диффузии продуктов из мишени и их транспортировки в постускоритель.

Очевидно, что для проведения экспериментов с целью исследования свойств и структуры радиоактивных ядер, значительно удаленных от полосы стабильности, включая и наиболее экзотичные ядерные системы (т.е. с наименьшим временем жизни), необходимо развитие экспериментальных методик второго направления, адаптированных к пучкам короткоживущих радиоактивных ядер, полученных методом “фрагмент-сепаратора”.

Отличительная особенность таких методик состоит в том, что они оперируют не “интегральными” параметрами пучка (эмиттанс, поперечные размеры и т.д.), а “событийными” кинематическими характеристиками каждой регистрируемой частицы пучка. В зависимости от поставленной задачи возможно упрощение метода. Например, в измерениях полных сечений реакций учет акцептанса установки позволяет ограничиться регистрацией факта попадания данной частицы (дополнительно необходимы идентификация и измерение энергии) в заданную область мишени. Методики, выполняющие данную задачу с минимальным воздействием на частицу, получили название методик активного коллиматора (а.к.).

В данной работе описаны методики а.к., использованные авторами в ряде экспериментов с пучками радиоактивных ядер как промежуточных (до 100 АМэВ), так и низких энергий (область энергий вблизи кулоновского барьера).

## МЕТОД АКТИВНОГО КОЛЛИМАТОРА

Суть метода активного коллиматора состоит в получении от позиционно-чувствительного детектора удовлетворительно малой толщины логического сигнала, несущего информацию о прохождении частицы в заданную область пространства. Под выражением “удовлетворительно малая толщина” мы полагаем выполнение одного из условий: либо толщина детектора пренебрежимо мала для учета эффекта ее влияния на искомый

результат, либо эффект влияния толщины детектора получен в независимых измерениях, и ее систематическая ошибка не превышает заданную границу.

Из этого определения следует “пособытийность” работы а.к.: в каждом событии, предназначенном для записи в память, а.к. предоставляет информацию о положении исследуемой частицы.

Ниже рассматриваются два типа используемых нами устройств а.к.: на основе Si-детекторов и детекторов на основе м.к.п. (м.к.п.-детекторов).

## АКТИВНЫЙ КОЛЛИМАТОР НА ОСНОВЕ Si-ДЕТЕКТОРА

Первая группа устройств а.к. успешно использовалась в экспериментах по исследованию функции возбуждения полных сечений реакции  ${}^4, {}^6\text{He}$ ,  ${}^6, {}^7\text{Li} + \text{Si}$  [2, 3]. Схема а.к. на основе Si-детекторов приведена на рис. 1а. Методика основывается на тонких Si-детекторах, удовлетворяющих принципиальному условию — металлизированные выводы электродов детектора для подсоединения контактов выведены из зоны перекрытия обоих электродов.

На рис. 1а детектор схематически представлен в проекции “вид сверху” и в разрезе. Кругом отмечены перекрывающиеся металлизированные поверхности электродов, “лепестками” — выводы для подсоединения контактов. Лепестки электрических выводов находятся на диаметрально-противоположных сторонах электродов детектора и расположены так, чтобы не образовывать зоны перекрытия. Закрашенные поверхности отмечают контакты электродов. Внутренний объем детектора, данного в разрезе, может быть разделен на три зоны детектора: объем с поверхностью, покрытой электродами с двух сторон (зона перекрытия электродов на рис. 1а показана двойной штриховкой), с одной из сторон (одинарная штриховка) и не покрытой электродами (без штриховки). На рис. 1б представлена двумерная  $dE_1$ – $dE_2$ -матрица энергетических потерь  ${}^6\text{He}$  в материалах соответствующих детекторов, где  $dE_2$  — детектор а.к. толщиной  $H = 19 \text{ мкм}$ . Слева от матрицы приведена ее проекция на  $dE_2$ -ось. Из этого рисунка видно, что благодаря различным условиям сбора носителей заряда в трех вышеуказанных зонах детектор а.к. имеет три различные функции отклика на частицы моноэнергетического пучка. Очевидно, а.к. имеет разные функции отклика  $dE_2$  на частицы с различными энергетическими потерями, что позволяет проводить их идентификацию. Недостатками устройств а.к. на базе Si-детекторов являются их недостаточное быстроедействие и большое количество вещества материала детектора (Si:  $11 \text{ мкм} \sim 5.5 \cdot 10^{19} \text{ атом/см}^2$ ). Вторым фактором становится существенным при снижении энергии пучков к величине кулоновского барьера.

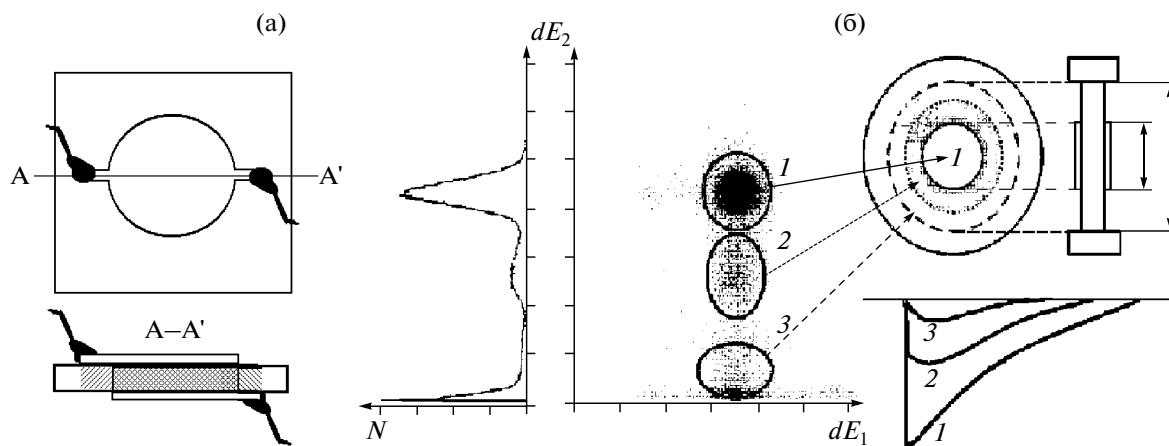


Рис. 1. а – схематическое изображение активного коллиматора с Si-детектором; б – двумерная  $dE_1$ – $dE_2$ -матрица энергетических потерь частиц и проекция матрицы на ось  $dE_2$ .

Действительно, чтобы измерить сечение реакции  ${}^6\text{He} + {}^{189}\text{Au}$  и  ${}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$  для энергии пучка  $E = 15$  МэВ при точности измерения энергии  $\Delta E < 1$  МэВ толщины  $H$  соответствующих мишеней должны быть ограничены величинами  $H < 3$  мкм и 10 мкм ( $1.8 \cdot 10^{19}$  и  $5.0 \cdot 10^{19}$  атом/см<sup>2</sup>) соответственно. Оптимально, с точки зрения вносимых погрешностей, иметь перед мишенью вещество а.к., толщина  $H_{\text{а.к.}}$  которого на порядок меньше толщины мишени, т.е.  $H_{\text{а.к.}} \sim 1.0 \cdot 10^{18}$  атом/см<sup>2</sup>. К настоящему времени минимальная толщина а.к. с поверхностью площадью  $\sim 1$  см<sup>2</sup> ограничена величиной  $H_{\text{а.к.}} \sim 8$  мкм ( $H_{\text{а.к.}} \sim 4.0 \cdot 10^{19}$  атом/см<sup>2</sup>), что совершенно недостаточно для их применения в вышеуказанной области исследований. Это ограничение связано, прежде всего, с проблемами технологий изготовления тонких Si-пластин высокой степени однородности по толщине, а также с возрастающими емкостными шумами детектора.

Между тем в последнее время наиболее интересные результаты экспериментов с радиоактивными ядрами были получены именно при энергиях вблизи кулоновского барьера [4, 5].

### АКТИВНЫЙ КОЛЛИМАТОР НА ОСНОВЕ М.К.П.-ДЕТЕКТОРОВ

С целью существенного уменьшения толщины а.к. был предложен детектор, регистрирующий факт попадания частицы пучка в определенную область мишени по электронам эмиссии. Источником электронов эмиссии служат тонкие фольги определенной формы (например X- и Y-полоски из сусального золота толщиной  $H_{\text{а.к.}} \sim 8.0 \cdot 10^{17}$  атом/см<sup>2</sup>), расположенные перед мишенью.

Устройство активного коллиматора на основе м.к.п.-детекторов, собрано на фланце DN160 (см. рис. 2а) и устроено следующим образом. Испускаемые источником  $\alpha$ -частицы последовательно

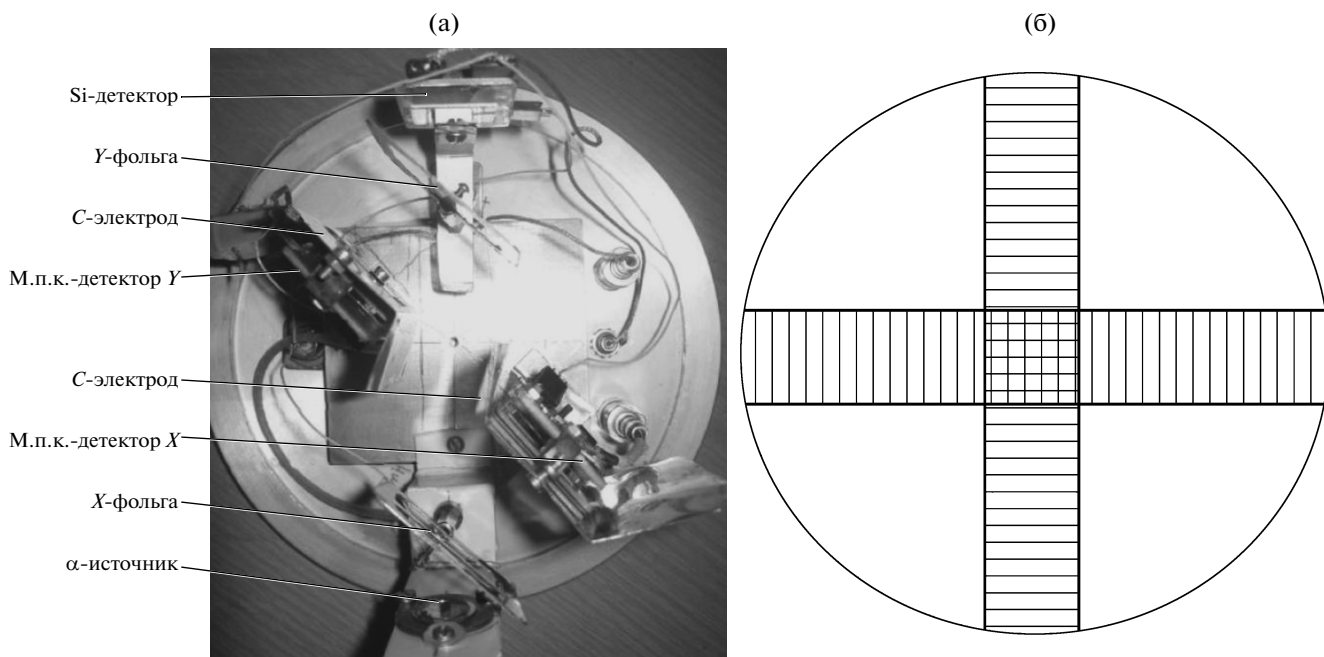
проходят (рис. 3) систему коллиматоров, X- и Y-рамки с тонкими полосками металлических фольг толщиной до 200–300 мкг/см<sup>2</sup> (сусальное золото, сусальное серебро), ориентированные по X- и Y-оси соответственно. Выбитые в процессе ионизационных потерь в фольгах электроны фокусируются электростатическими полями на детекторы м.к.п. X и м.к.п. Y. Фокусировка электронов осуществляется системой электродов (X-фольга, C-электрод, Y-фольга), находящихся под потенциалами  $HV_X$ ,  $HV_C$ ,  $HV_Y$  соответственно (см. рис. 3). Прошедшие через коллиматор (на рис. 3 отсутствует) и X, Y-рамки частицы попадают в Si-детектор. С помощью Si-детектора проводятся измерения энергии частиц, определяются их энергетические потери, а соответственно, и группы траекторий. На рис. 2б схематично представлены круглое окно коллиматора и X, Y-фольги в проекции на плоскость Si-детектора. Вертикальная и горизонтальная штрихованные полосы в круге соответствуют зонам затенения источника от X- и Y-фольги.

В соответствии с энергетическими потерями частиц все траектории частиц можно разделить на три группы:

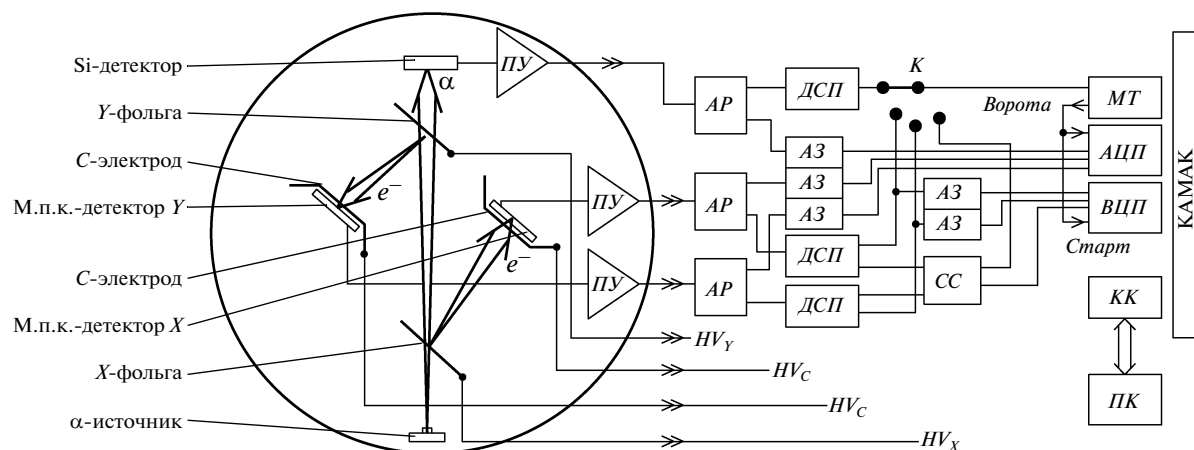
- частицы, влетевшие в детектор без взаимодействия с фольгами (вероятность событий пропорциональна не заштрихованной внутри круга площади, энергетические пики не смещены);

- частицы, попавшие в детектор после прохождения материала одной из фольг (вероятность событий пропорциональна суммарной площади с одинарной горизонтальной или вертикальной штриховкой);

- частицы, зарегистрированные в детекторе после прохождения ими двух фольг (вероятность событий пропорциональна площади с двойной штриховкой).



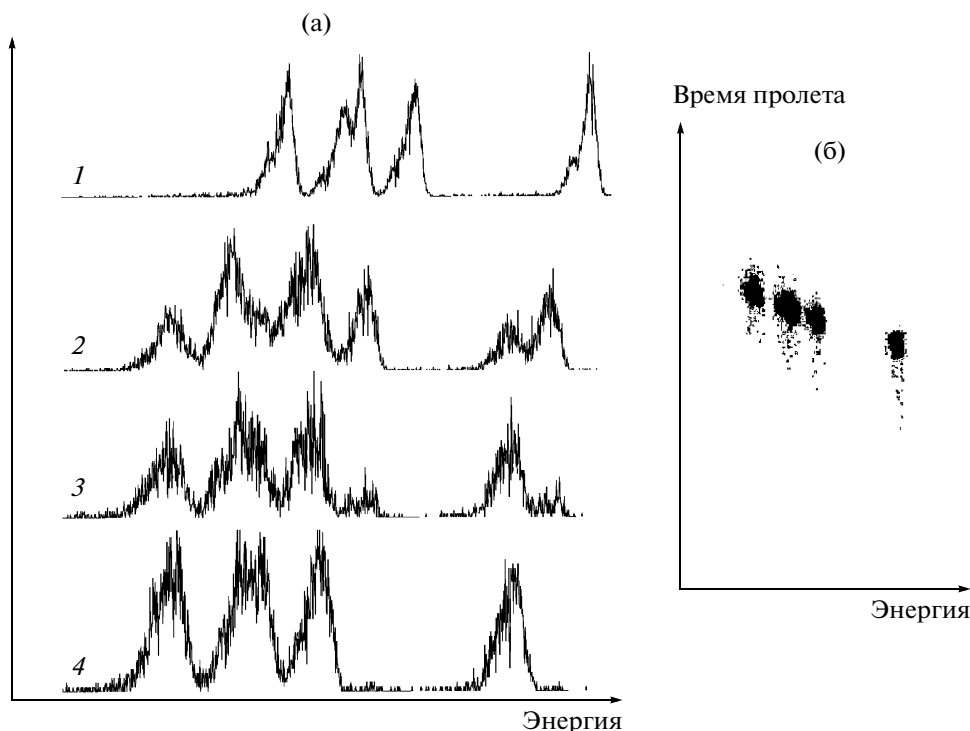
**Рис. 2.** а – активный коллиматор на основе м.п.к.-детекторов (вид сверху); б – схематическое изображение коллиматора и X, Y-фольг (вид со стороны детектора).



**Рис. 3.** Блок-схема электронной системы измерения эффективности и позиционной чувствительности м.п.к.-детекторов активного коллиматора. ПУ – предусилитель, АР – аналоговый разветвитель, ДСП – дискриминатор со следящим порогом, АЗ – аналоговая задержка, СС – схема совпадений, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ВЦП – времяцифровой преобразователь, МТ – мастер-триггер, КК – кейт-контроллер, ПК – персональный компьютер.

Таким образом, измерение в каждом событии энергии регистрируемой частицы дает возможность определять пространственную информацию о траектории частицы в каждом событии, а организация старта регистрации событий от полупроводникового детектора позволяет определять эффективность м.п.к.-детекторов. Данная идея реализована в электронной схеме, представленной на рис. 3. Токовые импульсы с предусилителя ПУ Si-детектора разветвляются аналоговым разветвителем АР и поступают на вход дискриминатора

со следящим порогом ДСП, а через аналоговую задержку АЗ – на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП. Логический сигнал с ДСП поступает на переключаемый вход К блока мастер-триггера МТ. При появлении импульса на входе МТ тот вырабатывает импульс стандарта NIM регулируемой длительности, служащий как импульсом Ворота для открытия АЦП, так и импульсом Старт для старта преобразователя время–цифра ВЦП. По истечении заданного времени после появления импульсов Ворота и Старт МТ выраба-



**Рис. 4.** а – энергетические спектры  $\alpha$ -частиц  $^{226}\text{Ra}$ , в соответствии с характерными смещениями пиков в которых траектории  $\alpha$ -частиц разделяются на три группы: без взаимодействия (спектр 1), прошедших только через одну из фольг (высокоэнергетические компоненты пиков в спектрах 2 и 3), прошедших сразу через две фольги (низкоэнергетические компоненты пиков в спектрах 2 и 3 и спектр 4); б – двумерный спектр  $\alpha$ -частиц “время пролета – энергия” от источника  $^{226}\text{Ra}$  (время пролета на пролетной базе между X- и Y-фольгами ( $L \sim 11$  см) и энергия  $\alpha$ -частиц в Si-детекторе – в произвольных единицах).

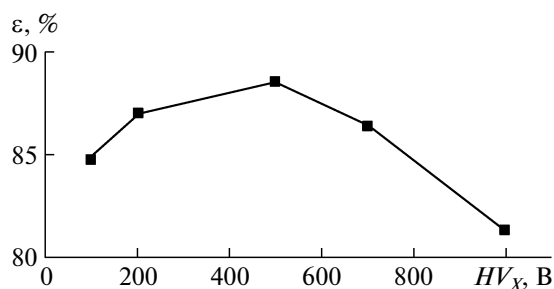
тывает в шину КАМАК сигнал запроса *LAM* к обработке события. Блоки АЦП и ВЦП постоянно закрыты по входу и открываются только импульсами от *MT*. Токвые импульсы с предусилителей ПУ м.к.п.-детекторов также разветвляются в блоках АР и поступают на входы ДСП, а через аналоговые (кабельные) задержки АЗ – на входы АЦП. Логические сигналы с ДСП поступают как на переключаемый вход К блока *MT*, так на схему совпадений СС и далее через задержки АЗ на входы “Стоп” ВЦП. Выход СС также подключен к входу К блока *MT* и к одному из “Стоп”-входов ВЦП.

Таким образом, электронная схема установки позволяет организовать записи событий от сигнала любого из детекторов установки, проводить настройку детекторов и определять эффективности как отдельных м.к.п.-детекторов, так и их совпадений, а также получать дополнительную информацию для идентификации частиц по времени пролета. На рис. 4б представлен двумерный спектр “время пролета – энергия”  $\alpha$ -частиц  $^{226}\text{Ra}$ , где по шкале ординат отложено время пролета на времяпролетной базе длиной 11 см, а по шкале абсцисс – энергия  $\alpha$ -частиц в Si-детекторе.

На рис. 4а представлены энергетические спектры  $\alpha$ -частиц  $^{226}\text{Ra}$ , полученные при различных

условиях: при отсутствии фольг (спектр 1); в совпадении с м.к.п. Y (спектр 2); в совпадении с м.к.п. X (спектр 3); в тройных совпадениях Si-детектора с м.к.п. X и с м.к.п. Y (спектр 4).

Для большей наглядности наличия энергетических сдвигов пиков в спектрах  $\alpha$ -частиц  $^{226}\text{Ra}$ , по которым производится идентификация соответствующих траекторий, на этом рисунке представлены спектры, накопленные при более толстых м.к.п. X- и м.к.п. Y-фольгах (металлизированный майлар толщиной  $H \sim 3$  мкм). Расщепление смещенного по энергии пика  $E = 7.68$  МэВ в спектрах 2 и 3 соответствует прохождению частицы как через одну, так и две фольги. Отсутствие в спектрах 2 и 3 не смещенной компоненты пика  $E = 7.68$  МэВ отражает факт отсутствия случайных совпадений. В спектре 4 присутствуют только пики, смещенные на величины, соответствующие энергетическим потерям при прохождении частиц через две фольги. С помощью анализа энергетических спектров были определены эффективность  $\varepsilon(V)$  регистрации м.к.п.-детекторов и оптимальные величины напряжений смещения как на X, Y-фольгах, так и на фокусирующих C-электродах. В качестве примера на рис. 5 представлена зависимость  $\varepsilon(V)$  эффективности регистрации м.к.п.-детектора X от напряжения смещения  $HV_X$ .



**Рис. 5.** Функциональная зависимость эффективности регистрации  $\varepsilon(V)$  м.к.п.-детектора  $X$  от напряжения смещения  $HV_X$  при нулевом значении потенциала фокусирующего электрода ( $HV_C = 0$ ).

Данная зависимость эффективности м.к.п.-детектора измерена при регистрации электронов, эмитирующих из сплошной фольги с полностью открытым  $\alpha$ -источником при нулевом значении потенциала фокусирующего электрода и при отсутствии электростатических зеркал, вносящих дополнительное воздействие на частицы пучка. Данная кривая демонстрирует существование оптимальной ( $\varepsilon(V) \sim 90\%$ ) величины потенциала  $HV_X$ , не превышающей нескольких сотен вольт.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения экспериментов с ускоренными пучками экзотических ядер с энергиями вблизи кулоновского барьера ядерных реакций по измерению полных сечений реакции в области низких энергий разработан метод активного коллиматора. Методика содержит два блока м.к.п.-детекторов и тонкие полоски металлических фольг толщиной

не более  $200\text{--}300$  мкг/см<sup>2</sup> (Au, Ag, Al), ориентированные по  $X$ - и  $Y$ -осям плоскости, перпендикулярной оси пучка. М.к.п.-детекторы регистрируют проходящие через фольги экзотические ядра по электронной эмиссии из этих фольг. Это дает возможность определять пространственную информацию о траектории частицы и временную отметку для регистрации событий. Предложенная методика активного коллиматора имеет наименьшее из существующих методик количество вещества  $\sim 8.0 \cdot 10^{17}$  атом/см<sup>2</sup>, обладает высокой эффективностью ( $\varepsilon \sim 90\%$  по каждому м.к.п.-тракту) и временным разрешением, достаточным для осуществления дополнительной идентификации радиоактивных ядер по времени пролета.

Мы благодарны конструктору В.В. Щетинкиной за разработку узлов аппаратуры и Г.Ф. Исаеву за помощь в работе.

Данная работа была выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ при поддержке гранта РФФИ 09-02-00196а, а также гранта Полномочного представителя Республики Чехия в ОИЯИ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пенионжкевич Ю.Э. // ЭЧАЯ. 1994. Т. 25. С. 930.
2. Соболев Ю.Г., Будзановский А., Бялковский Э. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 11. С. 1603.
3. Угрюмов В.Ю., Кузнецов И.В., Бялковский Э. и др. // Ядерная физика. 2005. Т. 68. № 1. С. 17.
4. Penionzhkevich Yu.E., Astabatyian R.A., Demekhina N.A. et al. // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 31. P. 185; Preprint JINR E7-2006-75. Dubna, 2006.
5. Пенионжкевич Ю.Э. // Ядерная физика. 2009. Т. 72. № 10. С. 1674.