

УДК 539.172.13:539.171:539.142

ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ

© 2021 г. М. В. Мордовской^{1, 2, *}, В. В. Мицук^{1, 2}, И. В. Суркова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

*E-mail: mvmdovsk@mail.ru

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.

После доработки 28.12.2020 г.

Принята к публикации 27.01.2021 г.

С помощью источника α -излучения ОСАИ Ra-226 измерены зависимости временных параметров линейки кремниевых детекторов от напряжения смещения. Кроме разрешений амплитудного и временного определялись длительность и форма фронта сигналов. Проведено определение временного разрешения установки для изучения реакций на легких ядрах и его калибровка. Даны рекомендации по оптимальной последовательности таких измерений.

DOI: 10.31857/S036767652105015X

ВВЕДЕНИЕ

В нашей лаборатории проводятся исследования реакций на легких ядрах на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ с использованием двухплечевого спектрометра из полупроводникового кремниевого ΔE – E телескопа заряженных частиц и детекторов нейтронов в другом плече [1]. Детектирование в совпадении заряженных частиц и нейтрона является одним из основных условий в таких экспериментах. При этом необходимы измерение энергий частиц с точностью, определяемой типом конкретного эксперимента, и отбор событий по типу частицы (для заряженных по ΔE – E диаграммам, а для нейтронного канала $n\gamma$ -разделение по форме импульса). Энергия нейтрона вычисляется из его времени пролета, которое получается из разницы времен прихода сигналов от кремниевого детектора (Si-детектора) и сцинтилляционного детектора в другом плече. С учетом возможностей для установки детекторов в экспериментальной зоне пролетные расстояния составляют ≈ 1.5 – 2 м. Что по результатам моделирования для большинства планируемых экспериментов приводит к требованию необходимого временного разрешения установки ≤ 1.5 нс. Также требуется и измерение нулевой временной отметки с точностью ≈ 0.2 нс, отвечающей одновременному приходу частиц в детекторы обоих плеч.

В качестве детекторов нейтронов используются сцинтилляционные детекторы на основе ФЭУ Hamamatsu 2083 и жидких сцинтилляторов EJ301 и EJ315. Временное разрешение этих детекторов

измерялось при регистрации $\gamma\gamma$ -совпадений при распаде ^{22}Na и составляло ≈ 0.5 – 0.6 нс.

Результатирующее временное разрешение установки в нашем случае определяется Si-детектором. Для его определения ранее мы проводили на ускорителе калибровочный эксперимент, соответствующий кинематике двухчастичной реакции $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ с регистрацией нейтрона и ${}^3\text{He}$ под определенными углами. При этом можно однозначно выделить энергию нейтрона [2].

Такие калибровочные измерения являются наиболее предпочтительным, поскольку условия измерения совпадают с условиями основного эксперимента. Однако они требуют затрат ускорительного времени. А в случае замены и подбора Si-детекторов значительное, если заранее неизвестны временные параметры детектора.

Задача предварительной проверки Si-детектора, а также измерение временного разрешения и калибровки временного канала может быть решена в лабораторных условиях, без использования ускорителя. Из известных способов можно упомянуть, например, измерения с регистрацией генерируемых вспышек света [3] или при регистрации “убегающих” электронов [4]. Положительное свойство таких измерений: наличие генераторного стартового импульса и возможность получать пучок частиц с заданными характеристиками. Относительный недостаток в отличии от условий основного эксперимента по энергиям и типу регистрируемых частиц.

Еще один способ определения временных характеристик детекторов – регистрация коррели-

рующих сигналов от частиц при радиоактивном распаде источника.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Мы использовали в измерениях α -источник ОСАИ Ra-226. Первая ступень распада ^{226}Ra (на ^{222}Rn) в 94,6% случаев происходит через альфа-распад ($E_\alpha = 4784,4$ кэВ), а в 5,4% случаев сопровождается и испусканием γ -кванта с энергией 185,7 кэВ. Регистрируя одновременно испускаемые частицы – альфа-частицы полупроводниковым детектором и гамма-кванты сцинтилляционным детектором можно определять временные характеристики детекторов.

На рис. 1 приведена схема эксперимента. Структура и состав установки (детекторы и система сбора информации) такие же, как в основных экспериментах. Схема почти стандартная для таких измерений. Из особенностей отметим то, что оцифровывается и записывается форма регистрируемых сигналов от одновременно испускаемых в распаде альфа- и гамма-частиц в цифровых сигнальных процессорах (ЦСП). На рисунке видно четыре канала записи сигналов. Первый для записи “медленных”, спектрометрических сигналов и изучения амплитудного разрешения Si-детектора: цепочка детектор 1, предусилитель 4, усилитель 6, ЦСП DT5720. Второй и третий – для записи “быстрых”, временных сигналов от Si- и сцинтилляционного детекторов: детекторы 1–2, усилители 5, ЦСП DT5742. Записанные сигналы обрабатываются в режиме “off-line”. Последний канал – только для оперативного контроля “on-line” за временным распределением сигналов: детекторы 1–2, усилители 5, формирователи со следящим порогом 7, время-амплитудный преобразователь 8, ЦСП DT5720.

Если не задаваться целью измерять с высокой точностью амплитудное разрешение детектора, то достаточно иметь только второй и третий канал, без оцифровки спектрометрического сигнала на ЦСП DT5720 (у ЦСП DT5720 шаг оцифровки 4 нс и длина буфера записи в десятки микросекунд, что позволяет записывать микросекундный спектрометрический сигнал; у DT5742 шаг – 0,2 нс, что подходит для временных измерений, но всего 200 нс диапазона [5]).

Известно, что на результирующее временные и амплитудные характеристики Si-детектора большое влияние оказывает выбор предусилителя (ПУ). Мы проводили измерения с тремя типами ПУ: ORTEC 142A, ORTEC H242A, CANBERRA 2003BT. Все приведенные ниже данные относятся к измерениям с ПУ CANBERRA 2003BT. В этом ПУ выходной “быстрый” сигнал создается дифференцированием основного длинного выходного сигнала. Амплитуда такого “временного” сигнала сильно зависит от крутизны переднего фронта и

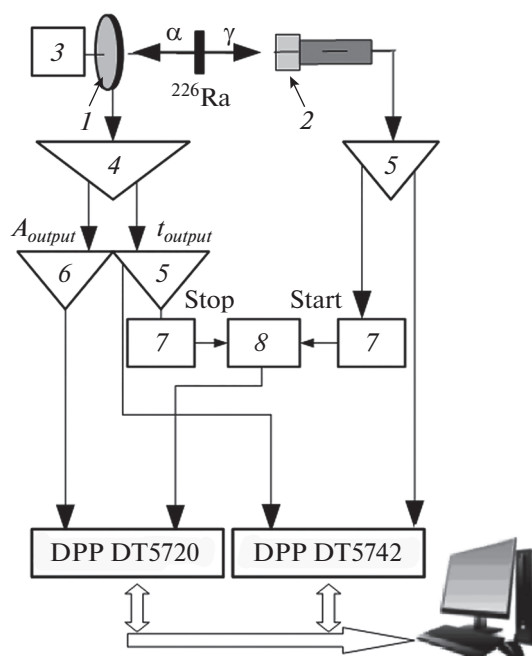


Рис. 1. Схема эксперимента. Обозначения: 1 – Si-детектор, 2 – сцинтилляционный детектор, 3 – источник напряжения смещения и контроля тока CAEN DT5472, 4 – предусилитель CANBERRA 2003BT, 5 – быстрый усилитель PHILIPS 7177, 6 – медленный усилитель ORTEC 472, 7 – формирователь CANBERRA QUAD CFD 454, 8 – ВАП INTERTECHNIQUE TA-22.

существенно меньше, чем амплитуда “медленного” сигнала. И поэтому такой сигнал является определяющим нижний порог по энергии регистрируемых заряженных частиц в эксперименте.

Одной из целей проведенных измерений была отработка методики отбора детекторов и выбора для них рабочей точки, обеспечивающей наилучшее временное и амплитудное разрешение при амплитуде “быстрого” сигнала, превышающей заданный порог регистрации заряженных частиц.

Меняя с определенным шагом напряжение смещения, в течение 30 мин записывались сигналы от Si- и сцинтилляционного детекторов, при этом измерялись ток и температура Si-детектора. Стартовыми синхронизирующими импульсами были сигналы от сцинтилляционного детектора как наименее загруженного. Для иллюстрации на рис. 2 приведен амплитудный спектр регистрируемых Si-детектором альфа событий в двух режимах: без совпадений с сигналами сцинтилляционного детектора и с совпадениями. Видно значительное выделение при работе в режиме совпадений линии α -спектра, относящейся к первой ступени распада ^{226}Ra .

Незначительное проявление остальных линий обусловлено случайными совпадениями, возникающих при определенной установке границ выборки выделения событий в амплитудном спектре использованного сцинтиллятора, относящихся

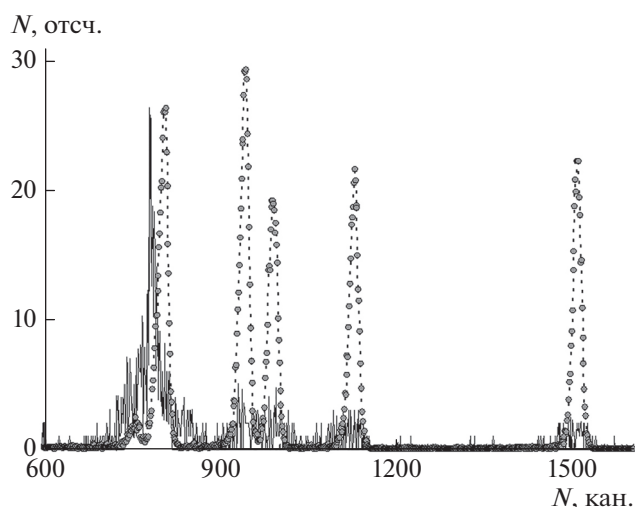


Рис. 2. Амплитудный спектр α -частиц в двух режимах измерений: штрихпунктирная линия и точки — без совпадений с регистрацией событий сцинтилляционным детектором, сплошные линии — с включенными совпадениями. Время измерений 30 мин. Шкала ординат для помеченного точками спектра разделена на 200.

ся к γ -линии в 185.7 кэВ (спектр представляет собой широкие комптоновские распределения).

Обработка записанной информации проводилась в режиме “off-line”. Для сигналов записанного массива определяются максимумы, по ним выделяются события, отвечающие соответствующим энергиям коррелирующих α - и γ -частиц. Для отобранных событий определяется длительность фронта сигнала на уровне 0.1–0.9 от амплитуды, проверяет-

ся отклонение от заданной средней формы быстрого сигнала, амплитуда среднего шума. Определяются времена прихода сигналов (по методу следящего порога) и разница этих времен для совпадающих сигналов. Величина распределения и считается временным разрешением канала, а положение центральной точки распределения определяет временную калибровку. Все распределения были существенно шире 0.6 нс, т.е. соответствуют вкладу от временного разрешения Si-детектора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При прочих равных условиях временное разрешение должно определяться передним фронтом сигнала и величиной отношения сигнал/шум. Продолжительность и форма переднего фронта сигнала могут зависеть в разной степени от напряженности поля, в котором собираются заряды, от типа регистрируемой заряженной частицы, от величины пробега в детекторе (и от условия — прошла или поглотилась частица в детекторе), от того с какой стороны детектора входит частица [6, 7]. Все детекторы в наших измерениях облучались с “лицевой” стороны.

Измерения были проведены для двенадцати поверхностно-барьерных Si-детекторов разных производителей. Площадь детекторов от 20 до 150 мм², толщина рабочего слоя от 25 до 550 мкм. Все детекторы ранее подвергались облучению и были изготовлены 10–30 лет назад. Для всех детекторов измеренные зависимости имели схожее поведение.

На рис. 3 приведены примеры части измеряемых зависимостей для одного детектора произ-

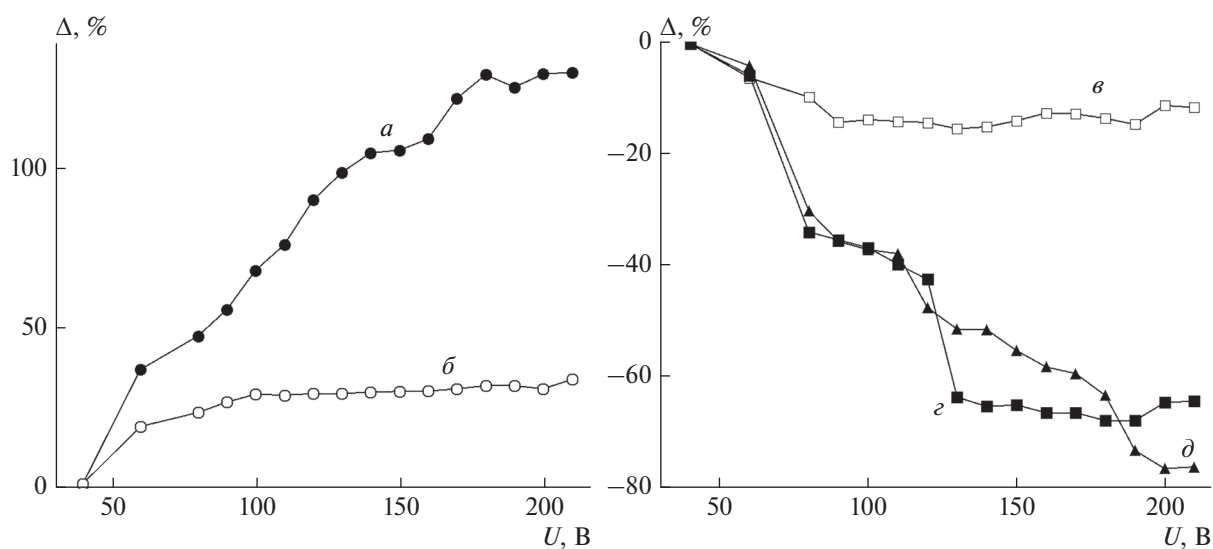


Рис. 3. Зависимости изменения измеряемых величин от напряжения смещения для одного детектора, в процентах относительно произвольно выбранной точки 40 В напряжения смещения. Кривые *a* и *б* — изменение амплитуд “быстрого” и “медленного” сигналов. Шкала ординат для кривой *б* умножена на 10. Кривая *в* — изменение ширины пика с энергией ~5 МэВ в амплитудном спектре α -частиц (отражает изменение амплитудного разрешения), кривая *г* — изменение ширины распределения разницы времен прихода сигналов от Si- и сцинтилляционного детекторов (отражает изменение временного разрешения). Кривая *д* — изменение длительности фронта “быстрого” сигнала.

водства ORTEC толщиной 250 мкм, площадью 80 мм². Паспортное значение рабочего напряжения – 100 В.

Все зависимости приводятся в виде изменений величин параметров в % (увеличение с плюсом или уменьшение с минусом) относительно точки по напряжению питания 40 В. На левой части рисунка показаны зависимости амплитуды выходных сигналов предусилителя “медленного” канала (кривая б) и “быстрого” каналов (а) от прикладываемого напряжения. Видно, что по достижению паспортной рабочей точки в 100 В амплитуда “медленного” сигнала фактически не изменяется. При этом рост “быстрого” сигнала не прекращается. “Быстрый” сигнал образуется в результате дифференцирования исходного выходного сигнала предусилителя. Поэтому такое поведение означает, что укорачивается фронт сигнала. Что можно видеть на правом рисунке (кривая д). Можно было бы ожидать при уменьшении фронта сигнала и улучшение временного разрешения (кривая г, меньше значение распределения – лучше разрешение). Однако насыщение изменения временного разрешения наступает гораздо раньше, чем это происходит с фронтом сигнала (хотя и позже, чем перестает улучшаться амплитудное разрешение, кривая в). Это возможно если, например, с увеличением питающего напряжения падает соотношение сигнал/шум (но это проявлялось бы и в ухудшении амплитудного разрешения); если увеличивается джиттер сигнала (однако ширина распределения величин длительности фронта сигнала не показывает значительного изменения), в случае изменения формы сигнала, что при постоянных параметрах обработки сигнала (сдвиги и коэффициент деления программного следящего порогового формирователя) могло бы приводить к таким результатам. В задачи данной работы такое исследование не входило.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате измерений показано, что отладку и калибровку временного канала установки можно проводить с помощью α -источника ОСАИ. Для получения приемлемой статистики достаточно 60 мин. При поиске оптимального рабочего напряжения для

временных характеристик детектора одна точка измерений занимает примерно 20–30 мин.

Для рассматриваемого набора Si-детекторов рабочая точка по напряжению смещения для наилучшего временного разрешения не совпадает с таковой по амплитуде и достигается при более высоких напряжениях. Выход на плато в зависимости временного разрешения от напряжения наступает намного раньше, чем достигается минимальное время нарастания, т.е. чтобы достичь наилучшего разрешения по времени недостаточно ориентироваться по переднему фронту сигнала, а необходимы измерения этого разрешения.

Если необходим низкий порог регистрации заряженных частиц, то следует увеличивать питающее напряжение до достижения необходимой амплитуды “быстрого” сигнала с учетом соображений безопасности для детектора (в этом случае также наиболее вероятно достижение наилучшего разрешения по амплитуде и времени). После этого измерить амплитудное и временное разрешение. Затем снизить напряжение и проверить факт выхода зависимостей на плато.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-32-00944).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коновеевский Е.С., Афонин А.А., Зуев С.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84 № 4. С. 492; Konobeevski E.S., Afonin A.A., Zuyev S.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 4. P. 378.*
2. *Зуев С.В., Каспаров А.А., Коновеевский Е.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 3. С. 260; Zuyev S.V., Kasparov A.A., Konobeevski E.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. No. 3. P. 232.*
3. <https://www.ortec-online.com/-/media/ametkortec/other/fast-timing-discriminator-introduction.pdf?la=en>.
4. *Бабич Л.П., Лойко Т.В., Родигин А.В. // ПТЭ. 2014. № 3. С. 21; Babich L.P., Loiko T.V., Rodigin A.V. // Instrum. Exp. Tech. 2014. V. 57. No. 3. P. 248.*
5. <https://www.caen.it/products/dt5720/>; <https://www.caen.it/products/dt5742/>.
6. *Гуров Ю.Б., Чернышев Б.А. Телескопические полупроводниковые детекторы для ускорительных экспериментов. М: НИЯУ “МИФИ”, 2012. 96 с.*
7. *Mutterer M., Trzaska W.H., Tyurin G.P. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2000. V. 47. No. 3. P. 756.*

The time parameters of silicon detectors dependence on bias voltage

M. V. Mordovskoy^{a, b, *}, V. V. Mitcuk^{a, b}, I. V. Surkova^a

^a*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

^b*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701 Russia*

*e-mail: mvmordovsk@mail.ru

Using an α -radiation source Ra-226 the dependences of the time parameters of a set of silicon detectors on the bias voltage are measured. Together with the amplitude resolution and time resolution the duration and shape of the signal front were determined. Determination of the time resolution of the setup for studying reactions on light nuclei and its calibration have been performed. Recommendations are given on the optimal sequence of such measurements.