

УДК 539.172.13:539.171:539.142

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИЗА ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОВЕДЕНИЯ КРИВЫХ НА ДИАГРАММАХ $\Delta E-E$, ПОЛУЧЕННЫХ НА ТЕЛЕСКОПЕ Si-ДЕТЕКТОРОВ

© 2022 г. М. В. Мордовской¹, *, И. В. Суркова¹

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

*E-mail: mvmordovsk@mail.ru

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

Для кремниевых полностью обедненных поверхностно-барьерных детекторов наблюдается изменение формы импульса в зависимости от условия полного поглощения или прохождения заряженной частицы через детектор. Предлагается способ получения и использования такой информации для разделения линий прямого и обратного хода в локусах на двумерных диаграммах $\Delta E-E$, с параметризацией, аналогичной широко используемому методу PSD при разделении гамма-квантов и нейтронов.

DOI: 10.31857/S0367676522040172

ВВЕДЕНИЕ

Анализ формы импульса детектора при регистрации различных частиц (pulse shape analysis (PSA) метод) широко применяется в ядерно-физических экспериментах для определения параметров частиц. Наиболее известное раннее использование такого метода датируется 1963 г. [1].

Предлагались, и до сих пор предлагаются различные варианты анализа и методы его использования [2].

Наибольшее количество способов реализации метода PSA было предложено для определения типа частицы (например, метод интегрирования зарядов, метод параметра баланса заряда, которые широко используются для дискриминации нейтронов и γ -квантов).

В 1970 г. была обнаружена возможность различать протоны и альфа-частицы по времени нарастания импульса в кремниевом детекторе.

Использование PSA анализа и методы его реализации связаны с развитием экспериментальной базы. Первоначальные варианты были основаны на использовании аналоговой электроники и обработки сигналов в “on-line” режиме. С развитием цифровой техники и появлением быстродействующих оцифровщиков сигнала стало возможным проводить полный анализ формы сигнала с привлечением сложного математического аппарата в “off-line” режиме с использованием преобразований Фурье, вейвлет-анализом и т.д. [3].

За последние двадцать лет значительные успехи были достигнуты в определении типа регистрируемой заряженной частицы в кремниевых детекторах с использованием одного кремниевых E -детектора, т.е. без обычного использования $\Delta E-E$ телескопа. Это позволяет существенно упростить и удешевить большие установки. При этом анализ формы импульса дает достаточную информацию о частице и позволяет определять Z и A и снизить порог идентификации за счет отсутствия ΔE детектора.

Поскольку идентификация частиц для полностью обедненного Si-детектора в основном зависит от эффекта эрозии плазмы, получаемой при прохождении заряженной частицы, и эффекта разницы параметров сбора носителей заряда, то все подобные эксперименты проводятся с облучением детекторов с обратной стороны (стороны малого поля). В этом случае эффект эрозии максимален. Идентификация заключается в анализе форм импульсов тока (например, при одинаковой энергии более тяжелая частица генерирует более длительный импульс, но с меньшей амплитудой в отличие от более легкой частицы).

Чтобы восстановить амплитудные и временные параметры детектора, ухудшающиеся при облучении со стороны малого поля (далее обратное облучение), приходится поднимать напряжение на детекторе, иногда значительно (что для малобюджетных экспериментов может быть рискованным).

Использовать анализ формы импульса можно также и для более узких задач. Далее описывается его применение для идентификации сигналов кремниевых детекторов, соответствующих либо полному поглощению заряженной частицы, либо факту ее прохождения через детектор

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕШАЕМАЯ ЗАДАЧА

В нашей лаборатории проводится серия экспериментов по изучению реакций взаимодействия протонов, дейтронов, альфа-частиц с легкими ядрами. Измерения выполняются на двухплечевом спектрометре на ускорителе У-120 Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына при МГУ имени М.В. Ломоносова. Спектрометр состоит из телескопа ΔE – E кремниевых поверхностно-барьерных детекторов заряженных частиц в одном плече и сцинтилляционных детекторов в другом плече. С помощью телескопа определяется энергия и тип заряженных частиц, детекторы телескопа также вырабатывают стартовый импульс для измерения энергии нейтронов во времени пролета в сцинтилляционных детекторах. В сцинтилляционных детекторах также происходит отделение нейтронных событий от гамма-излучения по форме импульса.

В спектрометре установлен набор полностью обедненных кремниевых поверхностного барьерных детекторов ORTEC 25, 300, 400, 500 мкм. В отличие от описанных выше случаев облучение осуществлялось с лицевой стороны детекторов. Усилительный тракт кремниевых детекторов – это предварительные усилители (ПУ) типа ORTEC Н242А, 142А и Canberra 2003ВТ (в работе приводятся данные для случая использования ПУ Canberga 2003ВТ). Используемые ПУ имеют спектрометрические (“медленные”) и быстродействующие (“быстрые”) сигнальные выходы, которые необходимы для функционирования системы определения времени пролета нейтронов (TOF). Далее сигналы усиливаются усилителями Ortec 570 и Philips 7177 для амплитудных и временных сигналов, соответственно. Тракт для детекторов на основе сцинтилляторов EJ301, регистрирующих нейтроны и γ -кванты в другом плече установки – на основе усилителей Philips 7177.

Сигналы оцифровываются цифровыми сигналами процессорами CAEN DT5742 (шаг квантования по времени 0.2 нс) и DT5720 (4 нс) и анализируются в режиме “offline”.

В осциллограммах сигналов от зарегистрированных событий детекторами телескопа ΔE – E определялись максимальные амплитуды медленного и быстрого сигналов, для быстрых сигналов – длительности переднего фронта и спада (по уровням 0.1–0.9 от максимальной амплитуды). Пол-

ного частотного или фазового анализа не проводилось.

Из сигналов, выработанных ΔE – E детекторами телескопа строится двумерная диаграмма: амплитуда сигналов ΔE в зависимости от амплитуды сигналов E детектора. Пример такой диаграммы для части наших результатов в эксперименте [4] по изучению реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ при энергии дейтронов $E_d = 15$ МэВ можно видеть на рис. 1а.

В данном случае нами использовался телескоп из 2 детекторов: ΔE – толщиной 25 мкм и E – 400 мкм.

На диаграмме отмечены кривые (локусы), соответствующие регистрации телескопом протонов, дейтронов и ${}^3\text{He}$. При этом прямой ход кривых в локусах (наклон слева – направо) – соответствует поглощению частиц в E детекторе, обратный – пролету сквозь него.

Из диаграммы можно получить информацию о типе частицы (это принадлежность к какому-либо локусу) и энергии частицы (суммированием с учетом калибровок амплитуд ΔE и E). Это основная задача при анализе таких диаграмм. Возможность разделения локусов и, соответственно, определения энергии и типа частицы, зависит от, например, амплитудного разрешения, наличия сильных пиков в амплитудных спектрах, замывающих картину и т.д. Особенно много подобных трудностей в обработке информации и идентификации частиц возникает при использовании в телескопе детекторов в большем количестве, чем 2 (например, [5]).

Далее описывается одна из возможностей для помощи в решении задачи определения принадлежности зарегистрированного сигнала к той или иной области локусов.

В части экспериментов мы оцифровывали амплитуды спектроскопических и быстрых временных сигналов без записи и анализа спектрограмм. В двумерных диаграммах взаимозависимостей амплитуд быстрых и медленных сигналов в E детекторе наблюдаются выделенные области для зарегистрированных частиц (p, d, t), соответствующие поглощенным и пролетевшим детектор частицам. Однако качество разделения не позволяло уверенно идентифицировать выделенные области. В дальнейших экспериментах установка позволяла оцифровывать сигналы уже с достаточным для полного анализа формы шагом.

Целью описываемых процедур было получение простого способа разделения событий по признаку поглощения или пролета частицы через E детектор для улучшения анализа двумерных диаграмм ΔE – E . Нами рассматривались зависимости величин амплитуд быстрых, медленных сигналов ПУ, длительностей ведущего и заднего

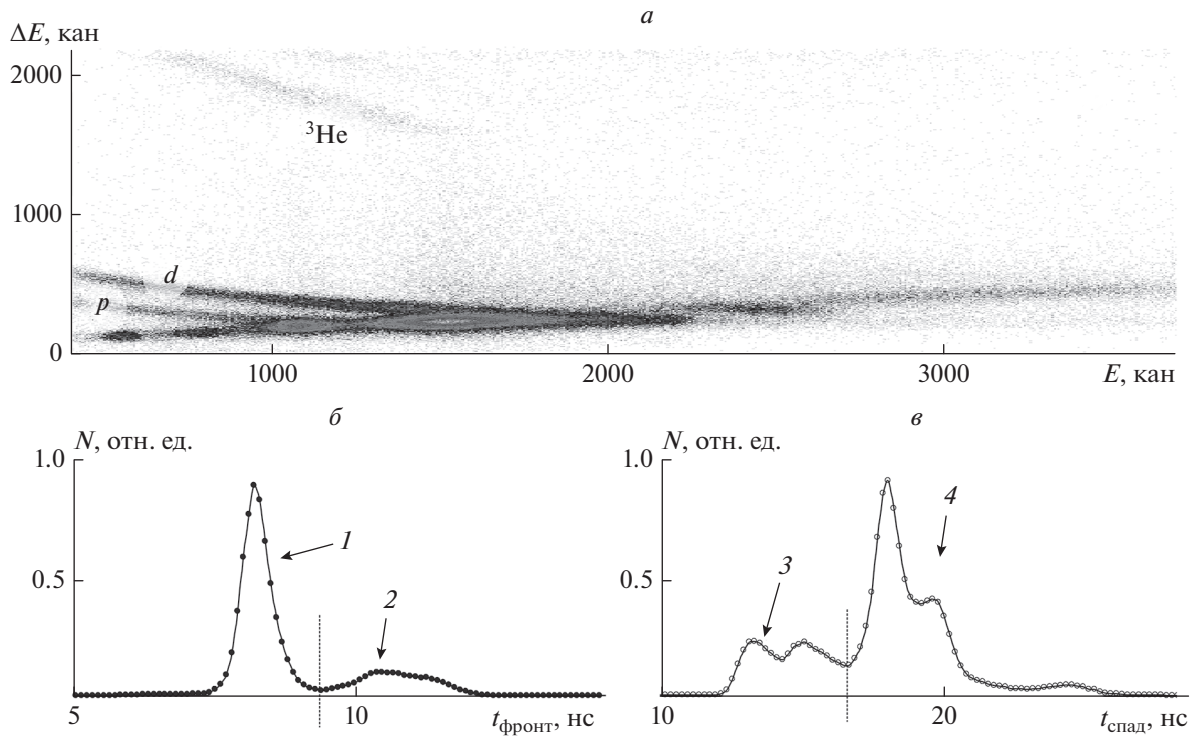


Рис. 1. Двумерная диаграмма $\Delta E-E$. Отмечены локусы протонов, дейтронов и ${}^3\text{He}$ на прямом ходе (а). Спектры длительности фронта сигналов и спада сигналов E детектора, соответственно, для данных диаграммы а (б, в). Вертикальными штриховыми линиями и цифрами отмечены области, для которых эти длительности характеризуют изменение поведения локусов на диаграмме а.

фронтов сигналов друг от друга и различные комбинации этих параметров от энергии частиц.

На рис. 1а приведена двумерная диаграмма амплитуд сигналов от ΔE и E детекторов. На рис. 1б и 1в для всех событий с этой диаграммы показаны спектры длительностей переднего фронта и спада сигналов E детектора. Видно, что изменение длительностей достаточно значительное, и на спектрах наблюдается разделение по областям.

В зависимости длительности спада сигнала от длительности переднего фронта проявляется тоже четкая картина разделения на четыре обособленных области: 1–3, 1–4 и 2–3, 2–4. Они также имеют форму, которая отражает зависимость от энергии частицы (амплитуды сигнала).

Если посмотреть, чему соответствуют указанные области на двумерной диаграмме $\Delta E-E$, то будет видно, что области 1–3 и 2–3 это сигналы, отвечающие фактически только прямому ходу локусов. Изменение длительности 1 и 2, возможно, относится к поведению формы сигналов от разного сорта частиц, однако для ответа на этот вопрос нужны дополнительные данные и измерения. На рис. 2в показана диаграмма $\Delta E-E$, соответствующая части событий с выделением по диапазонам 1–3 и 2–3 суммарно.

Рисунок 2б показывает диаграмму $\Delta E-E$, соответствующую событиям с временами из диапазонов 1–4 и 2–4. Видно, что разделение событий по вертикальной линии из спектра длительности заднего фронта фактически отделяет события для факта пролета частицы через детектор.

Можно показать, что если двигаться внутри области 4 в сторону увеличения длительности, то на диаграмме 2б будут проявляться события со все более увеличивающейся энергией.

Введем функцию, отражающую подобные зависимости рассматриваемых величин, с помощью которой можно решать поставленную задачу – разделение массива записанных событий на события для полностью поглощенных и пролетевших частиц. Перебор различных комбинаций показал, что простой вариант, аналогичный применяемому для разделения γ -квантов и нейтронов (PSD метод), имеет достаточно высокий уровень качества разделения (FOM). Здесь мы тоже обозначили такую функцию как PSD, и определили как:

$$\text{PSD} = (t_{\text{спад}} - t_{\text{фронт}}) / (t_{\text{спад}} + t_{\text{фронт}}). \quad (1)$$

Возможные другие комбинации (с использование площадей, амплитуд сигналов) не давали существенных отличий от результатов использования варианта (1).

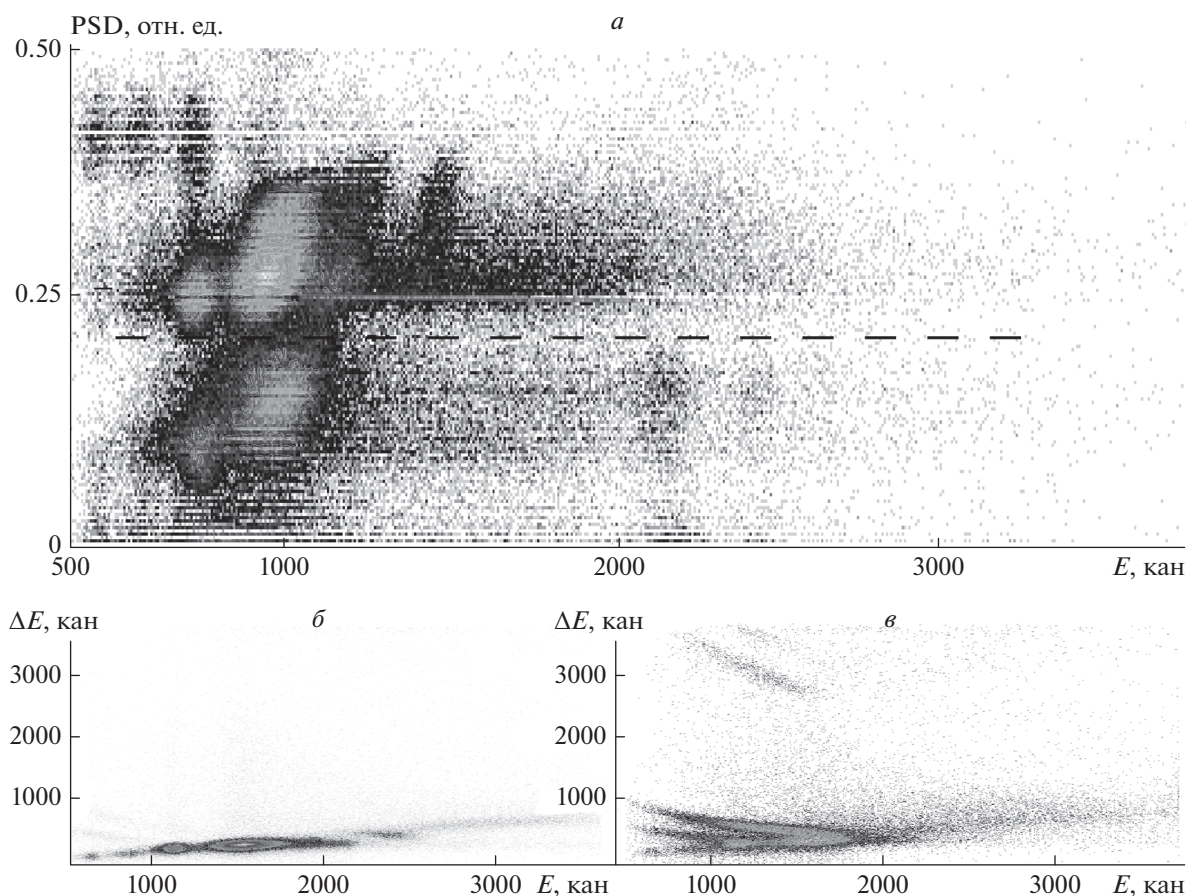


Рис. 2. Двумерная диаграмма функции PSD в зависимости от энергии частицы. Штриховой линией разделены области, соответствующие прямому и обратному ходу кривых в локсах (см. рис. 1а) (а). Результат разделения событий с учетом величины параметра PSD (б, в). Рисунок б соответствует отобранным событиям, лежащими выше штриховой линии рисунка а. Рисунок в – то же для событий, лежащих ниже штриховой линии раздела.

На рис. 2а приводится зависимость поведения функции PSD от энергии частицы. Видно разделение на две области (отмечено штриховой линией), которые и отвечают событиям поглощения или сквозного пролета частиц, что и иллюстрируют рис. 2б и 2в.

Длительности переднего и заднего фронтов сигналов должны плавно меняться с изменением амплитуды сигнала (энергии частицы).

Как уже было сказано, для обсуждения проявлений не плавного изменения формы переднего фронта (разделения на области 1 и 2) здесь недостаточно экспериментальной информации.

Одной из возможных причин описанных изменений длительности заднего фронта (для вылетающих частиц, области 1–4 и 2–4) могло бы быть локальное изменение напряженности поля за счет вносимого заряда при потерях энергии в области заднего электрода. В этом случае величина проявления эффекта – увеличение длительности заднего фронта – должна зависеть от энергии частицы в некоторой пропорции. (В двумер-

ной диаграмме с выделением, например, по области 1–4 это проявляется как увеличение длительности в 1.5 раза при увеличении энергии примерно в 2 раза). Для подтверждения или отрицания такого предположения в первую очередь требуются сравнительные измерения на детекторах, облучаемых с обратной стороны. Возможно, тогда такой эффект будет проявляться другим образом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для рассмотренного типа детекторов, облучаемых через фронтальную поверхность, исследование поведения формы сигнала в E детекторе ΔE – E телескопа при регистрации заряженных частиц позволяет выделять факт прохождения частицы через детектор.

Введение функции в виде соотношений длительностей переднего и заднего фронтов может формализовать это разделение и помочь при разборе событий на ΔE – E диаграммах сигналов телескопов с пролетными детекторами.

При необходимости разделение может быть осуществлено в режиме “online” с использованием аппаратных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ammerlaan C.A.J., Rumphors R.F., Koerts L.A.Ch.* // Nucl. Instrum. Meth. 1963. V. 22. No. 1. P. 189.
2. *Barlini S., Bougault R., Laborie Ph. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2009. V. 600. No. 3. P. 644.
3. *Jin-Tao Zhu, Guo-Fu Liu, Jun Yang et al.* // Chin. Phys. C. 2016. V. 40. No. 3. Art. No. 036202.
4. *Конобеевский Е.С., Зуев С.В., Каспаров А.А. и др.* // ЯФ. 2015. Т. 78. № 5. С. 687; *Konobeevski E.S., Zuev S.V., Kasparov A.A. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78. No. 5. P. 643.
5. *Конобеевский Е.С., Афонин А.А., Зуев С.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 4. С. 482; *Konobeevski E.S., Afonin A.A., Zuev S.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 4. P. 433.

The use of the PSA method in the interpretation of the behavior of curves on the $\Delta E-E$ diagrams for telescope of the Si-detectors

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

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

**e-mail: mvmordovsk@mail.ru*

A change in the pulse shape for the completely depleted surface-barrier silicon detectors is observed depending on whether a charged particle passes through the detector or completely absorbed in it. A method is proposed for obtaining and using such information to separate the forward and reverse directions of the curves for the locuses on two-dimensional diagrams $\Delta E-E$, with a parameterization similar to the widely used PSD method for the separation neutrons from γ -quanta.