

## Определение амплитудного дефекта для измерения энергии тяжелых ионов полупроводниковыми детекторами

Д. Н. Козлов\*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Университет «Дубна», инженерно-физический институт, кафедра ядерной физики  
Россия, 141980 г. Дубна, Московской обл., ул. Университетская, 19  
(Поступила в редакцию 30.05.2023; подписана в печать 04.07.2023)

Определен амплитудный дефект полупроводникового стрипового детектора КДПС-1К в зависимости от массы и энергии регистрируемых тяжелых ионов. Произведены энергетические калибровки детектора с использованием источника  $\alpha$ -частиц  $^{226}\text{Ra}$ , а также проведены калибровочные измерения на ускорителе ИЦ-100 в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований на пучках ионов  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{132}\text{Xe}$ . Проведены исследования по измерению эффективной толщины «мертвого слоя» полупроводникового детектора и внесена поправка на потери энергии в этом слое. Представлено выражение для оценки поправки на амплитудный дефект при измерении энергии продуктов реакции в области энергий от 20 до 100 МэВ и масс от 20 до 132 а.е.м.

PACS: 29.40.Wk. УДК: 621.376.234 + 539.1.074.55.

Ключевые слова: полупроводниковый детектор, амплитудный дефект, мертвый слой.

### ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые детекторы (ППД), появление которых в шестидесятых годах прошлого века стало важным событием в развитии экспериментальной ядерной физики, заняли одно из ведущих мест среди приборов ядерной спектрометрии. Полупроводниковые детекторы являются твердотельными аналогами ионизационных камер. Они имеют большие преимущества перед другими типами детекторов, наиболее важным из которых является высокое энергетическое разрешение. Среди других достоинств полупроводниковых детекторов следует указать: малое время нарастания импульса, относительную простоту и небольшие размеры, а также нечувствительность к магнитным полям. Не менее важна линейность характеристик ППД в широком диапазоне энергий, верхний предел которого определяется толщиной чувствительного слоя, в который должен укладываться пробег частицы в веществе. Регулируя напряжение смещения, можно изменить эффективную толщину  $p$ - $n$ -перехода, что создает удобство при измерениях в большом диапазоне энергий регистрируемых частиц. Нижний предел измеряемых энергий обусловлен толщиной нечувствительного (входного) окна, расположенного перед слоем объемного заряда  $p$ - $n$ -перехода. У полупроводниковых детекторов поверхностно-барьерного типа толщина окна невелика и определяется величиной металлического покрытия и так называемого мертвого слоя.

Большим преимуществом при работе с полупроводниковыми детекторами является также линейность энергетической градуировки, отклонение от которой можно наблюдать для тяжелых частиц, например

осколков деления, тяжелых ионов и фрагментов реакции, когда возникают дополнительные потери носителей заряда (рекомбинации пар электрон-дырка), которые ведут к заметному дефекту амплитуды сигнала. Величина амплитудного дефекта является исключительно характеристикой самих кремниевых кристаллов, из которых изготовлен детектор. Для каждого детектора эта характеристика индивидуальна, что также является одним из недостатков работы с полупроводниковыми детекторами. При замене полупроводниковых детекторов необходимо заново проводить исследования по определению амплитудного дефекта, что является долговременной и дорогостоящей процедурой, в то же время уменьшающей ресурс работы самого детектора. В настоящей работе изучался амплитудный дефект полупроводникового стрипового детектора КДПС-1К, используемого в экспериментах на времяпролетном спектрометре CORSET [1], для регистрации продуктов реакции.

### 1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Полупроводниковый детектор представляет собой полупроводниковый диод, на который подано обратное (запирающее) напряжение (рис. 1). В полупроводниковом детекторе в отсутствие высокого напряжения на границе  $p$ - $n$  переходов, т.е. материалов с разным типом проводимости, благодаря диффузии носителей заряда из одной области в другую, образуются два слоя противоположных по знаку зарядов. Между  $p$ - и  $n$ -областями образуется двойной электрический слой, который создает электрический потенциал, препятствующий проникновению носителей из одной области в другую. Образование слоев зарядов приводит к появлению между ними особой области, для которой характерны наличие потенциального барьера и малая

\* dmitriy.kozlov.tospace@bk.ru

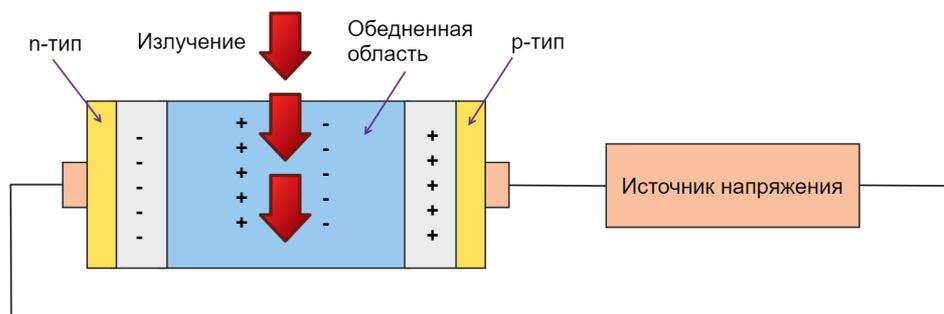


Рис. 1. Принцип работы полупроводникового детектора

концентрация неосновных носителей заряда — обедненная область. К полупроводниковому кристаллу прикладывается напряжение до нескольких киловольт, что обеспечивает сбор всех зарядов, образованных частицей в объеме детектора.

Заряженная частица, проникая в обедненную область детектора, создает дополнительные (неравновесные) электронно-дырочные пары, которые под действием электрического поля «рассасываются», перемещаясь к электродам детектора. В результате во внешней цепи полупроводникового детектора возникает электрический импульс, который далее усиливается и регистрируется. Заряд, собранный на электродах полупроводникового детектора, пропорционален энергии, выделенной частицей при прохождении через обедненный (чувствительный) слой.

В зависимости от метода образования *p-n*-переходов ППД разделяют на поверхностно-барьерные, диффузные детекторы и детекторы на основе особо чистого германия. В поверхностно-барьерном детекторе *p-n*-переход образуется окислением поверхности *n*-кремния с последующим нанесением тонкого слоя золота на образованный таким способом поверхностный *p*-слой. Толщина рабочей области таких детекторов не превышает 0.2–0.5 мм, поэтому объектами спектрометрии с использованием поверхностно-барьерных полупроводниковых детекторов становятся тяжелые заряженные частицы —  $\alpha$ -частицы, осколки деления. Для этих короткопробежных частиц, как правило, выполняется условие:

$$R < d, \quad (1)$$

которое обеспечивает высокую линейность кривой энергетической градуировки  $\alpha$ -спектрометров. где  $R$  — пробег частицы в веществе детектора,  $d$  — толщина чувствительной области ППД.

В настоящей работе изучался поверхностно-барьерный полупроводниковый детектор КДПС-1К (рис. 2) — 8-стриповый кремниевый детектор, предназначенный для преобразования энергии заряженной частицы, поглощаемой в детекторе в пропорциональный ей по амплитуде электрический заряд. Ширина одного стрипа — 6 мм, расстояние между стрипа

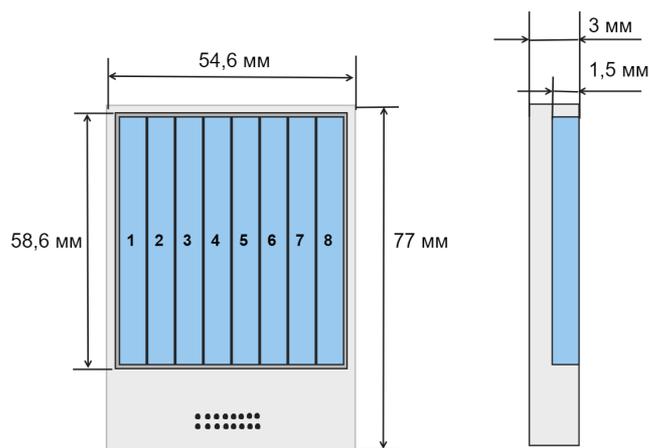


Рис. 2. Схема детектора КДПС-1К

пами — 60 мкм, рекомендуемое напряжение смещения — 50 В, энергетическое разрешение (для  $\alpha$ -частиц (5.5 МэВ)) — 100 кэВ.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДНОГО ДЕФЕКТА ППД

Актуальность решения проблемы точного измерения энергии тяжелых ионов обусловлена как широким использованием полупроводниковых детекторов для регистрации осколков деления, так и расширением диапазона масс и энергий тяжелых ионов, применяемых в ядерной физике. Точное определение энергии затрудняется наличием в детекторах амплитудного дефекта, который определяют как разность между амплитудами тяжелой и легкой заряженных частиц при равенстве их энергии на входе в детектор. В данном случае в качестве легкой частицы обычно используют  $\alpha$ -частицу [2, 3].

Наиболее известный метод определения амплитудного дефекта был предложен Шмиттом [4] в 1965 г. Он основан на измерении фрагментов спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$ , для которых средние массы и средние

энергии хорошо известны. Следует отметить, что фрагменты спонтанного деления имеют энергетический разброс 20–40 МэВ. Этот способ калибровки предполагал, что амплитудный дефект линейно зависит от энергии фрагмента. Метод показывал хорошие результаты, поскольку в те годы ускорительные возможности были ограничены в основном легкими ядрами. Однако сейчас калибровки Шмитта не дают желаемого результата, так как с развитием ускорительной техники появилась возможность ускорять более тяжелые ионы и, соответственно, массы и энергии образующихся продуктов реакции возросли.

В дальнейшем был предложен еще один способ калибровки полупроводниковых детекторов [5], основанный на исследовании амплитудного дефекта ионов от Ne до Au, ускоренных на 88-дюймовом циклотроне Лоуренсовской лаборатории (в Беркли). Энергетический диапазон от 5 до 160 МэВ перекрывал диапазон осколков деления, исследованный ранее в других работах. Нужно подчеркнуть, что в отличие от работ, в которых амплитудный дефект определялся по формуле

$$\Delta E = E_t - E_\alpha, \quad (2)$$

где  $E_t$  — «истинная» энергия иона;  $E_\alpha$  — энергия, получаемая из зарегистрированного ППД канала при использовании энергетической калибровки с помощью источника  $\alpha$ -частиц, в этих исследованиях в качестве амплитудного дефекта рассматривалась величина

$$\Delta E = (E_t - E_w) - E_\alpha = E_d - E_\alpha, \quad (3)$$

где  $E_w$  — энергия, потерянная частицей во входном окне (мертвом слое) детектора.

На данный момент единственным способом определить величину амплитудного дефекта полупроводниковых детекторов являются измерения энергии рассеянных ионов в широком диапазоне масс и энергий. В настоящей работе амплитудный дефект для детектора КДПС-1К определялся выражением (3).

Для определения амплитудного дефекта используемого детектора КДПС-1К были проведены исследования в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований на ускорителе ИЦ-100 на пучках ионов  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{86}\text{Kr}$  и  $^{132}\text{Xe}$  с энергиями 22.7, 46.4, 100.9 и 158.4 МэВ, соответственно. Пучок заряженных частиц с ускорителя рассеивался на золотой фольге толщиной  $l = 200 \text{ мкг/см}^2$  и попадал на исследуемый стриповый детектор, установленный на расстоянии 795 мм под углом  $40^\circ$  к направлению пучка (рис. 3).

### 2.1. Расчет «истинной» энергии иона

Так как для определения амплитудного дефекта  $\Delta E$  использовались упруго рассеянные ионы (рис. 4), то «истинная» энергия ионов  $E_t$  на входе в детектор находилась следующим образом:

$$E_t = E_{beam} - E_{loss1} - E_{scatter} - E_{loss2}, \quad (4)$$

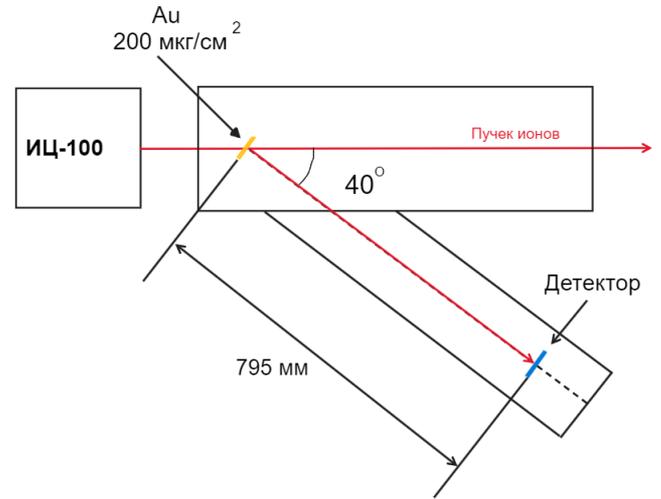


Рис. 3. Геометрия эксперимента на ускорителе ИЦ-100

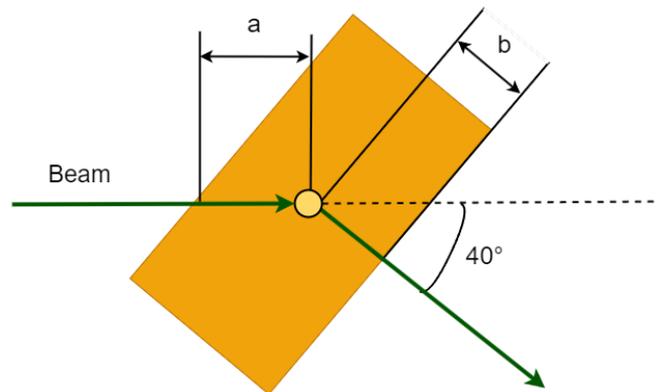


Рис. 4. Прохождение пучков ионов через золотую фольгу

где  $E_{beam}$  — энергия пучка ионов,  $E_{loss1}$  — потери энергии в золотой фольге толщиной  $a = 0.5 \cdot l \cdot \cos^{-1} 40^\circ$ ,  $E_{scatter}$  — потери при упругом рассеянии на ядрах  $^{197}\text{Au}$ ,  $E_{loss2}$  — потери энергии в золотой фольге толщиной  $b = 0.5 \cdot l$ . Для расчета энергетических потерь  $E_{loss1}$  и  $E_{loss2}$  с помощью программы Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) [6] были получены табличные значения удельных энергетических потерь  $\frac{dE}{dx}$  в зависимости от энергии частицы, а затем в пакете Origin [7] путем интерполяции кубическими сплайнами найдены функции  $\frac{dE}{dx}(E)$ .

Энергия  $E_{scatter}$ , потерянная при рассеянии ионов, рассчитывалась с помощью формул для упругого рассеяния [9] для каждого стрипа, в зависимости от угла рассеяния, энергии пучка и материала фольги.

## 2.2. Определение эффективной толщины мертвого слоя

Следующая особенность полупроводниковых детекторов, которую необходимо учитывать, это наличие входного окна и «мертвого слоя» детектора. Вследствие того, что обедненная область обычно образуется на некотором углублении в кристалле детектора, то прежде чем попасть в эту зону, регистрируемая частица должна пройти толщину «мертвого слоя». Входным окном детектора является тонкий слой напыления золота или, как у детектора КДПС-1К, алюминия, толщина которого обычно указывается в техническом паспорте детектора. Толщину же мертвого слоя определить довольно сложно, а пренебрежение этой поправкой может привести к существенным погрешностям в измерении энергии фрагментов реакции. Чтобы учесть эти потери, можно определить эффективную толщину мертвого слоя детектора, который включал потери энергии, как в мертвом слое, так и во входном окне.

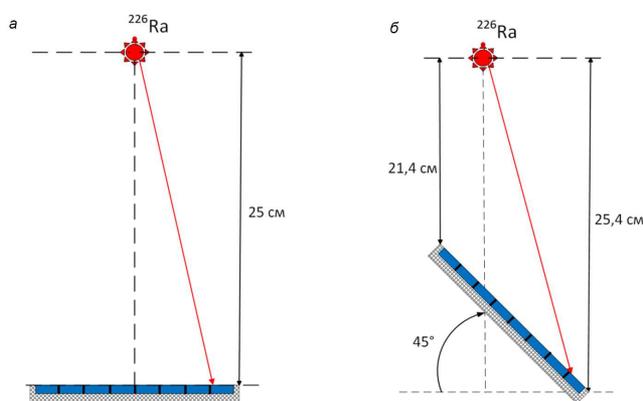


Рис. 5. Расположение детектора и источника: *а* — при первом измерении (геометрия  $90^\circ$ ), *б* — после поворота детектора (геометрия  $45^\circ$ )

Метод определения эффективной толщины мертвого слоя [8] следующий: источник  $\alpha$ -излучения  $^{226}\text{Ra}$  и исследуемый детектор устанавливаются таким образом, чтобы частицы падали на детектор перпендикулярно плоскости детектора (рис. 5, *а*). В такой геометрии набирается спектр  $\alpha$ -частиц. Затем детектор поворачивается на угол  $45^\circ$ , при этом источник остается в том же положении, и снова набирается  $\alpha$ -спектр (рис. 5, *б*). Во время измерений между источником и детектором устанавливается коллиматор, что позволяет рассматривать падение альфа-частиц в одной плоскости и упрощает определение эффективной толщины мертвого слоя.

Сдвиг  $\Delta E_s$  энергетических спектров (рис. 6, *а*)  $\alpha$ -частиц между этими двумя измерениями происходит из-за удлинения пути альфа-частиц в эффективном мертвом слое толщиной  $X$  на величину  $Z$  (рис. 6, *б*).

По известным удельным потерям  $\alpha$ -частиц в кремнии, полученных с помощью программы SRIM, величине смещения  $\Delta E_s$  и углом между траекториями па-

дения  $\alpha$ -частиц и плоскостью детектора можно определить величину удлинения  $Z$ , а затем используя выражение

$$X = Z \left[ \frac{1}{\sin^{-1} \beta - \sin^{-1} \alpha} \right], \quad (5)$$

где  $\alpha$  — угол между траекториями падения альфа-частиц и плоскостью детектора в геометрии  $90^\circ$ ,  $\beta$  — угол в геометрии  $45^\circ$ , можно получить толщину эффективного мертвого слоя  $X$ . Для полупроводникового стрипового детектора КДПС-1К эффективная толщина мертвого слоя составила  $100 \pm 10$  мкг/см<sup>2</sup> ( $430 \pm 40$  нм) в эквиваленте по кремнию  $^{28}\text{Si}$ .

## 2.3. Калибровка ППД

Калибровка полупроводникового детектора зависит от масс и энергий регистрируемых частиц. В первую очередь проводится калибровка с использованием источника альфа-частиц низкоэнергетической шкалы предусилителя. Следующим этапом является изменение низкоэнергетической шкалы предусилителя с помощью генераторной калибровки обеих шкал. В случае, если ожидаемые энергии регистрируемых ионов или фрагментов реакции не очень большие до 100 МэВ, то измерения можно проводить, используя только альфа-шкалу.

Для калибровки ППД по энергии используются доступные стандарты  $\alpha$  — излучателей с относительно высокой радиоактивностью, к таким относится источник  $^{226}\text{Ra}$ . При учете потерь энергии альфа-частиц в эффективном мертвом слое толщиной  $100$  мкг/см<sup>2</sup> кремния, калибровка производилась по линиям с энергиями 4.65, 5.36, 5.89 и 7.59 МэВ. Полученный альфа-спектр для одного из стрипов детектора представлен на рис. 7, *а*.

Положение пиков в каналах определялось аппроксимированием  $\alpha$ -спектра функцией Гаусса с помощью пакета Origin. Определив номера каналов, в которых появляются 4 линии  $^{226}\text{Ra}$ , строилась зависимость (рис. 7, *б*), коэффициенты которой находились методом наименьших квадратов, для перевода номера зарегистрированного канала в энергию частицы:

$$E_\alpha = A \times N_{Ch} + B, \quad (6)$$

где  $E_\alpha$  — энергия частицы, МэВ,  $A$  — цена канала, МэВ/канал,  $N_{Ch}$  — номер зарегистрированного канала,  $B$  — величина отсечки, МэВ.

## 2.4. Описание амплитудного дефекта

Попытка получить эмпирическую калибровочную функцию для более широкой области, чем область масс и энергий осколков деления, сделана в работе Кауфмана и др. [10]. Кауфман предложил использовать для

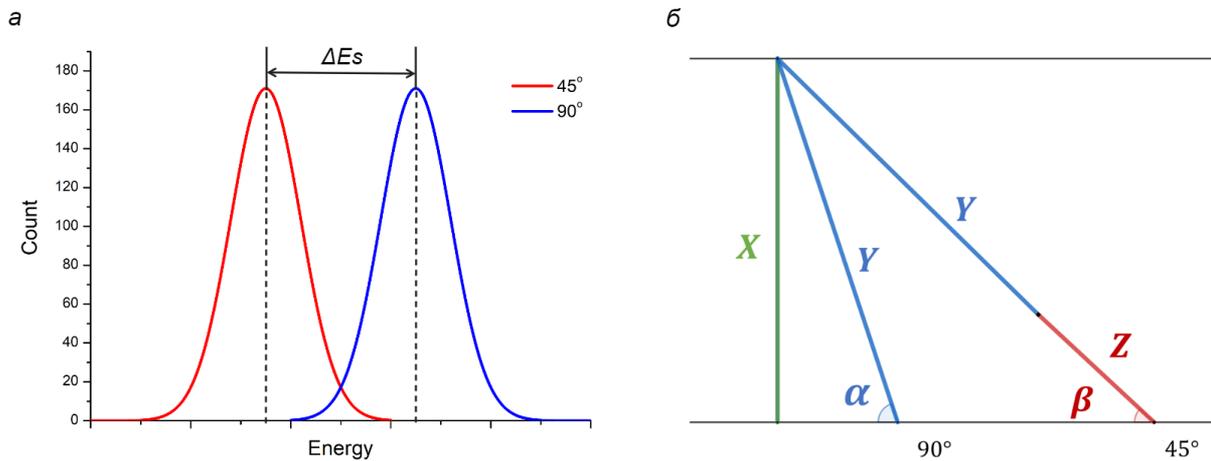


Рис. 6. *а* — Сдвиг энергетических спектров альфа-частиц, *б* — траектории движения альфа-частиц в мертвом слое *X*, *Y* — путь альфа-частицы в геометрии  $90^\circ$ , *Z* — удлинение пути альфа-частиц при повороте детектора на  $45^\circ$

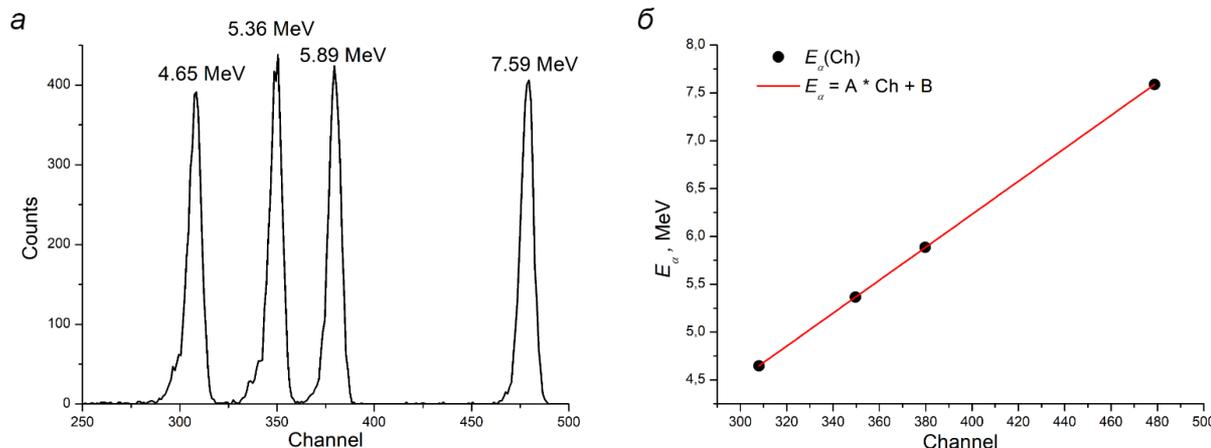


Рис. 7. *а* — Альфа-спектр, *б* — зависимость энергии от номера канала

калибровки уравнение в универсальной форме:

$$\Delta\epsilon = \frac{6\epsilon}{\epsilon + 8} + \frac{A}{1 + 525\epsilon^{-1.407}}, \quad (7)$$

где  $A$  — подбираемый для данного детектора параметр,  $\Delta\epsilon, \epsilon$  — амплитудный дефект и энергия, выраженные в универсальных безразмерных единицах Линхарда-Шарффа-Шиотта. По сравнению с осколочным спектром диапазон расширен не только в области более тяжелых масс, но и в области более низких энергий (4.5–80 МэВ). Однако тщательное исследование амплитудного дефекта на сепарированных по массе осколках деления  $^{252}\text{Cf}$  показало ограниченность использования этой калибровки. Из данных исследования, следует, что значение параметра  $A$  существенно зависит от массы при постоянном напряжении на детекторе, а при постоянной массе зависит от напряжения на детекторе.

В работе [5] для определения амплитудного дефекта

получена зависимость

$$\Delta E = 10^b \times E_{in}^a, \quad (8)$$

где  $E_{in}^a$  — энергия частицы на входе в детектор. Параметры  $a$  и  $b$  в выражении (8), являются функциями порядкового номера  $Z$  или массового числа  $A$  иона:

$$\begin{aligned} a(Z) &= 0.02230(Z^2/10^3) + 0.5682, \\ b(Z) &= -0.1425(100/Z) + 0.0825, \end{aligned} \quad (9)$$

или

$$\begin{aligned} a(M) &= 0.03486(A^2/10^4) + 0.5728, \\ b(M) &= -0.2840(100/A) + 0.0381. \end{aligned} \quad (10)$$

Однако использование (8) ограничено тем, что значения амплитудного дефекта и параметров были получены для определенного детектора и при одном рабочем напряжении.

В работе А.А. Богачева [8] полученные значения амплитудного дефекта (PHD) (рис. 8) в диапазоне энергий осколков деления до 1 ГэВ и масс до 208 а.е.м. описаны следующим выражением:

$$\text{PHD} = aE_\alpha e^{-E_\alpha/M} + b\sqrt{E_\alpha}, \quad (11)$$

где  $M$  — масса фрагмента реакции,  $a$  и  $b$  — коэффициенты, линейно зависящие от массы фрагмента, являются индивидуальными для каждого ППД.

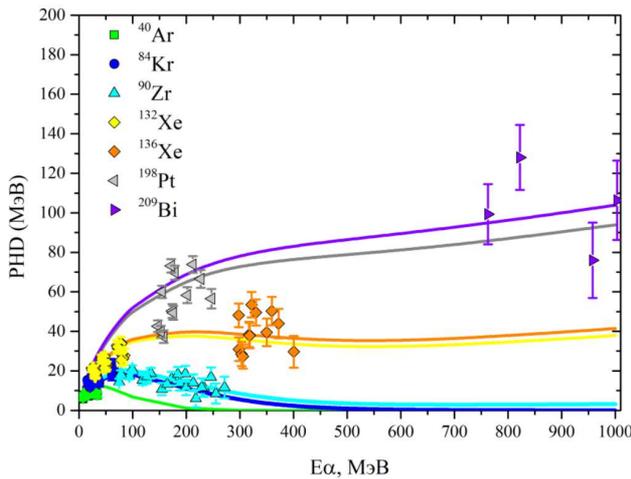


Рис. 8. Зависимость амплитудного дефекта PHD от энергии, определенной с помощью  $\alpha$ -калибровки

Полученные с помощью (3) значения амплитудного дефекта для полупроводникового стрипового детектора КДПС-1К (рис. 9) описаны с помощью первого слагаемого выражения (13), отвечающего за область низких энергий:

$$\Delta E = aE_\alpha \exp\left(\frac{-E_\alpha}{M}\right), \quad (12)$$

где коэффициент  $a$  определялся следующим образом:

$$a = -0.1556 + 0.00225 \cdot M. \quad (13)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена методика измерения амплитудного дефекта полупроводниковых детекторов. В ка-

честве примера был взят полупроводниковый детектор КДПС-1К

Для измерения энергии фрагментов реакции на установке CORSET определен амплитудный дефект кремниевое стрипового детектора КДПС-1К в зависимости от массы и энергии ионов, что позволяет проводить более точные измерения энергии.

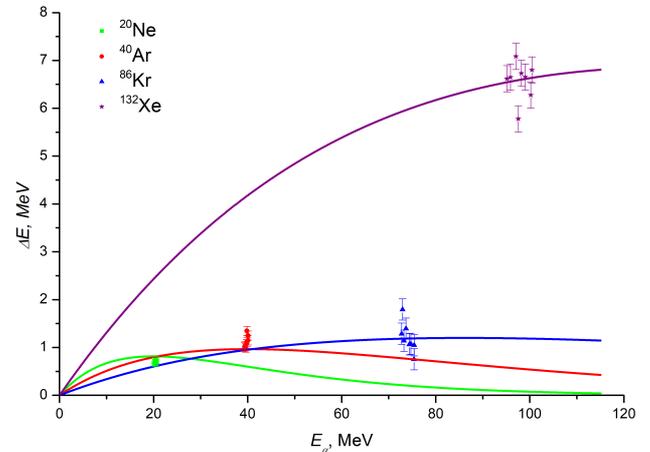


Рис. 9. Зависимость амплитудного дефекта  $\Delta E$  от энергии, определенной с помощью  $\alpha$ -калибровки для детектора КДПС-1К

Для определения амплитудного дефекта произведены энергетические калибровки с помощью  $\alpha$ -источника  $^{226}\text{Ra}$ , а также проведены специальные исследования на ускорителе ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ с использованием рассеянных на золотой фольге ионов  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{132}\text{Xe}$ . Учитывались все возможные потери энергии ионов до попадания в детектор.

Также проведены исследования по определению мертвого слоя детектора и найдена его толщина. Используя данные о величине мертвого слоя детектора, для амплитудного дефекта внесена поправка на потери энергии ионов в эффективной толщине мертвого слоя. Полученные экспериментальные данные были описаны выражением для оценки поправки на этот дефект, которая позволит точнее измерять энергии продуктов реакции и тяжелых ионов в областях энергии от 20 до 100 МэВ и масс от 20 до 132 а.е.м.

В дальнейшем планируется проведение измерений упруго рассеянных ионов в экспериментах на ускорителе У-400, которые позволят расширить область масс и энергий для определения амплитудного дефекта.

Автор выражает благодарность коллективу сектора №5 ЛЯР ОИЯИ за возможность участвовать в экспериментах и за плодотворное обсуждении в ходе работы.

[1] Козулин Э.М., Богачев А.А., Иткис М.Г. et al. // Приборы и техника эксперимента. **51**, № 1 44. (2008).

[2] Акимов Ю.Л., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф., Юнг-клауссен Х. // Полупроводниковые детекторы ядерных

- частиц и их применение. 1967.
- [3] *Акимов Ю.Л., Игнатъев О.В., Калинин А.И., Куш-нирук В.Ф.* // Полупроводниковые детекторы ядерных в экспериментальной физике. 1989.
- [4] *Schmitt H.W., Keke W.E., Williams C.W.* // Phys. Rev. **137**. (1965).
- [5] *Moulton G.B., Stephenson J.E., Schmitt R.P.* et al. // Phys. Rev. **157**, N 2. 325. (1978).
- [6] *James F. Ziegler M.D. Ziegler J.P. Biersack* SRIM, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. **268**, 1. 11. 1818. (2010).
- [7] Origin(Pro), Version 9. OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA.
- [8] *Богачев А.А.* Исследование деления, быстрого деления и квазиделения в реакциях с тяжелыми ионами, ведущими к образованию нейтронодефицитных  $^{180,190}\text{Hg}$  и  $^{184}\text{Pb}$ : Дис. . . канд физ.-мат. наук: 1.3.15 / А.А. Богачев — Дубна, 2022. 118 с.
- [9] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* // Теоритическая физика: Механика. В 10 т. Т.1. 2004.
- [10] *Kaufman S.B., Steinberg E.P., Wilkins B.D.* et al. // Nucl. Instrum. and Mehods. **72**, N 1. 47. (1969).

## Determination of the amplitude defect for measuring the energy of heavy ions with semiconductor detectors

**D. N. Kozlov**

*Dubna State University, Dubna 141980, Russia*

*E-mail: dmitriy.kozlov.tospace@bk.ru*

In current work the dependences of the amplitude defect of КДПС-1К detector on mass and energy were determined. Energy calibrations were performed with the  $^{226}\text{Ra}$   $\alpha$ -source and calibrational measurement with  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{132}\text{Xe}$  beams were performed at IC-100 cyclotron at FLNR JINR. The research was carried out to measure the effective thickness of «dead layer» of the semiconductor detector and a correction has been made for energy losses in this layer. The expression for estimating corrections for an amplitude defect when measuring reaction products energies the energy range from 20 to 100 MeV and mass from 20 to 132 a.m.u.

PACS: 29.40.Wk.

*Keywords:* semiconductor detector, amplitude defect, dead layer.

*Received 30 May 2023.*

### Сведения об авторе

Козлов Дмитрий Николаевич — студент; e-mail: dmitriy.kozlov.tospace@bk.ru.