Известия НАН Армении, Физика, т.38, №2, с.113-122 (2003)

УДК 539.1.074

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Г.М. АЙВАЗЯН, Г.В. БАДАЛЯН, М.А. МИКАЕЛЯН

Ереванский физический институт

(Поступила в редакцию 15 мая 2002 г.)

Описан эффективный способ энергетической калибровки полупроводниковых детекторов (ппд) различных толщин, основанный на имитации заряда, выделяемого в ппд ионизирующей частицей, с помощью генератора амплитуд, с частичным использованием α -радиоактивных источников. Приведены результаты лабораторных исследований метода для кремниевых детекторов как с большими (50–1000 мкм), так и с малыми (18–20 мкм) толщинами.

1. Введение

На экспериментальной установке "е-А", на внутреннем пучке Ереванского Синхротрона, на базе телескопов из кремниевых полупроводниковых детекторов проводились исследования по фрагментации ядер электронами больших энергий [1,2]. Используемый нами до настоящего времени метод энергетической калибровки (градуировки) ппд для определения кинетической энергии регистрируемых ядерных фрагментов, заключающийся в периодическом применении во время эксперимента *α*-радиоактивных источников с известными энергиями *α*-частиц в качестве реперных [3] обладает рядом недостатков: 1) необходимость установки а-источников на всех детекторах в телескопах, что помимо технических проблем, особенно при большом числе ппд, приводит к некоторому уменьшению рабочей поверхности детекторов, а также создает некий дополнительный фон; 2) невозможность калибровки очень тонких ппд (d<20 мкм), не вмещающих пробеги а-частиц, или же затрата значительного времени на калибровку, если возможно наклонное облучение *а*-частицами рабочей поверхности детектора.

Для избежания этих недостатков разработан электронный метод калибровки без использования *α*-источников [4,5]. Суть этого метода заключается в применении прецизионных малых емкостей на входе зарядочувствительных предусилителей (ЗПУ) и подачи на них калиброванных разностей потенциалов от генераторов, что имитирует акт выделения определенного количества заряда частицей в детекторе.

В настоящей работе в лабораторных условиях осуществлен вариант быстрой калибровки ппд без точных значений используемой имитирующей емкости и амплитуд генератора, но с частичным (разовым) использованием α-источников.

2. Постановка задачи

Как известно, в основе регистрации в ппд любого излучения лежит ионизационный эффект. Если данная заряженная частица теряет всю свою энергию в рабочей области детектора (полный пробег частицы $R \le d$, где d – чувствительная толщина детектора), то величина сигнала пропорциональна энергии частицы E: V=Q/c=e(E/W)/c-E, где Q – выделенный заряд, c – емкость на выходе ппд, W – средняя энергия на образование одной пары электрон-дырка в веществе ппд.

С этой точки зрения, энергетическую калибровку толстых ппд легче осуществить, так как пробеги α -частиц традиционных α -источников заведомо меньше чувствительной толщины детектора. В противном случае, когда эти условия не удовлетворяются, вопрос энергетической калибровки становится нетривиальным. В принципе, можно имитировать этот заряд на входе спектрометрического тракта детектора. В работе [4] через тщательно калиброванный тестовый конденсатор емкостью 4.425 пФ на вход ЗПУ подавались прецизионные импульсы от генератора напряжения и максимальному шагу IB соответствовало поглощение 100 МэВ энергии в кремниевом ппд (при принятом значении $W = 3.62\pm0.02$ эВ). При динамической входной емкости ЗПУ $C_d >>100 C_c$ заряд, поступающий с каждым импульсом от генератора, равен $V_g \cdot C_c$, в пределах 1% [5].

При наличии генератора импульсов стабильной амплитуды становится возможной имитация различных зарядовых импульсов, т.е. различные энерговыделения в детекторе (при линейности тракта электроники в интересующей области энергии).

Наш подход основывается на том, что для некоторого ппд толщиной >50 мкм, где поглощаются все энергии α -частиц известного α -источника, от генератора – через некалиброванную малую емкость C_e подаются регулируемые амплитуды на вход ЗПУ до совмещения на шкале анализатора с соответствующими пиками α -частиц и снимается функциональная зависимость между показаниями гелипота (цифрового потенциометра генератора) и значениями энергий поглощаемых α -частиц: $N_{ren} = f(E)$. Впоследствии, используя эту зависимость для рассматриваемого ппд произвольной толщины, с помощью генератора подают различные сигналы по описанной схеме ко входу ЗПУ (рис.1), т.е. имитируются соответствующие заряды (энергии). Таким образом, получается выражение искомой калибровки E=f(k), где k – номер канала анализатора. При таком способе калибровки нет необходимости точного измерения амплитуды генераторных импульсов и емкости С.



Рис.1. Функциональная схема лабораторной установки, предназначенной для исследования стандартных ппд.

Функциональная схема лабораторной установки, предназначенной для исследования стандартных плд, приведена на рис.1. Ппд устанавливаются в откачиваемый (до 0.1–0.2 Па) вакуумный объем ВК и облучаются α -источником. Последний может быть расположен в непосредственной близости к чувствительной поверхности ппд, а затем убирается с помощью специальной ручки. Ппд соединен с ЗПУ типа П-213 ($C_d \equiv 2000 \text{ n}\Phi$) и с внешним источником напряжения (сухая батарея до 330В). С помощью делителя напряжения обеспечивается регулируемое питание детектора в интервале 0 – 200 В. После усиления в спектрометрическом усилителе (СУ) типа У-204 сигналы проходят АЦП и регистрируются в амплитудном анализаторе или в ЭВМ. Импульсы напряжения подаются, например, от ртутного генератора стабильных амплитуд. В таком качестве использован внутренний генератор амплитудного анализатора DIDAC-4000.

Для исследований были выбраны поверхностно-барьерные детекторы различных толщин: 18, 20, 30, 50, 100, 1000 мкм и с рабочей поверхностью ~ 1 см². Использованы два типа α-источников с различными комбинациями линий:

 α 1: ²²⁶Ra: E_1 =4.78 M \ni B, E_2 =5.49 M \ni B, E_3 =6.0 M \ni B, E_4 =7.69 M \ni B.

α2: ²³⁹Pu+ ²³⁸Pu+ ²⁴⁴Cm: E₁=5.156 M∋B, E₂=5.49 M∋B, E₃=5.806 M∋B.

В работе, помимо одиночных детекторов, использованы также совпадательные пары ("ΔΕ"-"Е") с толщинами соответственно 18 мкм и 1000 мкм и толщинами 24(30) мкм и 100 мкм (см. ниже).

3. Порядок выполнения работы

а) Выбор рабочего напряжения детектора.

Для детекторов при заданной энергии α-источника по схеме,

приведенной на рис.1, снимается зависимость амплитуды импульсов от приложенного напряжения. В качестве амплитуды берется значение канала, соответствующего максимуму распределения. В частности, для 1000 мкм детектора вначале с увеличением напряжения наблюдается рост амплитуды импульса, но с U = 100В можно считать, что происходит полное собирание заряда, выделенного в ппд (рис.2). Подчеркнем, что при всех операциях ппд остается включенным и под рабочим напряжением.



Рис.2. Зависимость амплитуды импульсов детекторов от приложенного напряжения.

б) Процедура подбора зарядного импульса.

Для выбранного ппд (например, 1000 мкм), где все *α*-частицы источника поглощаются, на экране получаем визуальную картину энергетических линий. Для α1 источника явно видны 4 пика гауссовой формы. Вращая ручку генератора, подаем такие амплитуды, чтобы максимумы генераторных пиков приходили в совпадение с соответствующими максимумами спектра от а-источника. В этой процедуре, когда совмещение максимумов производится визуально с помощью курсора, точность совмещения не правильнее одного канала. Для более точного совмещения максимумов поступаем следующим образом: для каждого α-пика с помощью программы "Анализ" [6] определяются его взвешенный центр, среднеквадратичное отклонение σ и ширина на полувысоте (шпв). Далее снимаются такие же параметры для соответствующих генераторных пиков. При помощи последовательного приближения, регулируя амплитуду генератора, достигается наилучшее совмещение (с точностью до одного канала) взвешенных центров соответствующих сигналов от а-источника и генератора (табл.1). Выводя показания гелипота генератора, соответствующие E_1, E_2, E_3, E_4 а-пикам, получаем зависимость $N_{red} = f(E_a)$,

которая оказалась линейной (рис.3). Анализ этой зависимости приведен ниже. Такая же процедура проведена для детекторов с толщинами 50 и 100 мкм. Для этих детекторов положения α -линий и совмещенных с ними соответствующих генераторных пиков в целом смещены на шкале анализатора. Однако показания гелипота генератора для соответствующих α -энергий оказались идентичными для всех детекторов. Далее проведена аналогичная процедура для ппд с очень малой толщиной – 20 мкм. Для того, чтобы все α -частицы полностью поглотились в этом детекторе, детектор расположен наклонно под углом φ между направлением α -частицы и нормалью к поверхности детектора. Минимальный угол наклона, соответствующий поглощению всех α -частиц в ппд, получается из выражения соs φ_{mun} =d/R(7.69MэB)=d(мкм)//46.47(мкм), где d – толщина ппд, R – пробег α -частицы. При d = 20 мкм φ = 65°, хотя из-за конструктивных особенностей установить этот угол было довольно трудно. Результаты измерений приведены в табл.2.



Рис.3. Зависимость подобранных показаний гелипота генератора от соответствующих энергий *α*-частиц *α*1-источника.

α линии	Энер- гия, кэВ	Взв. центр пика, Каналы	<i>σ</i> , Ка- налы	Шпв, Ка- налы	Гене- ратор	Показа- ние гели- пота, Делен.	Взв. центр пика, Каналы	<i>σ</i> , Ка- налы	Шпв, Ка- налы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E1	4780	544	6	14	Гел1	1712	544	4.7	11
E2	5490	626	6,3	15	Гел2	1824	626	4,8	11
E 3	6000	686	5,4	13	Гел3	1907	686	4,7	11
E4	7690	881	5,5	13	Гел4	2194	880	5,0	11

Табл. 1. Сводные данные процедуры совмещения генераторных и *а*-линий. Ппл – 1000 мкм, *U*=120 В.

Табл.2. Сводные данные процедуры совмещения генераторных и α-линий. Ппд – 20 мкм, U=20 В.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E.	4780	385	13.2	31	Гел1	1706	384	12,7	30
E2	5490	436	12.8	30	Гел2	1821	438	12.0	28
E	6000	485	13.1	31	Гел3	1903	488	12.5	29
E.	7690	624	12.2	28	Гел4	2190	628	12.5	29

4. Полученные результаты и их анализ

Из результатов совмещения генераторных пиков с энергетическими пиками α1-источника для двух детекторов (толстого – 1000 мкм и очень тонкого – 20 мкм), приведенных в табл.1,2, видно, что зависимость N_{ext} = f(E) можно аппроксимировать линейной функцией (рис.3)

$$N_{ses} = aE + b. \tag{1}$$

Фитируя эту зависимость по 4-м точкам (табл.1 и 2), получаем:

для ппд 1000 мкм: N_{rea} = (0.1663±0.0004)E+(912.492±2.505), (2)

для ппд 20 мкм: N_{res} = (0.166±0.009)E+(906.79±5.60), (3)

где значения энергии даны в кэВ.

Сравнивая соотношения (2) и (3), видим, что они в пределах ошибок совпадают, что говорит о том, что калибровочное соотношение, полученное для одного – толстого детектора, можно с уверенностью применять и для других ппд, в том числе и очень тонких.

Соотношение (2) было проверено для других энергий – E₁, E₃ линий *а*2-источника. Определенные этим соотношением генераторные пики на шкале анализатора точно совпали с соответствующими *а*-пиками.

В целях дополнительной проверки действенности метода проведены следующие тесты:

 а) Повторена процедура измерений с 1000 мкм детектором, но с замененным блоком предусилителя. Имитационная зависимость оказалась

$$N_{\rm res} = (0,1656 \pm 0,0005)E \pm (908,42 \pm 3,93), \tag{4}$$

что совпадает с предыдущими выражениями (2), (3), и говорит о том, что зависимости от ЗПУ нет.

6) Проведен тест с включенными во временное совпадение тонким и толстым детекторами, прокалиброванными по соотношению (2), и рассмотрен баланс энерговыделений первичных α -частиц. Здесь мы приведем результаты такого теста для телескопа детекторов « ΔE »-18 мкм, «E»-1000 мкм. α 1-источник был установлен на корпусе « ΔE »-детектора. α -частицы, проходя через тонкий детектор, полностью останавливались в толстом детекторе «E». Электронная схема 2-х трактов измерений стандартная [1,2]. Импульсы генератора заданной амплитуды одновременно подавались на входы ЗПУ обоих трактов для их калибровки. Определялись центры генераторных пиков с соответствующими энергиями (2). Результаты фитирования полученной зависимости линейной функцией приведены ниже:

$$E = AK + B.$$
(5)

для «
$$\Delta E_{n-2}$$
ет.: $\Delta E = (2,112 \pm 0,022)k + (187,66 \pm 27,62)$ кэВ, (6)

для «Еп-лет.: E = (2,207 ± 0,023)k + (275,71 ± 26,74) кэВ, (7)

где k - номер канала анализатора.

Эти соотношения являются окончательной калибровочной зависимостью для определения неизвестной энергии, соответствующей зарегистрированному числу каналов.

Во время тестовой экспозиции с помощью программы TLSCOP [6] информация, поступающая от детекторов, накапливалась и отображалась на дисплее. На 2-мерной картине ($\Delta E, E$) хорошо разделяются четыре сгустка, которые соответствуют энергиям 4-линейного α -источника. Их центры лежат на одной идентификационной гиперболе $\Delta E \cdot E \equiv aMZ^2$. Распределения энерговыделений в « $\Delta E, E$ » детекторах и их суммы для одной α -линии E_{α} =7,69 МэВ, приведенные на рис.4a,b,c, аппроксимировались функцией распределения Гаусса со следующими средними значениями параметров:

> « ΔE »- $\beta e \tau$.: $<\Delta E >= 2.302 \pm 0.011 M \Rightarrow B$, $\sigma = 0.232 \pm 0.013 M \Rightarrow B$, «E»- $\beta e \tau$.: $<E >= 5.288 \pm 0.011 M \Rightarrow B$, $\sigma = 0.197 \pm 0.009 M \Rightarrow B$, $<\Delta E + E >= 7,587 \pm 0.007 M \Rightarrow B$, $\sigma = 0.151 \pm 0.006 M \Rightarrow B$.

Примечательно, что эти распределения между собой коррелированы, т.к. сумма потерь энергии α -частицы в двух детекторах изначально задана, и распределения удовлетворяют неравенству $\sigma(\Delta E + E) < \sigma(\Delta E) + \sigma E$ [7].

Теперь рассмотрим баланс энергии. Полученная средняя сумма энерговыделений в 2-х детекторах составляет 7,587 МэВ, что на 0,103 МэВ меньше ожидаемого значения 7,690 МэВ. Однако эта потеря энергии может быть объяснена систематической ошибкой, так как α -частица в эксперименте совпадений теряет некую часть своей энергии в электрических контактах детекторов, что не регистрируется аппаратурой. Оценка этой потери при разумных толщинах контактов – золото (2x(20-30) нм), алюминий (десятые доли микрона) как раз дают примерно эту недостающую энергию \cong 0,1 МэВ. К тому же эта недостача меньше, чем наблюдаемая дисперсия распределения суммарной энергии.

Таким образом, тест, проведенный с совпадательным телескопом при калибровке обоих детекторов по генератору, приводит к правильному энергетическому балансу, т.е выбранный способ калибровки правильный.



Рис.4. Амплитудные распределения в совпадательном тесте (энерговыделений в « ΔE », «E» детекторах и их суммы) для первичной α -частицы с энергией $E_{\alpha} = 7,69$ МэВ.

Соотношения (1-3) позволяют оценить точности (разрешения) имитируемых энергий. Решая ур.(1) в отношении энергии и учитывая ошибки величин N_{ren} (±2 дел), $a(\pm 0,0004 \ I/\kappa \Rightarrow B)$, $b(\pm 2,505 \ дел)$, можно по формуле среднеквадратичных отклонений для косвенных измерений [7] получить (принимая, что все величины подчиняются нормальному закону распределения)

$$\sigma_{\text{EHMMT}} = 1/a[(dN_{\text{res}})^2 + E^2(da)^2 + (db)^2]^{1/2}.$$
(8)

В табл.За представлены данные для ряда значений имитируемых энергий и указаны ошибки (разрешения). В качестве разрешения принята ширина на полувысоте шпв ≡ 2.35 σ.

а) Имитирусмые энергии					б) Измеряемые энергии					
<i>Е</i> , МэВ	<i>о</i> , кэВ	σ/E, %	шпв, кэВ	шпв/ <i>Е</i> , %	<i>Е</i> , МэВ	<i>σ</i> , кэВ	σÆ %	шпв, кэВ	шпв/Е, %	
2	19.4	0.97	45.6	2.3	2	32.3	1.60	75.9	3.8	
5	22.7	0.45	53.4	1.06	5	55.2	1.10	129.7	2.6	
20	51.8	0,.26	121.8	0.61	20	203	1.02	477.1	2.4	
100	241.3	0.24	567.1	0.56	100	1017	1.02	2390.0	2.4	

_		_	
-	-		 -
_	- 26		
	1.00		
		~~~	

Видно, что возникшие «ширины» имитируемых энергетических линий растут с энергией, но их относительные величины не превышают ~1%.

Наконец, из окончательных калибровочных соотношений (6)-(7) можно оценить точности (разрешения) для различных измеряемых энергий. Воспользовавшись снова формулой среднеквадратичных отклонений для косвенных измерений.

$$\sigma_{\text{Excm}} = [k^2 (dA)^2 + A^2 (dk)^2 + (dB)^2]^{1/2}$$
(9)

и учитывая ошибки значений каналов  $dk = \pm 1$  и параметров ( $dA = \pm 0,023$  кэВ/кан,  $dB = \pm 26,74$  кэВ), можно получить расчетные данные для ряда значений измеряемых энергий, которые приведены в табл.36. Видно, что неточности (разрешения) растут с измеряемой энергией, но их относительные величины не превышают 2-3%.

#### 5. Заключение

В экспериментальном получении имитационно-калибровочной зависимости использованы ппд различных толщин и чувствительной поверхности, разные предусилители, но соотношение оказалось универсальным (см.(1)-(3)). Все это является подтверждением того факта, что для заданной области энергии имитационная связь, полученная для одного ппд, скажем толстого, может быть использована и для энергетической калибровки других. Кроме того, хотя исследованные детекторы были поверхностно-барьерного типа, можно с уверенностью сказать, что способ калибровки применим и для других типов ппд. Разработанный способ энергетической калибровки ппд будет использован на экспериментальной установке «е-А» для продолжения исследований по фрагментации ядер электронами больших энергий.

Авторы признательны Г.Г.Зограбяну, Я.Д.Нерсесяну, В.Н.Арутюняну за интерес к работе и помощь. Выполнение данной работы поддержано грантом Боннского университета (Германия).

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. В.Н.Арутюнян, Г.В.Бадалян, Д.М.Бегларян и др. Изв. АН Арм ССР, Физика, 14, 172 (1979). Вопросы атомной науки и техники, 2, 27 (1984).
- G.E.Markaryan, G.M.Aivazyan, H.V.Badalyan, et al. J. Physics G: Nuclear and Particle Physics, 25, 101 (1999).
- S.P.Avdeyev, V.A.Karnaukhov, V.D.Kuznetsov, et al. Nuclear Instruments and Methods, A332, 149 (1993); IIT, 4, 7(1996).
- 4. A.M.Poskanzer, J.Gilbert, W.Butler, and E.K.Hyde. Phys. Rev. C., 3, 882 (1971).
- Методы испытаний усилителей и предусилителей, применяемых с полупроводниковыми детекторами ионизирующих излучений. Рекомендация МЭК, пуб.340, 1, 1976.
- 6. Г.Г.Зограбян. Препринт ЕРФИ-1295 (81), 1990.
- 7. Дж. Тейлор. Введение в теорию ошибок. М., Мир, 1985.

## ԻՄԻՏԱՑԻԱՅԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ԴԵՏԵԿՏՈՐՆԵՐԻ ԷՆԵՐԳԻԱԿԱՆ ԱՍՏԻճԱՆԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

### Գ.Մ. ԱՅՎԱՋՅԱՆ, Հ.Վ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Մ.Ա. ՄԽՋԱՅԵԼՅԱՆ

Նկարագրված է տարբեր հաստությւններով կիսահաղորդչային դետեկտորների (կհդ) էներգիական աստիճանավորման էֆեկտիվ եղանակ։ Այն հիմնված է ամպլիտուդային գեներատորով չափիչ սիստեմի նախնական ուժեղացուցիչի մուտքին հայտնի էներգիայով իոնացնող մասնիկի կհդ-ում անջատած լիցքի իմիտացիայի (նմանակման) վրա, սակայն հայտնի էներգիաներով *α*-ոադիոակտիվ աղբյուրների մասնակի օգտագործմամբ։ Բերված են մեթոդի լաբորատոր հետազոտման արդյունքները թե հաստ (50-1000 մկմ) և թե բարակ (18-20 մկմ) սիլիցիումային դետեկտորների համար:

## APPLICATION OF IMITATION FOR ENERGY CALIBRATION OF SILICON SEMICONDUCTOR DETECTORS

#### G.M. AIVAZYAN, H.V. BADALYAN, M.A. MIKAELYAN

An effective method is described for energy calibration of semiconductor detectors (SCD) with different thicknesses. The method is based on imitating the charge on the input of the preamplifier deposited in SCD by known energy ionizing particles, the imitation being performed by a pulser with a partial use of  $\alpha$ -active sources. The results of laboratory studies of the described method are given with detectors of either large, 50–1000  $\mu$ m, or small, 18–20  $\mu$ m, thickness.