

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1973

УДК 536.750 : 53.519.25

Н. В. АЛЕКСЕЕВ, Е. М. БУРЫМОВ, П. В. ВАКУЛОВ,  
Ю. И. ДЕНИСОВ, Ж. Д. ЮРЧЕНКО

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ И ОДНОРОДНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Описана методика и приведены основные результаты исследования толщины и однородности чувствительной области ряда типов кремниевых полупроводниковых детекторов советского и чехословацкого производства. Проводится сопоставление точности и надежности измерений разными методами, что существенно для правильной организации контроля детекторов на предприятиях и в лабораторных условиях.

Для регистрации излучений полупроводниковыми детекторами в большинстве случаев необходимо достаточно точно знать толщину и однородность чувствительного слоя этих детекторов. Особенно это важно для случаев регистрации излучений, в состав которых входят частицы различных энергий и масс. Например, при исследованиях радиационных поясов Земли и солнечных космических лучей, проводимых за пределами атмосферы на спутниках и космических ракетах, регистрируемая радиация состоит из смеси частиц разных масс и зарядов. В настоящее время для этих исследований все шире начинают применять кремниевые полупроводниковые детекторы.

Очевидно, что для однозначной интерпретации результатов, получаемых с помощью этой методики, необходимо еще до эксперимента определить достаточно точно основные параметры детектора, так как в процессе эксперимента и после него возможность проверки и калибровки детектора практически исключена. Одним из основных параметров детектора является толщина чувствительной области. Эта толщина определяет максимальную энергию регистрируемых частиц, соответствующую полному поглощению. Значение толщины, указанное в паспорте предприятием-изготовителем, обычно определяется каким-либо косвенным способом и не всегда обеспечивает необходимую точность.

Известно несколько прямых способов измерения толщины. Наиболее точный и универсальный способ основан на определении потерь энергии ускоренных протоков [1]. Для ряда детекторов применим более простой способ просвечивания чувствительной области электронами от радиоактивных препаратов [2].

В настоящей работе рассматриваются результаты изучения толщины и однородности некоторых отечественных промышленных детекторов и ряда образцов чехословацких детекторов фирмы Tesla, установленных

на спутниках «Интеркосмос». Для этой цели были развиты два независимых метода исследования, что позволило провести взаимный контроль и хорошо оценить точность результатов, полученных разными методами. Исследования проводились на циклотроне, а также с помощью радиоактивных источников (как с использованием, так и без использования  $\beta$ -спектрометра).

На циклотроне Р-7 имелась возможность ускорять протоны, дейтроны или  $\alpha$ -частицы до энергий 6,25; 12,5 и 25 Мэв. Так как энергия

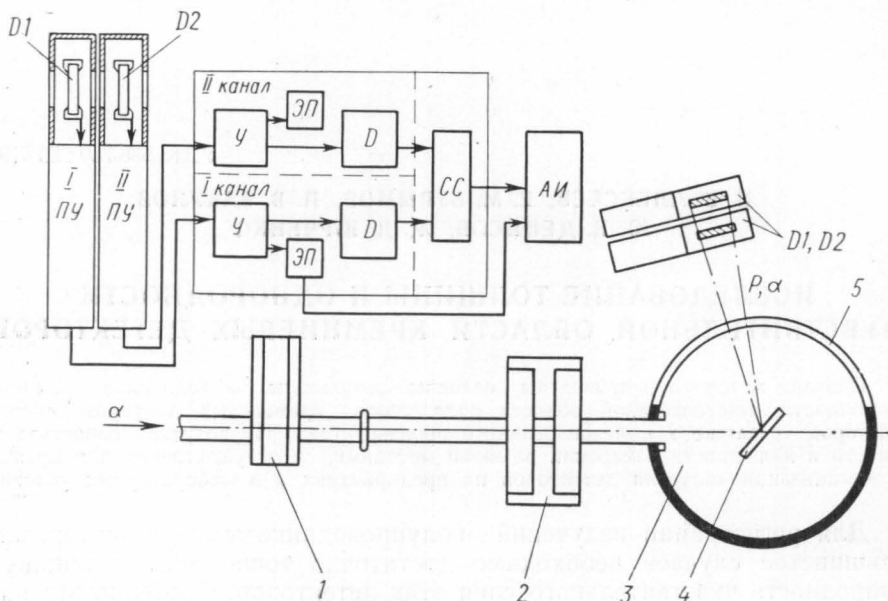


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению толщины чувствительной области кремниевых детекторов на циклотронном пучке. 1 — набор дистанционно-управляемых алюминиевых фольг, 2 — фокусирующие квадрупольные линзы, 3 — камера рассеяния, 4 — мишень, 5 — лавсановое окно.  $D1$  и  $D2$  — кремниевые детекторы, ПУ — предусилители, У — усилитель, ЭП — эмиттерный повторитель, D — дискриминатор, СС — схема совпадений, АИ — анализатор амплитуд импульсов

ускоренных протонов недостаточна для определения толщины больше 250 мкм, то ускорялись ядра гелия-4, а протоны нужной энергии получались из реакции ( $\alpha, p$ ) на углероде  $C^{12}$  или боре  $B^{10}$ . Схема эксперимента показана на рис. 1. Пучок  $\alpha$ -частиц, ускоренных на циклотроне до 25 Мэв интенсивностью  $\sim 5$  мка, выводился из камеры циклотрона по ионопроводу в экспериментальный зал, фокусировался квадрупольными линзами в центр камеры рассеяния, где устанавливалась мишень [3]. Энергия  $\alpha$ -частиц, падающих на мишень, могла изменяться с помощью набора алюминиевых фольг. Для вывода наружу продуктов взаимодействия камера рассеяния имела тонкое лавсановое окно толщиной 1,5 мг/см<sup>2</sup>. Мишенью служили золотая фольга толщиной  $\sim 0,25$  мг/см<sup>2</sup>, графит толщиной  $\sim 1$  мг/см<sup>2</sup> или обогащенный до 90%  $B^{10}$ , осажденный на тонкую золотую подложку. Толщина осаждаемого слоя  $\sim 1$  мг/см<sup>2</sup>.

Разброс энергий в первичном пучке  $\alpha$ -частиц был не хуже  $\sim 100$  кэв. Разброс по энергии вторичного пучка из-за толщины мишени и разброса угла вылета составлял  $\sim 150$  кэв.

Исследуемый детектор устанавливался под пучок вторичных частиц снаружи вблизи лавсанового окна. Он устанавливался непосредственно на кассете предусилителя. На входе предусилителя был включен полевой транзистор, при этом уровень шумов от предусилителя не превышал  $\sim 4$  кэв. Энергетический эквивалент шума исследовавшихся детекторов находился в интервале (20—80) кэв. Изучались детекторы

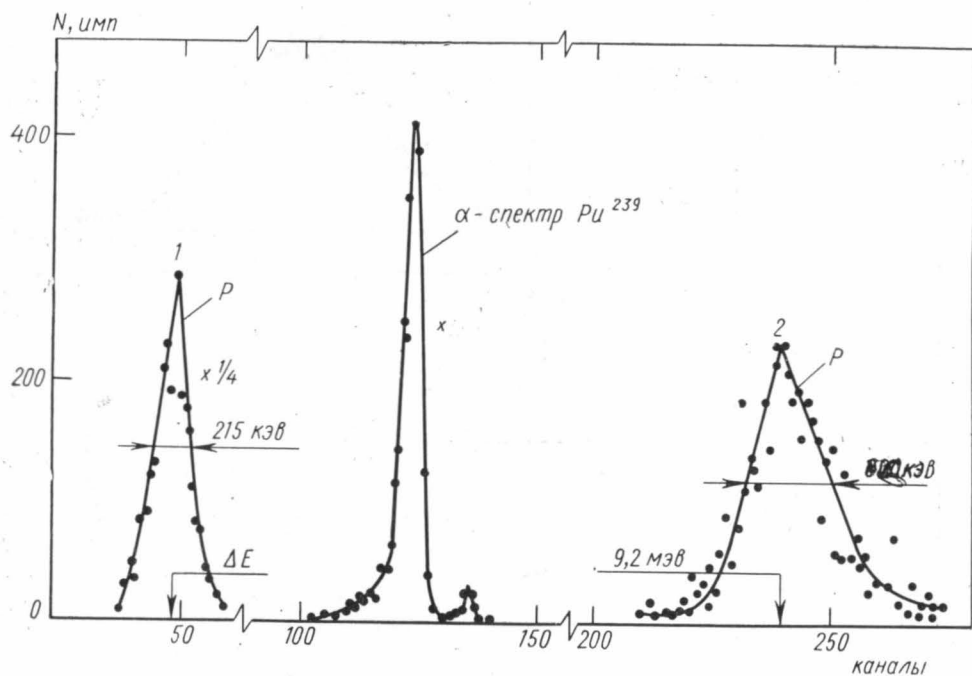


Рис. 2. Результаты измерений толщины двух кремниевых литий-дрейфовых «пролетных» детекторов с помощью протонов, вылетающих под углом  $40^\circ$  из реакции  $C^{12}(\alpha, p)N^{15}$  (спектр 1, детектор  $d=400$  мкм) и  $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$  (спектр 2, детектор  $d=2350$  мкм)

«пролетные» с кольцевым цоколем и «непролетные» в герметичном корпусе.

Для исследования «пролетных» детекторов на протонах из ядерных реакций  $C^{12}(\alpha, p)N^{15}$  и  $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$  использовался метод телескопа для выделения монохроматичной группы, соответствующей основному состоянию конечного ядра  $N^{15}$  или  $C^{13}$ . Для этого за изучаемым детектором устанавливался второй детектор, в чувствительной области которого полностью терялась оставшаяся энергия. Протоны основного состояния выделялись путем введения порога дискриминации импульсов от второго детектора. Производился отбор импульсов на совпадения в обоих детекторах. Измерения толщины и однородности состояли в регистрации и анализе спектра амплитуд импульсов исследуемого детектора и калибровке энергетической шкалы. Этот метод сходен с измерением на монохроматичных протонах [1].

Для «непролетных» детекторов этот метод непригоден. В этом случае проводилось измерение зависимости амплитуды импульсов от энергии протонов, причем энергия протонов изменялась путем торможения первичных  $\alpha$ -частиц алюминиевыми фольгами. Этот метод давал меньшую точность.

Тонкие детекторы до  $\sim 200$  мкм исследовались непосредственно на пучке  $\alpha$ -частиц, рассеянных золотом. Так как пучок был монохроматичным, то логика совпадений импульсов от двух детекторов в этом случае не требовалась.

Для примера на рис. 2 показаны результаты измерения «пролетного» литий-дрейфового детектора с полной толщиной кремниевой шай-

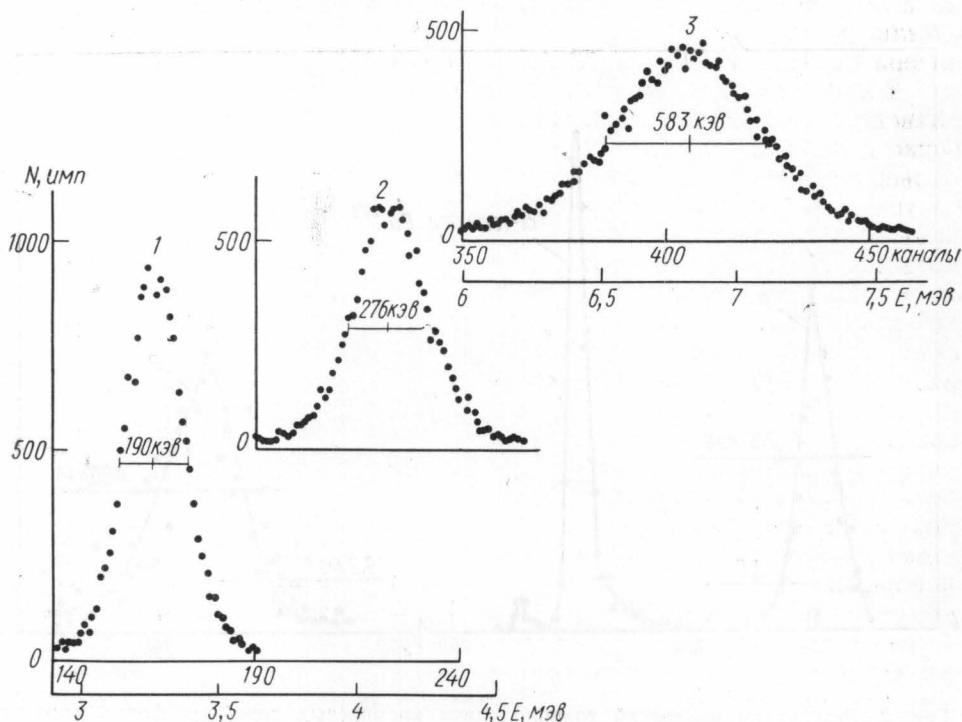


Рис. 3. Спектры  $\alpha$ -частиц, полученные в «пролетном» поверхностно-барьерном детекторе толщиной 64 мкм

бы  $d=400$  мкм (спектр 1). Протоны из углеродной мишени облучали детектор со стороны тонкого окна. Градуировка энергетической шкалы анализатора проводилась по  $\alpha$ -частицам  $\text{Pu}^{239}$ , спектр которых приведен на этом же рисунке. Толщина чувствительной области  $t$  находилась по результатам измерений энергетических потерь  $\Delta E$  протонов известной энергии и табличным данным по удельным потерям [4].

В данном конкретном случае чувствительный слой детектора получился равным  $(330 \pm 15)$  мкм. Полная толщина детектора больше этого значения на 70 мкм. Это означает, что с задней стороны детектора имеется мертвый слой низкоомного  $n$ -кремния, возникающий в процессе изготовления. Он уменьшает толщину обедненной области, где происходит собиранье зарядов.

На рис. 2 (спектр 2) показаны результаты измерений также «пролетного» литий-дрейфового детектора, имеющего полную толщину шайбы 2350 мкм. Облучение этого детектора проводилось протонами с энергией 25,2 Мэв, получаемыми из реакции  $\text{V}^{10}(\alpha, p)\text{C}^{13}$ . Измеренная потеря энергии этих протонов составляет 9,2 Мэв, что соответствует толщине чувствительной области  $(2010 \pm 50)$  мкм.

Исследования «непролетного» детектора DDC-5/2 проводились путем торможения ускоренных  $\alpha$ -частиц и наблюдения изменения амплитуды сигнала, соответствующего основной группе протонов реакции  $V^{10}(\alpha, p)C^{13}$ . Толщина чувствительной области находилась как пробег протонов с энергией  $E_t$ , соответствующей наблюдаемому максимуму амплитуды. Слева от максимума амплитуда сигнала однозначно связана с энергией протонов, которые полностью останавливаются в чувствительной области детектора. Для контроля линейности шкалы анализатора использовалось положение  $\alpha$ -линии  $Pu^{239}$ .

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты исследования тонкого «пролетного» поверхностно-барьерного детектора с помощью  $\alpha$ -частиц, рассеянных золотом. Для контроля измерения выполнены на трех энергиях: 1 —  $E_\alpha = 23,3$ ; 2 —  $E_\alpha = 17,7$  и 3 —  $E_\alpha = 10,5$  Мэв. Энергия изменялась, как и в предыдущем случае, с помощью фольг. Найденная для каждой энергии толщина в пределах погрешности  $\pm 3$  мкм совпадает с геометрическим значением. Детекторы данного типа наиболее широко используются для анализа состава ядерного излучения. Поэтому существенно, чтобы они были однородны по толщине, тогда с их помощью можно достигнуть высокого разрешения. Прежде чем подробно остановиться на методе измерения однородности, приведем сводную таблицу результатов измерения

толщины некоторых детекторов описанными выше способами.

Однородность толщины чувствительной области определяется по разбросу амплитуд сигналов в детекторе от прошедших насквозь протонов или  $\alpha$ -частиц. Наблюдаемое энергетическое разрешение  $^{1/2}\Delta(\Delta E)$  складывается из статистических флуктуаций ионизационных потерь  $^{1/2}\Delta_{ст}(\Delta E)$ , разброса потерь на неоднородностях  $^{1/2}\Delta_0(\Delta E)$ , разброса энергий в пучке  $^{1/2}\Delta_{п}(\Delta E)$ , а также разброса амплитуд сигналов из-за шумов детектора и предусилителя  $^{1/2}\Delta_{ш}(\Delta E)$ .

Значения  $^{1/2}\Delta_n(\Delta E)$  незначительны, так как удельные потери слабо зависят от энергии в пределах указанного выше разброса энергий в пучке протонов и  $\alpha$ -частиц. Практически для всех исследованных детекторов  $^{1/2}\Delta_{ш}(\Delta E)$  также можно было не учитывать.

Поэтому однородность детектора находилась из соотношения:

$$^{1/2}\Delta_0(\Delta E) = \sqrt{[^{1/2}\Delta(\Delta E)]^2 - [^{1/2}\Delta_{ст}(\Delta E)]^2}.$$

Статистические флуктуации вычислены согласно [4]. Для примера, показанного на рис. 3, получаются следующие значения  $^{1/2}\Delta_0(\Delta E)$ : 190 кэв ( $E_\alpha = 23,3$  Мэв); 270 кэв ( $E_\alpha = 17,7$  Мэв), 580 кэв ( $E_\alpha = 10,5$  Мэв). Для наглядности переведем эти значения в эквивалентную толщину в микронах. Если учесть разницу в энергиях  $\alpha$ -частиц на входе и выходе из детектора, то для разных энергий получим одинаковую эквивалентную толщину неоднородного слоя ( $4 \pm 0,5$ ) мкм. Хорошее совпадение значе-

Таблица 1

№	Тип детектора	Толщина, Указанная предприятием (мкм)	Результаты наших измерений (мкм)
1	ДДС-5/2	2000	1310 $\pm$ 40
2	ДДС-5/2	2000	1620 $\pm$ 250
3	ДДС-5/2	2000	1810 $\pm$ 150
4	ДДС-8/2	2000	1790 $\pm$ 70
5	ДДС-8/2	2000	1880 $\pm$ 100
6	ДКД-ПС	900	1000 $\pm$ 40
7	ДКД-ПС	700	810 $\pm$ 30
8	PSP-020-050	50	83 $\pm$ 4
9	PSP-020-060	60	67 $\pm$ 3
10	PSP-020-500	500	462 $\pm$ 25
11	PSP-020-500	500	490 $\pm$ 25

ний при разных энергиях показывает, что правильно учтены вклады всех составляющих факторов в размытие пика.

В ряде случаев требования к определению толщины детекторов не очень высокие  $\sim 10\%$ . Для этих случаев толщины детекторов можно определять более простым способом с помощью электронов от радиоактивных препаратов или на  $\beta$ -спектрометре. Метод измерения «пролетных» детекторов с помощью электронов  $\text{Bi}^{207}$  и  $\text{Cs}^{137}$  состоит в определении положения пика вероятных потерь [2]. Для выделения потерь энергии только от одной монокроматической группы электронов используется метод совпадения сигналов от двух счетчиков, подобно тому как это описывалось выше для протонов. По точности этот метод несильно уступает циклотронному, однако диапазон толщин, где он применим, сравнительно узкий  $\sim 200\text{--}1000$  мкм. Детекторы тоньше 200 мкм сложно измерять из-за шумов, а в детекторах толщиной  $\geq 1$  мм слишком велико поглощение и рассеяние электронов.

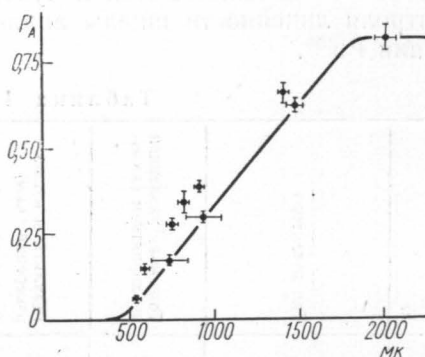


Рис. 4. Зависимость вероятности полного поглощения электронов  $\text{Bi}^{207}$  (линий 984 и 1050 кэв) от толщины детектора, измеренной на циклотроне

Положение пика вероятных потерь в «непролетном» детекторе можно наблюдать, располагая пучком строго монокроматических электронов. В качестве такого источника использовался  $\beta$ -спектрометр  $\pi\sqrt{2}$  [5]. Электроны с энергией до 2 Мэв получены от радиоактивного препарата  $\text{Ru}^{106}$ . Измеряемый детектор устанавливался в фокусе спектрометра и охлаждался для снижения шумов жидким азотом. Сигналы от детектора усиливались и подавались на амплитудный анализатор.

Для контроля условий дифрагмирования пучка было исследовано несколько «пролетных» детекторов. Например, в одном из детекторов при энергии в 1 Мэв имеются 2 пика: один соответствует вероятным потерям, второй — полному поглощению электронов. Положение пика вероятных потерь  $\Delta E = 110$  кэв соответствует толщине 350 мкм, найденной ранее на циклотроне. Отношение интенсивности пика полного поглощения к полному числу зарегистрированных электронов (вероятность полного поглощения)  $P_A = 0,023 \pm 0,03$ . Это значение согласуется с опубликованными подробными данными о взаимодействии электронов в кремнии [6]. Аналогичное соответствие имеется для других «пролетных» детекторов. Однако для «непролетных» детекторов результаты не всегда столь определенны. Когда энергия электронов соответствует пробегу в кремнии, примерно в 3 раза большему, чем толщина детектора, то в зависимости от особенностей детекторов наблюдаемые спектры можно условно разбить на 2 типа: «нормальный» спектр, совпадающий по форме и интенсивности со спектром для эквивалентных по толщине «пролетных» детекторов, и «аномальный» спектр, в котором полное поглощение не совпадает по интенсивности с «пролетным» детектором, если толщину считать по сдвигу пика вероятных потерь.

Для выяснения причин возникновения «аномальных» спектров было проведено сравнение данных о толщине, полученных на циклотроне, с данными, основанными на полном поглощении электронов фиксированной энергии. Это сравнение показано на рис. 4. Данные о полном поглощении получены с помощью электронов  $\text{Bi}^{207}$ . При этом расстояние

ний при разных энергиях показывает, что правильно учтены вклады всех составляющих факторов в размытие пика.

В ряде случаев требования к определению толщины детекторов не очень высокие  $\sim 10\%$ . Для этих случаев толщины детекторов можно определять более простым способом с помощью электронов от радиоактивных препаратов или на  $\beta$ -спектрометре. Метод измерения «пролетных» детекторов с помощью электронов  $\text{Bi}^{207}$  и  $\text{Cs}^{137}$  состоит в определении положения пика вероятных потерь [2]. Для выделения потерь энергии только от одной монокроматической группы электронов используется метод совпадения сигналов от двух счетчиков, подобно тому как это описывалось выше для протонов. По точности этот метод несильно уступает циклотронному, однако диапазон толщин, где он применим, сравнительно узкий  $\sim 200\text{--}1000$  мкм. Детекторы тоньше 200 мкм сложно измерять из-за шумов, а в детекторах толщиной  $\geq 1$  мм слишком велико поглощение и рассеяние электронов.

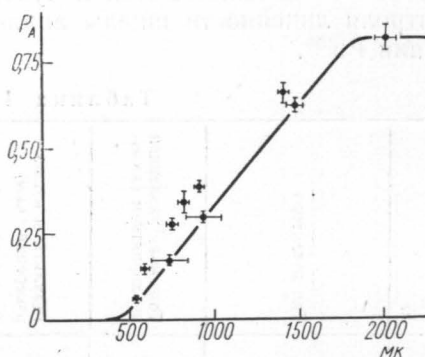


Рис. 4. Зависимость вероятности полного поглощения электронов  $\text{Bi}^{207}$  (линий 984 и 1050 кэв) от толщины детектора, измеренной на циклотроне

Положение пика вероятных потерь в «непролетном» детекторе можно наблюдать, располагая пучком строго монокроматических электронов. В качестве такого источника использовался  $\beta$ -спектрометр  $\pi\sqrt{2}$  [5]. Электроны с энергией до 2 Мэв получены от радиоактивного препарата  $\text{Ru}^{106}$ . Измеряемый детектор устанавливался в фокусе спектрометра и охлаждался для снижения шумов жидким азотом. Сигналы от детектора усиливались и подавались на амплитудный анализатор.

Для контроля условий дифрагмирования пучка было исследовано несколько «пролетных» детекторов. Например, в одном из детекторов при энергии в 1 Мэв имеются 2 пика: один соответствует вероятным потерям, второй — полному поглощению электронов. Положение пика вероятных потерь  $\Delta E = 110$  кэв соответствует толщине 350 мкм, найденной ранее на циклотроне. Отношение интенсивности пика полного поглощения к полному числу зарегистрированных электронов (вероятность полного поглощения)  $P_A = 0,023 \pm 0,03$ . Это значение согласуется с опубликованными подробными данными о взаимодействии электронов в кремнии [6]. Аналогичное соответствие имеется для других «пролетных» детекторов. Однако для «непролетных» детекторов результаты не всегда столь определенны. Когда энергия электронов соответствует пробегу в кремнии, примерно в 3 раза большему, чем толщина детектора, то в зависимости от особенностей детекторов наблюдаемые спектры можно условно разбить на 2 типа: «нормальный» спектр, совпадающий по форме и интенсивности со спектром для эквивалентных по толщине «пролетных» детекторов, и «аномальный» спектр, в котором полное поглощение не совпадает по интенсивности с «пролетным» детектором, если толщину считать по сдвигу пика вероятных потерь.

Для выяснения причин возникновения «аномальных» спектров было проведено сравнение данных о толщине, полученных на циклотроне, с данными, основанными на полном поглощении электронов фиксированной энергии. Это сравнение показано на рис. 4. Данные о полном поглощении получены с помощью электронов  $\text{Bi}^{207}$ . При этом расстояние

от источника до детектора всегда было равным 5 см, а свинцовый коллиматор фиксировал отверстие 2 мм в центре чувствительной площади детектора. Наблюдалась суммарная интенсивность в единицу времени линий 984 и 1050 кэв. Затем интенсивность в каждом детекторе была нормирована на максимальную интенсивность, наблюдаемую в детекторе толщиной 2 мм (по протонам). Кривая на рис. 4 — это вероятность полного поглощения электронов энергией в 1 Мэв, рассчитанная в работе [6]. Она также нормирована на двухмиллиметровый детектор. Как видно из этих сравнений, имеется хорошее согласие расчета с экспериментальными данными для «пролетных» детекторов и «непролетных» с нормальными спектрами электронов. Однако для детекторов, в которых наблюдаются аномалии в спектрах, точки лежат систематически выше кривой.

Относительно большое значение вероятности полного поглощения электронов для детекторов с наблюдаемыми «аномальными» электронными спектрами можно объяснить существованием сильной неоднородности чувствительной области. Вследствие неоднородности положение пика вероятных потерь плохо определяет толщину детектора. Неоднородность этих детекторов наблюдалась также по размытию спектральной линии протонов на циклотроне и оказалась действительно очень большой. В некоторых детекторах имеются области в (2—3) раза меньшей толщины, чем номинальная. Хотя по площади эти области относительно невелики, но их существование приводит к аномалиям в спектрах.

Данная работа относится к исследованию детекторов с толщиной чувствительной области до 2 мм, которые уже находят широкое применение в научных исследованиях и в промышленности. Наиболее высокая точность измерений толщины чувствительной области достигнута на циклотроне. В этом случае погрешность измерений толщины определяется главным образом погрешностью градуировки энергетической шкалы с помощью радиоактивных источников и протонов из ядерных реакций. Относительно несложно определить толщину с точностью ~2%, что вполне достаточно для большинства физических измерений.

При измерениях толщины детекторов с помощью электронов погрешность измерений по пику вероятных потерь «пролетных» детекторов несколько хуже, так как сложнее устранить рассеяние на коллиматоре, краевые эффекты и т. п. Поэтому средняя погрешность измеренных значений составляет ~7%. Результаты измерений толщины «непролетных» детекторов на электронах ненадежны, что связано с возможной неоднородностью чувствительной области. Поэтому вопрос о контроле простым ядерно-физическим способом толщины детекторов на предприятиях весьма актуален. Из табл. 1 видно, что толщина, указанная предприятием для детекторов типа ДДС, иногда заметно отличается от истинного значения.

Таблица 2

№	Тип детектора	Эффективность $P_A$
1	ДДС-12/2	0,83 <sup>1</sup>
2		0,81
3		0,71
4	ДДС-18/2	0,86
5		0,71
6		0,67
7		0,80
8	ДДС-5/2	0,64
9		0,63
10		0,46
11		0,50
12		0,47

<sup>1</sup> Этот детектор принят в качестве эталона, для него  $P_A = 0,83$  [6].



Это отличие возможно объяснить различием в режимах диффузии и дрейфа лития в процессе изготовления детекторов, когда контроль толщины проводится только для отдельных образцов из всей партии.

Возможным способом оперативного контроля может служить эффективность полного поглощения конверсионных электронов  $\text{Bi}^{207}$  (984 кэв) или  $\text{Cs}^{137}$  (625 кэв) относительно однотипного детектора, проверенного на циклотроне. При этом в процессе измерений соблюдаются одинаковые условия коллимации пучка в центр чувствительной области детектора. Для примера в табл. 2 приведены результаты таких испытаний партии из 12 счетчиков с помощью электронов  $\text{Bi}^{207}$ .

Все эти счетчики изготавливались с одинаковой толщиной 2 мм. Наблюдаемые отклонения эффективности относительно первого детектора, принятого в качестве эталона, указывают на меньшую толщину или неоднородность чувствительной области.

Авторы благодарны И. А. Савенко и И. Б. Теплову за интерес и содействие при выполнении работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hubbard E. L., Peterson D. G. Nucl. Inst. Methods., **80**, 40, 1970.
2. Tuzzolino A. J., Kristoff J., Perkins M. A. Nucl. Inst., Methods., **36**, 73, 1965.
3. Спасский А. В. Автореферат кандид. диссертации. НИИЯФ, МГУ, 1971.
4. Skurme D. J. Nucl. Inst. Methods., **57**, 61, 1967.
5. Бета- и гамма-спектроскопия. Под ред. К. Зигбана, М., 1959.
6. Berger M. J., Seltzer S. M. et al. Nucl. Inst., Methods., **69**, 181, 1969.

Поступила в редакцию  
26.10 1971 г.

НИИЯФ