

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

3714/82

9/8-82

13-82-350

М.Г.Горнов, Ю.Б.Гуров, П.В.Морохов,
Б.П.Осипенко, А.П.Пичугин, В.Г.Сандуковский

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СЛОЕВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
С ПОМОЩЬЮ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Направлено в журнал
"Приборы и техника эксперимента"

1982

1. ВВЕДЕНИЕ

Наряду с такими параметрами полупроводниковых детекторов /ППД/, как энергетическое разрешение и рабочее напряжение, в большинстве физических измерений необходимо знать геометрические параметры: полную толщину и толщину чувствительной области детектора. Особенно ясно это видно в случае использования ППД в многослойных телескопах для регистрации частиц относительно высоких энергий.

Регистрируемая частица проходит в телескопе несколько ППД. Для восстановления начальной энергии необходимо знать толщины нечувствительных областей. Значения толщин чувствительных и нечувствительных слоев необходимы также для идентификации частиц и выделения измерений, в которых происходит нарушение зависимости ионизационных потерь энергии, например, в случае ядерных реакций в веществе ППД либо выхода частиц из чувствительного объема ^{1,2/}.

В данной работе изложены методы измерения, которые позволяют определить геометрические параметры структурных слоев спектрометра заряженных частиц. Спектрометр комплектуется Si(Au) – и Si(Li) – детекторами с диаметром чувствительной области 32 мм. Толщины чувствительных областей Si(Au) – детекторов – /200-600/ мкм, полные толщины Si(Li) – детекторов – /1,5-4,0/ мм.

В настоящее время известны различные способы определения геометрических параметров ППД, как с помощью электрических измерений /по измерению емкости ^{3/} /, так и с помощью пучков частиц и излучений радиоактивных источников ^{4-6/}. Определение емкости ППД дает, как правило, неудовлетворительную точность, поэтому обсуждаемые в работе измерения были выполнены в пучках ускоренных частиц с применением радиоактивных источников электронов.

В реализованной методике мы попытались избавиться от ряда недостатков известных нам способов ^{4-6/}. К таким недостаткам относятся требования: иметь пучок частиц с хорошим разрешением и абсолютной энергетической калибровкой, наличие прецизионного спектрометрического тракта с хорошо известной энергетической шкалой, а также использование расчетных зависимостей энергетических потерь. Ошибки в определении параметров указанных величин и зависимостей непосредственно связаны с ошибками измерения геометрических параметров ППД и, как правило, требуют тщательной проверки, что часто является весьма сложной самостоятельной задачей.



2. ИЗМЕРЕНИЯ В ПУЧКЕ ПРОТОНОВ

Схема измерений для определения толщин ППД с помощью пучка протонов представлена на рис. 1. Коллиматоры K_1 и K_2 выделяют пучок протонов диаметром, немного меньшим диаметров чувствительных областей детекторов D_1 и D_2 . Диаметр чувствительной области D_3 больше, чем диаметры D_1 и D_2 . В экспериментах использовался пучок с достаточно большим энергетическим разбросом. Конкретно, измерения выполнялись на пучке со средним импульсом 150 МэВ/с и разрешением 10% /мезонный тракт синхротрона ЛЯП ОИЯИ/. Для такого пучка разброс пробегов протонов в кремнии составляет ~6 мм. Детектор D_2 выбирается достаточно тонким - с толщиной, много меньшей разброса пробега протонов /использовался поверхностно-барьерный Si(Li)-детектор толщиной ~100 мкм/. Логикой совпадения сигналов с D_1 , D_2 и антисовпадения с D_3 анализировались протоны в узком энергетическом интервале с пробегом, соответствующим суммарной толщине D_1 и кремниевого фильтра Si.

В такой постановке параметры спектра протонов, измеряемого детектором D_1 /рис. 2а/, зависят только от толщины фильтра Si.

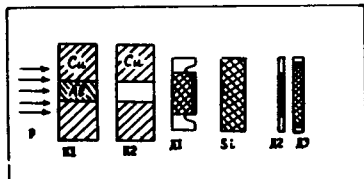


Рис. 1. Схема эксперимента для определения геометрических параметров ППД в пучке протонов.

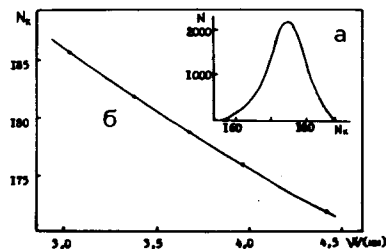


Рис. 2. Спектр протонов, измеренных детектором D_1 /а/; зависимость положения пика протонов, зарегистрированных D_1 , от толщины Si-фильтра /б/.

Выбрав в качестве такого параметра, например, положение пика, можно с помощью набора калиброванных фильтров* Si получить зависимость положения пика от толщины фильтра /рис. 2б/. Далее, установив на место фильтра исследуемый детектор и воспользовавшись полученной калибровочной зависимостью, определяем его толщину. Точность таких измерений зависит от статистической обеспеченности спектров с D_1 и стабильности работы спектро-

* Плоскопараллельность Si-фильтров составляла +5 мкм, а точность измерения толщины фильтров $\pm 0,5$ мкм /прибор ИЗВ-3/.

метрического тракта. Контрольные исследования показали, что параметры спектра с D_1 не зависят от толщины алюминиевого фильтра в пределах изменения ± 2 мм и, следовательно, от стабильности параметров пучка. Стабильность работы спектрометрического тракта контролировалась с помощью α -источников и практически определяла точность измерений ± 40 мкм. Сравнение результатов измерения толщин (W) с паспортными данными для трех Si(Li)-детекторов представлено в табл. 1. Видно, что существуют

Таблица 1

№ ППД	47	53	51
W (мм) - паспортные данные	4,41	4,28	4,00
W (мм) - результаты измерения в протонном пучке	$4,06 \pm 0,04$	$3,91 \pm 0,04$	$4,01 \pm 0,04$
$W_{м.с.}$ (мм) - результаты измерений с помощью ^{207}Bi	$0,49 \pm 0,01$	$0,43 \pm 0,01$	$0,48 \pm 0,01$
$W_{м.с.}$ (мм) - результаты измерений по средним потерям энергии в пучке протонов	$0,52 \pm 0,04$	$0,43 \pm 0,04$	$0,51 \pm 0,04$

сильные различия между измеренными и паспортными данными, основанными на предварительном определении толщины исходных пластин и средней оценке технологического расхода материала в процессе изготовления ППД.

С помощью изложенной методики измерений можно определить и толщину нечувствительной области ППД, перекомпенсированной литием, так называемый "мертвый слой" ($W_{м.с.}$). Для этого достаточно повернуть детектор D_1 нечувствительным слоем к пучку. Однако понятно, что в этом случае необходимо получать калибровочную кривую для каждого исследуемого ППД. Необходимость длительных измерений, то есть использование дорогостоящего времени работы ускорителя, создает практическое неудобство данной методики для таких целей. Поэтому для определения нечувствительных слоев Si(Li)-детекторов, полных толщин Si(Au)-детекторов, а впоследствии и полных толщин Si(Li)-детекторов использовались методы измерений с помощью радиоактивных источников электронов. В табл. 1 вместе с полными толщинами представлены результаты определения нечувствительных слоев ($W_{м.с.}$), полученные с помощью источника электронов внутренней конверсии /ЗВК/ ^{207}Bi . Для сравнения также приведены величины толщин нечувствительных слоев, измеренные при облучении в пучке протонов

по средним потерям энергии с использованием абсолютной калибровки спектрометрического тракта, расчетной зависимости потерь энергии и измеренных значений полных толщин.

3. ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Схема измерений толщин поверхностно-барьерных детекторов, нечувствительных слоев и полных толщин Si(Li)-детекторов представлена на рис. 3. Для определения толщин Si(Au)-и нечувствительных слоев Si(Li)-ППД использовался источник ЭВК ^{207}Bi . С помощью набора калиброванных фильтров Si строилась зависимость положения пика ЭВК /рис. 4б/ в зарегистрированном спектре /рис. 4а/ от толщины фильтра. Толщины Si(Au)-де-

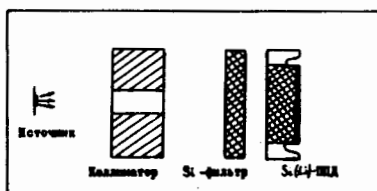
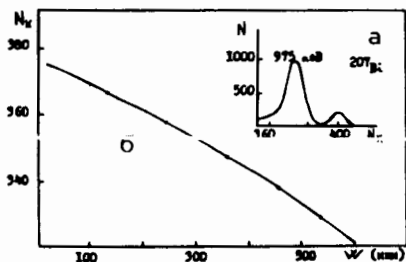


Рис. 3. Схема измерений геометрических параметров ППД с применением источников электронов.

Рис. 4. Фрагмент спектра электронов внутренней конверсии ^{207}Bi , измеренного с помощью Si(Li)-детектора /а/; зависимость положения пика ЭВК /б/ от толщины Si-фильтра /б/.



тктора определялись с помощью полученной зависимости при замене Si-фильтра на ППД, а толщины "мертвых слоев" Si(Li)-детекторов - путем поворота "мертвым слоем" к источнику /табл. 1,3/.

В табл. 2 результаты определения толщин двух Si(Au)-детекторов сопоставлены с данными контактных измерений с помощью прибора ИЗВ-3, имеющего точность $\pm 0,5$ мкм. Измерения были выполнены на детекторах, вышедших из строя в процессе эксплуатации. Следует отметить, что при таких точностях существенную роль играет качество обработки поверхности фильтров. Так, при измерениях с помощью электронов устойчиво сохранялось расхождение в 8 мкм для Si-фильтров одинаковой толщины /измеренной с помощью ИЗВ-3/ с травленной и шлифованной поверхностью /диаметр зерна шлифовального порошка - 8 мкм/.

Таблица 2

в ППД	8	10
W (мкм) - результаты измерений с помощью ^{207}Bi	545 ± 2	600 ± 2
W (мкм) - результаты измерений с помощью ИЗВ-3	$546 \pm 0,5$	$600 \pm 0,5$

Для определения полных толщин Si(Li)-детекторов использовался источник β -излучения ^{106}Ru с граничной энергией 3,55 МэВ. В качестве параметра зарегистрированного спектра /рис. 5а/ при построении калибровочной зависимости от толщины фильтра /рис. 5б/ была выбрана площадь спектра выше порога $\sim 0,5$ МэВ. Измерения выполнялись с постоянной экспозицией по времени, их результаты представлены в табл. 3.

В реальных экспериментах с помощью телескопов ППД часто регистрируются частицы различных масс в широкой области энергий. В таких условиях каждый из ППД телескопа регистрирует значительное количество частиц с пробегом, близким к полной толщине чувствительной области, и, соответственно, максимальным энерговыделением. На рис. 6 представлена часть энергетического спектра частиц, зарегистрированного одним из Si(Li)-детекторов телескопа в эксперименте по изучению поглощения

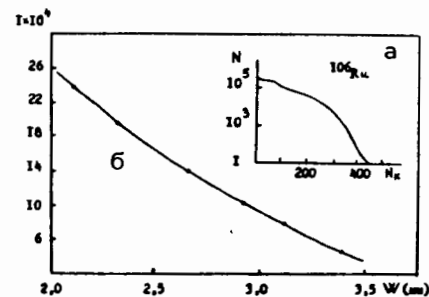


Рис. 5. Спектр β -излучения источника ^{106}Ru , регистрируемый Si(Li)-детектором /а/. Зависимость величины площади спектра ^{106}Ru /выше порога 0,5 МэВ/ от толщины Si-фильтра /б/.

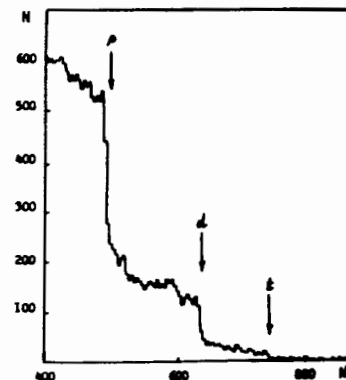


Рис. 6. Энергетический спектр частиц, зарегистрированных одним из Si(Li)-детекторов, входящих в состав телескопа, в эксперименте по изучению поглощения ядрами отрицательных пионов.

отрицательных пионов ядрами. Хорошо выделены участки спектра с границами, соответствующими максимальному энерговыделению для протонов и дейтронов, статистически менее обеспечена граница тритонов. По положению этих границ можно оценить толщину чувствительной области детектора. Для Si(Au)-детекторов, работающих в режиме полного обеднения, такие границы соответствуют толщине детекторов. В табл. 3 оценки толщин чувствительных слоев ($W_{\text{ч.о.}}$) Si(Li)-детекторов и полных ширин Si(Au)-детекторов, полученные по данной методике, сопоставлены с результатами измерений с помощью источников ^{106}Ru и ^{207}Bi . Методика оценки чувствительных областей ППД по границам максимального энерговыделения аналогична методике, изложенной в работе /7/, однако здесь нет необходимости в прецизионном пучке частиц.

Таблица 3

в ППД	Si (Au)		Si (Li)	
	124	125	101	112
W (мм) - результаты измерений с помощью ^{207}Bi	$0,254 \pm 0,002$	$0,336 \pm 0,002$		
W (мм) - результаты измерений с помощью ^{106}Ru			$3,41 \pm 0,01$	$2,91 \pm 0,01$
$W_{\text{ч.о.}}$ (мм) - результаты измерений с помощью ^{207}Bi и ^{106}Ru			$3,165 \pm 0,01$	$2,64 \pm 0,01$
$W_{\text{ч.о.}}$ (мм) - оценка по границе протонов - (p)	$0,25 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,02$	$3,04 \pm 0,09$	$2,57 \pm 0,08$
$W_{\text{ч.о.}}$ (мм) - оценка по границе дейтронов - (d)	$0,25 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,02$	$3,06 \pm 0,09$	$2,57 \pm 0,08$

4. ВЫВОДЫ

При использовании изложенных методов наиболее существенными являются ограничения на нестабильность работы аппаратуры. Высокая точность измерений, проведенных с помощью источников электронов, была обеспечена спектрометрическим каналом, для которого нестабильность работы во время измерений не наблюдалась.

Следует отметить, что данная методика позволяет определять средние параметры ППД на исследуемой площади. В то же время в результате механической обработки и неравномерности процесса травления форма ППД может отличаться от плоскопараллельной.

Разработанную методику измерений с использованием источников электронов можно применять не только для определения геометрических параметров структурных слоев изготовленных ППД, но и для технологических целей, например, для контроля процесса выравнивания концентрации лития в Si(Li)-детекторах, толщин кремниевых пластин для Si(Au)-детекторов, работающих в режиме полного обеднения и т.д.

Необходимо также отметить, что энергетическое разрешение телескопа из Si(Li)-детекторов вследствие флуктуации потерь энергии может в большой степени зависеть от абсолютных значений толщин самих нечувствительных слоев, чем от точности их измерения. Поэтому важно усовершенствовать технологию изготовления Si(Li)-ППД с целью уменьшения размеров перекомпенсированного литием слоя.

В заключение мы хотели бы поблагодарить В.А.Гайна за помощь в измерениях, а А.К.Поносова и В.А.Печкурова за полезные обсуждения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eisenberg R. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1977, 146, p. 487.
2. Горнов М.Г. и др. ОИЯИ, 13-12921, Дубна, 1979.
3. Golding F.S. Nucl. Instr. and Meth., 1966, 43, p.10.
4. Hunbbard E.L., Peterson D.G. Nucl. Instr. and Meth., 1970, 80, p.40.
5. Tuzzolino A.J. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1965, 36, p. 73.
6. Алексеев Н.В. и др. Вестник МГУ, 1973, №5, с.603.
7. Ильясов А.З., Мазитов Б.С. ПТЭ, 1974, №2, с.60.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 мая 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электроне. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
D17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
D6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
D3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
D13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
D1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
D1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Горнов М.Г. и др. Определение структурных слоев полупроводниковых детекторов с помощью заряженных частиц 13-82-350

Изложены методы измерения полных толщин и чувствительных областей кремниевых детекторов с помощью пучка протонов и радиоактивных источников электронов. Для определения этих величин использовались зависимости различных параметров спектров, зарегистрированных Si(Li) -детектором, от толщины калиброванных кремниевых фильтров. Такой подход упростил измерения и устранил недостатки ранее известных способов. Показано, что разработанная методика позволяет определять геометрические параметры структурных слоев ППД с высокой точностью /лучше +10 мкм/, которая зависит лишь от стабильности спектрометрического тракта.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Gornov M.G. et al. The Definition of the Structure Layers of Semiconductor Detectors by Means of Charged Particles 13-82-350

The measuring methods of total thicknesses and sensitive regions of silicon detectors by means of the proton beam and radioactive sources of electrons are accounted. To define these values we use the dependences of different parameters of the registered spectra of thickness of calibrated silicon filters. It simplifies the measurement and eliminates the disadvantages of the known methods. It is apparent that these methods permit to define the geometrical parameters of structure layers of silicon detectors with a good accuracy (better than 10 μm) which is achieved only at the expense of stabilization of the spectrometrical channel.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problem, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод авторов.