

индекс 3624



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Препринт ЕФИ-944(95)-86

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԾԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Г.М.АЙВАЗЯН, Э.А.АХВЕРДЯН, Г.В.БАДАЛЯН,
Г.Н.ЕРИЦЯН, Г.Г.ЗОГРАБЯН, Г.В.ЕСАЯН

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ЯДЕРНЫХ
ИЗЛУЧЕНИЙ, ИХ СОЗДАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЕРЕВАНСКОМ
ЭЛЕКТРОННОМ СИНХРОТРОНЕ

ЦНИИатоминформ

ЕРЕВАН-1986

УДК 539.1.074:537.311.33

Г.М. АЙВАЗЯН, Э.А. АХВЕРДЯН, Г.В. БАДАЛЯН,
Г.Н. ЕРИЦЯН, Г.Т. ЗОГРАБЯН, Г.В. ЕСАЯН

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ,
ИХ СОЗДАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА
ЕРЕВАНСКОМ ЭЛЕКТРОННОМ СИНХРОТРОНЕ

В работе приводятся краткий обзор и основные особенности изготовления полупроводниковых детекторов. Подробно рассмотрены вопросы проверки работоспособности характеристик изготовленных детекторов и достигнутые в ЕФИ параметры. Перечисляются и анализируются основные экспериментальные исследования, выполненные на Ереванском электронном ускорителе с применением различных полупроводниковых детекторов. Показано успешное применение кремниевых полупроводниковых детекторов как поперечно-барьерных, так и литий-дрейфовых для спектрометрии и идентификации протонов, дейтронов и более тяжелых частиц в сложных условиях эксперимента на внутреннем пучке электронного синхротрона большой энергии.

Ереванский физический институт

Ереван 1986

I. Полупроводниковые детекторы ядерных
излучений

Создание в начале 60-х годов электронно-дырочных полупроводниковых детекторов (ППД) было очередным этапом в развитии ядерного приборостроения, мощным толчком для разработки аппаратуры с качественно новыми параметрами. Это связано с тем, что при использовании ППД для спектрометрии ионизирующих излучений достигается такое энергетическое разрешение, которое до этого удавалось получать лишь с помощью сложной и дорогостоящей аппаратуры [1-4].

Полупроводниковые детекторы по назначению и устройству относятся к твердотельным детекторам ионизирующих излучений.

Акты взаимодействия ионизирующих излучений с полупроводниковым материалом ППД создают в среде носители электрического заряда, а также микронеоднородности (выбивание атомов из междоузлий,

появление центров рекомбинации, образование ловушек и т.д.).

На основе этого явления - возникновения в материале свободных носителей электричества - созданы ППД для регистрации заряженных частиц и γ -квантов. В этих детекторах в результате сбора свободных носителей электрическим полем на электродах детектора создается заряд, позволяющий с помощью последующего электронного устройства регистрировать акты взаимодействия ионизирующих излучений с чувствительной областью детектора.

В спектроскопии ионизирующих излучений наиболее широко используются ППД с электронно-дырочным переходом.

Различают 2 основных типа электронно-дырочных ППД: p-n или n-p - типа и (p-i-n) или (n-i-p) - типа. Среди ППД p-n - типа наибольшее распространение получили поперечно-барьерные детекторы, чувствительная область которых создается поверхностным барьером, а среди ППД p-i-n - типа - диффузионно-дрейфовые с чувствительной областью, созданной в результате дрейфа соответствующих примесей (например, лития) в полупроводниковый материал.

2. Основные особенности изготовления полупроводниковых детекторов

На протяжении многих лет ППД в основном изготавливались из германия и кремния, так как они наиболее полно удовлетворяли требованиям, предъявляемым к материалам для ППД [1].

ППД из Ge и Si из-за относительно высокого шума, обусловленного обратным током, эффективны при регистрации заряженных частиц с энергией ≥ 1 МэВ. На практике эти материалы при спектроскопии излучений с энергией ≤ 1 МэВ требуют снижения

рабочей температуры для ограничения влияния на энергетическое разрешение обратных токов.

В настоящее время ведутся работы по использованию других полупроводниковых материалов для изготовления ППД, работающих без охлаждения: арсенида галлия, фосфида галлия, сульфида и теллурида кадмия, карбида кремния, йодида ртути, антимонида индия и др.

В [5] рассмотрены спектрометрические характеристики детекторов из GaAs, CdTe и HgJ₂ в сравнении с кремниевыми и германиевыми. Особенно выделяется HgJ₂, его удельное сопротивление достаточно высоко, токи утечки малы. Он имеет большой атомный номер и большую плотность, что позволяет достигать высокой эффективности даже в тонких детекторах. Авторы [6] указывают на применение HgJ₂ как наиболее перспективного материала для создания неохлаждаемых ППД. Детекторы из HgJ₂ способны работать при комнатной температуре и обладают высокой эффективностью регистрации рентгеновского и γ -излучений. Их предполагается использовать для спектроскопии в области энергий 1-30 кэВ, в частности, для измерения рентгеновской флуоресценции.

В последние годы стали чаще использоваться детекторы из сверхчистого Ge [7]. Сверхчистый Ge стал доступен для практического использования лишь в последнее время. Преимущество детекторов из сверхчистого Ge сводится к тому, что они могут храниться при комнатной температуре без ухудшения спектрометрических характеристик.

Широкое применение в технологии изготовления (dE/dx) - детекторов находят эпитаксиальные кремниевые GaAs-структуры

[8-9]. Применение эпитаксиальных структур позволяет получить плоскопараллельные пластины микронных толщин, какие невозможно изготовить путем механической обработки слиткового кремния.

Все эти новые полупроводниковые материалы пока трудноподо- чаемые и дорогие; у некоторых размеры пока небольшие (например, $HgTe$). По этим причинам они только начинают внедряться в фи- зический эксперимент.

Развитие экспериментальных исследований на Ереванском ускоре- теле в области ядерной физики высоких энергий с использованием ППД привело к необходимости организации разработки и изготов- ления их в самом институте, так как получение детекторов нужных типоразмеров и параметров извне сопряжено с различными труднос- тями и затратами.

В 1975 г. в рамках лаборатории радиационной физики твердого тела ЕРФИ были организованы разработка и изготовление кремние- вых поверхностно-барьерных детекторов. Исходным материалом слу- жит кремний n -типа с удельным сопротивлением не менее $1-3 \text{ кОм}\cdot\text{см}$

Технология изготовления любых видов детекторов с переходами включает в себя многие типичные операции и меры предосторож- ности [2-3].

Сначала слитки кремния нарезаются на пластины соответствую- щей толщины, затем пластины шлифуются, подвергаются химическо- му травлению. После травления кристалл тщательно промывается под проточной деионизированной водой.

Методика изготовления тонких ΔE - детекторов толщиной ме- нее 50 мкм несколько отличается от методики изготовления других типов ППД. В этом случае более жесткие требования предъявляют-

ся к плоскопараллельности отшлифованных пластин. Разброс по толщине не должен превышать $1 - 2 \text{ мкм}$ [10]. После нанесения термическим испарением электродов кристалл упаковывается в кор- пус и поступает на испытательный стенд для проверки работоспо- собности и определения рабочих параметров. На рис.1 показан об- щий вид технологического участка по изготовлению ППД. Типовая конструкция ППД изображена на рис.2 а,б.

3. Проверка работоспособности изготовленных детекторов и достигнутые параметры

Проверка работоспособности изготовленных кремниевых поверх- ностно-барьерных ППД включает 2 этапа:

а) определение электрических характеристик детектора, включа- ющих снятие вольтамперной характеристики и измерение емкости (вольтамперная характеристика считается удовлетворительной при наличии плато тока на среднем уровне $\approx 0,1 \text{ мкА}$);

б) испытание электрически годных детекторов на физические характеристики.

Обычно проверке подлежат те свойства, характеристики детек- торов, которые критичны при проведении физического эксперимен- та. Применяемые нами ППД в ($\Delta E, E$) - телескопах используются для определения энергии частицы и ее идентификации по энерго- выделениям в ΔE и E -детекторах. Из сказанного следует, что особой, тщательной проверке подлежат такие характеристики ППД, как:

- линейность детектора по энергиям (пропорциональность ампли- туды импульса детектора выделенной в нем энергии);
- энергетическое разрешение;

- реальная чувствительная толщина детектора, задающая энергетический диапазон регистрируемых частиц;
- чувствительная поверхность, задающая рабочую апертуру детектора;
- изменение перечисленных характеристик от воздействия внешних факторов (температура, радиация и т.д.).

Все перечисленные характеристики сильно зависят от качества материала, из которого изготавливается ППД, а также от технологии изготовления.

Сам тип детектора, его целевое назначение (пролетный ΔE - детектор или E - детектор полного поглощения) всецело определяются этими факторами.

Общая схема испытательного стенда, применяемая в ЕРФИ для изучения характеристик ППД, приведена на рис.3 а,б. Детектор располагается в специальной откачиваемой вакуумной камере и облучается коллимированным пучком от α - радиоактивного источника. Выходные от ППД импульсы после усиления регистрируются многоканальным амплитудным анализатором (например, "DIDAS - 4000"). Так как сигналы от детекторов на пути в анализатор проходят через спектрометрический тракт, то на них будут накладываться некоторые искажения от элементов тракта. Поэтому перед началом проверки характеристик ППД необходимо провести проверку вклада спектрометрического тракта с помощью генератора точных амплитуд, подаваемых на вход предусилителя. Это даст возможность проверить собственную линейность усилительного тракта, а также определить вносимый им вклад в ширину кривой энергетического разрешения ППД.

Вакуумная камера на рис.3, содержащая испытуемый ППД и α - ис-

точник, может быть оснащена также разными приспособлениями для сканирования поверхности ППД, изменения его температуры и т.д.

А. Проверка линейности ППД

Для этого используют источники α - частиц разных энергий E_1, E_2, E_3, \dots , при этом энергии желательно иметь такие, чтобы частицы сканировали возможно большую часть толщины детектора. Регистрируя все эти линии на амплитудном анализаторе, можно с достаточной точностью определить линейность ППД. Часто $E_{макс}$ не бывает достаточной для сканирования больших толщин детектора, и в таких случаях иногда большие энергетические метки можно получить, используя ускорительные пучки. Надо отметить, что таким проверкам подлежат особенно те ППД, которые должны использоваться для регистрации фрагментов, так как в этом случае вероятности перезарядки фрагментов и ядерного рассеяния увеличиваются. Полученная картина является важной характеристикой и фактически представляет энергетическую калибровку ППД.

Б. Энергетическое разрешение ППД

Это есть ширина моноэнергетической линии на полувысоте. Эта характеристика сразу снимается при проведении исследования линейности ППД. Так как α - источники имеют очень узкую собственную ширину линий, а уширение линий из-за шумов спектрометрических трактов, проверенное генератором точных амплитуд, мало, то уширение этих линий объясняется конечным энергетическим разрешением ППД. Разрешение детекторов зависит от условий собирания зарядов в детекторе, т.е. от приложенного напряжения, а также от температуры. В некоторых случаях бывает необходимым также изучение зависимости разрешения ППД от энергий входных частиц.

В. Чувствительная толщина ППД

Для пролетных ППД проверка — является ли вся толщина детектора эффективной — осуществляется облучением детектора как с передней, так и с задней стороны идентичными α — источниками с такими энергиями, при которых пробег α — частиц меньше полной толщины детектора. В случае, если зафиксированные амплитудным анализатором эти энергетические линии (для позиций сзади и спереди) не совпадают, то говорят о наличии неэффективного ("мертвого") слоя в ППД.

Обычно, если материал для ППД выбран удачным (достаточно высокоомным), то при соответствующем увеличении напряжения смещения эти линии совпадают на дисплее анализатора. В остальных случаях полученный "мертвый" слой должен фиксироваться и учитываться при обработке полученных экспериментальных данных. Для ППД полного поглощения проверка наличия нечувствительного слоя проводится аналогично. В ППД полного поглощения, если после них ставится детектор антисовпадения, присутствие "мертвого" слоя приводит к некоторым искажениям в конце энергетических спектров регистрируемых частиц, исправление которых не просто. Что касается определения реальной эффективной толщины детекторов (в микрометрах), то поступают следующим образом: облучают ППД на ускорителе от физической мишени и регистрируют амплитудный спектр тяжелых частиц, попадающих в детектор. В спектре в основном преобладают протоны и характерный "перегиб" в его конце соответствует концу эффективной толщины детектора. Используя энергетическую калибровку детектора по α — активным источникам, можно восстановить энергию и, соответственно, толщину, со-

ответствующую концу спектра.

Г. Чувствительная поверхность ППД

Чувствительная поверхность определяет светосилу установки и является важным параметром ППД. Обычно чувствительной называется вся контактная поверхность из золота и алюминия спереди и сзади детектора. Однако на границе контактов могут быть неоднородности электрического поля в объеме детектора, что может привести к неэффективному сбору зарядов и соответственно к уменьшению эффективности регистрации частиц и искажению спектров.

Изучить эти области можно сильно коллимированными пучками радиоактивных источников. Сканируя поверхность ППД по диаметру и следя за средней скоростью срабатывания детектора, можно определить этот неэффективный слой. Обычно неэффективный слой на краю контактной поверхности не превышает 0,5 мм, и в физическом эксперименте его учитывают, соответственно сузив отверстие апертурного коллиматора телескопа.

Д. Температурный сдвиг характеристик ППД

При исследовании детектора желательно определить ту температурную область, в которой основные характеристики ППД оптимальные и мало изменяются.

Наилучшие характеристики ППД, такие, как: лучшее энергетическое разрешение, малые токи достигаются при низких температурах. Такие условия можно создать, например, применением локальных миниатюрных холодильников, работающих на основе эффекта Пельтье (до перепада — 15⁰С), охлаждением детекторной крышки

сухим льдом или холодной водой, или, что сложнее, применением охлаждения жидким азотом и т.д.

Начиная с 1975 г. в ЕрФИ изготовлено около 200 кремниевых поверхностно-барьерных детекторов различных толщин, из которых в настоящее время действуют ~ 40 . Материалом служили слитки кремния отечественного производства с удельным сопротивлением $\sim 1-2$ кОм·см (для тонких детекторов) и ~ 10 кОм·см (для Е-детекторов). В таблице приведены некоторые результаты исследования характеристик изготовленных детекторов. При этом энергии α - частиц радиоактивного источника были: 5,156 ; 5,499 ; 5,806 МэВ соответственно.

Таблица

Толщина детектора (мкм)	Рабочая апертура Φ (мм)	Удельное сопротивление материала ρ (кОм·см)	Приложенное обратное напряжение \bar{U} (В)	Ток детектора I (мкА)	Энергетическое разрешение R (кэВ)
50 - 90	16	1,2 - 1,8	20 - 60	$\approx 0,1$	60 - 80
200 - 300	18	1,2 - 1,8	110 - 200	$\approx 0,1$	50 - 60
450 - 500	16	1,2 - 1,8	150 - 220	$\sim 0,1$	45 - 70
700 - 900	16	~ 10	140 - 190	$\sim 0,1$	55 - 70

Примечание: в таблице приведены разрешения, измеренные с рабочей стороны ППД. Разрешения с обратной стороны - относительно хуже.

4. Применение полупроводниковых детекторов в экспериментах на Ереванском электронном ускорителе

Методика ППД излучений получила широкое развитие и приме-

ние в экспериментальной физике. Основные преимущества ППД по сравнению с детекторами других типов - это хорошее энергетическое разрешение, линейная зависимость амплитуды импульса от величины поглощенной энергии, сравнительно короткая продолжительность импульса, нечувствительность к магнитному полю, простота и компактность конструкции, возможность работы при низких температурах (в случае кремниевых ППД - и при комнатной температуре), возможность создания детекторов с практически нулевой толщиной входного окна.

К недостаткам этих детекторов можно отнести малую величину сигнала, невозможность создания детекторов достаточно большой толщины для полного поглощения частиц высоких энергий, изменение (ухудшение) характеристик при накоплении больших доз облучения, невозможность работать при высоких температурах.

Эти характерные особенности и определяют области применения ППД. Во-первых, это спектрометрия заряженных частиц и γ - квантов в области низких и средних энергий. Необходимость таких измерений возникает во многих исследованиях ядерной физики, когда необходимо изучать энергетические спектры частиц, возникающих в результате радиоактивного распада или разного рода ядерных реакций.

В Ереванском физическом институте первые экспериментальные исследования с применением кремниевых полупроводниковых детекторов начаты в 1970 г. Объединенная группа специалистов ЕрФИ и лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, в том числе ученые из СРР, НРБ, ГДР, ВНР начала систематические экспериментальные исследования упругого $e-p$, $e-d$ рассеяния на внутреннем пучке Ереванского электронного ускорителя (фактически первый экспери-

мент после его ввода в действие).

Эти оригинальные по замыслу исследования преследовали цель выяснения электромагнитной структуры протона, дейтрона (нейтрона) при малых передаваемых импульсах, т.е. при малых энергиях отдачи частицам-мишеням, регистрируемым кремниевыми полупроводниковыми детекторами [II-13].

В этих экспериментах для спектрометрии протонов (дейтронов) отдачи использовались кремниевые поверхностно-барьерные детекторы прямоугольной формы $10 \times 40 \text{ мм}^2$ толщиной $\sim 1 \text{ мм}$ и с энергетическим разрешением 60-80 кэВ на уровне α -линии 5,5 МэВ, изготовленные в ЛЯП ОИЯИ. Эти работы продолжались до 1975 г.

С 1976 г. начался новый этап физических исследований в ЕрФИ с применением кремниевых полупроводниковых детекторов. Группа ЕрФИ совместно с учеными из Института атомной физики (ныне Институт физики и ядерной технологии г.Бухарест, ССР) приступила к систематическому исследованию продуктов электродезинтеграции атомных ядер электронами больших энергий на созданной на внутреннем пучке Ереванского ускорителя экспериментальной установке "а - А".

Исследуются физические характеристики: массовые, энергетические спектры, угловые и А-зависимости, а также зависимости от начальной энергии электронов выхода образованных продуктов ядерных расщеплений - протонов, дейтронов, тритонов, ядер изотопов He, Li, Be и более тяжелых фрагментов с последующим сравнением с существующими теоретическими моделями по механизму образования [I4-I6].

В этих исследованиях, в отличие от предыдущего, для регистрации ядерных частиц применяются не одиночные кремниевые детек-

торы, а телескопические системы типа ($\Delta E, E$) из тонких протонных ΔE - детекторов (толщина 50 - 200 мкм) и E - детекторов останковки (толщина 0,5 - 4 мм), позволяющие идентификацию и спектрометрию тяжелых заряженных частиц. Энергетическое разрешение детекторов составляло 65 - 70 кэВ для ΔE - детекторов и 80 - 90 кэВ для E - детекторов на уровне α -линии 5,5 МэВ. Применяемые в этих экспериментах полупроводниковые детекторы изготавливались как в Бухаресте, так и в Ереване. Начиная с 1982 г., после завершения сотрудничества с СРР в этих экспериментах используются только кремниевые ППД, изготовленные в ЕрФИ.

Важной особенностью упомянутых выше экспериментальных исследований является применение впервые методики кремниевых полупроводниковых детекторов на внутреннем пучке электронного синхротрона большой энергии. Действительно, при работающем ускорителе ППД и последующая спектрометрическая электроника испытывают большую радиационную нагрузку, ухудшающую, в частности, энергетическое разрешение иногда в несколько раз и требующую определенных мер для надежного проведения экспериментов.

Круг использования в экспериментах на Ереванском ускорителе полупроводниковых детекторов не ограничивается одними кремниевыми детекторами. Начиная с 1975-1976 гг. объединенной группой ЕрФИ и ЕГУ проводятся совместные исследования фотоядерных реакций с применением германиево-литиевых детекторов для спектроскопии возбужденных ядер-остатков [I7-I8]. В этих работах используются стандартные Ge(Li) -детекторы с рабочим объемом соответственно 30 и 60 см^3 при энергетическом разрешении ~ 3 кэВ на уровне энергии гамма квантов ~ 1 МэВ.

В настоящее время планируются и другие применения полупроводниковых детекторов в экспериментах на Ереванском синхротроне.

В заключение выражаем благодарность А.Ц.Аматуни за большую помощь и внимание в организации и функционировании группы изготовления детекторов и С.Г.Матиняну за содействие. Выражаем также благодарность К.А.Арутюняну, П.Н.Бедросяну за помощь в работе.

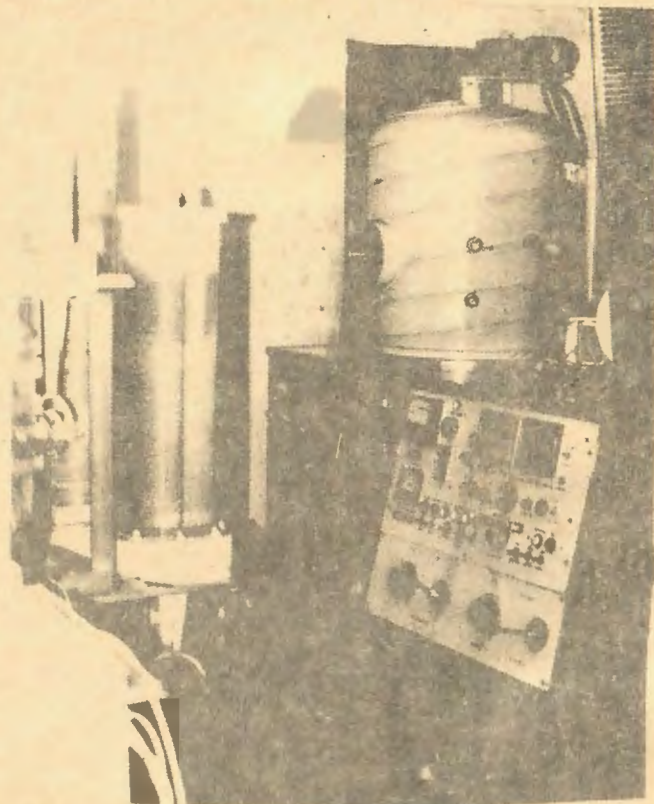


Рис.1 Общий вид технологического участка по изготовлению ППД

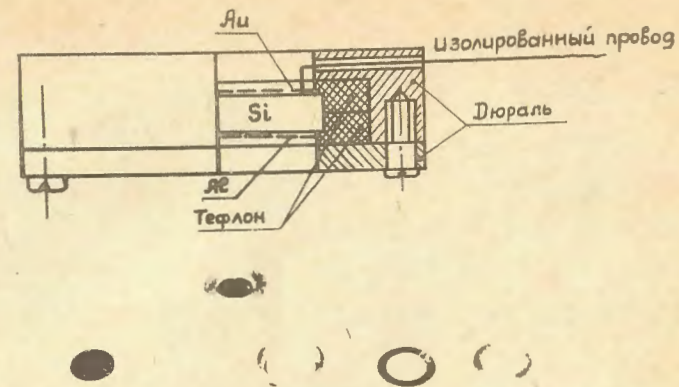


Рис.2 Конструкция изготовленного полупроводникового детектора:
а) разрез; б) разборка

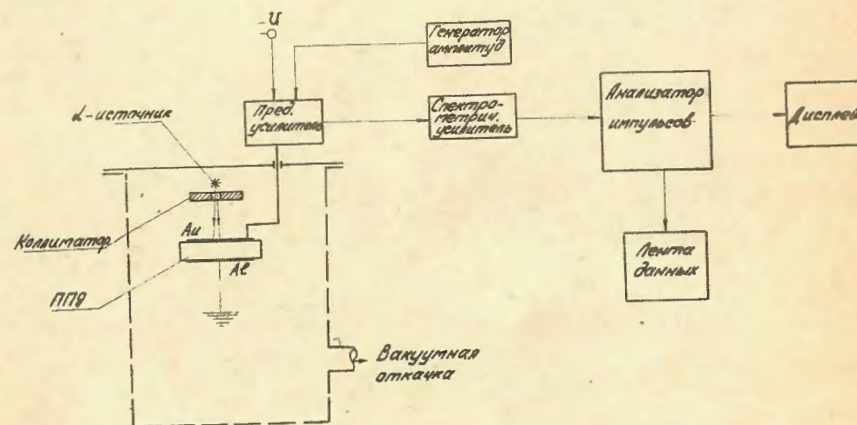


Рис.3 Испытательный стенд для проверки полупроводниковых детекторов:
а) принципиальная схема

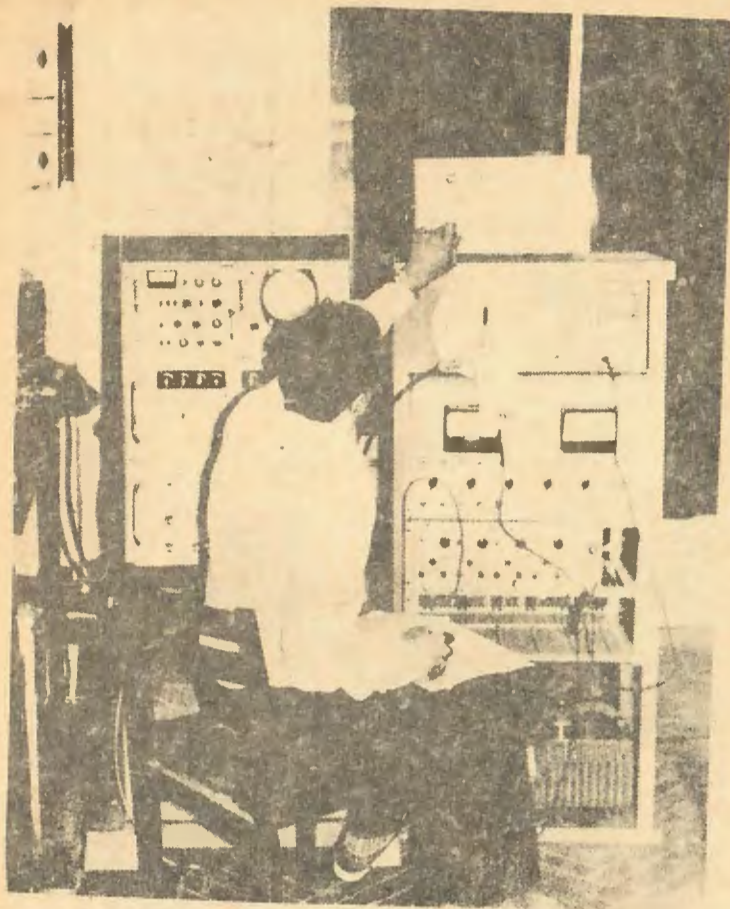


Рис.3 б) общий вид станда

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдин С.А., Вартанов Н.А., Ерыкайлов Ю.В. и др. Прикладная спектрометрия с полупроводниковыми детекторами. М., Атом - издат, 1974.
2. Акимов Ю.К., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф., Юнгклауссен Х. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение. М.; Атомиздат, 1967.
3. Дирили Дж., Нортроп Д. Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. М., Мир, 1966.
4. Белоусов А.С. Счетчики элементарных частиц. М., Наука, 1972.
5. Chwaszczewska J., Twanowska J.M. Mercury iodide detectors in room temperature X-ray spectrometry. "Phys.Semiconduct. Compounds Pros." 10, Jasrowice, Apr. 22-30, 1980.
6. Залетин В.М., Кочеванов В.В., Ножкина И.Н. и др. Детекторы рентгеновского и γ - излучения на основе кристаллов дийодида ртути. Атомная энергия, 1982, т.52, вып.3, с.193-195.
7. Жаргал Ч., Ким Зайте, Лим Хен Тхек и др. Коаксиальные детекторы из сверхчистого германия. Препринт ОИЯИ, 13-82-397, Дубна, 1982.
8. Евсеев И.И., Крячко В.В., Диденко А.А. ΔE - детекторы на основе эпитаксиальных кремниевых структур. ПТЭ, 1982, № 2, с.43-45.
9. Голенецкий С.П., Залетин В.М., Протасов И.И. и др. О возможности использования полупроводниковых детекторов на основе эпитаксиального арсенида галлия в рентгенорадиометрическом анализе. ПТЭ, 1980, № 3, с.63-67.

10. Авдейчиков В.В., Дожкин О.В. Тонкие кремниевые dE/dx - детекторы. (Способ изготовления и свойства). В сб. Прикладная ядерная спектроскопия. 1970, вып. I, с. 200-207.
11. Акимов Ю.К., Андерт К., Арванов А.Н. и др. Рассеяние электронов протонами на малые углы, ЖЭТФ, 1972, 62, вып. 4, с. 231.
12. Акимов Ю.К., Арванов А.Н., Банифатов А.Е. и др. Исследование упругого рассеяния электронов протонами в области квадрата передаваемых импульсов $0,12F^{-2} - 0,5F^{-2}$. ЯФ, 1979, т. 29, вып. 4, с. 922.
13. Акимов Ю.К., Арванов А.Н., Банифатов А.Е. и др. Исследование упругого рассеяния электронов дейтронами при значениях квадрата передаваемого импульса $0,36F^{-2} - 0,9F^{-2}$. ЯФ, 1979, т. 29, вып. 3, с. 649.
14. Арутюнян В.Н., Бадалян Г.В., Бегларян Д.М. и др. Регистрация образования тяжелых частиц на ядрах электронами с энергией 4,5 ГэВ. Изв. АН АрмССР, Физика, 1979, т. 14, вып. 3, с. 172.
15. Арутюнян В.Н., Бадалян Г.В., Бегларян Д.М. и др. Исследование инклюзивного образования малоэнергетических частиц p , d , t , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ в неупругих взаимодействиях 4,5 ГэВ электронов с ядрами. ВАНТ, серия: общая и ядерная физика, 1981, вып. 4(18), с. 3.
16. Айвазян Г.М., Арутюнян В.Н., Бадалян Г.В. и др. Испускание легких фрагментов He , Li , Be , ... при взаимодействии электронов больших энергий с ядрами. ВАНТ, серия: общая и ядерная физика, 1984, вып. 2(27), с. 50.

17. Danagulian A.S., Danagulian S.S., Khudaverdian A.G. Investigation of protonuclear reactions in enriched nuclei ${}^{58}\text{Ni}$ and ${}^{64}\text{Ni}$. Proc. of the Second International conf. on Radioactivities 80, Bratislava 1982.
18. Авдалян Г.А., Григорян Е.О., Демехина Н.А. Исследование импульсных характеристик ядер отдачи в реакции $\text{Al}(\gamma, 2pn) {}^{24}\text{Na}$. Препринт ЕФИ-667(57)-83, Ереван, 1983.

Рукопись поступила 23 октября 1986 г.

И.М.АЙВАЗЯН, Э.А.АХВЕРДЯН, Г.В.БАДАЛЯН, Г.Н.ЕРИЦЯН,
Г.Г.ЗОГРАБЯН, Г.В.ЕСАЯН

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ, ИХ СОЗДАНИЕ
И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЕРЕВАНСКОМ ЭЛЕКТРОННОМ
СИНХРОТРОНЕ

Редактор Л.П.Мукаян
Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать 29/ХП-86г. . ВФ-12475 Формат 60x84/16
Офсетная печать. Уч.изд.л. I,3 Тираж 299 экз. Ц.20 к.
Зак.тип. 662 Индекс 3624

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, Маркаряна 2