



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

ИФВЭ 2016–13

Е.Н. Ардашев, С.А. Горохов, А.А. Киряков, П.П. Коробчук,
И.С. Лобанов, Е.В. Лобанова, В.Х. Маляев, В.А. Сенько,
М.М. Солдатов, Ю.П. Цюпа, В.И. Якимчук

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино

А.Г. Воронин, Д.Е. Карманов, М.М. Меркин

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

**Кремниевый микрополосковый детектор
установки СВД**

Направлено в ПТЭ

Протвино 2016

Аннотация

Ардашев Е.Н. и др. Кремниевый микрополосковый детектор установки СВД: Препринт ИФВЭ 2016-13. – Протвино, 2016. - 17 с., 12 рис., библиогр.: 7.

Приведены результаты: разработки модулей кремниевых микрополосковых детекторов установки СВД, вместе с электроникой управления и сбора данных; процедурой определения качества детекторов перед монтажом, отбраковки микросхем, настройки параметров микросхем ASIC; настройки блоков электроники системы сбора данных; работы модулей на пучке ускорителя.

Abstract

Ardashev E.N. et al. Si microstrip detector of SVD setup: IHEP Preprint 2016-13. – Protvino, 2016. – p. 17, figs. 12, refs.: 7.

Results presented on: developments of the modules of silicon microstrip detectors of SVD setup, together with handling and data taken electronics; procedure of detector quality control before assembling; selection of microchips; setting of ASIC parameters; tuning DAQ electronics; operation of the modules in an accelerator beam.

Введение

Микрополосковые (стриповые) кремниевые детекторы российского производства используются в экспериментах на установке СВД (см. www.ihep.ru – действующие установки) уже более десяти лет [1-2]. В настоящее время создан новый кремниевый микрополосковый вершинный трековый детектор, при изготовлении которого учтён накопленный ранее опыт. В отличие от предыдущего варианта, детектор имеет модульную структуру, в нём используется только один тип специализированных микросхем VA1-3 (ASIC - Application Specific IC) фирмы IDEAS (Норвегия)[3]. Новая система сбора данных с модулей микрополосковых детекторов создана на базе блоков электроники в стандарте ЕвроМисс (Многоканальная Информационная Скоростная Система, изготовленная в стандарте U6 евромеханика) [4], с автономным контроллером, вычитывающим данные с модулей микрополосковых детекторов в последовательном режиме чтения информации и буферизирующим данные во время вывода пучка из ускорителя. По концу вывода, данные, накопленные в буфере памяти контроллера, передаются по каналу USB в PC и обрабатываются. Используемый подход к созданию микрополоскового вершинного трекового детектора и его электроники позволил в несколько раз повысить скорость приёма данных с вершинного детектора установки СВД, улучшить параметры системы. Вершинный трековый детектор предназначен для реконструкции вершин взаимодействий в ядерных мишенях и имеет в своём составе пять модулей: первый модуль состоит из

двух взаимно перпендикулярных плоскостей (X и Y) детекторов с шагом 28 микрон, размером $\sim 30 \times 30 \text{ мм}^2$, три модуля имеют взаимно перпендикулярные плоскости (X и Y) детекторов с шагом 56 микрон, размером $\sim 60 \times 60 \text{ мм}^2$, и один модуль имеет детекторы с шагом 56 микрон, размером $\sim 60 \times 60 \text{ мм}^2$, у которых микрополоски двух плоскостей находятся под углом 20° друг к другу. В настоящей работе мы представляем конструкцию модулей, с электроникой управления и сбора данных, процедуры определения качества детекторов перед монтажом, отбраковки микросхем ASIC, настройки параметров микросхем, настройки блоков электроники системы сбора данных, результаты работы модулей на пучке ускорителя.

1. Конструкция модулей микрополосковых трековых детекторов

В конструкции модулей используются два типа кремниевых детекторов толщиной 0,3 мм: детекторы с шагом 56 микрон, и точным размером $61,4 \times 62,2 \text{ мм}^2$, и детекторы с шагом 28 микрон, и точным размером $31,7 \times 33 \text{ мм}^2$. Рисунок (с вертикальным расположением стрипов) и фотография (с горизонтальным расположением стрипов) одной плоскости модуля с большим детектором в сборе приведены на Рис. 1а, б.

Микрополосковый трековый кремниевый детектор и ситалловые микроплаты (см. Рис. 2) с бескорпусной микросхемой VA1-3 смонтированы на текстолитовой печатной плате толщиной 0,5 мм, которая, в свою очередь, приклеена, для обеспечения жёсткости конструкции, к стальной пластине-рамке толщиной 1 мм. Габариты этой сборки $146 \times 146 \text{ мм}^2$. Вся детекторная сборка: стальная рамка с текстолитовой печатной платой и детектором, адаптерами шага и микроплатами, – монтируется винтами на текстолитовую печатную плату электроники, диаметр которой 290 мм.

Для монтажа детектора $61,4 \times 62,2 \text{ мм}^2$ печатная плата детекторной сборки имеет окно размером $60,2 \times 56,6 \text{ мм}^2$, на которое при помощи проводящего клея Namiks 30N, нанесенного по краям окна на омическую сторону детектора, приклеен детектор к проводящему слою печатной платы. Для сборки детектора $31,7 \times 33 \text{ мм}^2$ окно в печатной плате имеет размер $30 \times 27,6 \text{ мм}^2$.

Для совмещения шага контактных площадок детектора (116 мкм) и ASIC (91,2 мкм) в версии с детектором 61,4x62,2 мм² используется адаптер (см. Рис. 2) размером 53,7x3,4 мм² и адаптер размером 52,5x18 мм² при сборке с детектором 31,7x33 мм².

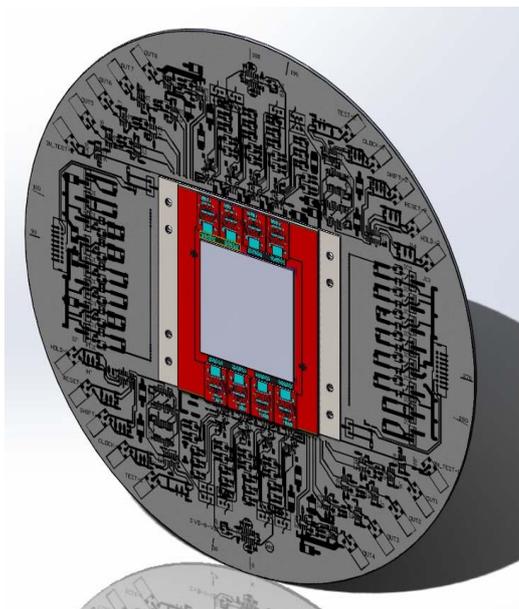


Рис. 1а. Рисунок (с вертикальным расположением стрипов) одной плоскости модуля с большим детектором в сборе.

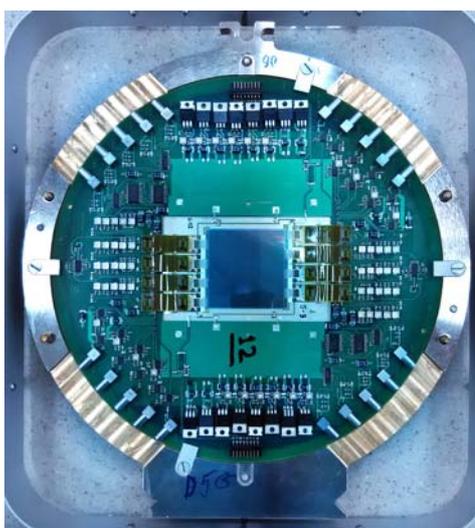


Рис. 1б. Фотография (с горизонтальным расположением стрипов) одной плоскости модуля с большим детектором в сборе.



Рис. 2. Фотография части сборки, на которой видны (сверху вниз): часть детектора с разваркой на адаптер, соединение адаптера с ASIC, ситалловые микроплаты с ASIC и SMD разъёмы для подсоединения к печатной плате электроники, гибкая плата из фольгированного полиимида с SMD разъёмами.

На ситалловой микроплате размером $14,3 \times 20,3 \text{ мм}^2$, электропроводящим клеем Namiks 30N смонтирована бескорпусная микросхема VA1-3 и SMD разъем AXK-7L-28 для коммутации детекторной сборки и печатной платы электроники. Коммутация выхода микросхемы VA1-3 и входа электроники выполняется посредством гибкой платы из фольгированного полиимида (см. Рис. 2) толщиной 80 микрон, на обоих концах которого методом пайки смонтированы SMD разъемы AXK-8L-28.

Трехслойная металлизация ситалловых адаптеров и микроплат создана методом термического напыления в вакууме трех металлов: *Cr, Cu, Ni*. Ситалловые адаптеры и микроплаты изготовлены методом химической жидкостной фотолитографии.

Все электрические соединения детекторной сборки выполнены алюминиевой проволокой диаметром 18 мкм методом ультразвуковой сварки. Для соединения всех элементов одной детекторной сборки: детектора с адаптером, адаптера с ASIC, ASIC

с микроплатой, – потребовалось выполнить 2272 шт. проволочных петель. Схема разварки детекторов разного размера различна. Так, при разварке детектора 61,4x62,2 мм² на стороне «А» развариваются 128 контактных площадок на первый ASIC VA1-3, затем пропуск 128. Эти пропущенные контактные площадки стороны «А» развариваются на противоположной стороне «В» на второй ASIC. И так далее. В результате на каждой стороне детектора разваривается 512 контактных площадок, что в сумме дает 1024 каналов детектора. При разварке детектора 30x30 мм² каждая сторона детектора разваривается равномерно через одну контактную площадку.

Печатные платы электроники со всеми элементами и детекторами монтируются в металлический обод с двух сторон, с взаимным расположением детекторов друг к другу под углом 90⁰ либо 20⁰, образуя модуль (Рис. 1б). Для определения координат пролета частиц в пространстве с хорошей точностью конструкция модуля должна обеспечивать минимальное расстояние между плоскостями детекторов. Для этого все элементы детекторной сборки монтируются на одной стороне печатной платы, в том числе и стальная рамка. Детекторная сборка, в свою очередь, закрепляется с обратной стороны платы электроники. Таким образом, модуль из двух, например, взаимно перпендикулярных плоскостей (X и Y) детекторов собирается с минимальным расстоянием между плоскостями стрипов каждого детектора, которое составляет не более 1,7 мм.

2. Электроника управления и считывания сигналов с микрополоскового детектора

Считывание сигналов с детектора осуществляется с помощью специализированных интегральных микросхем (ASIC) VA1-3 фирмы IDEAS [3]. Микросхема содержит 128 каналов усиления и формирования сигналов, аналоговую память и схему последовательного вывода аналоговой информации. Для тестирования микросхем (т.к. они получены от фирмы без предварительной отбраковки) и для упрощения их замены кристаллы VA1-3 монтируются на ситалловые микроплаты (см. Рис. 2), содержащих блокировочные конденсаторы и SMD разъёмы. С печатной

платой электроники эти микроплаты связаны шлейфами (гибкими платами) из полиимидной плёнки (см. Рис. 2).

Основная плата электроники содержит преобразователи уровня цифровых сигналов, элементы настройки аналоговой части VA1-3, выходные малошумящие усилители и аналоговые стабилизаторы напряжений питания с низким падением напряжения для уменьшения тепловыделения.

Электрические схемы основной платы электроники содержат узлы, обеспечивающие работу микросхем VA1-3 в двух возможных режимах ее работы: основной режим и калибровочный режим. В электрические схемы введены элементы, позволяющие оптимизировать режимы микросхемы по постоянному току и другим параметрам, а также компенсировать возможные недостатки, поскольку техническое описание микросхемы, полученное от фирмы, не полно описывает ее работу.

Основная плата содержит следующие электрические блоки:

- Вторичные источники питания, которые выполнены на микросхемах линейных стабилизаторов с низким падением напряжения. На выходах стабилизаторов формируются напряжения питания +1,5В; -2В; -5В; +5В а также фильтры питания микросхем.
- Преобразователи логических уровней управляющих цифровых сигналов NIM - VA1-3. Преобразователи уровней основаны на применении микросхем цифровых дифференциальных приемников 90LV032. Далее расположены драйверы 74LTV244 и 74LTV240 для согласования с входами микросхем VA1-3.
- SMD разъемы для подключения силовых микроплат с ASIC и регулировочные элементы, устанавливающие токи и напряжения смещения аналоговой части ASIC.
- Выходные каскады на AD8129 (инструментальный усилитель), при помощи которых биполярные дифференциальные выходные аналоговые сигналы VA1-3 преобразуются в однополярные. Далее идет драйвер с высокой нагрузочной способностью BUF634 для чтения сигналов приборами с низкоомной нагрузкой (50 Ом).
- Дополнительный драйвер, предназначенный для согласования калибровочных сигналов с входами VA1-3.

- Прецизионный источник напряжения MAX6120 и схемы формирования постоянных напряжений смещений VA1-3 и смещений для согласования выходных сигналов VA1-3 с амплитудно-цифровыми преобразователями EM-07 системы измерений ЕвроМисс [4].

Конструктивно основная плата электроники выполнена в виде круга диаметром 290 мм. Это сделано для того, чтобы полупроводниковые детекторы можно было располагать в модуле под любым углом друг к другу. Одна плоскость модуля (Рис. 1) содержит: кремниевый микрополосковый детектор на 1024 канала; восемь керамических микроплат с ASIC VA1-3; керамические адаптеры для согласования шага разварки детектора и ASIC; разъёмы LEMO EPM.00.250.NTN, для считывания сигналов (8 шт.) и подачи тестовых сигналов (8 шт.); разъёмы подачи питания и напряжения смещения на микрополосковый детектор.

3. Настройка параметров модулей на стенде

Для настройки параметров модулей вершинного детектора был создан стенд, в состав которого входят блоки обеспечивающие работу электроники детектора от трёх типов сигналов. Блок-схема электроники стенда приведена на Рис. 3.

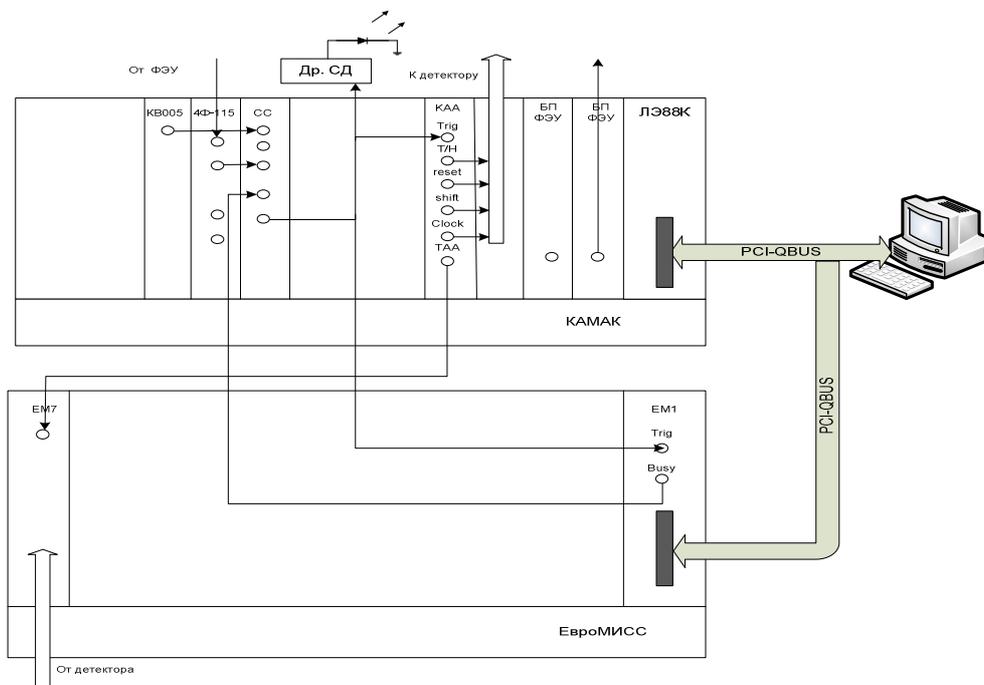


Рис. 3. Блок-схема электроники стенда.

В качестве этих сигналов могут использоваться сигналы от генератора с настраиваемой частотой (блок KB005 на Рис. 3), от сигналов, формируемых β источником ^{90}Sr в микрополосковом детекторе, а также от сигналов, формируемых в детекторе импульсным источником инфракрасного излучения длительностью ~ 30 нс, с регулируемой мощностью света.

Процедура настройки электроники детектора заключается в определении и установке оптимальных значений напряжений и токов на управляющих входах микросхемы VA1-3.

Для обеспечения требуемого протокола работы VA1-3 использовался модуль КАА. Временная диаграмма работы модуля представлена на Рис. 4. Временные параметры модуля устанавливаются командами системы КАМАК при инициализации работы модуля. По приходу сигнала от детектора модуль выдает необходимые сигналы для работы VA1-3 и модуля АЦП (EM-7). На время их работы сигналы от детектора (либо генератора) блокируются сигналом BUSY с модуля EM-1[4]. После снятия сигнала BUSY система готова к принятию следующего сигнала от детектора. После набора и обработки определенного количества данных, при различных значениях напряжений и токов на управляющих входах VA1-3, процедура, описанная ниже, выдает оптимальное их значение.

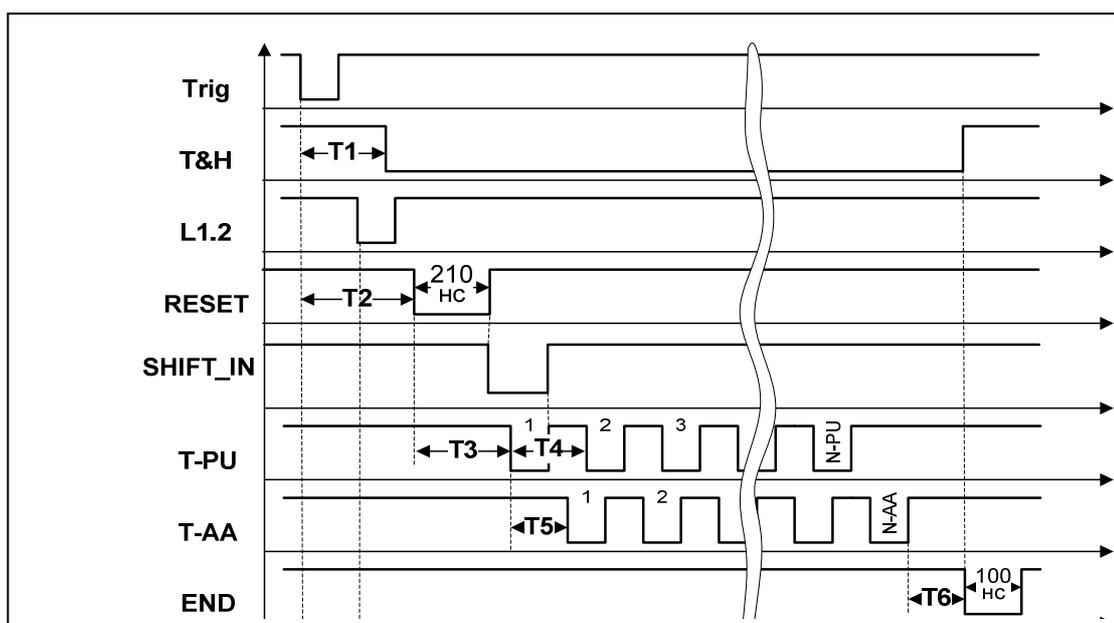


Рис. 4. Временная диаграмма работы модуля КАА.

3.1. Настройка модулей на стенде

Для настройки оптимальных параметров работы микросхем ASIC используются преобразователи логических уровней управляющих цифровых сигналов с заданием уровней сигналов малооборотными подстроечными резисторами (ПР), размещёнными на основной плате электроники (по 5 шт. на каждый ASIC). Оптимизация параметров производится программным путём с использованием РС и математического «метода координатного спуска».

На предварительном этапе настройки ASIC выполняются измерения граничных значений напряжений каждого ПР_{*i*} (*i*=1,5) и занесение их в программу. Все ПР_{*i*} устанавливаются в центр своего диапазона по напряжению.

Настройка каждой ASIC начинается с ПР₁. Программа разбивает диапазон изменения напряжения ПР_{*i*} на 6 равных интервалов (т.е. съём данных производится с 7 точек диапазона изменения напряжения ($U_j, j=1,7$), начиная с минимального). При этом реализована следующая логика программного пакета:

1. Программа выдаёт значение напряжения (U_j), которое должно быть установлено на ПР_{*i*}. Так как используются малооборотные ПР, то задача сводится к установке ближайшего значения к рекомендуемому программой; с последующим изменением в программе рекомендуемого значения на истинное через графический интерфейс программы.
2. После начала работы:
 - а. Программа блокирует запуск инфракрасного светодиода (ИКС) и производит съём пьедестальных значений за 1000 запусков. После чего рассчитывает положение и RMS пьедесталов для каждого входного канала ASIC.. По полученной информации итерационно рассчитываются $\langle \text{RMS} \rangle$ и $\sigma_{\langle \text{RMS} \rangle}$, которые, в частности, используются для исключения шумящих каналов.
 - б. Программа прописывает пороги в модуль АЦП EM-7 [4] (согласно данным, полученным при измерении пьедесталов) и включает ИКС. Производится съём данных за 2000 запусков ИКС. Полученные данные анализируются на положение максимума засветки ИКС и аппроксимируются нормальным распределением для получения значения максимальной

амплитуды (A_{\max}) и её ошибки (Рис. 5). Согласно найденному значению A_{\max} рассчитывается значение амплитуды для минимально ионизирующей частицы (MIP): $MIP = p_0 + p_1 A_{\max}$, где p_0 , p_1 – параметры аппроксимации зависимости $MIP(A_{\max})$, полученные ранее на стенде с радиоактивным источником ^{90}Sr (Рис. 6).

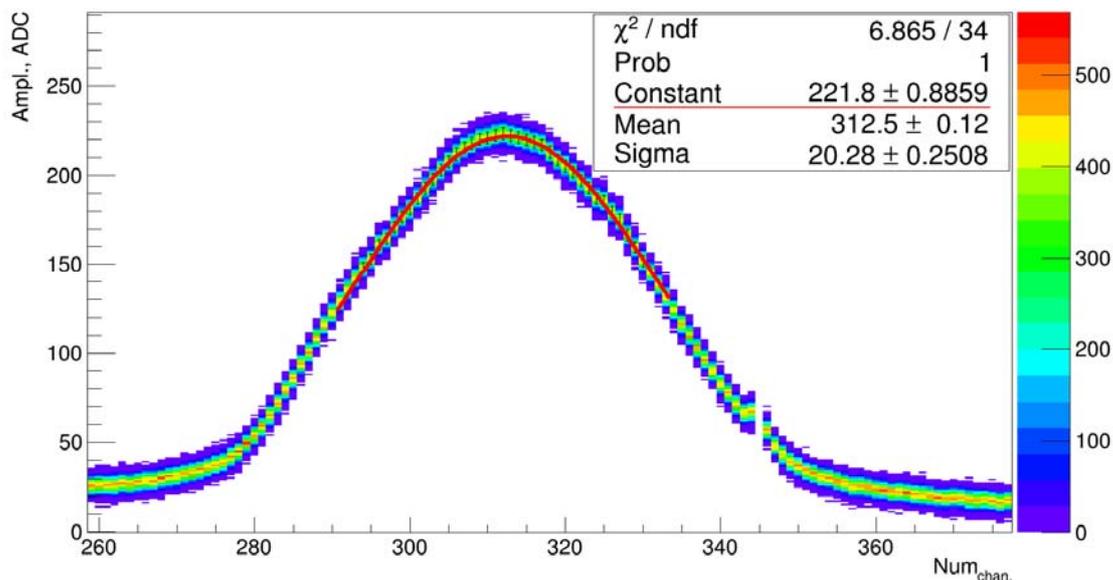


Рис. 5. Аппроксимация отклика микрополоскового детектора на ИКС нормальным распределением.

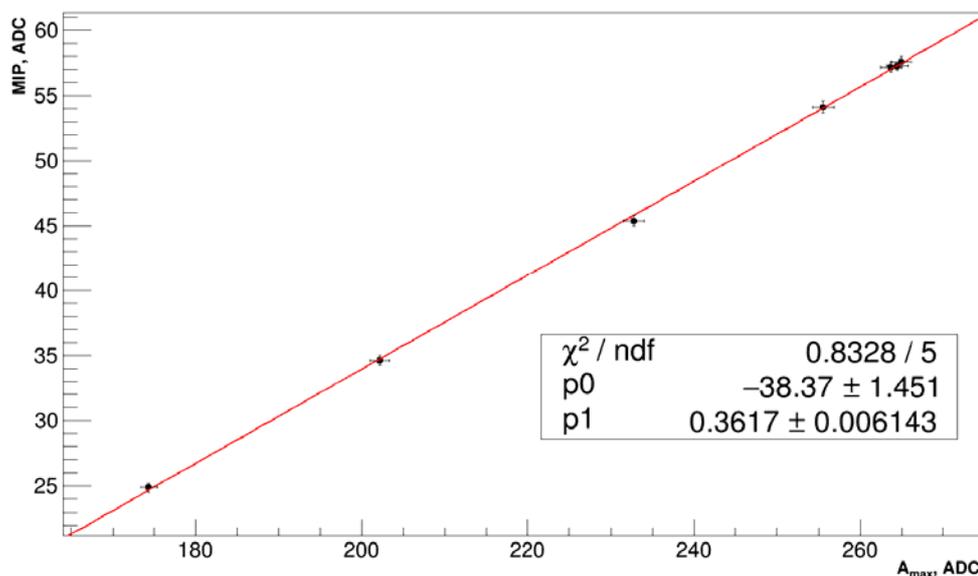


Рис. 6. Зависимость $MIP(A_{\max})$, полученная на стенде от источника ^{90}Sr .

- с. Вычисляется параметр оптимизации: $K = \text{MIP}(A_{\max}) / \langle \text{RMS} \rangle$ и его ошибка. Найденные значения и текущее напряжение (U_j) на PP_i сохраняются в банк данных; после чего программа переходит к пункту 1 (пока не будут пройдены все 7 точек диапазона изменения напряжения PP_i).
3. После прохождения диапазона изменения напряжения текущего PP_i , программа осуществляет аппроксимацию зависимости $K(U_j)$ полиномом. Степень полинома выбирается по наилучшему χ^2 из последовательного перебора от 1-й по 6-ю степень. Данный подход является оправданным, поскольку зависимость $K(U_j)$ для всех PP_i имеет гладкий вид (Рис. 7). Согласно аппроксимации, программа рассчитывает напряжение, при котором режим работы ASIC оптимален, и требует установить полученное напряжение на текущем PP_i .

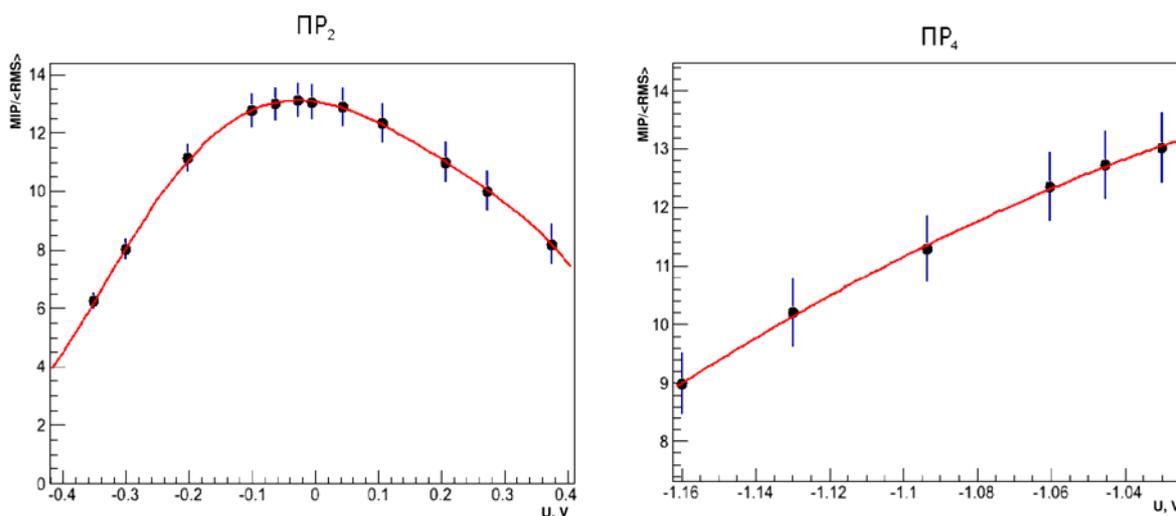


Рис. 7. Примеры вида зависимостей $K(U_j)$ для PP_2 и PP_4 .

4. Если номер текущего PP_i меньше 5 ($i < 5$), то осуществляется переход к следующему по последовательности PP_{i+1} и к пункту 1. Если текущий PP_5 (полный цикл закончен), то производится переход на PP_1 и к пункту 1.

В общем случае достаточно двух полных циклов по PP_i для настройки одной ASIC.

В процессе настройки микросхем ASIC были выявлены закономерности, позволившие перейти от многомерной задачи к одномерной – подстройке только одного PP_2 для каждого ASIC.

Результат настройки модулей на стенде проверялся с использованием радиоактивного источника ^{90}Sr . Измерялось отношение сигнала от минимально ионизирующей частицы к шуму для всех ASIC. Типичное распределение, получаемое при такой проверке, приведено на Рис. 8.

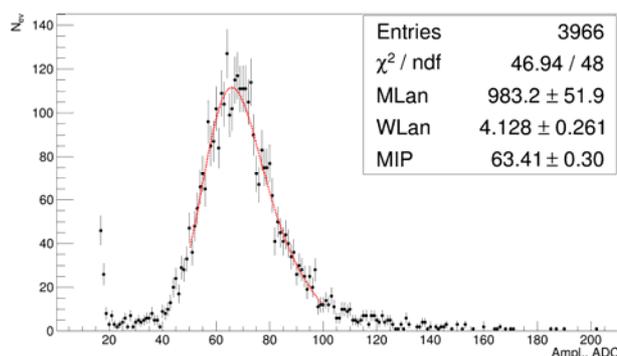


Рис. 8. Распределение амплитуд сигналов (в отсчётах АЦП) от радиоактивного источника ^{90}Sr .

Среднеквадратичное отклонение (в отсчётах АЦП) при этом равно $\langle \text{RMS} \rangle \approx 2.6$, а отношение сигнал/шум равно ~ 25 .

4. Процедура отбраковки детекторов

Микрополосковые детекторы изготовлены в НИИ Материаловедения (г. Зеленоград) [5] на полупроводниковых пластинах диаметром 100 мм, вместе с тестовыми структурами. Вид такой пластины для больших детекторов СВД приведён на Рис. 9.

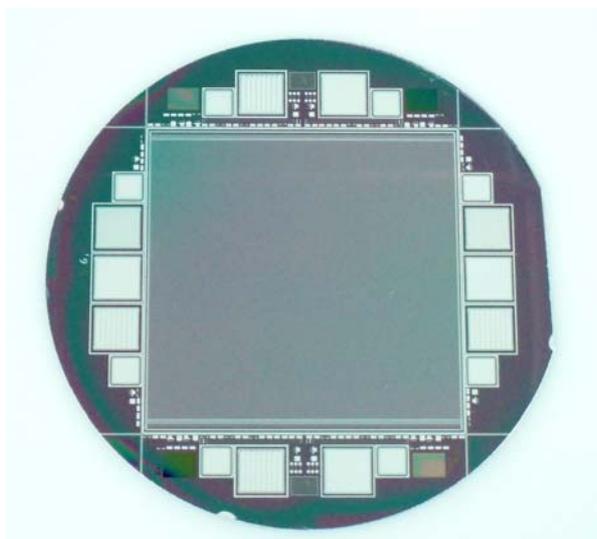


Рис. 9. Фотография п/п пластины с детектором площадью $60 \times 60 \text{ мм}^2$ и тестовыми структурами.

Для изготовления модулей детекторы контролировались как визуально, так и проводились их измерения электрофизических характеристик.

Пластины с детекторами проходили визуальный контроль с использованием микроскопов, оснащённых CCD камерами для обнаружения царапин по площади детектора, трещин и сколов по краям детекторов после процедуры дисковой вырезки их из пластины. Визуальным контролем выявлялись также дефекты металлизации элементов микрополоскового детектора.

Кроме того, выполнялись четыре вида электрических измерений, а именно:

- Определение напряжения полного обеднения детектора, которое проводится на образце сопровождения, расположенном на каждой полупроводниковой пластине. В случае если детектор не достигает полного обеднения, то он подлежит отбраковке как непригодный по исходному материалу.
- Проверка общего (темнового) тока утечки на полномасштабном детекторе. В случае если ток утечки имеет большую величину, то детектор имеет несколько неисправных каналов. Дальнейшее его использование возможно с определёнными ограничениями.
- Измерение вольтамперных характеристик (I-V) каждого канала позволяет найти каналы с большим током утечки.
- Проверка сопротивления разделительных конденсаторов. Каждый пробитый и/или с большим током утечки конденсатор равносителен неработающему каналу детектора. Использование пробитого конденсатора с большой вероятностью может привести к повреждению электроники считывания и искажению информации с детектора. Поэтому такие каналы в дальнейшем не подсоединяются к электронике обработки сигналов.

Полупроводниковые детекторы использовались для изготовления модулей если при визуальном контроле не были обнаружены поверхностные дефекты, общий темновой ток не превышает 10^{-6} А, напряжение полного обеднения составляет 60-70 В, количество поврежденных конденсаторов не превышает 0,5% от общего их числа.

Подробное описание процедур контроля качества полупроводниковых микрополосковых детекторов и использованного для этих целей оборудования можно найти в работе [6].

5. Система сбора данных с модулей вершинного детектора, процедура настройки системы

Система сбора данных с модулей вершинного детектора расположена в домике экспериментаторов установки СВД. Система позволяет обрабатывать 10240 сигналов поступающих с микрополоскового вершинного детектора. Состав аппаратуры регистрации и межмодульные соединения представлены на Рис. 10.

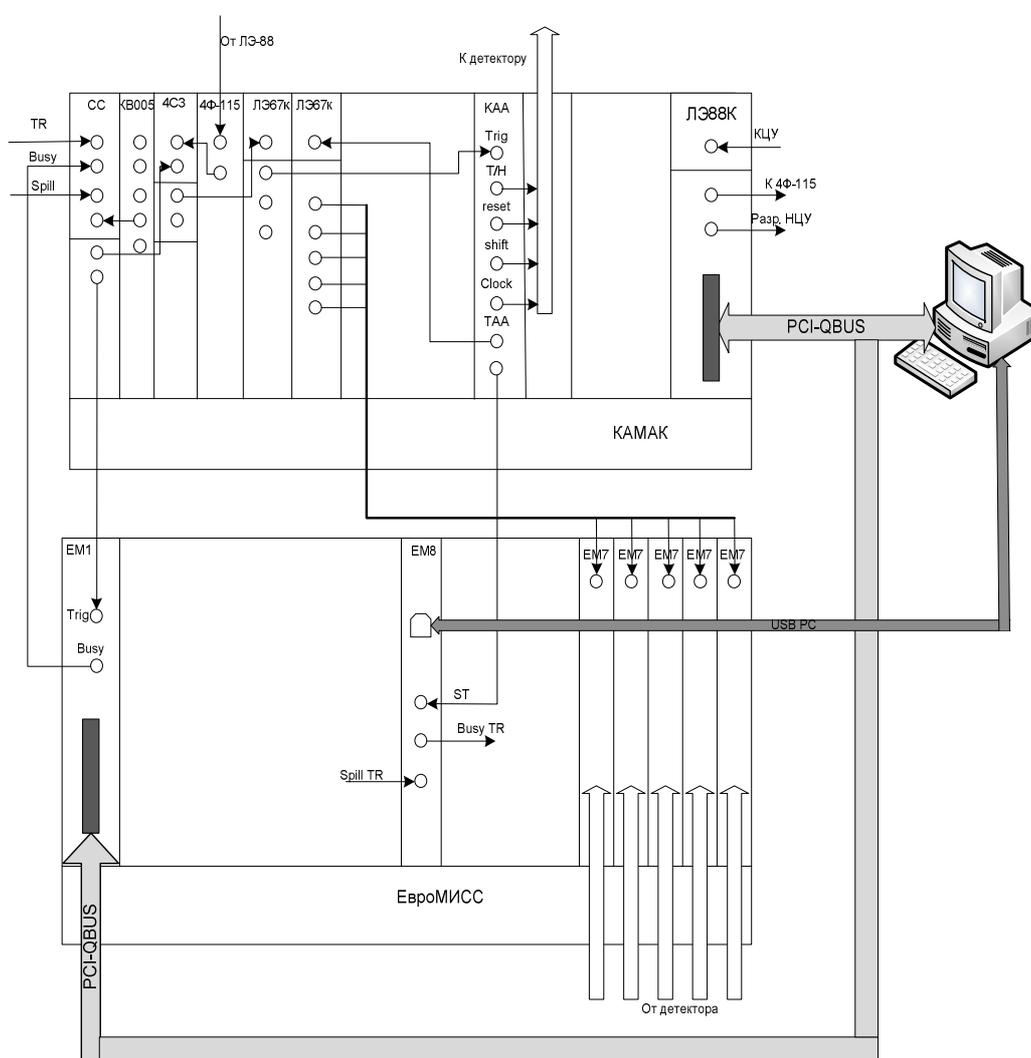


Рис. 10. Состав аппаратуры регистрации и межмодульные соединения.

Аппаратура регистрации содержит крейт КАМАК с модулями для синхронизации системной работы и крейт ЕвроМИСС. В состав крейта ЕвроМИСС входят следующие модули:

- 2048-канальные АЦП EM-7;
- крейт контроллер EM-1, выходящий на шину QBUS, связывающий его с ПК;
- автономный крейт контроллер EM-8, выходящий на шину USB, связывающий его с ПК.

Процедура настройки системы сводится к выбору временных соотношений управляющих сигналов для вершинного детектора и стробирующих сигналов (ТАА) для АЦП EM-7. Это производится путем программирования времени T5 (см. Рис. 4) в модуле КАА через автономный контроллер ЛЭ-88К [7].

6. Результаты работы модулей на пучке ускорителя У-70

Изготовленные, по описанной выше технологии, модули микрополосковых детекторов были испытаны в составе вершинного детектора установки СВД на пучке протонов с импульсом 50 ГэВ/с. Типичное распределение амплитуд больших детекторов на прохождение протонов приведено на Рис. 11.

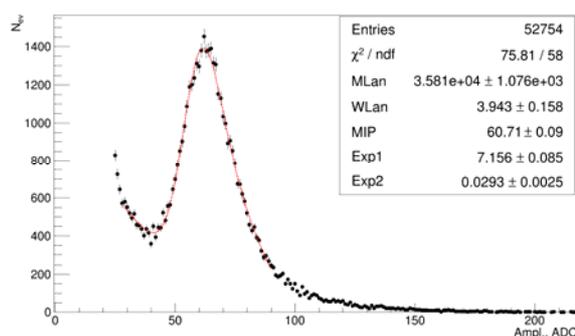


Рис. 11. Распределение амплитуд сигналов (в отсчётах АЦП) от протонов с импульсом 50 ГэВ/с для больших детекторов.

Отношение сигнал/шум для больших детекторов в составе установки СВД составило 20-25.

Профили пучка протонов от У-70, полученного с использованием кристаллического дефлектора, в модулях микрополосковых детекторов на установке СВД, приведены на Рис. 12.

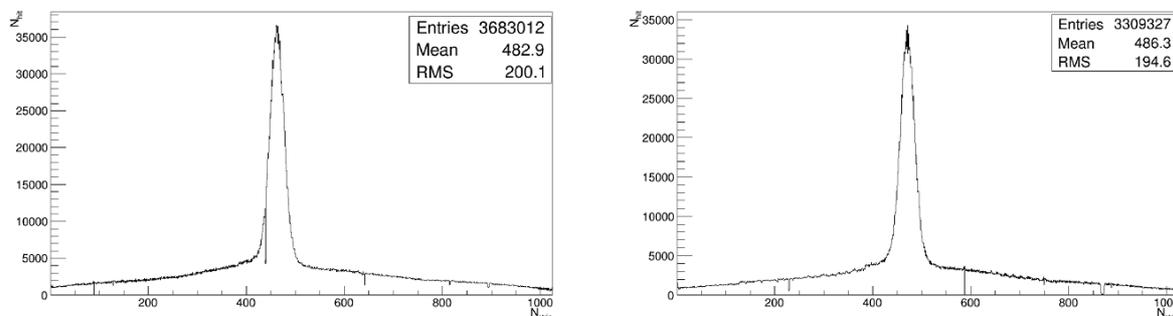


Рис. 12. Профили пучка протонов в двух плоскостях наклонного модуля вершинного детектора установки СВД.

Выводы

Разработанная в ГНЦ ИФВЭ технология изготовления модулей микрополосковых детекторов позволяет использовать их для создания прецизионных трековых систем в составе экспериментальных установок.

Список литературы

- [1] Е.Н. Ардашев, С.Г. Базиладзе, Г.А. Богданова и др. «Вершинный микростриповый детектор установки СВД для экспериментов на ускорителе ИФВЭ» // Приборы и Техника Эксперимента, 2007, № 4, с. 1.
- [2] В.В. Авдейчиков и др., «Спектрометр с вершинным детектором для экспериментов на ускорителе ИФВЭ» // Приборы и Техника Эксперимента, 2013, № 1, с. 14-37.
- [3] www.ideas.no
- [4] С.И. Букреева, Н.М. Емельянов, А.Н. Исаев и др. «Электронная система «ЕвроМисс» для физических установок ИФВЭ» // Приборы и Техника Эксперимента, 2014, № 6, с. 23-27.
- [5] www.niimv.ru

[6] А.П. Воробьёв, С.Н. Головня, С.А. Горохов, И.С. Лобанов, Е.В. Лобанова, С.Ю. Молодцова, Д.Е. Карманов, М.М. Меркин. «Система контроля качества изготовления полупроводниковых микрополосковых детекторов в ГНЦ ИФВЭ», Препринт ИФВЭ 2013-24 ЛДС. <http://web.ihep.ru/library/pubs/rep2013/ps/2013-24.pdf>

[7] В.С. Петров, В.И. Якимчук и др. «Аппаратура для подключения электронных систем МИСС, КАМАК, СУММА к персональному компьютеру», Препринт ИФВЭ 2011-21.

Рукопись поступила 6 декабря 2016 г.

Е.Н. Ардашев и др.

Кремниевый микрополосковый детектор установки СВД.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 08.12.2016. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,25. Уч.– изд.л. 1,82. Тираж 80. Заказ 16. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2016-13,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2016
