



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2001–20  
ОЭФ

Г.А. Богданова, М.В. Васильев, В.Ю. Волков, А.Е. Кирюнин,  
Л.Л. Курчанинов, М.С. Левицкий, А.А. Минаенко, А.М. Моисеев,  
А.В.Плескач, Е.А. Усенко, Ю.П. Цюпа

**СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КРЕМНИЕВЫХ  
СЧЕТЧИКОВ ВЕРШИННОГО ДЕТЕКТОРА  
УСТАНОВКИ СВД**

**Протвино 2001**

**Аннотация**

Богданова Г.А. и др. Стенд для измерений кремниевых счетчиков вершинного детектора установки СВД: Препринт ИФВЭ 2001-20. – Протвино, 2001. – 8 с., 5 рис., 1 табл., библиогр.: 8.

Описана установка для проведения стендовых испытаний и контроля качества микростриповых кремниевых детекторов. Основные характеристики измеряются при облучении счётчиков  $\beta$ -источником  $\text{Sr}^{90}$ . Приведены результаты измерений, полученные при подготовке четырёх детекторов к работе в методическом сеансе (апрель 2000 г.) установки СВД.

**Abstract**

Bogdanova G.A. et al. The stand for the measurements of vertex detector silicon counters of SVD set up: IHEP Preprint 2001-20. – Protvino, 2001. – p.8, fig. 5, tables 1, refs.: 8.

Test bench for the quality check of silicon microstrip detectors is described. The measurements are based on the irradiation of detectors by  $\beta$ -source  $\text{Sr}^{90}$ . Four detectors have been prepared for the beam run of the SVD setup (April 2000). The results of measurements are presented.

## Введение

Начиная с 1998 г. коллаборацией НИИЯФ МГУ и ИФВЭ производится разработка и создание нового прецизионного вершинного детектора (ПВД) установки «Спектрометр с Вершинным Детектором» (СВД) ИФВЭ [1]. Согласно проекту, ПВД состоит из трёх частей, в состав которых входят 16 микростриповых кремниевых детекторов (МКД). Их основные проектные характеристики приведены в табл. 1.

*Таблица 1: Основные характеристики кремниевых детекторов ПВД.*

Часть ПВД	Детектор №	Кол-во детекторов	Размер, мм	Шаг стрипов, мкм	Кол-во стрипов
Пучковая	МКД1-6	6	3.2	25	128
Триггерная	МКД7,8	2	16	25	640
	МКД9,10	2	32	50	640
	МКД11,12	2	52	50	1024
Трековая	МКД13,14	4	52	50	1024
Общее кол-во		16			9472

К настоящему времени полностью разработана, произведена и испытана в сеансах на пучке ускорителя механическая конструкция ПВД [2]. Разработана система триггирования, считывания данных и синхронизации вершинного детектора. В 1998-2000 гг. разработаны и в основном произведены модули предусилителей и амплитудного анализа [3]. Начиная с 1999 г. сотрудничеством НИИЯФ МГУ и АООТ «ЭЛМА» произведено несколько партий кремниевых детекторов. Используемая технология и система тестирования [4] гарантирует хорошее качество детекторов и высокий процент выхода годных изделий.

МКД как сборочная единица вершинного детектора представляет собой сборку [5], состоящую из латунного кольца диаметром ~20 см, в которое клеена стеклотекстолитовая плата. На этой плате в специальном углублении клеена керамическая подложка с кремниевым детектором. Склеивание элементов МКД производится под микроскопом для обеспечения необходимой точности ориентации стрипов.

Сигнальные площадки стрипов развариваются на соответствующие электроды керамической подложки алюминиевой проволокой. Таким же способом производится соединение контактных площадок на периферии подложки и электродов стеклотекстолитовой платы. Далее сигналы выводятся на внешнюю область платы, где производится распайка витых пар сигналь-земля. С противоположной стороны 64 пары длиной 20-30 см припаиваются к разъёму.

Большое количество электрических соединений в МКД приводит к необходимости проверки линий на замыкания и обрывы. На начальном этапе эксперимента такая проверка производилась не изготовителем сборок МКД (сотрудничество НИИТАП, г. Зеленоград и НИИЯФ МГУ), а осуществлялась после передачи сборок в ИФВЭ. Кроме того, при подготовке МКД к работе в составе установки необходимо проводить измерения и спецификацию их основных параметров, перечисленных в главе 1. При длительной эксплуатации установки необходим периодический контроль работоспособности элементов ПВД. Для этих целей был разработан и создан измерительный стенд, описанный в главе 2. Для проведения методических сеансов на пучке У70, в 2000 г. были произведены детекторы триггерной части ПВД. В главе 3 приведены результаты стендовых испытаний некоторых из этих детекторов.

## 1. Измерения характеристик МКД

Для оценки качества и работоспособности МКД необходимо определить следующие характеристики детектора:

- Количество «мертвых» стрипов. Причинами неработающего стрипа могут быть различные нарушения при производстве кремниевой пластины, а также брак при последующей разварке проволочек или распайке разъёмов. Отсутствие контакта или наличие замыкания может быть определено по измерению импеданса стандартным LRC-метром.
- Пробой разделительного оксидного слоя (pinhole). Пробой определяется по наличию постоянного тока в цепи стрипа. В условиях нормального освещения ток утечки достаточно велик даже при напряжении смещения детектора в несколько вольт, так что пробой может быть идентифицирован при измерении сопротивления между сигнальным выводом и обратным электродом детектора. Такие измерения производились стандартным лабораторным мультиметром. Альтернативным методом определения пробоя является измерение сопротивления между стрипом (также со стороны сигнального вывода) и общей шиной смещения.
- Сбор ионизационного заряда. Определяется при облучении детектора  $\beta$ -источником. Это наиболее трудоёмкая часть испытаний и для её проведения потребовалось создание измерительного стенда, описанного в следующей главе.

При определении ионизационного заряда производится три цикла измерений:

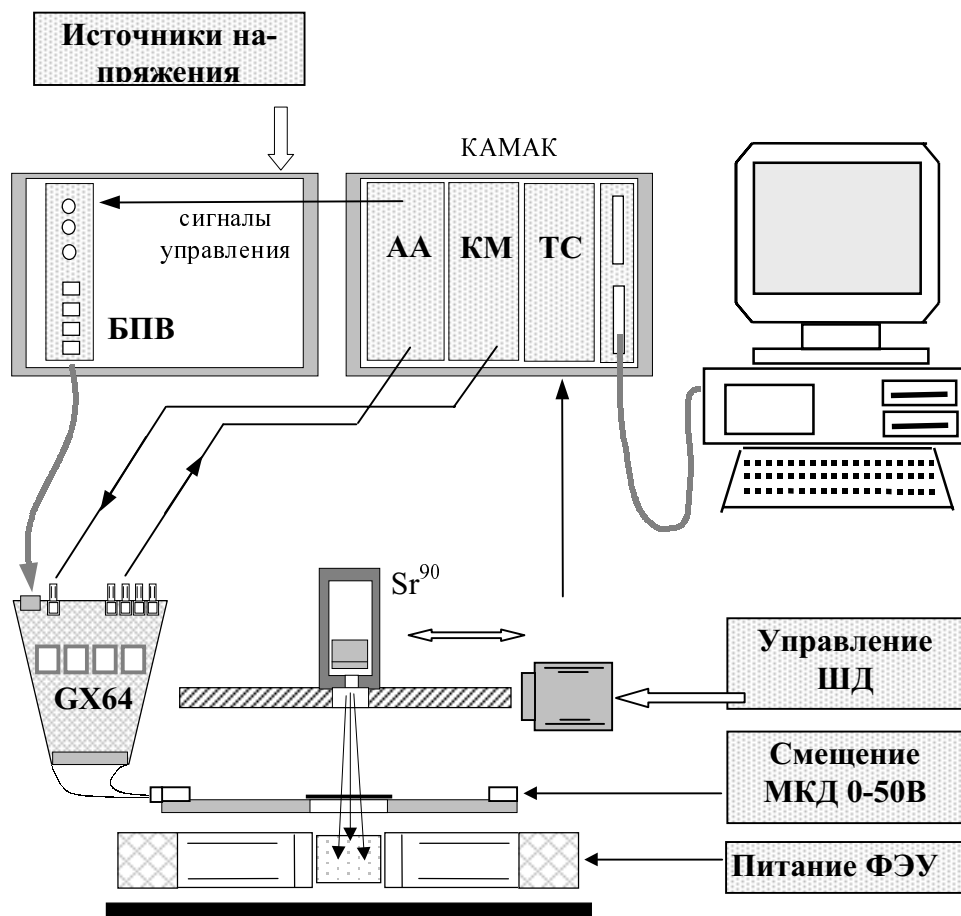
- (1) Калибровка электроники. На входы предусилителей GASSIPLEX подаются тестовые сигналы и определяются величины шума, пьедестала, и усиления каждого канала.
- (2) Определение рабочего напряжения МКД. Центральная часть детектора облучается  $\beta$ -источником, и определяются амплитуды сигналов при различных значениях напряжения смещения.
- (3) Определение эффективности стрипов. Производится сканирование рабочей области детектора  $\beta$ -источником при напряжении полного обеднения. Определяется отклик каждого стрипа в единицах ионизационного заряда.

Кроме перечисленных выше измерений, в задачи стенда на первом этапе эксперимента входила проверка правильности выбранной конструкции МКД, схемы подводки напряжения смещения детектора, организации заземлений, а также схемы транспортировки сигнала от детектора до предусилителя.

## 2. Измерительный стенд

Схема измерительного стенда приведена на рис. 1. В состав стенда входят:

- Конструкция, обеспечивающая крепление МКД и его экранировку (электромагнитную и оптическую), крепление триггерного сцинтиляционного счетчика, крепление и прецизионное перемещение  $\beta$ -источника шаговым двигателем.
- Вспомогательные системы: источники напряжений питания предусилителей, МКД и ФЭУ, управление шаговым двигателем.
- Электроника считывания и триггирования: крейт КАМАК с контроллером, модулями амплитудного анализа (блок *АА* на рис.1), модулями калибровки (*КМ*) и стандартными модулями (формирователи, схема совпадений и т.п.) для сцинтиляционного счетчика (*ТС*).
- ПЭВМ с системой сбора данных.



**Рис. 1.** Схема измерительного стенда. ШД – шаговый двигатель, GX64 – модуль предусилителей, БПВ – блок преобразования уровней, АА – модули амплитудных измерений, КМ – модуль калибровки, ТС – система триггирования.

До настоящего времени стенд использовался для тестирования только МКД пучковой и триггерной частей ПВД, т.к. трековая часть находится в стадии разработки. Поэтому стенд оснащён электроникой считывания триггерной части ПВД. Модули предусилителей и амплитудного анализа, а также блоки преобразователей управляющих сигналов разработаны в ОЭА ИФВЭ. Архитектура системы сбора данных полностью идентична (за исключением триггирования) системе сбора разработанной для СВД. Используется то же программное обеспечение, адаптированное к уменьшенному количеству каналов.

При электронных измерениях амплитуды тестовый сигнал вырабатывается в калибровочном модуле и подается последовательно на каждый из каналов предусилителя. Амплитуда сигнала варьируется в пределах рабочего диапазона (10-15 точек) и по измеренным значениям восстанавливаются величины пьедестала и усиления. При измерении пьедестала определяется также величина шума. Источником триггера в данном случае является генератор калибровочных импульсов. Запись сигналов и их считывание производится одновременно только для одного 64-канального модуля предусилителей.

При измерении ионизационных сигналов с кремниевых детекторов источником триггера является совпадение импульсов с двух ФЭУ сцинтилляционного счетчика. По триггерному сигналу происходит запись во всех предусилителях и последующая оцифровка в модулях амплитудного анализа, работающих в режиме набора физических данных. По завершении считывания данные передаются в компьютер. Один цикл измерений заключается в наборе 10 тыс. триггеров и занимает несколько минут.

### 3. Результаты измерений

Ниже приведены результаты измерений МКД8, МКД10, МКД11 и МКД12 (см. табл.1).

Коэффициент преобразования электронного тракта определяется по калибровочному сигналу и составляет  $\sim 1$  отсчёт АЦП/1000 электронов. Величина шума определялась в измерительном цикле (1). На рис. 2 приведены величины шумов для половины стрипов детектора МКД12. Большинство каналов имеет величину шума 1,5–2 отсчёта АЦП, что примерно соответствует эквивалентному шумовому заряду 1500–2000 электронов. Эта величина в  $\sim 1,5$  раза превышает спецификацию микросхемы GASSIPLEX [6]. Последующие исследования показали, что причиной избыточных шумов являются наводки от системы сбора данных. Так как результирующая величина шума позволяет надёжно выделить амплитудный спектр частиц, то никаких мер по уменьшению наводок не принималось.

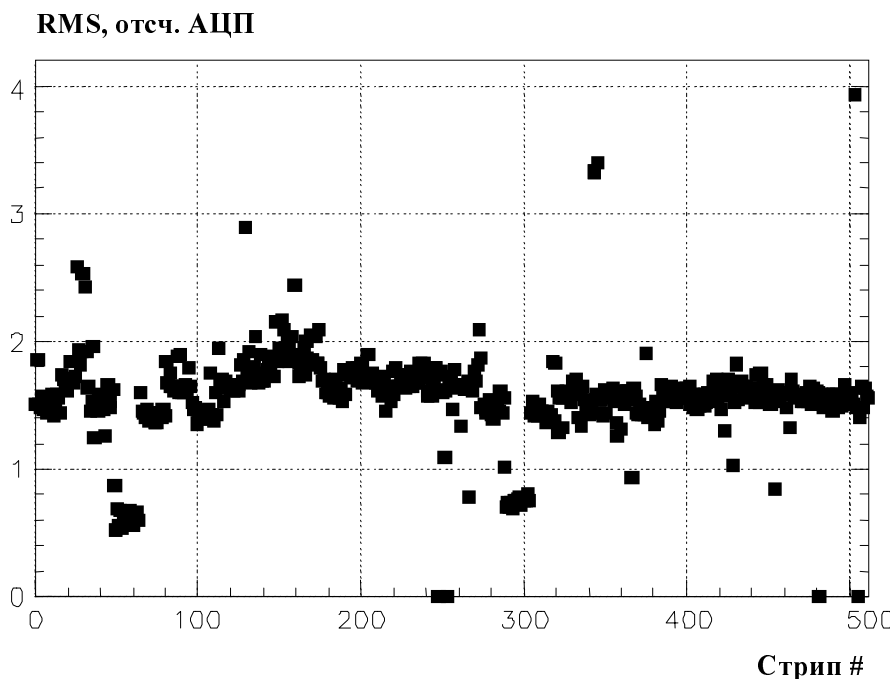
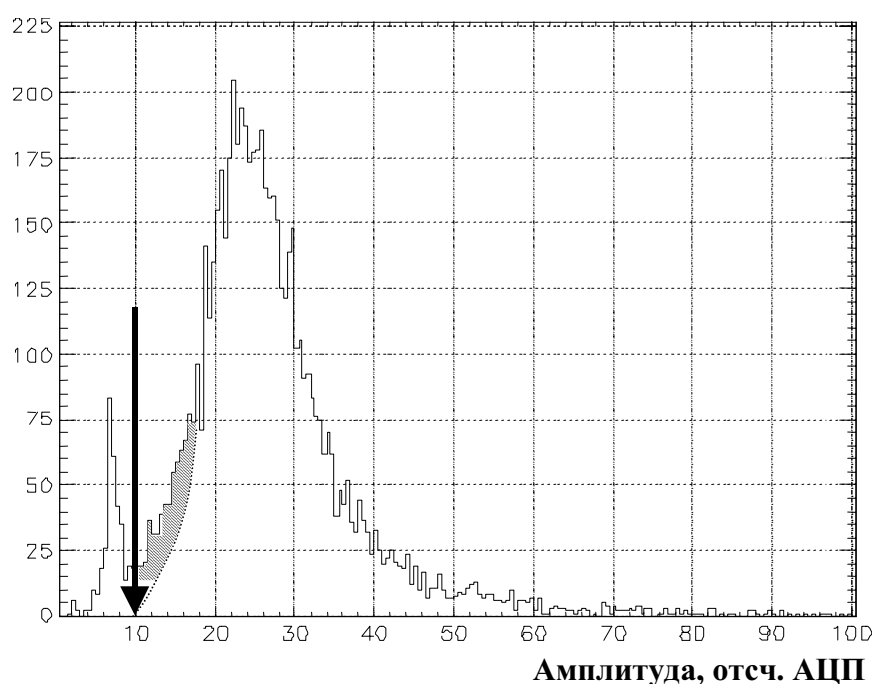


Рис. 2. Среднеквадратичная величина шума для половины каналов МКД12.

Величина собранного ионизационного заряда определялась по амплитудному спектру (сигнал за вычетом пьедестала) индивидуально для каждого стрипа. Область засветки радиоактивным источником охватывает большое количество стрипов из-за углового распределения  $\beta$ -частиц и их многократного рассеяния. При отверстии коллиматора 5 мм диаметр пятна достигает 20 мм, поэтому доля полезных событий в одном стрипе мала и составляет  $\sim 0.2-0.3\%$  при шаге стрипов 50 мкм и вдвое меньше при шаге 25 мкм. Для выделения амплитудного спектра частиц в гистограмму заносились только события с амплитудой, превышающей установленный порог, который был выбран равным 4 RMS шума. На рис. 3 приведён амплитудный спектр нескольких стрипов МКД12 в центральной части области облучения. Пик в левой части гистограммы демонстрирует оставшееся после обрезания шумовое распределение пьедестала.

Спектр на рис. 3 позволяет определить величину ионизационного заряда либо по наиболее вероятным потерям (положение правого пика), либо по средним потерям. Для спецификации МКД был выбран второй вариант, т.к. вычисление среднего не требует фитирования данных какой-либо функцией. Для уменьшения вклада шумов в определение величины ионизационного заряда усреднение по гистограмме производилось, начиная с области минимума распределения (стрелка на рис. 3).



**Рис. 3.** Амплитудный спектр нескольких стрипов из центра области облучения МКД12 при напряжении смещения 40 В.

Зависимость собранного заряда от напряжения смещения детектора определяется объёмным сопротивлением кремния и толщиной пластины. Для идеального  $p-n$  перехода толщина обеднённого слоя растёт как корень квадратный от напряжения смещения. Для кремния  $n$ -типа эта зависимость описывается следующей формулой [7]:

$$W(V) = 15.8 \cdot \sqrt{\rho \cdot V},$$

где толщина  $W$  измеряется в мкм, напряжение  $V$  – в В, а удельное сопротивление кремния  $\rho$  - в  $\text{k}\Omega\cdot\text{см}$ . Напряжение полного обеднения при толщине пластины 300 мкм составляет:

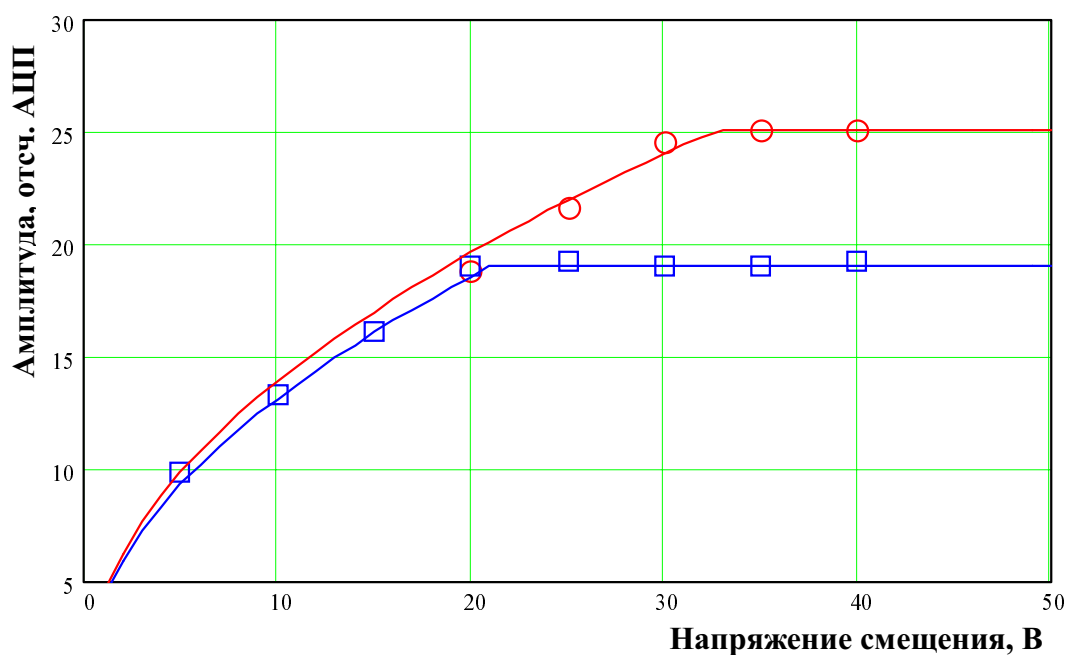
$$V_o = \frac{360}{\rho}. \quad (1)$$

При увеличении напряжения выделенный ионизационный заряд растёт пропорционально  $W$  и при полном обеднении рост прекращается. Используя известные характеристики кремния, легко получить зависимость среднего заряда от напряжения смещения:

$$Q(V) \approx \begin{cases} 1690 \cdot \sqrt{\rho \cdot V}, & V < V_o \\ 32000 & V \geq V_o, \end{cases} \quad (2)$$

где заряд  $Q$  измеряется в электронах. В микростриповых детекторах ионизационный заряд меньше чем величина (2), т.к. происходит деление заряда между соседними стрипами. Этот же эффект приводит к уширению амплитудного спектра в области малых сигналов. На рис.3 эта область выделена штриховкой.

На рис. 4 показан измеренный заряд (точки) для МКД12 и МКД8. В случае МКД12 использовались те же стрипы, для которых получен спектр на рис.3. Теоретическая зависимость (линия) для этого детектора построена для удельного сопротивления кремния  $\rho = 11 \text{ k}\Omega\cdot\text{см}$ . Для сравнения приведена также зависимость заряда от напряжения для МКД 8, который имеет шаг стрипов 25 мкм. Меньшее значение собранного заряда объясняется его делением между большим количеством стрипов. Теоретическая зависимость (2) для этого детектора построена для удельного сопротивления  $\rho = 17 \text{ k}\Omega\cdot\text{см}$ .



**Рис. 4.** Зависимость ионизационного заряда от напряжения смещения, измеренная для МКД8 (□) и МКД12 (○), и теоретическая зависимость (линии).



По зависимости заряда от напряжения смещения, измеренной для всех стрипов, определялась величина рабочего напряжения МКД. Для всех детекторов она варьировалась от 25 до 35 В, что соответствует ожидаемому значению напряжения полного обеднения для пластин с удельным сопротивлением 10 – 17 кΩ·см.

При измерении ионизационного заряда производился также контроль распределения по числу сработавших стрипов. Форма этого распределения определяется геометрическими характеристиками МКД, диффузией электронов и дырок при их дрейфе в области обеднения, угловым распределением ионизирующих частиц и их многократным рассеянием в кремнии. Другой причиной появления сигнала на соседних стрипах является образование δ-электронов, пробег которых может составлять несколько десятков мкм [8]. Ожидаемая величина среднего количества сработавших стрипов в условиях стенда составляет ~1.5 при шаге стрипов 50 мкм и ~2.5 в случае 25 мкм. На рис. 5 приведены типичные распределения для двух детекторов с разным шагом стрипов. Как и ожидается, распределение шире для МКД с шагом 25 мкм.

Увеличение числа сработавших стрипов может происходить из-за межстриповых замыканий как в самом МКД, так и на печатной плате. Одиночные замыкания не могут быть достоверно определены по распределениям рис.5, они идентифицируются прямыми измерениями межстрипового сопротивления и по возможности устраняются до проведения цикла ионизационных измерений.

Другой причиной увеличения числа срабатываний является возбуждение предусилителей. При достаточно большом входном сигнале возможно появление кратковременных осцилляций на соседних предусилителях или на всех 16 каналах микросхемы. Причиной этого эффекта может быть недостаточный запас стабильности схемы предусилителя либо (что более вероятно) ненадёжная распайка земляных контуров платы детектора или усилителя. Возбуждение усилителей показано на правой гистограмме рис.5, где видны события с большим числом одновременно сработавших стрипов.

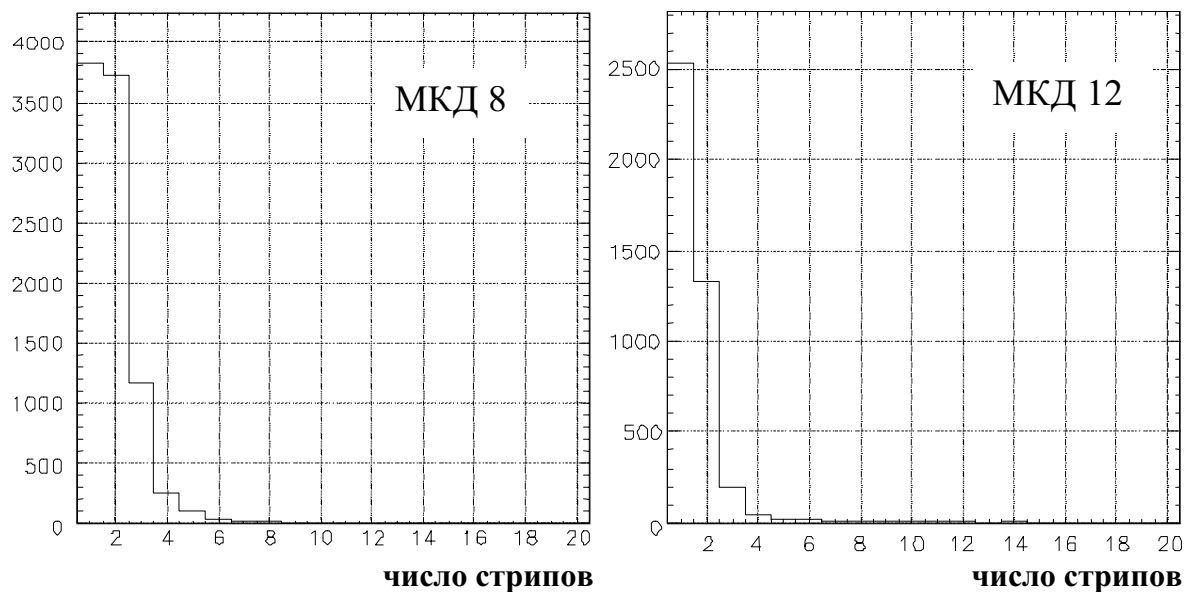


Рис. 5. Распределение количества сработавших стрипов в МКД8 (шаг 25 мкм) и в МКД12 (50 мкм).

## Заключение

Разработана методика контроля качества микростриповых кремниевых детекторов для их подготовки к работе в физическом сеансе установки СВД. Создан измерительный стенд, позволяющий определить рабочее напряжение детектора и эффективность сбора ионизионного заряда для каждого стрипа. Приведены результаты испытаний четырёх детекторов с шагом стрипов 25 и 50 мкм, измеренные характеристики согласуются со спецификацией детекторов. Показана работоспособность выбранных схем разводки высоковольтных и сигнальных линий детектора. Получен первый положительный опыт работы с полным трактом электроники усиления и преобразования сигналов триггерной и пучковой части вершинного детектора.

## Список литературы

- [1] Ardashev E., et al. Proposal an experiment for studying mechanisms of charm particle production and decays in pp-interactions at 70 GeV/c: Preprint IHEP 96-98 (1996).
- [2] Боголюбовский М.Ю., Л.Л. Курчанинов Л.Л., Левицкий М.С. и др. Механическая конструкция прецизионного вершинного детектора для исследований на ускорителе У70: Препринт ИФВЭ 2000-23, Протвино, 2000.
- [3] Курчанинов Л. Л. Электроника считывания вершинного детектора. Предложение. Внутр. отчёт СВД Эл № 98-05 (1998).
- [4] P. Ermolov, N. Egorov, D. Karmanov et al. Design and performance of the forward H-disks of D0 silicon trackers: Препринт НИИЯФ МГУ 97-22/473 (1997).
- [5] Моисеев А. М. Проект прецизионного вершинного детектора установки СВД. Внутр. отчёт СВД ВД № 99-01 (1999).
- [6] J.C. Santiard, W. Beusch, S. Buytaert et.al GASPLETEX a Low-noise Analog Signal Processor for Readout of Gaseous Detectors: Preprint CERN-ECP/94-17 (1994).
- [7] Review of Particle Physics, European Physical Journal, v.15, N1-4 (2000), p. 180.
- [8] J.Straver, O.Toker, P.Weilhammer et al. One micron spatial resolution with silicon strip detectors. Preprint CERN-PPE/94-26 (1994).

*Рукопись поступила 18 апреля 2001 г.*

Г.А. Богданова и др.

Стенд для измерений кремниевых счетчиков вершинного детектора установки СВД.

Оригинал макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Технический редактор Н.В. Орлова.

---

Подписано к печати 03.05.2001.

Формат 60x84/8.

Офсетная печать.

Печ.л. 0, 75. Уч.-изд.л. 0,6.

Тираж 130.

Заказ 77.

Индекс 3649.

ЛР №020498 от 17.04.97

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142284, Протвино Московской обл.

