

# ПРЕЦИЗИОННЫЕ МИКРОВЕРШИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

*Н.М.Никитюк*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В обзоре рассмотрено современное состояние и перспективы развития высокопрецизионных микровершинных детекторов. Описаны характеристики, принципы действия и методы считывания сигналов от микровершинных детекторов, создаваемых на основе полупроводниковой технологии и методики световых волоконно-оптических световодов. Приводятся таблицы с параметрами наиболее известных микровершинных детекторов, используемых в экспериментах с фиксированной мишенью и на коллайдерах. Описаны специализированные процессоры, применяемые для быстрого вычисления прицельного параметра и отбора событий, содержащих вершины распада.

The present-day status and prospect for the development of microvertex detectors are considered. The characteristics, operation methods and data reading way from silicon and scintillation fibers are described. The tables with parameters of the most well-known microvertices detectors are given. Special purpose processors used for impact parameter calculation and event selection having vertex decays are described.

## ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые детекторы известны более 40 лет. В 1951 г. в одной из пионерских работ [1] показано, что  $\alpha$ -частицы, пролетающие сквозь обратный смещенный  $pn$ -переход в германии, порождают заметный сигнал. На этом принципе фактически функционируют все современные полупроводниковые детекторы. Однако, как отмечается в [2], вплоть до конца 70-х гг. полупроводниковые детекторы использовались для измерения энергии проходящих частиц. Вследствие такого положительного качества, как возможность работы при комнатной температуре, в экспериментах по физике высоких энергий, за небольшим исключением, было отдано предпочтение кремниевым детекторам, создаваемым методами современной технологии на основе высокорезистивного кремния (порядка несколько  $\text{k}\Omega/\text{cm}$ ). Дальнейшие исследования, направленные на повышение разрешающей способности трековых детекторов, привели к разработке микрополосковых полупровод-

никовых детекторов. Ниже будет дан краткий обзор работ, посвященных полупроводниковым детекторам и их применению.

В [3] приведен обзор литературы по полупроводниковым детекторам, начиная с 1951 и вплоть до конца 70-х гг. В соответствии с классификацией [4] полупроводниковые детекторы разделяются на две группы:

1. Классические детекторы: фотодиоды, детекторы рентгеновского излучения, полупроводниковые счетчики, микрополосковые детекторы, а также некоторые типы двумерных детекторов.

2. Детекторы с памятью: ПЗС-матрицы, кремниевые дрейфовые камеры и двухкоординатные детекторы с запоминающими элементами.

В данном обзоре мы будем рассматривать вопросы применения в качестве вершинных детекторов полупроводниковых счетчиков, микрополосковых детекторов и ПЗС-матриц, получивших широкое применение в экспериментах. По сравнению с газовыми детекторами кремниевые полупроводниковые микрополосковые детекторы имеют на порядок лучшую

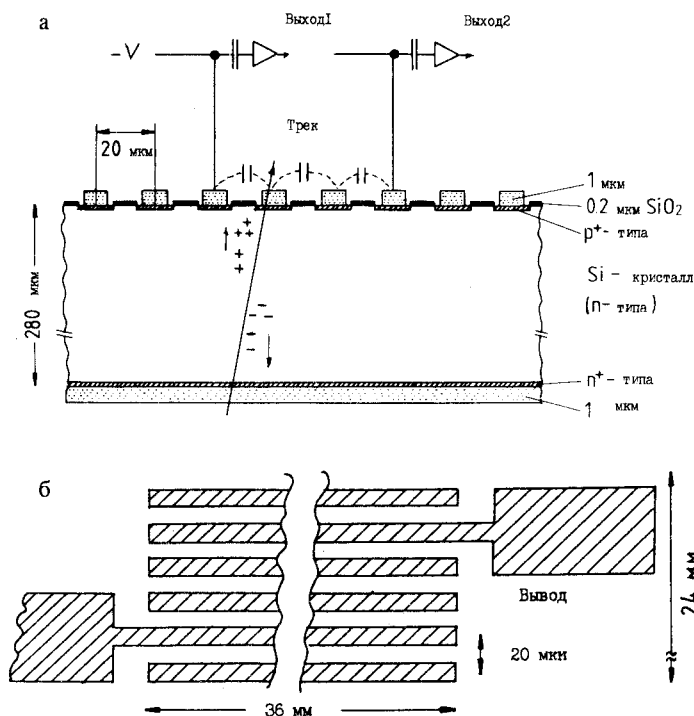


Рис.1. а) Структура микрополоскового полупроводникового детектора; б) геометрия микрополосок

точность, отличаются высоким быстродействием, а их изготовление базируется на хорошо отработанной планарной технологии (точность лучше 1 мкм), что позволяет на одном кристалле изготовить сотни и более каналов регистрации. В обзоре [5] детально рассмотрены вопросы физики, технологии и описаны различные типы кремниевых полупроводниковых детекторов. Типичная структура и геометрия электродов одного из первых микрополосковых детекторов приведены на рис.1 [6]. Он изготавливается на полностью обедненном кремниевом кристалле с диодной структурой и высоким удельным сопротивлением (больше 10 кОм·см). Одна сторона поверхности кристалла разделяется проводящими полосками (стрипами) с шагом 20–50 мкм, которые используются для сбора зарядов. Типичное время сбора электронов равно 4 нс. Чтение сигналов осуществляется как от каждой микрополоски, так и от определенным образом соединенных групп стрипов. С целью повышения точности регистрации координат событий и уменьшения количества используемых усилителей широко используется метод деления заряда. Применение этого метода позволяет использовать метод интерполяции при вычислении значения координаты заряженной частицы. В более совершенных микрополосковых детекторах имеется возможность считывать сигналы от противоположных плоскостей детектора [7]. Следует отметить, что кремниевые детекторы не обладают свойством внутреннего усиления сигналов, и поэтому к регистрирующей электронике предъявляются жесткие требования, прежде всего по такому параметру, как помехоустойчивость.

**Полупроводниковые счетчики.** Счетчики используются в качестве активных мишеней. В эксперименте NA14 (ЦЕРН) [8] первая версия мишени состоит из 43 тонких ( $300 \times 100 \times 100$  мкм) пластин с расстоянием 200 мкм между ними. Малые размеры мишени позволяют получить высокую точность регистрации событий. Реконструкция треков осуществляется путем анализа потерь на ионизацию в различных счетчиках мишени. Измененное время жизни очарованного мезона составило  $9,5 \cdot 10^{-13}$  с. С целью повышения чувствительности к частицам с меньшим временем жизни была создана комбинированная мишень, состоящая из миниатюрной германиевой мишени и телескопа, изготовленного из тонких кремниевых счетчиков [9]. С целью уменьшения входной емкости кремниевые счетчики разделены на секторы. Применение мишени из германия позволило увеличить чувствительность в области первичной вершины распада в 2,5 раза. Особенно эффективно активные мишени используются в сочетании с микрополосковыми детекторами. Основной недостаток активных кремниевых детекторов — трудности, возникающие при идентификации множественных процессов. Наряду с полупроводниковыми детекторами и ПЗС-матрицами для построения прецизионных микровершинных детекторов находят применение

ние также микрополосковые газовые детекторы и детекторы, создаваемые на основе волоконно-оптических сцинтилляционных световодов (ВОС).

Цель данного обзора состоит в том, чтобы в краткой форме изложить современное состояние методики и перспективы развития и применения прецизионных вершинных детекторов. Первые три раздела посвящены полупроводниковым микровершинным детекторам. В первом разделе рассмотрены параметры и методы построения прецизионных вершинных детекторов для экспериментов с фиксированной мишенью. Второй раздел обзора содержит описание специализированных процессоров, применяемых для восстановления вершин распада. В третьем разделе рассмотрены вопросы построения и параметры прецизионных вершинных детекторов, предназначенных для проведения экспериментов на коллайдерах. В четвертом разделе обсуждается использование микрополосковых газовых детекторов для построения микровершинных детекторов и, в частности, для будущего детектора CMS. Свойства кремниевых двумерных регистраторов кратко описаны в пятом разделе. В шестом разделе рассматриваются вопросы использования световых волоконно-оптических световодов для построения микровершинных детекторов.

## 1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ МИКРОВЕРШИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ФИКСИРОВАННОЙ МИШЕНЬЮ

Как отмечается в [10], при изучении физики прелестных частиц эксперименты с фиксированной мишенью имеют некоторые преимущества по сравнению с экспериментами на коллайдерах: 1) прелестные частицы разлетаются вперед от мишени, где расположен детектор; 2) более просто восстанавливается первичная вершина распада. Впервые микрополосковые детекторы начали использоваться начиная с 80-х годов в экспериментах с фиксированной мишенью. Ниже будут рассмотрены характеристики наиболее известных прецизионных детекторов, которые использовались в экспериментах с фиксированной мишенью.

**Микровершинный детектор для спектрометра АССМОР.** В [10] описан микровершинный детектор, с помощью которого получено разрешение 5 мкм и разрешение двух треков 60 мкм. Детектор состоит из пучкового телескопа и активной мишени. Пучковый телескоп имеет шесть микрополосковых плоскостей. Полоски в первых четырех плоскостях с шагом 50 мкм расположены горизонтально и объединены в пары. Микрополоски с шагом 20 мкм в других плоскостях наклонены к горизонтали под углами  $\pm 14^\circ$ . Телескоп используется для определения положения пучка  $\pi^-$  с энергией 200 ГэВ. Активная мишень состоит из 10 детекторов толщиной 280 мкм, расположен-

ных на расстоянии 500 мкм друг от друга. За мишенью имеется несколько детекторов с шагом 400 мкм, которые используются для выработки триггер-импульса. Вершинный телескоп (активная мишень) состоит из шести детекторов, имеющих толщину 280 мкм и активную поверхность  $24 \times 30$  мм. Сигналы, регистрируемые от вершинного телескопа, считываются экономичным методом деления заряда и используются для измерения прицельного параметра с рекордным разрешением. С помощью такого детектора зарегистрировано  $4 \cdot 10^6$  событий с указанием на наличие очарованных частиц.

Микрополосковый вершинный детектор для эксперимента E687. Детектор был создан для измерения времени жизни тяжелых прелестных частиц в эксперименте по фоторождению на ускорителе в Лаборатории им.Ферми (Батавия, США) [11]. Он позволяет реконструировать топологии таких событий и идентифицировать вершины распада. На рис.2 приведена схема микровершинного детектора, который состоит из германиевой мишени, содержащей 40 микрополосок и 12 микрополосковых кремниевых плоскостей с возможностью чтения сигналов от каждой микрополоски. Подложка микрополоскового детектора имеет толщину 300 мкм и площадь  $5 \times 5$  см. Параметры отдельных групп микрополосковых детекторов приведены в табл.1. В каждой группе первые три детектора дают X-, Y- и U-координаты. При этом плоскости X, Y и U повернуты относительно горизонтальной плоскости на  $-45^\circ$ ,  $-135^\circ$  и  $-90^\circ$  соответственно. Наряду с событиями, содержащими прелестные частицы, с помощью такого телескопа зарегистрировано свыше миллиона событий с очарованными частицами.

Точность установки детекторных плоскостей 3 мкм. Особый интерес представляет организация триггерной системы (рис.3). С целью упрощения

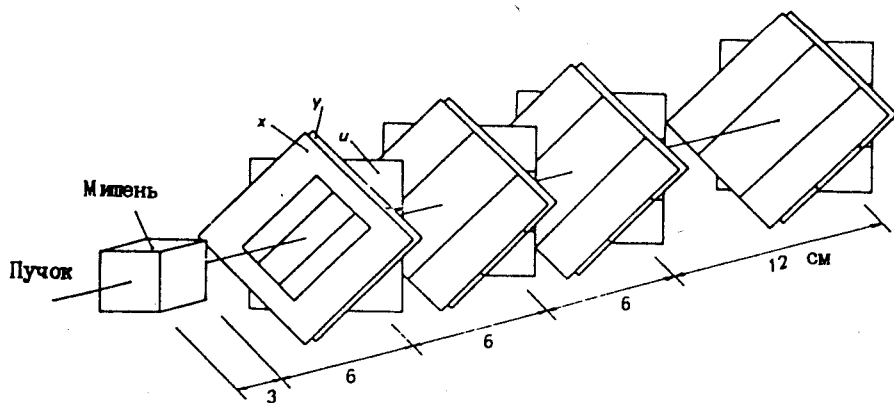


Рис.2. Схематическое изображение телескопа E687

Таблица 1. Параметры микрополоскового детектора E687

Номер группы	1	2,3 и 4
Общая площадь, см <sup>2</sup>	2,5 × 3,5	5 × 5
Общее число микрополосок (1 + 2 + 3 + 4)		8400
Центральная область:		
площадь, см <sup>2</sup>	1 × 3,5	2 × 5
шаг, мкм	25	50
Внешняя область:		
площадь, см <sup>2</sup>	0,75 × 3,5	1,5 × 5
шаг, мкм	50	100

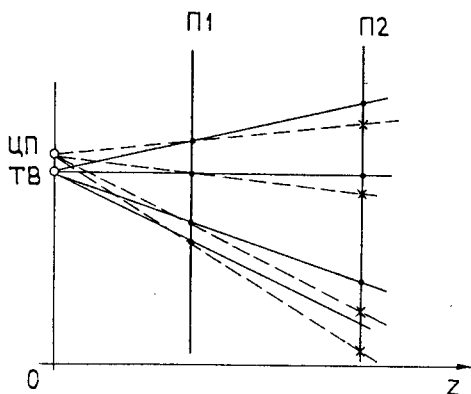


Рис.3. Алгоритм работы простого триггера: П1, П2 — детекторные плоскости. ЦП — центр проекции, ТВ — вершина распада

принят простой алгоритм, позволяющий всего лишь обнаруживать наличие в зарегистрированном событии хотя бы одной вершины распада. После запоминания сигналов на триггерных регистрах данные от передней плоскости записываются (накладываются) на регистр, относящийся ко второй плоскости. Затем с помощью мажоритарных схем совпадений определяется наличие вершины распада.

**Микрополосковый детектор для эксперимента Beatrice (WA92).** Детектор разработан для проведения экспериментов с прелестными частицами в ЦЕРН [10]. Он позволяет точно восстанавливать события с *B*-распадами. Детектор состоит из 16 микрополосковых плоскостей с шагом 10 мкм и имеет общую толщину 3,2 см вдоль оси. Первые 13 *Z*-плоскостей, расположены ближе к мишени. Из них шесть детекторов имеют толщину 150 мкм, и остальные плоскости имеют толщину по 300 мкм. Четырнадц-

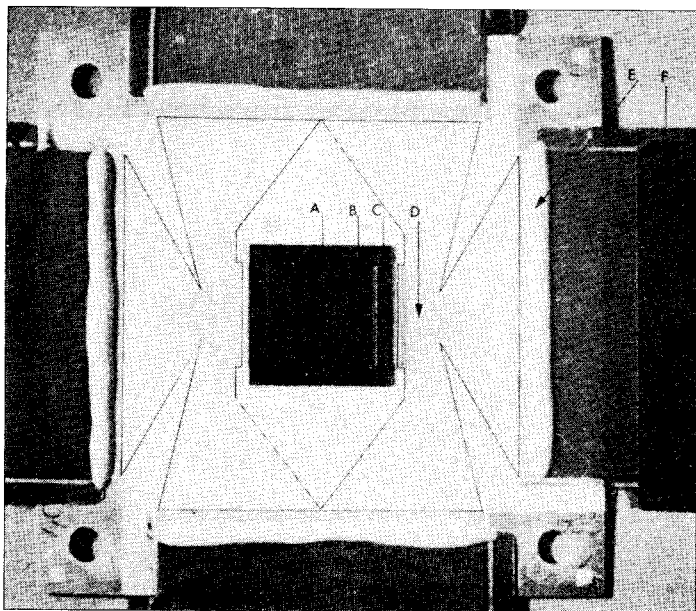


Рис.4. Общий вид микровершинного детектора: А — активная область, В — печатные проводники; С — проводники, соединяющие микрополоски и керамическую подложку; D — проводники, расположенные на керамике; E — связи между керамической подложкой и гибким кабелем; F — связь между керамической подложкой и электронной системой считывания

чатая  $Y$ -плоскость повернута на  $90^\circ$  по отношению к предыдущим плоскостям. Плоскости 15 и 16 ( $U$  и  $V$ ) повернуты на  $10,14^\circ$ . С помощью такого телескопа достигнуто рекордное пространственное разрешение 3 мкм. На рис.4 приведен общий вид детектора, смонтированного на керамической подложке. Для данного эксперимента разработан эффективный процессор, который описан в следующем разделе.

## 2. ТРИГГЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЕРШИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

В работе [12] приведен оригинальный алгоритм отбора событий с очарованными частицами, сочетающий в себе как аппаратные, так и программные средства фильтрации сложных событий. Суть алгоритма заключается в следующем. Микрополосковые детекторы располагаются в пространстве таким образом, чтобы отношение ширины стрипа к расстоянию от мишени

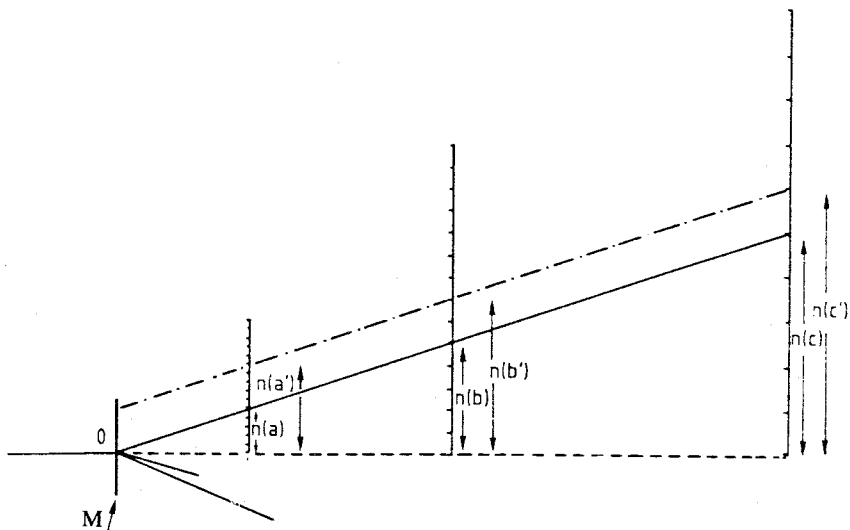


Рис.5. Телескоп, используемый для выработки триггера в эксперименте WA82:  
 M — мишень;  $n(a)$ ,  $n(b)$ ,  $n(c)$  — детекторные плоскости

между соседними микрополосками было постоянной величиной. Тогда для всех треков, исходящих из точки 0, где находится вершина первичного взаимодействия, выполняется условие

$$n(a) = n(b) = n(c),$$

где  $n$  — номер сработавшей микрополоски (рис.5). Если же трек не «смотрит» в точку 0, то в пределах точности имеет место соотношение

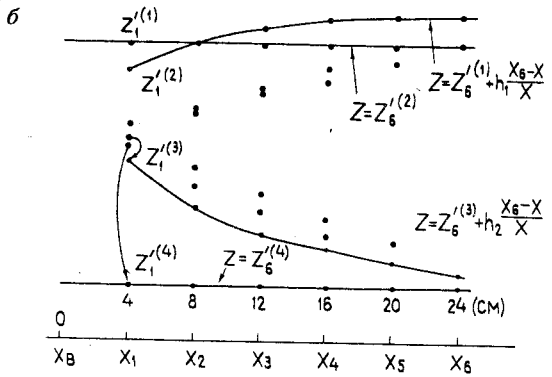
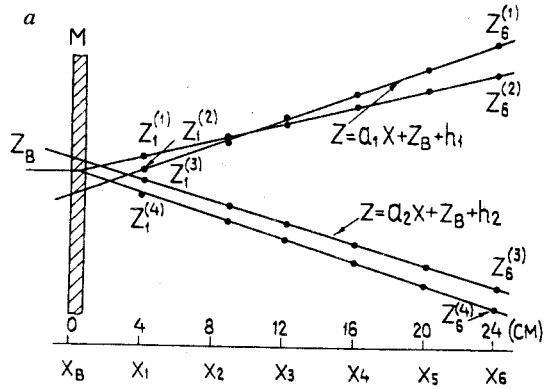
$$n(a') \neq n(b') \neq n(c').$$

Практически это значит, что после регистрации события в памяти достаточно стереть все координаты, имеющие одинаковые адреса, относящиеся к первым трем детекторам, и по оставшимся данным можно вычислить значение прицельного параметра и восстановить треки частиц. Поскольку часть информации в такой триггерной системе обрабатывается программным способом, то оставляет желать лучшего скорость отбора событий. В работе [13] описана быстродействующая триггерная система, с помощью которой события, содержащие вторичные вершины распада, отбираются за 10 мкс. В этой системе используется двумерный трековый процессор, разработанный для установки DELPHI и детально описанный в работе [14]. Алгоритм работы триггерной системы, по существу, является усовершенствованным



Рис.6. а) Пример события с двумя первичными вершинами распада; б) это же событие после трансформации

вариантом алгоритма, описанного выше. Суть его заключается в следующем (рис.6). Обозначим  $(X_v, Y_v)$  — координаты вершин и  $(X_i, Z_i^{(j)})$  — координаты треков, зарегистрированных с помощью микрополосковых детекторов:  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$  — число детекторов) — есть позиция  $i$ -го микрополоскового детектора и  $Z_i^{(j)}$  —  $j$ -я координата данного детектора. Тогда в плоскости  $XZ$  (рис.6,а) уравнение прямого трека имеет вид



$$Z = bX + Z_v + h, \tag{1}$$

где  $Z_v$  — представляет собой  $Z$ -координату вершины и  $h$  — прицельный параметр, который для всех треков, исходящих из первичной вершины распада, равен нулю. Реконструкция треков выполняется в четыре этапа.

Шаг 1. Трансформация координат. Для всех точек  $(X_i, Z_i^{(j)})$  выполняется трансформация типа

$$Z_i^{(j)} = \frac{X_6}{X_i} (Z_i^{(j)} - Z_v). \tag{2}$$

Тогда уравнение (1) можно представить в виде

$$Z = Z_6^{(j)} - Z_v + h \frac{X_6 - X}{X} = Z_6^{(j)} + h \frac{X_6 - X}{X}. \tag{3}$$

Следует отметить, что с помощью трансформации (2) прямые треки, у которых прицельный параметр  $h = 0$ , превращаются в параллельные прямые (см. рис.6,б), а треки, относящиеся к вторичным вершинам взаимодействия, становятся гиперболами.

Шаг 2. Как следует из уравнения (3), первичные треки имеют по шесть точек с равными абсциссами, поэтому эти координаты, записанные в памяти, стираются, и тем самым облегчается процесс вычисления прицельного параметра.

Шаг 3. Сдвиг и определение прицельного параметра. Если ко всем значениям  $Z_i^{(j)}$  добавить величину

$$n_i(h)w = h \frac{X_i - X_0}{X}, \quad (4)$$

где  $w$  — шаг микрополоскового детектора и  $n_i$  — число, зависящее от  $h$ , которое лучшим образом аппроксимирует уравнение (4), то после такой трансформации треки, имеющие отличный от нуля прицельный параметр, сводятся к постоянной функции от  $X$ . После нахождения таких треков можно вычислить значение прицельного параметра путем подсчета числа сдвигов в первом детекторе

$$h_i = n_1 l \frac{X_1}{X_1 - X_6}, \quad \text{где } l = 25 \text{ мкм.}$$

Шаг 4. Нахождение координат соответствующих вершин распада. Как уже отмечалось выше, для восстановления топологий событий используются

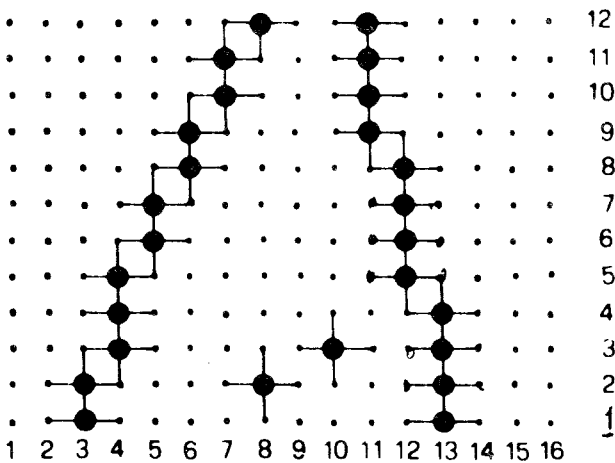


Рис.7. Алгоритм непрерывной маски

быстрый аппаратно-программируемый процессор, работа которого основана на так называемом алгоритме непрерывной маски [15]. Суть алгоритма поясняется с помощью рис.7. Данные с детекторов запоминаются на триггерных регистрах. Программируемая память в первом приближении представляет собой матрицу, состоящую из горизонтальных и вертикальных ключей, которые замыкаются теми триггерами регистров, на которых записаны единицы. Более детально модернизированный вариант специализированного процессора, используемого в эксперименте WA92, описан в [16].

**Применение ассоциативной памяти и аналоговой нейронной сети.** В триггерной системе, предназначенной для быстрого отбора событий, содержащих тяжелые цветные кварки, использованы модули ассоциативной памяти емкостью 4096 ячеек в каждом модуле [17]. В более современном варианте триггерной системы используется аналоговая нейронная сеть [18]. Необходимость в применении таких сложных процессорных устройств объясняется тем, что нахождение вершины вторичного распада даже в режиме «оф-лайн» представляет собой довольно сложную проблему. На рис.8 приведена блок-схема микровершинного детектора. Она состоит из мишени М, восьми микрополосковых детекторов, повернутых друг относительно друга на 90°, электронной системы считывания, модулей ассоциативной памяти (АЗУ) и аналоговой нейронной сети. Поиск вторичной вершины распада происходит в два этапа. На первом этапе в модули АЗУ предварительно заносятся данные о наиболее вероятных полезных событиях. Такими данными могут быть, например, количество треков в событии, их наклоны и т.д. Кроме того, из общих соображений известно, что треки (в идеальном случае), исходящие из первичной вершины распада, представляются как множество точек на горизонтальной прямой, а вторичные вершины распада отображаются в виде множества точек на наклонной прямой, которая пересекает эту прямую. После регистрации данных происходит параллельный поиск треков с помощью АЗУ в течение нескольких микросекунд, и в случае положительного ответа данные передаются на входы аналоговой нейронной сети.

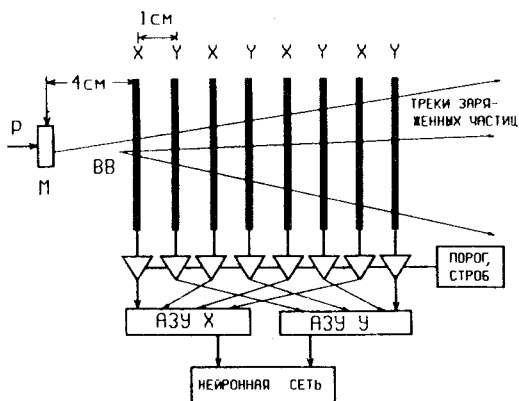


Рис.8. Блок-схема вершинного детектора: АЗУ — ассоциативное запоминающее устройство; Р — пучок; ВВ — вторичная вершина распада; М — мишень

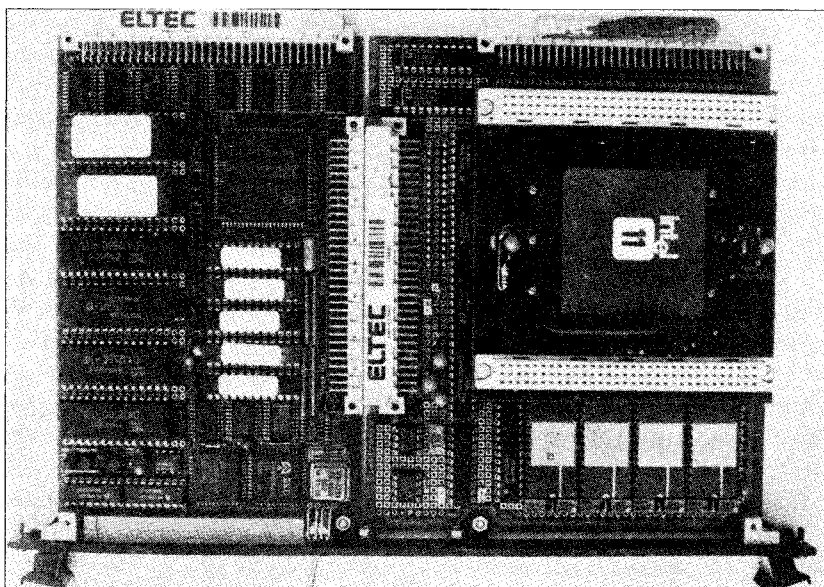


Рис.9. Вычислительная плата с аналоговой нейронной сетью

Аналоговая нейронная сеть представляет собой большую интегральную микросхему, разработанную фирмой «Intel». Она имеет 64 входа, 64 нейронных элемента в скрытом слое и 64 выхода. Для того чтобы нейронная сеть могла использоваться непосредственно в эксперименте, в стандарте VME создан гибридный процессор, общий вид которого приведен на рис.9. На плате расположены цифровая микро-ЭВМ 68070, аналоговая нейронная сеть 80170, модули памяти и соответствующие интерфейсы. Кроме того, с целью обмена данными между процессорами на плате имеются также модули АЦП и ЦАП. В целом гибридный процессор управляется с помощью персонального компьютера. Одной из трудоемких процедур, связанной с использованием нейронной сети, является ее обучение с помощью специальной программы. Использование аналоговой нейронной сети позволило существенно улучшить отбор полезных событий.

### 3. ВЕРШИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, СОЗДАВАЕМЫЕ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА КОЛЛАЙДЕРАХ

Вершинные детекторы, создаваемые для экспериментов на коллайдерах имеют не только своеобразную конфигурацию в виде цилиндра, в центре которого проходит ионопровод (рис.10), но также более сложную меха-

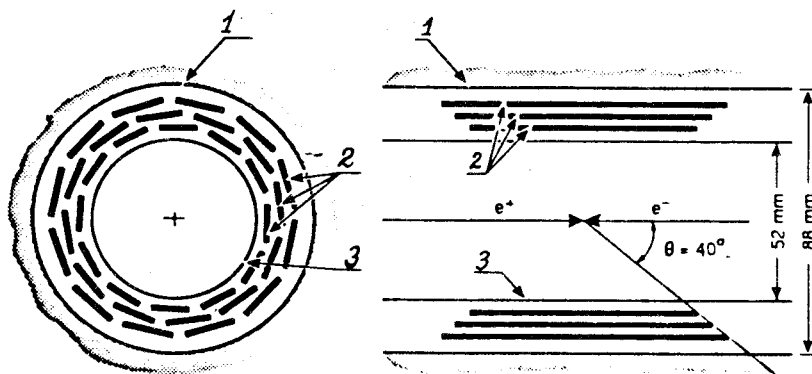


Рис.10. Схематическое изображение микровершинного детектора Mark II с ионопроводом: 1 — внутренняя стенка вершинной дрейфовой камеры; 2 — кремниевые детекторы, 3 — ионопровод

ническую конструкцию и большее число каналов регистрации (порядка  $10^5$ ). С целью повышения точности регистрации координат вершин распада типичный детектор имеет несколько слоев, покрытых микрополосковыми детекторами или другими типами полупроводниковых детекторов. Для упрощенной детекторной системы, состоящей из двух слоев, расположенных на расстояниях  $L_1$  и  $L_2$  от точки распада, с собственным разрешением  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  величина разрешения прицельного параметра  $\sigma_i$  может быть вычислена из следующего выражения [19]:

$$\sigma_i^2 = \sigma_1^2 + R^2 \alpha_{ms}^2 + R^2 \alpha_{track}^2,$$

где  $\sigma_1$  — пространственное разрешение ближайшей детекторной плоскости,  $R$  — расстояние от первой детекторной плоскости до центра пучка,  $\alpha_{ms}$  отражает эффект многократного рассеяния и  $\alpha_{track}$  — точность по углу трековой системы. С целью упрощения вещество ионопровода рассматривается как часть внутреннего слоя детектора. Основные требования к вершинным детекторам, создаваемым для экспериментов на Большом адронном коллайдере, заключаются в следующем: 1) точность внутреннего детектора (ближайшего к ионопроводу) должна быть весьма высока (порядка нескольких микрометров); 2) необходимо обеспечить минимум вещества детектора и ионопровода; 3) угловое разрешение всей трековой системы должно быть порядка 100 мкрад.

Таблица 2. Микрополосковые вершинные детекторы [20]

Эксперимент	Коллайдер	Энергия коллайдера, ГэВ
MARK II	SLC ( $e^+e^-$ )	94/ $Z^0$
DELPHI	LEP ( $e^+e^-$ )	94/ $Z^0$
ALEPH	LEP ( $e^+e^-$ )	94/ $Z^0$
OPAL	LEP ( $e^+e^-$ )	94/ $Z^0$
CDF	TEVATRON ( $p\bar{p}$ )	1800
L3	LEP ( $e^+e^-$ )	94/ $Z^0$
ARGUS	DORIS-II ( $e^+e^-$ )	10/ $\Upsilon(4S)$
CLEO-II	CESR ( $e^+e^-$ )	10/ $\Upsilon(4S)$
KEDR	VEPP-4 ( $e^+e^-$ )	10/ $\Upsilon(4S)$

$Z^0$ , (4S) — частицы.

В [19] приведено краткое описание и параметры вершинного детектора, создаваемого для коллаборации ATLAS. Рассматривается вопрос об использовании двухкоординатных (pixel) детекторов для внутренних слоев вершинного детектора. В [20] приведено описание конструкций и параметры наиболее известных микрополосковых детекторов, электронных систем считывания и регистрации данных. В табл.2 приведены установки, предназначенные для проведения экспериментов на коллайдерах. Большинство из этих детекторов уже используется в экспериментах.

Более подробная информация о детекторах содержится в соответствующих литературных ссылках. Ниже будут описаны наиболее известные микровершинные детекторы.

**Микровершинный детектор Mark II.** Микровершинный детектор Mark II был предложен для эксперимента в 1985 г. на линейном коллайдере SLAC и начал использоваться с 1990 г. [21]. До этого измерения времени жизни  $\tau^\pm$ -лептонов и среднее время жизни  $B$ -адронов проводилось с помощью вершинных дрейфовых камер. Помимо ожидаемого повышения точности регистрации координат частиц до 5 мкм, использование микровершинного детектора позволит также увеличить на порядок точность измерения прицельного параметра и улучшить такой важный параметр, как разрешение двух треков до 5 мрад. Схематический вид детектора изображен на рис.10. Он состоит из трех концентрических цилиндрических поверхностей, на которых смонтировано 36 модулей (ladders) с односторонним считыванием. Большое внимание было уделено точности установки вершинного

детектора и отдельных его частей. Так, для получения точности установки 40 мкм использовался трехмерный микроскоп. Для ориентации микрополосковых детекторов с точностью 2 мкм применялся коллимированный пучок рентгеновской трубки. Кроме того, в процессе эксперимента дополнительно использовался емкостный пробник с целью устранения отклонений внешнего слоя детектора с медными шинами «земли», принадлежащими дрейфовой вершинной камере, окружающей полупроводниковую микровершинную камеру. В свою очередь, каждый детектор (модуль) содержит по 512 микрополосок с переменным шагом 25, 29 и 33 мкм для внутреннего, среднего и внешнего слоя соответственно. Длина стрипов тоже переменная, что позволяет получить размах покрываемого детекторами полярного угла до 40°. Микрополоски ориентированы параллельно пучку (ось  $z$ ), что позволяет измерять координаты в плоскости  $\varphi$ . На рис.11 приведен общий вид одного модуля микрополоскового детектора. Каждый модуль состоит из микрополоскового детектора и двух микросхем Н1 и Н2, выполненных по гибридной технологии. Эти устройства обеспечивают передачу сигналов от микрополосок к входам усилителей чтения. В свою очередь, каждому детектору соответствуют по две пары больших 128-канальных больших интегральных микросхем типа «Microplex» (см. табл.3). Такие микросхемы обеспечивают усиление и чтение сигналов от 18432 микрополосок. На рис.12 приведен снимок с дисплея реконструированного с помощью микровершинного детектора Mark II двухструйного  $Z^0$ -распада. Треки заряженных частиц,

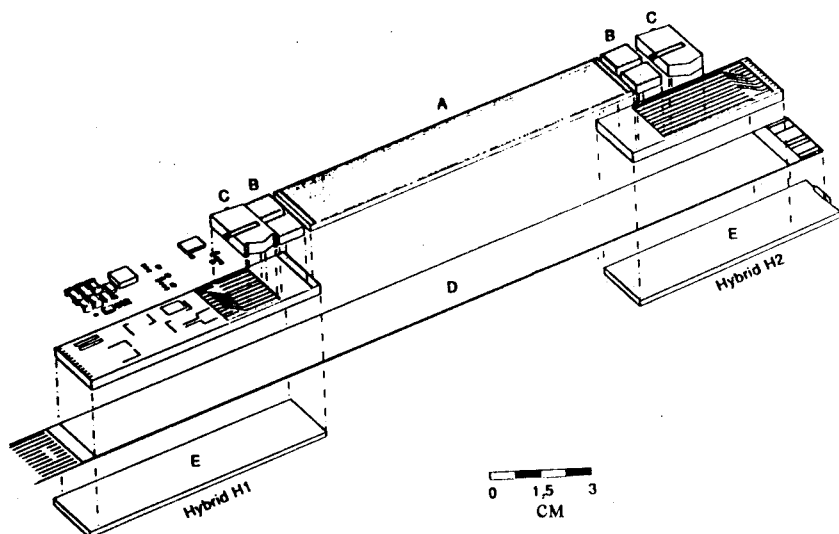


Рис.11. Общий вид микрополоскового модуля: А — микрополоски; В — микросхемы; С — буферные блоки; D — тонкий кабель; Е — стальная пластинка

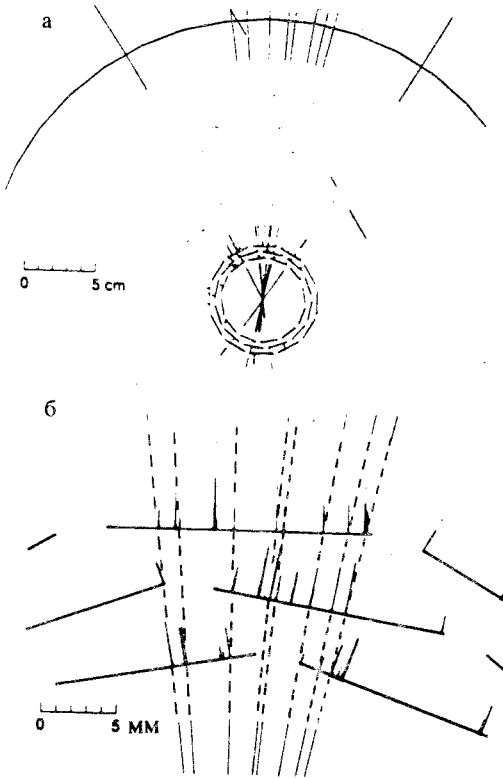


Рис.12. а) Реконструированный с помощью микровершинного детектора Mark II  $Z^0$ -распад; б) более детальная часть картины

мишенью. Микрополосковые детекторы с шагом 25 мкм расположены параллельно пучку и магнитному полю. Плоскости содержат по 24 модуля, каждый из которых, в свою очередь, состоит из четырех микрополосковых детекторов. Вершинный детектор покрывает угол  $\pm 45^\circ$  и содержит в общем 165888 микрополосок. Трудности заключаются с тем, что здесь используются одномерные детекторы со считыванием сигналов только от одной плоскости. В более совершенном варианте микрополоскового детектора шаг микрополоски равен 16,6 мкм, что позволило получить высокое пространственное разрешение порядка 5 мкм и разрешение двух треков 100 мкм.

Уменьшение радиуса ионопровода в 1991 г. позволило установить еще дополнительный внутренний цилиндр с радиусом 6,3 см при длине 24 см.

проходящих через детектор, обозначены как прямые линии, исходящие из точки взаимодействия.

**Микровершинный детектор DELPHI.** Детектор DELPHI является одной из четырех универсальных установок, используемых на ускорителе LEP и предназначенных для изучения  $e^+e^-$  взаимодействий при энергиях, близких к массе  $Z^0$ -бозона. Около 130000 адронных событий зарегистрированы в 1990 г. и вдвое больше в 1991 г. В установке DELPHI [22] использовались две модификации вершинных детекторов. Установленный на пучке LEP в 1989 г. детектор состоял из двух концентрических плоскостей с радиусами 9 и 11 см, на которых смонтированы микрополосковые детекторы. Ранее аналогичные детекторы использовались в эксперименте с фиксированной



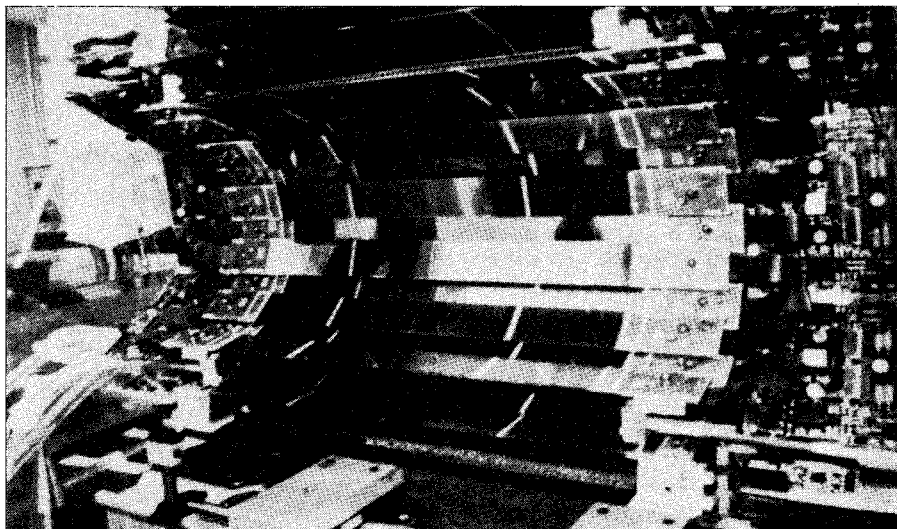


Рис.13. Общий вид половины микровершинного детектора DELPHI

Поскольку радиусы концентрических плоскостей различны, то активная длина модулей вершинного детектора также переменная и находится в пределах от 1,92 до 3,20 см. Характеристики окончательного варианта детектора описаны в [22]. На рис.13 приведен общий вид одной половины микровершинного детектора. Использование третьей плоскости позволяет проводить измерения координат частиц непосредственно у ионопровода. При этом удалось повысить неопределенность в вычислении прицельного параметра от  $((80 \text{ мкм})^2 + (120 \text{ мкм}/p_t)^2)^{1/2}$  до  $(24 \text{ мкм})^2 + (69 \text{ мкм}/p_t)$  для треков с импульсом  $p_t$ , измеренным в единицах ГэВ/с. Приблизительная оценка дает разрешение для прицельного параметра для  $\sigma_b(\mu^+\mu^-) = 21 \text{ мкм}$ . На рис.14 приведен снимок с дисплея, где изображен кандидат в событие  $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ .

Рассмотрим кратко параметры микрополоскового детектора. Ширина детектора меняется от 19,2 (384 микрополоски) до 32 мм (640 микрополосок) для внешнего слоя. Средний слой имеет 512 микрополосок при ширине 25,6 мм. Используется полупроводниковый детектор с интегрированной емкостной связью и смещающим резистором. На рис.15,а приведен общий вид модуля микрополоскового детектора. Электронная система усиления и чтения приведена на рис.15,б. Плата, на которой монтируются

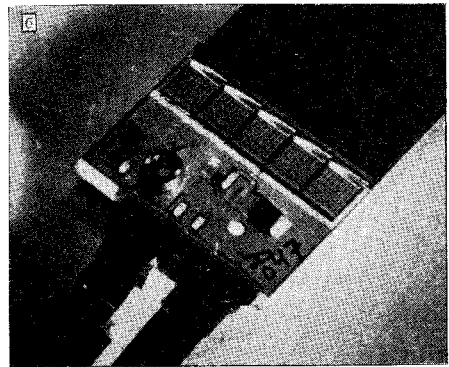
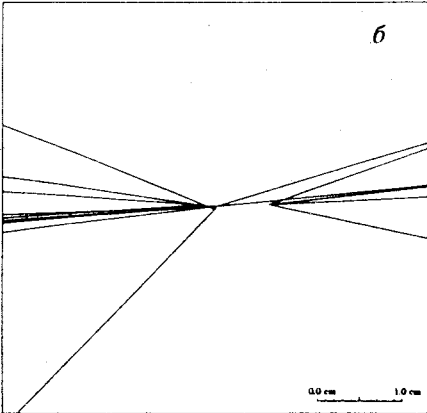
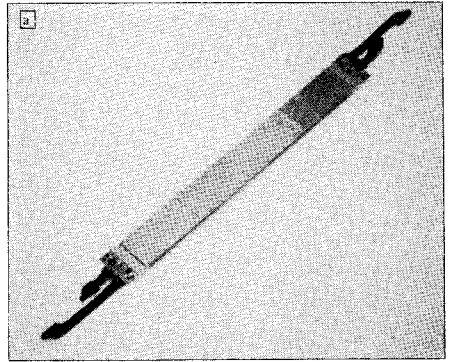
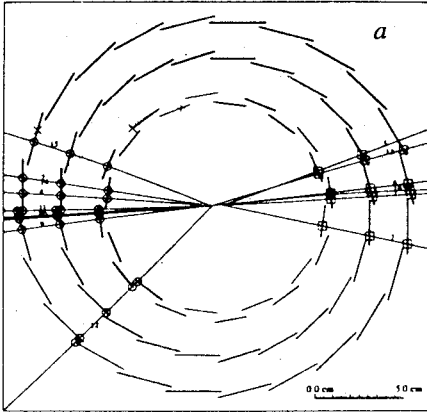


Рис.15. а) Общий вид внешнего модуля детектора. б) Модуль считывания данных

Рис.14. Снимок с дисплея кандидата в событие  $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ , зарегистрированного с помощью микровершинного детектора DELPHI

микросхемы MX3, одновременно является частью механической конструкции микровершинного детектора. После поступления общего триггерного сигнала импульсы с выходов детектора последовательно считываются с помощью системы модулей FASTBUS, оцифровываются и обрабатываются с помощью сигнального процессора DSP56001.

В табл.3 приведены параметры четырех типов наиболее известных микровершинных детекторов, используемых на ускорителях LEP и SLC.

Таблица 3. Параметры полупроводниковых микрополосковых детекторов

Установка	Mark II	DELPHI	ALEPH	OPAL	L3
Литература	[21]	[22]	[23–26]	[27,28]	[29–31]
Количество слоев	3	3	2	2	2
Радиусы, см					
$r_1$	2,9	6,3	6,3	6,2	6,1
$r_2$	3,4	9,0	—	—	—
$r_3$	3,8	11,0	10,7	7,7	7,8
Покрываемый угол, %	0,65	0,86	0,87	0,82	0,92
	0,65	0,80	—	—	—
	0,65	0,73	0,75	0,76	0,88
Перекрытие плоскостей, %	—	14	4	—	12
Количество детекторов	36	288	96	75	96
Площадь кремния, м <sup>2</sup>	0,05	0,42	0,25	0,15	0,30
Количество БИС чтения	144	576	1152	125	576
Количество каналов чтения	18432	73728	73728	16000	73728
Отношение сигнал/шум	18	14	17	22	—
Собственное разрешение, мкм	7	7–9	12( $r\phi$ ) 12( $r_z$ )	5	7( $r\phi$ ) 14( $r_z$ )
Прицельный параметр, мкм	25 $\mp$ 5		15 ( $r\phi$ ) 25 ( $r_z$ )		

— Нет информации.

Чтение информации организовано таким образом, что данные считываются через каждые 50 мкм (три микрополоски на один усилитель), а значения координат вычисляются методом деления заряда. При этом используется большая многоканальная интегральная микросхема МХЗ, параметры которой приведены в табл.4.

**Таблица 4. Параметры БИС,  
используемых в полупроводниковых вершинных детекторах [20]**

Эксперимент	Mark II	DELPHI	ALEPH	OPAL	L3
БИС	Microplex	MX3	CAMEX64A	MX5	SVX-H3
Тип	5 мкм NMOS	3 мкм CMOS	3,5 мкм CMOS	1,5 мкм CMOS	3 мкм CMOS
Количество каналов	128	128	64	128	128
Поверхность, мм <sup>2</sup>	6,3 × 54	6,5 × 6,8	6,4 × 5,0	6,5 × 6,8	6,3 × 6,8
Стрип, мкм	47,5 (4 ряда)	50 (2 ряда)	100	550 (2 ряда)	48 (2 ряда)
Мощность рассеяния, мВт	14	0,75	1	2	1,3
ENC, e <sup>-</sup>	280 + 97C <sub>ВХ</sub>	350(C <sub>ВХ</sub> + 3,5) <sup>1/2</sup>	335 + 35C <sub>ВХ</sub>	325 + 23C <sub>ВХ</sub>	350 + 58C <sub>ВХ</sub>
Радиационная стойкость, крад	20	15	12	5	20

Более детально характеристики ряда БИС, разработанных для микрополосковых детекторов, приведены в [20].

**Микровершинный детектор ALEPH.** Это первый микровершинный детектор с двусторонним считыванием, который используется в эксперименте на коллайдере с 1991 г. Общий вид детектора приведен на рис.16. Для детектора ALEPH [23] по специальной технологии разработан микрополосковый детектор с двусторонним чтением, что позволяет с помощью одной детекторной плоскости регистрировать две координаты — X и Z [24]. Детектор ALEPH состоит из двух концентрических плоскостей с радиусами 6,3 и 10,7 см, покрытых микрополосковыми детекторами площадью 0,25 м<sup>2</sup>, керамических держателей и электронной системы считывания, содержащей 74000 каналов регистрации. В микрополосковом детекторе с двусторонним чтением идеально решается проблема регистрации второй координаты. Такое решение позволяет оптимизировать величину сигнала при минимальной толщине материала и осуществить корреляцию амплитуд импульсов, получаемых от собираемых зарядов с двух сторон микрополоскового детектора. Естественно, что использование двустороннего считывания приводит

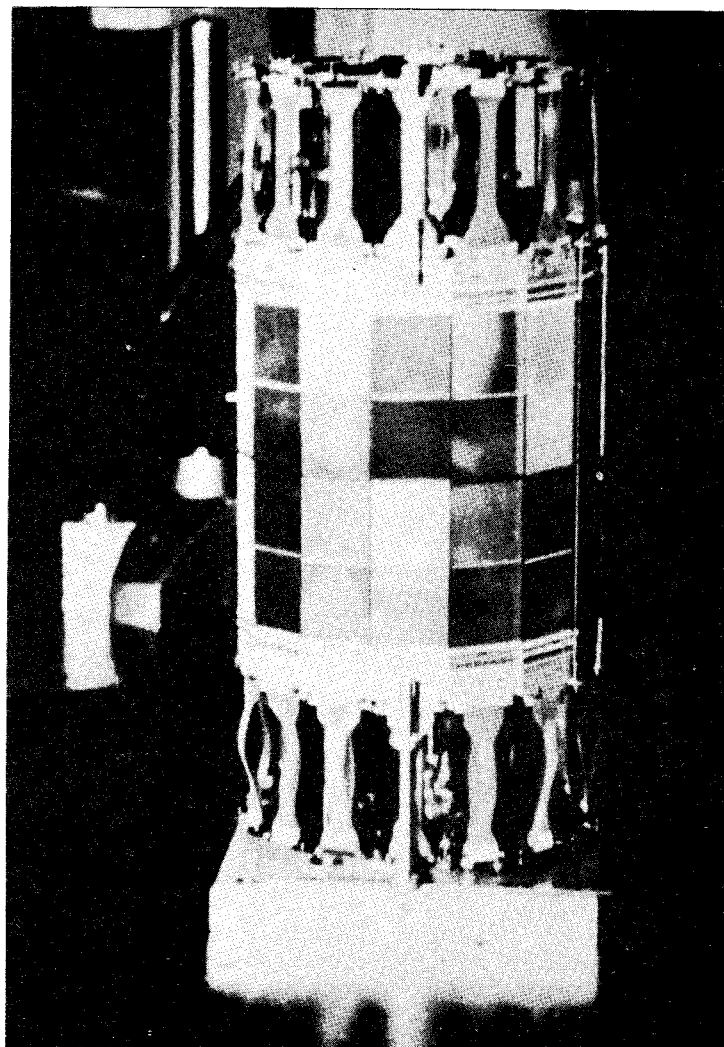


Рис.16. Общий вид микровершинного детектора ALEPH, смонтированного на графитовой подставке. Около торцов видны гибкие печатные проводники

к существенному упрощению вершинного детектора и уменьшению эффекта многократного рассеяния частиц. Поэтому вершинный детектор для данной установки содержит всего две концентрические поверхности, покрытые модулями из микрополосковых детекторов. На рис.17 схематически

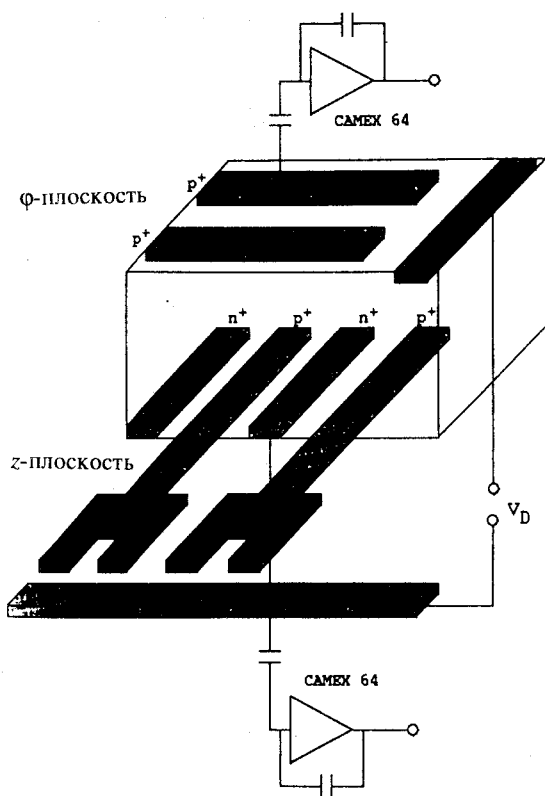


Рис.17. Структура подложки микрополоскового детектора ALEPH с двусторонним считыванием. CAMEX 64 — микросхема

состоит из двух микрополосковых детекторов с двусторонним считыванием сигналов. На  $p^+$ -плоскости полоски обоих детекторов соединены последовательно. Длина полосок на этой стороне 46,1 мм, число каналов равно 483 на каждый детектор. Полное число каналов считывания с одного базового модуля равно 1442, а общее количество каналов регистрации составляет 81000. Большая интегральная схема CAMEX64, используемая для чтения и регистрации данных, имеет 64 независимых канала, каждый из которых содержит зарядочувствительный предусилитель с управляемой обратной связью, второй усилитель вместе с переключаемыми конденсаторами обеспечивает выполнение двойной корреляционной выборки и дополнительное

показана структура подложки микрополоскового детектора. Она имеет размеры  $5,12 \times 5,12$  см и толщину 300 мкм. Подложка выполнена из высокоомного кремния, в котором на  $\phi$ -плоскости имплантированы  $p^+$ -микрополоски с шагом 25 мкм. На противоположной  $z$ -плоскости и ориентированно перпендикулярно  $n^+$  микрополоски имплантированы с шагом 50 мкм. Сигнал на  $\phi$ -плоскости считывается от каждой четвертой микрополоски, а на  $z$ -плоскости — от каждой второй, так что шаг считывания на каждой из сторон составляет 100 мкм. Микровышинный детектор состоит из 28 модулей, расположенных в двух слоях. В свою очередь, каждый модуль

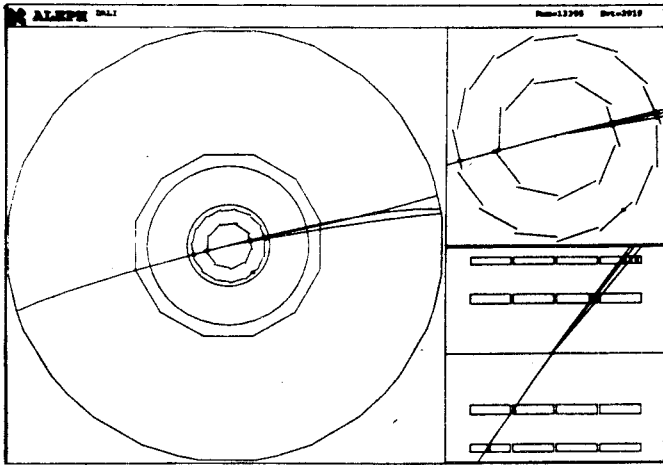


Рис.18. Распад  $Z^0$ -бозона на пару  $\tau$ -лептонов, содержащий однолучевые и трехлучевые моды. Слева видны в разрезе микровершинная, внутренняя и времяпроекционная камеры. Справа сверху приведены более детально треки, проходящие через микровершинный детектор в плоскости  $x, y$ . Справа внизу то же событие, но в плоскости  $r, z$

усиление. В 1991 г. с помощью вершинного детектора ALEPH было зарегистрировано около 300000 адронных  $Z^0$ -распадов. На рис.18 приведены типичные адронные события от  $Z^0$ -распада в проекциях  $r, \phi$  и  $r, z$ . Координаты частиц определяются методом деления заряда.

**Микровершинный детектор OPAL.** Известны две модификации микровершинных детекторов OPAL. В первой модификации используются микрополосковые детекторы с однокоординатным чтением. Во втором варианте, благодаря специальной технологии, стало возможным создание двухкоординатного детектора. Разработка высокопрецизионного микровершинного детектора первой модификации [27] совпала со временем реконструкции ионпровода на ускорителе LEP, в результате чего радиус ионпровода в 1991 г. был уменьшен с 8,5 до 5,5 см. Общие параметры микровершинного детектора приведены в табл.3. Детектор состоит из двух концентрических поверхностей с радиусами 6,2 и 7,7 см. Микрополоски ориентированы по азимуту (в  $\phi$ -направлении) с шагом 50 мкм. По этой причине возможна регистрация только одной координаты сработавшей частицы. Особенностью микрополоскового детектора является использование полевого транзистора в качестве источника смещения для отдельных

имплантированных микрополосок (FOXFET-структура) [28], что позволяет менять динамическое сопротивление от 10 до 40 МОм и улучшить отношение сигнал/шум до 22:1. Микрополосковый модуль детектора состоит из трех полупроводниковых детекторов длиной 6 см, соединенных в виде последовательной цепочки, причем каждый такой детектор состоит из 629 микрополосок. Выходы микрополосок соединены с входами усилителей по переменному току. Общее число каналов считывания аналоговых сигналов составляет 16000. Регистрация сигналов выполняется с помощью 128-канальной БИС МХ5 (см. табл.4), выполненной по 1,5 К-МОП-технологии. Каждый канал микросхемы имеет на входе зарядочувствительный усилитель, выход которого подключен к запоминающему конденсатору. Сигналы от конденсаторов всех каналов считываются с помощью 128-разрядного сдвигового регистра. Параметры микровершинного детектора OPAL приведены в табл.6. В 1991 г. с помощью вершинного детектора было зарегистрировано порядка 250000 адронных  $Z^0$ -распадов. Получено высокое разрешение прицельного параметра порядка 15 мкм.

В [28] описан модифицированный вариант микровершинного детектора OPAL с двухкоординатным считыванием. Однако используемая система считывания принципиально отличается от системы, применяемой в детекторе ALEPH. Отчасти это объясняется трудностями технологического характера. Поэтому для чтения второй  $z$ -координаты было принято простое решение путем склеивания двух плоскостей микрополосковых детекторов, ориентированных в  $\phi$ - и  $z$ -направлениях соответственно. Для прохождения сигналов, соответствующих  $z$ -координате, к усилителям, расположенным в той же области, где находятся усилители считывания, соответствующие  $\phi$ -координатам, используются печатные золоченые контакты, расположенные на стеклянной подложке. В табл.5 приведены параметры микрополоскового модуля.

**Таблица 5. Параметры микрополоскового модуля модифицированного детектора OPAL**

Параметр	$\phi$ -плоскость	$z$ -плоскость
Толщина кремния, мкм	250	250
Шаг микрополоски, мкм	25	25
Шаг микрополоски чтения, мкм	50	100
Собственное разрешение, мкм	5,0	13
Число каналов чтения	629	584
Отношение сигнал/шум	24	20



Таблица 6. Параметры микровершинного детектора OPAL

Параметр	Величина
Число слоев	2
Количество микрополосковых детекторов:	
внутренний слой	11
внешний слой	14
Эффективный радиус слоя, мм:	
внутренний	61
внешний	75
φ-акцептанс:	
внутренний слой	88%
внешний слой	91%
Количество каналов	30325
Система охлаждения	Водяная

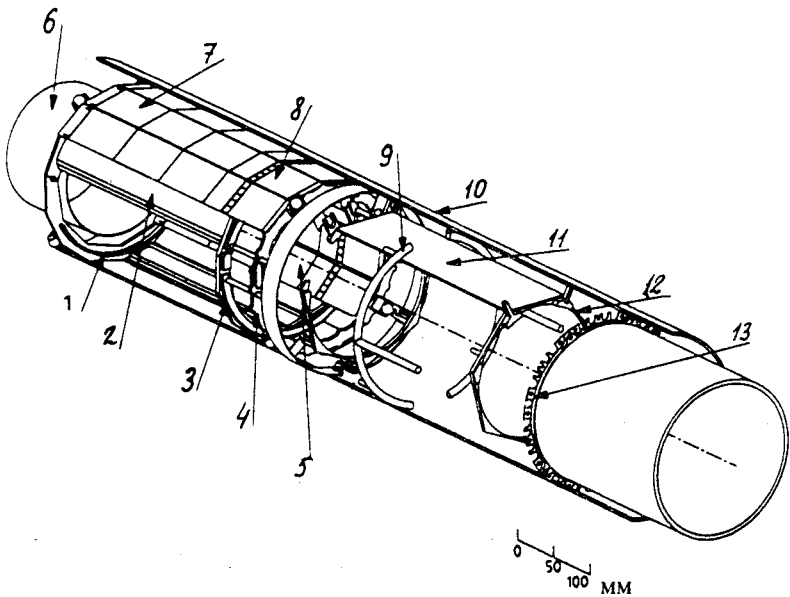


Рис.19. Общий вид конструкции детектора OPAL: 1 — опорное кольцо, 2 — бериллиевая оболочка, 3 — опорное и охлаждающее кольца, 4 — опорное кольцо, 5 — внутренние детекторные платы, 6 — пучковая бериллиевая трубка, 7 — внешние детекторные платы, 8 — микросхемы, 9 — система охлаждения, 10 — трубки давления, 11 — платы для регистрирующей электроники, 12 — опорное кольцо, 13 — направляющие для кабелей

Вместо БИС МХ5 в модифицированном варианте детектора используется большая интегральная микросхема МХ7, где, в частности, существенно повышена радиационная стойкость и на 20% повышена помехоустойчивость. Получено собственное координатное разрешение 5 и 13 мкм по координатам  $\varphi$  и  $z$  соответственно. Общие параметры микровершинного детектора OPAL приведены в табл.6.

На рис.19 приведена фотография микровершинного детектора OPAL, установленного вокруг ионопровода на ускорителе LEP.

**Микровершинный детектор L3 [29—31].** Этот детектор был введен в эксперимент сравнительно недавно (в начале 1993 г.). В целом детектор состоит из двух концентрических слоев цилиндрической формы с радиусами 6,1 и 7,8 см соответственно. В каждом слое содержится по 12 микрополосковых модулей толщиной 300 мкм и площадью  $7 \times 4$  см. Модуль, в свою очередь, состоит из двух микрополосковых детекторов с двусторонним считыванием, что позволяет измерять две координаты частицы:  $z$  и  $r$ ,  $\varphi$ . Ожидаемое разрешение для одного трека составляет 7 и 14 мкм в плоскостях  $r\varphi$  и  $rz$  соответственно. Особенностью конструкции микровершинного детектора L3 является сдвиг во внешнем слое модулей по отношению к оси  $z$  на стереоугол  $3^\circ$ , что позволяет идентифицировать многотрековые события. Более подробно конструкция и характеристики модулей описаны в [29]. Микровершинный детектор обеспечивает реконструкцию треков частиц в полярном угле  $22^\circ$  и  $158^\circ$  и по азимуту  $360^\circ$ . Большая интегральная 128-канальная микросхема SVX, используемая для считывания данных, содержит все необходимые схемы, позволяющие усиливать, запоминать и мультиплексировать данные на один выходной канал, который подключен к входу оптического передатчика. Функциональная плата с оптической развязкой содержит также 8-разрядный параллельный АЦП, с помощью которого оцифровываются сигналы, поступающие от детектора, и 8-разрядные ЦАП, используемые для установки порога АЦП и калибровки модуля SVX. Выходы функциональных плат с оптической развязкой подключены к входам системы сбора и обработки данных в стандарте VME на основе микропроцессора TSM 99105.

**Микровершинный детектор CDF [32—34].** Микровершинный детектор CDF предназначен для проведения экспериментов на  $pp$ -коллайдере в Лаборатории им.Ферми. Он был введен в эксплуатацию в 1992 г. Задача состояла в том, чтобы обеспечить точность регистрации треков порядка 10 мкм. Общий вид детектора приведен на рис.20. Он состоит из четырех концентрических слоев. Внутренний и внешний слой имеют радиусы 3,005 и 7,866 см соответственно. Детектор помещен внутри вершинной время-проекционной камеры. В табл.7 приведены параметры микровершинного детектора.

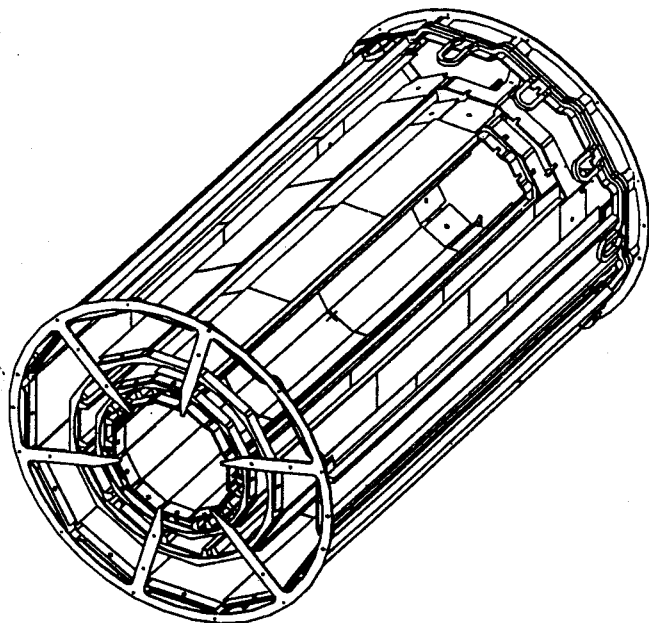


Рис.20. Общий вид конструкции детектора CDF

Таблица 7. Параметры микровершинного детектора CDF

Параметр	Значение
Количество слоев	4
Внутренний/внешний радиус, см	3,005/7,866
Микрополоски, мкм	60, слой 0–2; и 55 — слой 3
Активная длина, см	51 (2 × 25,5)
Разрешение, мкм	10 (прицельный параметр)
Технология	одностороннее считывание
Отношение сигнал/шум	9—10
Число каналов	46080
Количество микросхем	360
Мощность рассеяния, мВт/микросхема	175
Общая мощность рассеяния, Вт	100
Время считывания, мс	1–2
Охлаждение	водяное, 14°C
Период встречи пучков, мкс	3,5

Детектор CDF состоит из четырех слоев микрополосковых детекторов с односторонним считыванием (порядка 40000 каналов). Размер микрополоски 25 мкм, шаг между микрополосками 60 мкм у внутреннего слоя и 110 мкм у внешнего, длина 8,5 см, толщина 300 мкм. Модули микрополосковых детекторов имеют максимальную длину 510 мм; каждый модуль состоит из трех микрополосковых детекторов. В [32] приводятся также характеристики 128-канальной микросхемы, используемой для усиления и регистрации сигналов. На одно событие приходится 60–100 Кбайт данных.

**Микровершинные полупроводниковые детекторы для эксперимента ATLAS [35].** Для будущего эксперимента ATLAS предлагается сложная система трековых детекторов, включающая несколько типов полупроводниковых микровершинных детекторов. На рис.21 приведена схема трековой системы, причем рассматриваются две концепции установки, которые находятся в стадии исследования. Здесь мы рассмотрим краткое описание микровершинных полупроводниковых детекторов. Основные требования к внутреннему микровершинному детектору заключаются в следующем.

1. Высокое пространственное разрешение порядка 5–10 мкм.
2. Высокое быстродействие: полное время сбора зарядов должно составлять 20–30 нс для детекторов толщиной 300 мкм.
3. Высокое разрешение двух треков: типичная величина — 150 мкм.
4. Высокая радиационная стойкость.

Внутренний микровершинный детектор состоит из трех concentрических плоскостей, расположенных на расстоянии от 10 + 30 см от ионопровода. Предполагается, что будут использованы микрополосковые детекторы с двусторонним считыванием или двухкоординатные (pixel) детекторы,

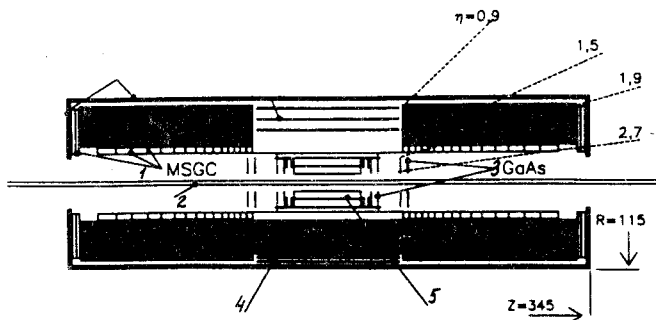


Рис.21. Система трековых детекторов установки ATLAS в разрезе: 1 — микрополосковые газовые счетчики, 2 — ионопровод, 3 — полупроводниковые детекторы на основе GaAs, 4, 5 — полупроводниковые детекторы

которые позволяют измерить величину прицельного параметра с точностью до 25 мкм.

Микрополосковый детектор на основе GaAs позволит улучшить импульсное разрешение в области с большим уровнем радиации. Третий внешний полупроводниковый детектор в сочетании с внутренним детектором обеспечивает точное измерение импульсов заряженных частиц в центральной области трековой системы и выработку данных для триггера второго уровня.

**Микровершинный полупроводниковый детектор для эксперимента CMS [36].** Структура цилиндрической части детектора CMS, состоящей в основном из микрополосковых газовых детекторов, будет рассмотрена ниже. Основные требования к микровершинному детектору заключаются в том, чтобы обеспечить пространственное разрешение  $r$ ,  $\phi$ -координат с точностью до 25 мкм и высокое разрешение по импульсу. Детальные исследования показали, что микрополоски длиной 125 и с шагом 50 мкм обеспечивают качественное восстановление треков и удовлетворительное импульсное разрешение. Такой важный параметр, как емкость детектора, влияющий на уровень шумов, должен быть менее 10–20 пФ.

**Требования к электронике микровершинных детекторов.** Кремниевый детектор не обладает свойством внутреннего усиления, поэтому на вход усилителя поступает заряд, равный числу электронно-дырочных пар, возникающих при прохождении заряженной частицы. От стандартного кристалла толщиной 300 мкм можно получить сигнал, эквивалентный  $25 \cdot 10^3$  электронам. Поэтому для кремниевых детекторов необходимы высококачественные малозумящие усилители. В [37] показано, что среди трех схем предусилителей (зарядочувствительный, усилители тока и напряжения) для экспериментов в физике высоких энергий наиболее предпочтительным является усилитель напряжения. Вследствие стабильности выходной емкости детектора имеется возможность выполнять интегрирование выходного сигнала непосредственно на входе усилителя. Кроме того, усилитель напряжения имеет лучшую помехоустойчивость по сравнению с зарядочувствительным усилителем. Обычно усилители для микрополосковых детекторов выполняются по гибридной технологии. В данной работе рассмотрены также способы формирования и стробирования сигнала, необходимые для фильтрации шумов и оцифровки с помощью АЦП.

Большое число каналов регистрации в вершинных детекторах приводит к необходимости создания экономичной схемы считывания данных от детекторных плоскостей. Проблема состоит в трудности согласования минимальных размеров кристалла детектора с реальными размерами регистрирующей электроники. Поэтому такие устройства выполняются в виде отдельных микросхем. Эффективная монолитная микросхема описана в

работе [38]. Она выполнена по К-МОП-технологии и содержит 128 каналов регистрации. С целью повышения помехоустойчивости в схеме предусилителя используется метод выборки с двойной корреляцией. Модуль имеет один выход от сдвигового регистра. Важно, что потребляемая мощность на канал не превышает 1,6 мВт. В работе [39] описана двухмодульная 64-канальная система с буферной памятью типа «FIFO», что позволяет существенно повысить скорость считывания информации. В первом модуле содержатся усилители и компараторы, а вторая микросхема предназначена для хранения данных. Память работает в режиме «первый записан — первый считан», что позволяет по мере поступления триггерных сигналов регистрировать только полезные события.

Весьма перспективным направлением в электронных системах считывания для микрополосковых детекторов является использование конденсаторов, переключаемых с помощью транзисторных ключей, работающих в конвейерном режиме. В такой памяти сигнал передается (сдвигается) от одного конденсатора к другому с большой скоростью. Суть проблемы заключается в том, что для будущих экспериментов на коллайдерах, где число каналов считывания в микровершинных детекторах может составлять  $10^5$  и более, требуется создание помехоустойчивых микросхем с малой потребляемой мощностью. Кроме того, существенным недостатком используемых микросхем, параметры которых перечислены в табл.4, является то, что они не приспособлены для работы в конвейерном режиме, характерном для экспериментов на коллайдерах с малым периодом встречи сгустков (банчей) частиц. Как известно, это время ( $16 + 96$  нс) намного меньше, по сравнению с временем работы триггерной системы первого уровня (порядка 1–2 мкс). В [40] описана аналоговая задержка-буфер, выполненная по 1,2 мкм К-МОП-технологии и предназначенная для регистрации данных от полупроводниковых детекторов. После усиления с помощью зарядочувствительного усилителя сигналы поступают на вход CR-RC формирователя с пиковым временем 45 нс. Далее сформированные сигналы сдвигаются в аналоговый буфер, обеспечивающий задержку 1,2 мкс. После поступления триггерного сигнала первого уровня аналоговые выборки поступают на следующий уровень конвейера, где сигналы обрабатываются с частотой 100 кГц.

Поскольку аналоговые запоминающие устройства используются также и в двухкоординатных детекторах (см. ниже), рассмотрим кратко принцип действия такого устройства [41]. На рис.22 приведена блок-схема одного канала аналоговой памяти на переключаемых конденсаторах. Аналоговый сигнал поступает на вход памяти через низкоомный ключ K1. Запоминающая ячейка состоит из комплементарного ключа (из  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов, стоки которых включены параллельно) и двойного поликрем-

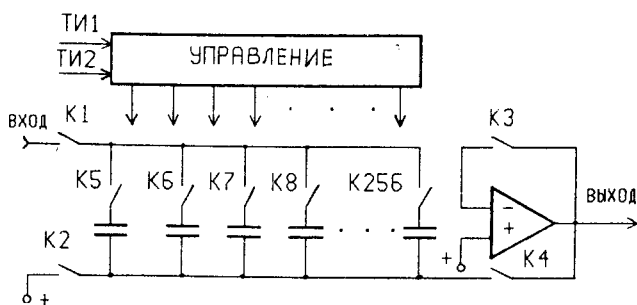


Рис.22. Канал аналоговой памяти на переключаемых конденсаторах:  $K_1 + K_{256}$  — ключи;  $TI_1, TI_2$  — тактовые импульсы

нивого конденсатора емкостью 1,5 пФ с толщиной диэлектрика 700 Å. Сдвиг входных сигналов происходит в момент поступления тактового импульса на оба транзистора (на рис.22 ключи изображены упрощенно). Внешнее напряжение смещения прикладывается к нижним пластинам конденсаторов с помощью ключа  $K_2$ . В результате напряжение, запоминаемое в каждом конденсаторе в момент сдвига, соответствует разнице между напряжением входного сигнала и напряжением смещения. Перед чтением закрываются ключи  $K_1$  и  $K_2$ . Тем самым от входа памяти отключается входная магистраль и нижние пластины конденсаторов, и с помощью ключа  $K_4$  подключается выходной усилитель. Частота записи сигналов может составлять 100 МГц. Концепция переключаемых конденсаторов эффективно используется также при создании 32-канальной аналоговой памяти [42].

#### 4. МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ГАЗОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Впервые микрополосковые газовые детекторы были описаны в [43,44]. Прототипами таких детекторов являются многопроволочные пропорциональные камеры и микрополосковые полупроводниковые детекторы. На рис.23 приведена схема детектора [45]. Он имеет подложку из изоляционного материала, на которой сформированы тонкие металлические анодные и катодные полоски толщиной несколько микрометров. Типичные размеры анодных и катодных микрополосок составляют 10 и 80 мкм. Они расположены с шагом 100 мкм. Разность потенциалов между анодными и катодными электродами создает электрическое поле около анодных микрополосок в достаточной степени, чтобы обеспечить газовое усиление электронов. Катодные электроды располагаются на расстоянии в несколько миллимет-

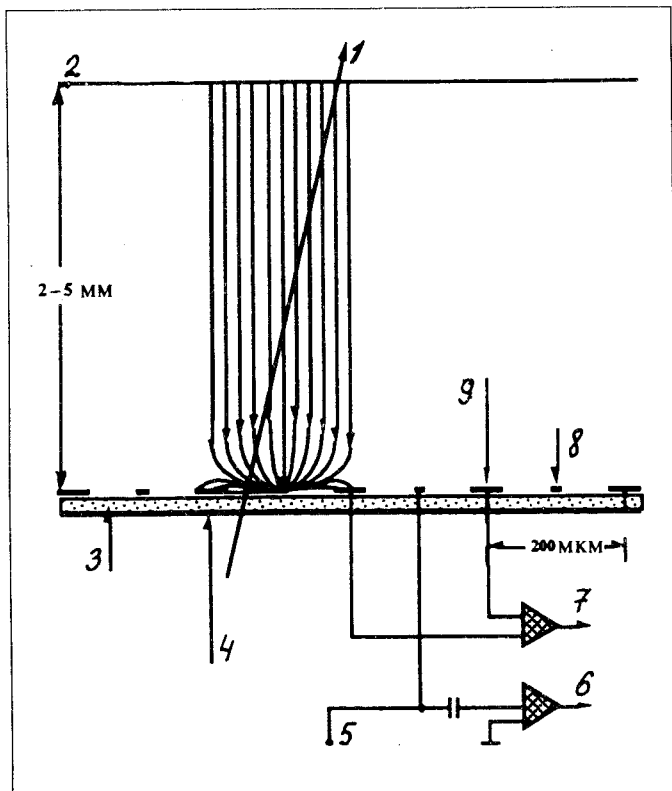


Рис.23. Схема микрополоскового газового детектора: 1 — траектория заряженной частицы, 2 — катодная плоскость, 3 — подложка, 4 — электрод, 5 — высоковольтное напряжение, 6 — цифровой выход, 7 — аналоговый выход, 8 — анодные полоски, 9 — полевые полоски. Толщина подложки 150 + 500 мкм

ров над поверхностью для того, чтобы гарантировать дрейф электронов в направлении анодных микрополосок и обеспечить формирование заметного сигнала. Так же, как и в обычной многопроволочной пропорциональной камере, наряду с отрицательным сигналом, который формируется в области облака электронов, на соседних катодных электродах наводится импульс положительной полярности, что позволяет улучшить пространственное разрешение детектора и дает возможность регистрировать вторую координату частицы.

Методика микрополосковых газовых детекторов рассматривается как одно из перспективных направлений для будущих экспериментов на кол-



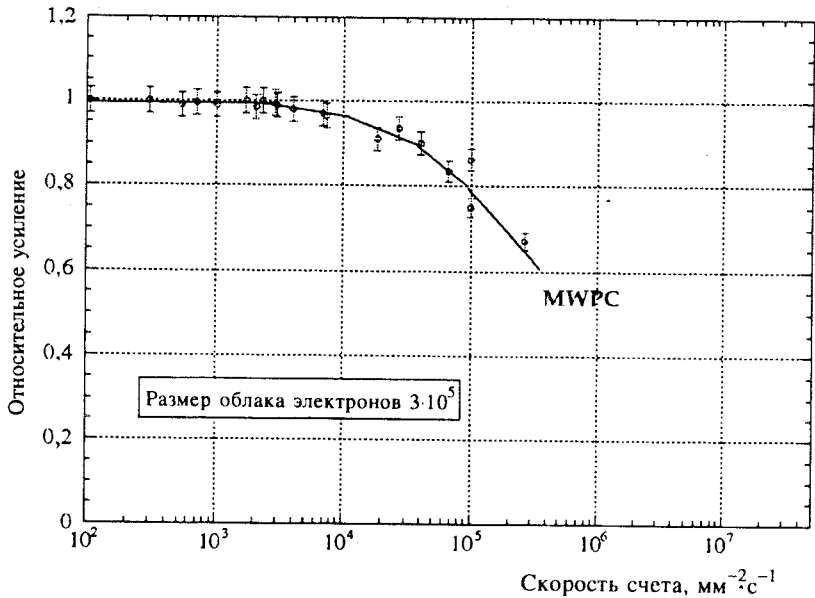


Рис.24. Загрузочная характеристика многопроволочной пропорциональной камеры

лайдерах. Отмечаются следующие положительные качества новых детекторов: относительная простота конструкции, низкая стоимость, высокая радиационная стойкость, и, что весьма важно, наличие газового усиления позволяет упростить электронную систему считывания. Еще одним важным качеством таких детекторов является более высокое быстродействие по сравнению с МПК. На рис.24 приведена кривая, характеризующая относительное усиление в зависимости от скорости счета. Для сравнения на рис.25 приведены значения этого же параметра для микрополоскового газового детектора [46]. Таким образом, микрополосковая газовая камера может работать в условиях потоков, превышающих  $10^6$  частиц на  $\text{мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

В последнее время ведется большое количество исследований, направленных на совершенствование микрополосковых газовых детекторов. Так, работа [45] посвящена исследованию влияния различных газовых смесей на характеристики камеры. Показано, что с целью достижения высокого разрешения весьма перспективными являются две газовые смеси:  $\text{Xe}/\text{DME}/\text{CO}_2$  30/30/40 и  $\text{DME}/\text{CO}_2$  60/40 (DME — диметилэфир). Получена хорошая эффективность и разрешение 30 мкм в газовом объеме толщиной 2,8 мм. В [47] описано устройство и конструкция микрополосковой газовой камеры,

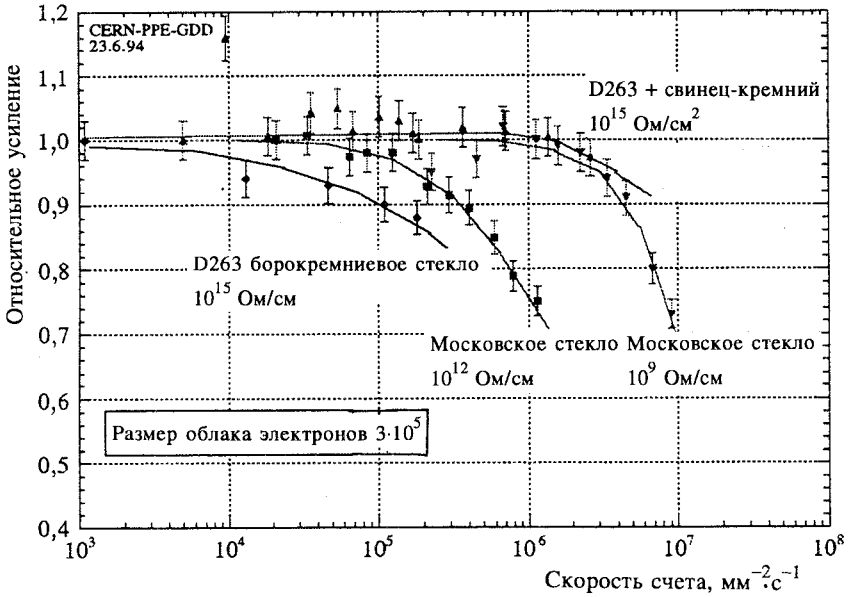


Рис.25. Скоростные характеристики микрополоскового газового детектора в зависимости от проводимости подложки

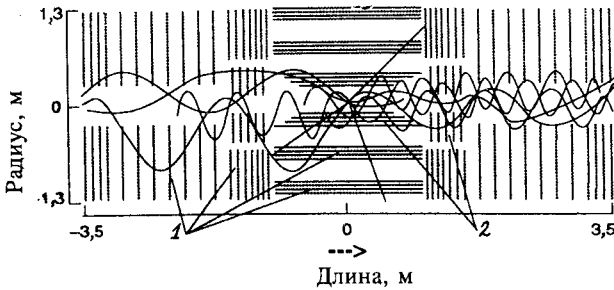
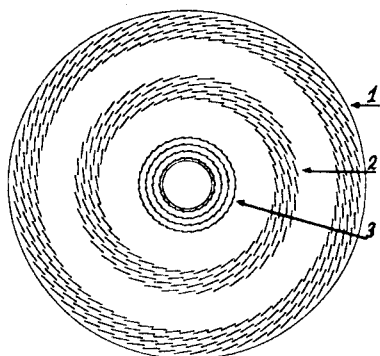


Рис.26. Вид соленоидального детектора (CMS) в плоскости rz: 1 — микрополосковые газовые счетчики, 2 — кремниевые детекторы

отличающейся большой поверхностью ( $10 \times 10$  см), с возможностью чтения сигналов как от анодных микрополосок, так и от катодных. В [48] обобщаются достижения в области методики таких детекторов: точность определения координаты для минимально ионизирующей частицы составляет

Рис.27. Вид соленоидального детектора (CMS) в плоскости  $r\phi$ : 1 — внешние микрополосковые газовые счетчики (камеры); всего имеется 68 счетчиков на один слой; 2 — внутренние микрополосковые газовые счетчики; всего имеется 40 счетчиков на один слой; 3 — полупроводниковые микрополосковые детекторы



30 мкм, что лучше, чем точность дрейфовых камер, и приближается к точности полупроводниковых микрополосковых детекторов, высокая скорость счета (свыше  $10^6 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и хорошее энергетическое разрешение. В [49] приведены результаты применения микрополосковых газовых детекторов в эксперименте NA12. Было использовано восемь плоскостей с общим числом каналов считывания 1100. В [50] описан проект применения в качестве центрального детектора микрополосковых газовых плоскостей в компактном мюонном соленоиде (CMS). Трековая система состоит из двух частей: передней секции и многослойного детектора цилиндрической формы, вид которого в разрезе в плоскости  $r\phi$  показан на рис.26. Центральный слой установки представляет собой полупроводниковый микрополосковый детектор, где детекторные элементы расположены параллельно оси пучка. Второй и третий слои состоят из микрополосковых газовых детекторов, имеющих линейные размеры  $100 \times 100 \text{ мм}$  и толщиной 2–3 мм. В свою очередь, каждый слой разделен на отдельные суперслои, как это видно из рис.27. Точность регистрации координат при считывании дискретным способом должна составлять 40 мкм, а при считывании с катодных микрополосок — не менее 30 мкм. В передней части микрополоскового газового детектора CMS детекторные элементы расположены радиально по отношению к оси пучка. Использование детектора с большой дискретностью по всему объему позволит повысить импульсное измерение заряженных частиц, улучшить точность регистрации координат частиц и упростить конструкцию детектора в целом. На рис.27 приведена схема детектора CMS в разрезе в плоскости  $r\phi$ .

**Двухкоординатные микровершинные детекторы.** Двухкоординатный (пиксель) детектор представляет собой полупроводниковый прибор с большим количеством детекторных элементов, расположенных на двумерной плоскости. Двухкоординатные микровершинные детекторы имеют более широкие перспективы развития по сравнению с однокоординатными детек-

торами. Так, в процессе определения координат  $n$  частиц с помощью однокоординатной детекторной плоскости порождаются столько же неопределенностей («духов»). Если же микрополосковый детектор имеет две плоскости, то при реконструкции треков частиц получается  $n^2$  «духов». Для однозначной реконструкции многотрековых событий требуется детектор, состоящий из шести плоскостей [51]. Такой подход является неприемлемым вследствие следующих факторов: толщина материала, мощность рассеяния, время считывания и т.д. Поэтому более перспективными являются двухкоординатные детекторы. Наиболее широкое применение в качестве таких детекторов находят ПЗС-матрицы и кремниевые детекторы.

**Двухкоординатные детекторы, создаваемые на основе ПЗС-матриц.** Пионерские исследования приборов с зарядовой связью (ПЗС) [52] показали, что ПЗС-матрицы можно успешно использовать для создания прецизионных детекторов элементарных частиц, в том числе и в качестве

вершинных детекторов. Типичные ПЗС-матрицы, используемые в качестве детекторов, имеют следующие характеристики: пространственная точность составляет 3 мкм; разрешение двух треков 60 мкм; временное разрешение 500 нс; время чтения 4–5 мс и радиационная стойкость  $3 \cdot 10^5$  рад, что эквивалентно работе в течение года на пучке с интенсивностью  $10^6$  в банче. Так же, как и микрополосковые детекторы, ПЗС-матрицы используются как в экспериментах с фиксированной мишенью, так и на коллайдерах. Подробное описание принципа действия ПЗС-матриц содержится

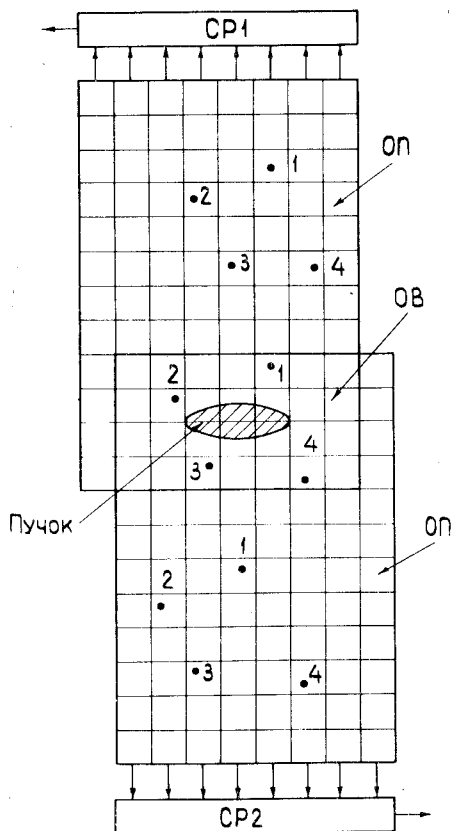


Рис.28. Метод совмещения регистрации запоминания данных, применяемый в микровершинных детекторах на основе ПЗС-матриц: СП1 и СП2 — сдвиговые регистры; ОП — область памяти; ОВ — область детектора; 1 + 4 — срабатывавшие ячейки

в обзоре [53]. Активная поверхность матрицы обычно равна  $1 \text{ см}^2$ , а размеры одной ячейки —  $22 \times 22 \text{ мкм}$ . В эксперименте NA32 вершинный детектор, наряду с ПЗС-матрицами, содержит также восемь микрополосковых детекторов. Поскольку ПЗС-матрицы могут работать при большей плотности треков, то они помещаются ближе к мишени. Точность регистрации первичной вершины распада в таком детекторе составляет  $2 \text{ мкм}$  [54].

В экспериментах с фиксированной мишенью телескоп из ПЗС-матриц используется совместно с активной мишенью. Минимально ионизирующая частица порождает в детекторе заряд, равный 1000 электронам, и для уменьшения уровня шумов детектор помещается в криостат при температуре азота. Известны два метода чтения данных от ПЗС-матриц, используемых в качестве детекторов. В первом методе [55] две ПЗС-матрицы располагаются так, что они только частично перекрываются (рис.28). В результате получаются две зоны. Общая зона используется как детектор, а оставшаяся часть — в качестве памяти. Причем считывание выполняется с частотой  $1 \text{ МГц}$  и в противоположных направлениях, что упрощает идентификацию треков. Во время банча данные сдвигаются в область памяти и после поступления тритерного сигнала подача тактовых импульсов прекращается. Далее выполняется чтение информации во внешнюю память. Применяется также схема отделения треков, не связанных с тритерным сигналом [56]. Данные из четных и нечетных матриц считываются в противоположных направлениях. В процессе реконструкции треков предполагается что сигналы, поступившие от нужной частицы, имеют равное время чтения (в единицах тактовой частоты). В данной работе ПЗС-матрица, имеющая тактовую частоту  $6,75 \text{ МГц}$ , функционирует при комнатной температуре и содержит  $2,3 \cdot 10^5$  ячеек ( $576$  столбцов по  $385$  ячеек в каждом столбце).

**Микровершинный детектор SLD.** Детектор предназначен для использования в экспериментах, проводимых на линейном коллайдере [51]. В настоящее время известны две модификации детектора, которые условно назовем SLD1 [51] и SLD2 [57]. Общий вид двух половинок детектора SLD1 приведен на рис.29. Детектор состоит из четырех концентрических слоев, покрытых с обеих сторон ПЗС-матрицами. Радиусы внешнего и внутреннего слоев равны  $41,5$  и  $29,5 \text{ мм}$ . Всего смонтировано  $480$  ПЗС-матриц, содержащих  $120 \cdot 10^6$  пикселей. ПЗС-матрицы смонтированы на  $60$  модулях по  $8$  ПЗС-матриц на каждом модуле. Модули смонтированы на двух полуцилиндрах, изготовленных из бериллия. Что касается непосредственно ПЗС-матрицы, то она изготовлена на подложке из кремния и имеет размер пикселя  $20 \text{ мкм}^2$ . Всего на подложке расположено  $16 \cdot 10^6$  пикселей. Будучи на порядок тоньше микрополоскового детектора, SLD, изготавливаемый на основе ПЗС-матриц, дает лучшее разрешение наклонных треков (порядка  $5 \text{ мкм}$ ). С целью оптимизации радиационных потерь и уменьшения шумов

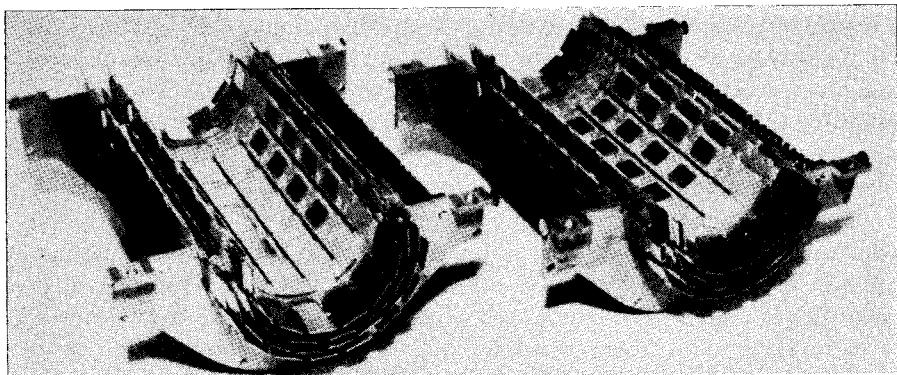


Рис.29. Общий вид двух половин микровершинного детектора SLD

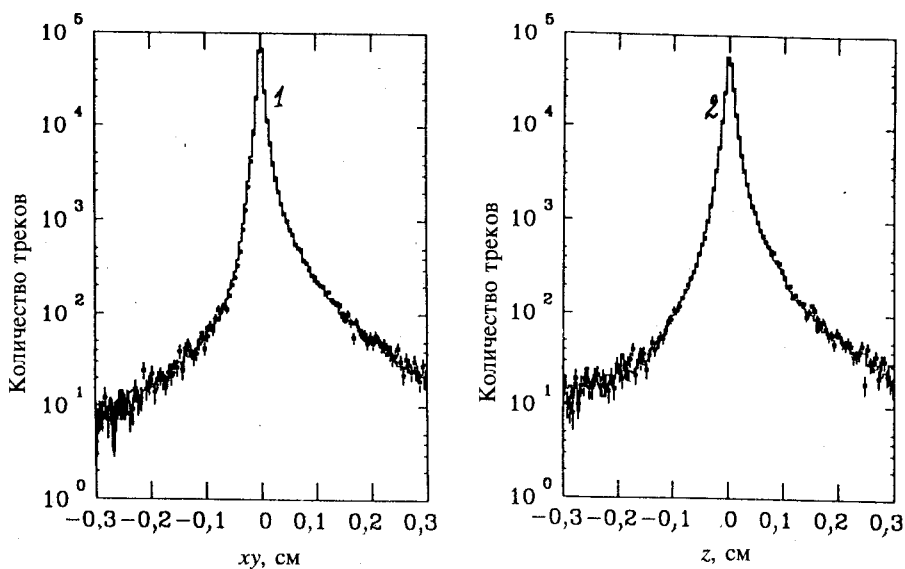


Рис.30. Распределение прицельного параметра в плоскостях  $xu$  и  $rz$  для треков, принадлежащих адронному  $Z^0$ -распаду: 1 — прицельный параметр в плоскости  $xu$ , 2 — прицельный параметр в направлении  $rz$

детектор помещен в криостат при температуре  $180^\circ\text{K}$ . Отмечаются следующие положительные качества таких детекторов [57].

1. Высокая дискретность ячеек и отсутствие высокого напряжения питания или какого-либо способа умножения зарядов. Как следствие этого, детектор имеет высокую помехоустойчивость.

2. Практическое отсутствие кластеров облегчает фитирование треков.
3. На каждую точку трека получается по две координаты.
4. Эксплуатация в течение трех лет показала, что детектор отличается высокой стабильностью во времени.

На рис.30 приведено распределение прицельного параметра в плоскостях  $xu$  и  $rz$  для треков от  $Z^0$ -распада. Получены следующие основные параметры: пространственное разрешение 5 и 6 мкм в плоскости  $xu$  и в направлении  $z$  соответственно. Величина прицельного параметра измерялась для двух треков с большой кривизной. При этом использовалась мюонная пара от  $Z^0$ -распада. Гауссовское фитирование дало такие величины для разрешения одного трека: 11 мкм для  $xu$  и 38 мкм для  $rz$ .

В табл.8 приведены сравнительные параметры микровершинных детекторов SLD1 и SLD2 [57].

Микровершинный детектор SLD2 должен быть введен в эксперимент в 1995 г. Как видно из табл.8, для создания детектора были использованы специально разработанные ПЗС-матрицы больших размеров и с повышенными временными параметрами, что позволило уменьшить время считывания и улучшить разрешение прицельного параметра. Поскольку на ускорителе SLAC частота встречи банчей составляет всего 120 Гц, то большое время считывания сигналов от детектора порядка 160 мс не сказывается на эффективности работы ПЗС-матриц.

**Таблица 8. Сравнительные параметры детекторов SLD1 и SLD2**

Параметр	SLD1	SLD2
Количество слоев	4	3
Количество модулей	60	48
Количество ПЗС-матриц	480	96
Количество пикселей	$110 \cdot 10^6$	$307 \cdot 10^6$
Активные размеры ПЗС-матрицы, см	1,3-0,9	8,0-1,6
Активная длина ( $z$ ), см	9,2	15,9
Количество пикселей на трек	2,3	3,2
Частота считывания, МГц	2	10
Время считывания, мс	160	100
Прицельный параметр ( $xu$ ), мкм	$11 + 70/p$	$9 + 29/p$
Прицельный параметр ( $rz$ ), мкм	$39 + 70/p$	$14 + 29/p$

Знак + означает сложение в квадрате;  $p$  — импульс, Гэв/с.

## 5. КРЕМНИЕВЫЕ ДВУМЕРНЫЕ РЕГИСТРАТОРЫ

Задача ставится таким образом, чтобы разработать двумерный регистратор, сочетающий одновременно все преимущества микрополосковых кремниевых детекторов и ПЗС-матриц и содержащий не только усилители, но и

преобразователи информации. Возникающие при этом технологические проблемы обсуждаются в работе [58]. Используя современную технологию, трудно сформировать на одном кристалле  $10^6$  диодов, расположенных в виде матрицы. Проблема заключается в создании адекватной по размерам и обладающей высоким быстродействием регистрирующей электроники при малой рассеиваемой мощности. Описанный в [59] прототип кремниевых регистраторов имеет детектор, содержащий 1024 диода ( $32 \times 32$ ), параллельный АЦП и шифратор координат. Шифратор координат построен на компараторах и поэтому возникают неопределенности при шифрации множественных событий. В более сложной разработке для выборки сработавших столбцов и строк с последующей шифрацией координат сработавших ячеек используется приоритетный шифратор [60]. В работе [61] проблема быстрой и экономичной системы считывания сигналов решается путем применения мат-

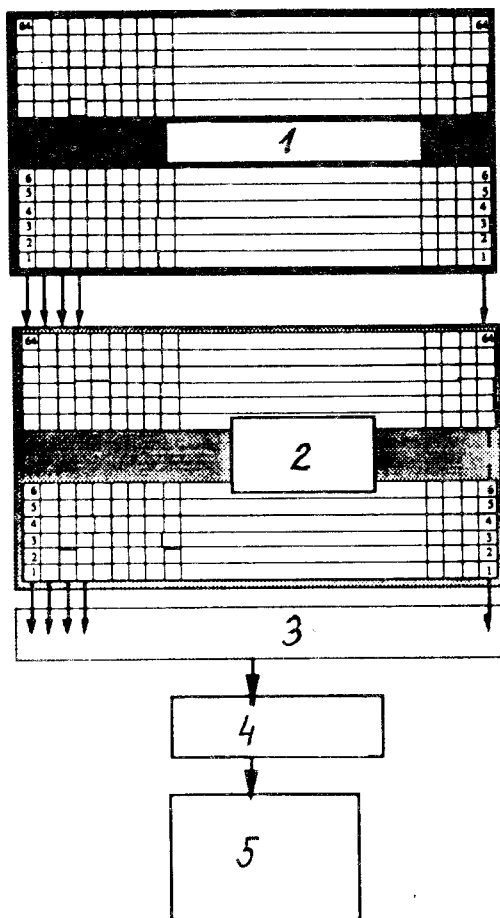


Рис.31. Применение памяти конвейерного типа для считывания сигналов с двухкоординатного детектора: 1 — двухкоординатный детектор, 2 — запоминающее устройство конвейерного типа, 3 — мультиплексор, 4 — оптическая связь, 5 — накопительное запоминающее устройство



рицы переключаемых конденсаторов, работающих в конвейерном режиме. Такая память, по существу, представляет собой микроэлектронный аналог обычной схемы задержки. При этом работа такой памяти разделяется на две фазы: чувствительную фазу, во время которой детектор облучается, и фазу чтения данных. На рис.31 приведена блок-схема двухкоординатного детектора с памятью на переключаемых конденсаторах. Данные в память записываются после процесса экспозиции детекторной части модуля. Запись выполняется по колонкам, в то время как считывание идет по строкам с частотой 100 МГц с помощью мультиплексора. Далее по оптической линии связи информация передается в общую память.

В последнее время был разработан ряд модулей двухкоординатных полупроводниковых детекторов с хорошими параметрами. В [62] описан гибридный двухкоординатный детектор, содержащий матрицу из  $96 \times 378$  (36288) чувствительных элементов, расположенных на площади  $75 \times 500$  мкм. Модуль предназначен для эксперимента WA97 (ЦЕРН). На рис.32 приведен общий вид шести модулей вместе с процессорной платой и соответствующими соединительными проводниками. В одной микросхеме содержится

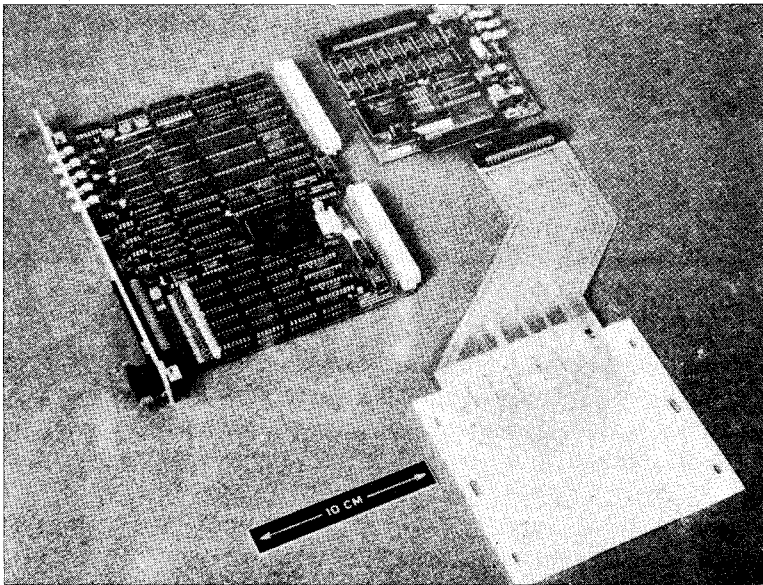


Рис.32. Матрица из шести модулей, содержащая 32288 детекторных элементов, вместе с процессорными платами

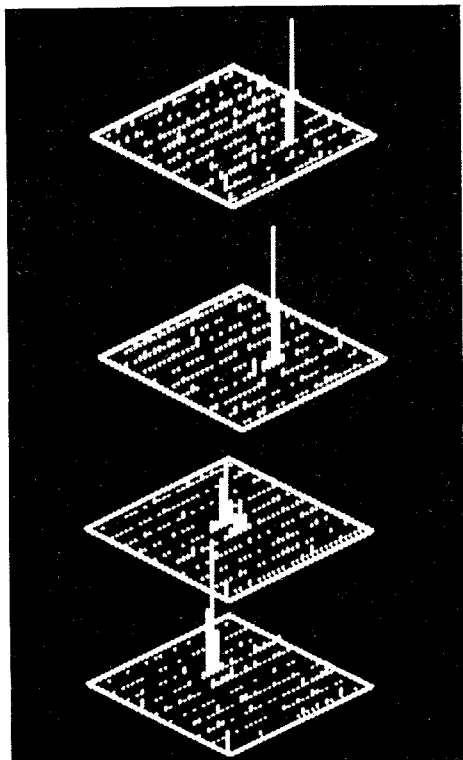


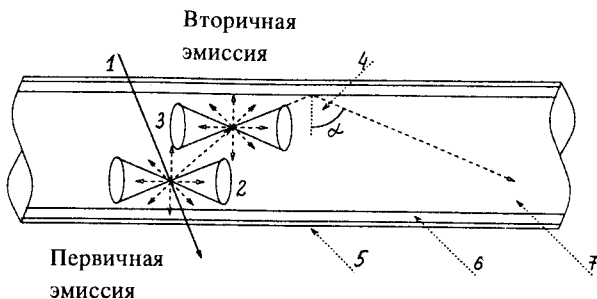
Рис.33. Дисплейная картина прохождения заряженной частицы сквозь четыре плоскости двухкоординатных детекторов

шесть матриц. Получено разрешение двух треков не хуже 10 мкм. Каждый чувствительный элемент имеет свой канал усиления, дискриминации и запоминания сигналов. С помощью рис.33 иллюстрируются методические возможности двухкоординатных полупроводниковых детекторов в процессе восстановления трека частицы. Для точного определения координат частиц при наличии кластеров используется известная формула определения координаты методом вычисления центра тяжести сигнала [62,63].

## 6. ВЕРШИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, СОЗДАВАЕМЫЕ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ

Развитие технологии обычных волоконно-оптических световодов (СВОС), микроэлектроники и оптоэлектроники создало предпосылки для разработки быстродействующих и прецизионных вершинных детекторов на основе СВОС. Детекторы элементарных частиц, использующие пучки тонких сцинтилляторов, впервые использовались в конце 50-х гг. [64]. Однако они не получили широкого применения вследствие разработки более эффективных трековых детекторов, таких как пузырьковые и искровые камеры. В обзорах [65,66] рассмотрены вопросы технологии и различные аспекты применения СВОС в качестве детекторов элементарных частиц, активных мишеней, трековых детекторов, а также для создания калориметров и пр. Отдельный СВОС (рис.34) состоит из сердечника, выполненного на основе

Рис.34. Геометрические и оптические параметры типичного СВОО: 1 — трек частицы; 2 — первичная эмиссия, 3 — вторичная эмиссия, 4 — критический угол отражения, 5 — внешняя оболочка, 6 — внутренняя оболочка, 7 — сердечник



пластического или стеклянного сцинтиллятора, покрытого материалом с меньшим коэффициентом преломления света. Кроме того, СВОО имеет еще внешнюю тонкую оболочку из черного стекла. Пластические СВОО имеют следующие преимущества по сравнению со СВОО из стекла: более высокий (4–5 раз) световыход; на порядок меньшее время высвечивания (3 нс и 55 нс соответственно); более высокая радиационная стойкость; простота изготовления. Однако используемые в экспериментах СВОО на основе стекла имеют внутренний диаметр порядка 10 мкм против  $50 + 500$  мкм у пластиковых. Разработаны пластиковые СВОО с диаметром 30 мкм [67]. Более подробно сравнительные характеристики обоих типов СВОО приведены в [68]. Показано, что, используя в качестве активной мишени СВОО диаметром 30 мкм, можно получить разрешение двух треков порядка 20 мкм.

В поперечном разрезе СВОО могут иметь круглую, прямоугольную и даже шестиугольную форму. Последние два типа СВОО позволяют создавать детекторы с большой плотностью сцинтиллирующего материала [69]. Для построения активной мишени отдельные СВОО собираются в пучки цилиндрической или прямоугольной формы сечением  $15\text{--}20\text{ мм}^2$  и длиной несколько сантиметров. В зависимости от физики изучаемых событий (угла разлета частиц) пучок СВОО располагается либо перпендикулярно, либо параллельно пучку (рис.35,б,в) [70]. При этом световое изображение события как бы проецируется на выходную светочувствительную поверхность первого каскада оптоэлектронной системы, где оно усиливается и передается на систему считывания. В качестве примера рассмотрим использование СВОО в составе прецизионного вершинного детектора в эксперименте WA84 (ЦЕРН) [71]. Задача состоит в измерении времени жизни заряженных и нейтральных  $B$ -мезонов (рис.36). Распадная длина  $B$ -мезона  $L = 400$  мкм. Сложность топологии изучаемых событий и короткое время жизни частиц ставят следующие требования к вершинному детектору: эффективная работа в интенсивном пучке как минимум  $10^6$  частиц/с; высокая

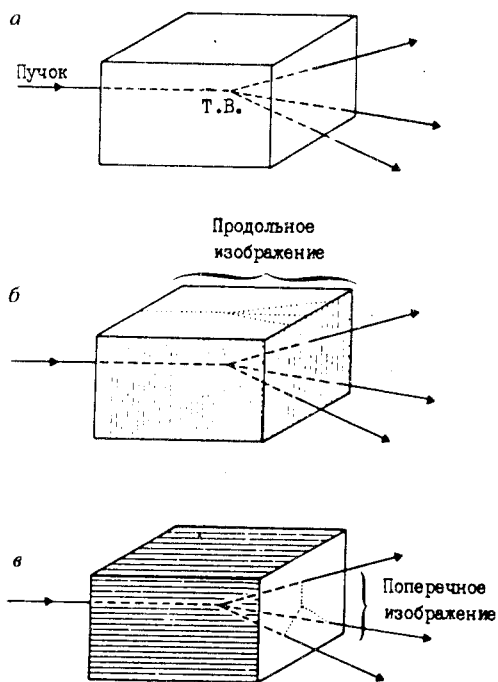


Рис.35. Сцинтилляционные мишени: а) твердый сцинтиллятор; б, в) мишени на основе СВОС, расположенные перпендикулярно и параллельно пучку

радиационная стойкость; точность регистрации треков 5 мкм; работа в триггерном режиме; возможность измерения кривизны треков.

Описываемый вершинный детектор удовлетворяет этим условиям, так как он выполнен на основе СВОС со стробируемой оптоэлектронной системой усиления и считывания данных с помощью ПЗС-матрицы. Кроме того, в состав вершинного детектора входит также телескоп из микрополосковых полупроводниковых детекторов, с помощью которого более эффективно восстанавливаются топологии событий. Из-за слабого световыхода, получаемого от активной мишени, между последней и ПЗС-матрицей помещается система усиления света, схематическое изображение которой приведено на рис.37. Большинство усилителей света не могут эффективно работать в магнитном

поле, поэтому активная мишень располагается в передней части магнитного спектрометра. Она состоит из параллельного жгута СВОС диаметром 30 мкм, расположенных вдоль пучка частиц. Вертикальная составляющая магнитного поля в области мишени равна 1,8 Тл, поэтому пятикаскадная оптоэлектронная система разделена на две части. Первая часть системы с коэффициентом усиления 20 расположена около мишени. С помощью световода длиной 2,5 м световое изображение события передается в область с магнитным полем 0,1 Тл. Вторая часть системы, помещенная в магнитный экран, используется для усиления изображения события примерно в  $10^4$  раз и передачи его на ПЗС-матрицу. Как это следует из рис.37, мишень оптически соединена непосредственно с оптоволоконным световодом, за которым следует пара электронно-оптических усилителей с электростатической фокусировкой. Вторая часть системы усиления состоит из трех микро-

канальных пластин, которые работают в стробируемом режиме. Заканчивается оптоэлектронная система ПЗС-матрицей емкостью  $16 \cdot 10^4$  ячеек, которая разделена на две зоны: зону изображения и зону памяти. Триггерная система вершинного детектора состоит из двух уровней. На первом уровне с помощью сцинтилляционного телескопа формируется строб-импульс для оптоэлектронной системы. Этот сигнал появляется через 80 нс после взаимодействия. Триггерный сигнал второго уровня, поступающий через 400 нс, вырабатывается с помощью сцинтилляционных годоскопов и используется как стартовый импульс для чтения данных из ПЗС-матрицы. Чувствительная поверхность ПЗС-матрицы равна  $1 \text{ см}^2$  и поэтому хорошо согласуется с раз-

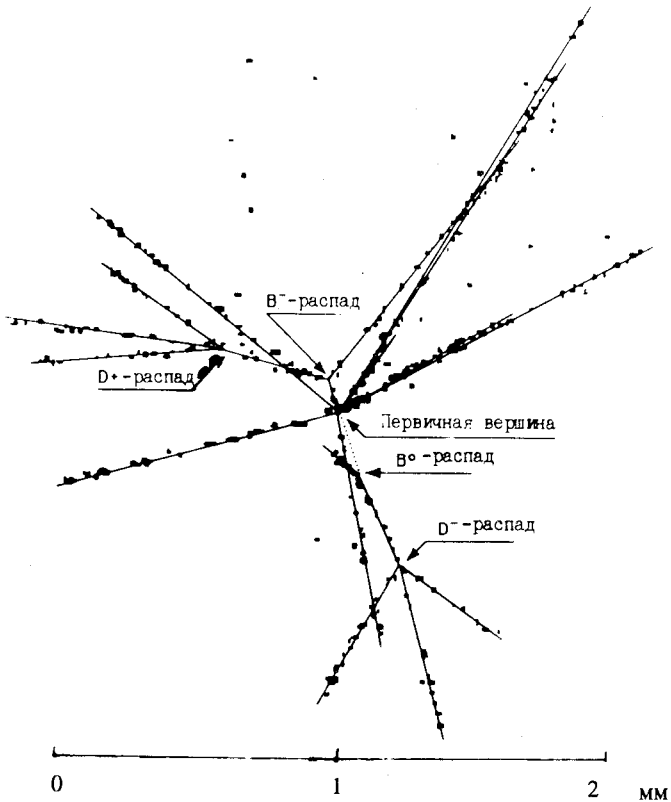


Рис.36. Общий вид  $BB^-$ -продуктов распада в плоскости, поперечной пучку частиц, полученный путем моделирования методом Монте-Карло. Наряду с первичной вершиной распада видны также четыре вторичные вершины

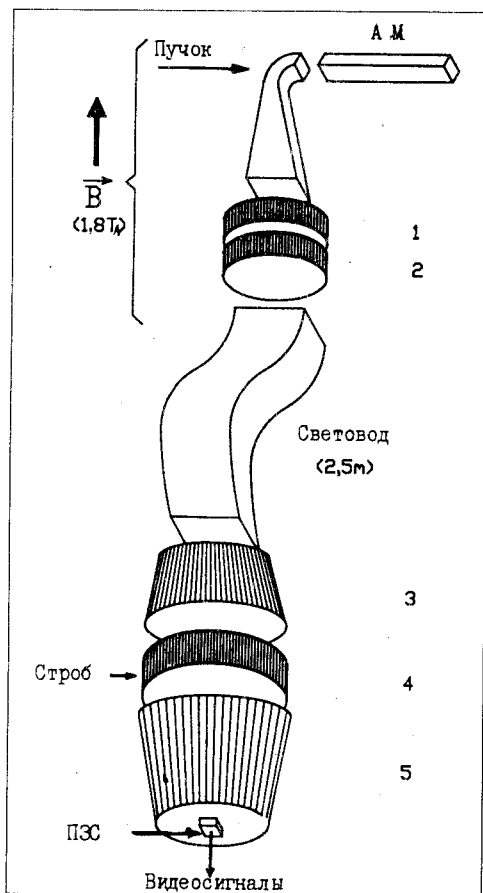


Рис.37. Схематическое изображение активной мишени вершинного детектора WA84: АМ — активная мишень; 1 + 5 — электронно-оптические усилители

мерами активной мишени. Аналогичное согласование имеет место между отдельными СВАО и ячейками ПЗС-матрицы ( $20 \times 20$  мкм).

Разработанный вершинный детектор на основе СВАО был протестирован на пучке ускорителя. Были получены следующие данные: средняя плотность зарегистрированных точек составляла 0,7 на мм; разрешение двух точек 33 мкм; на фоне полезных событий имеется существенный фон, который возникает от всех составляющих вершинного детектора [72].

В работе [73] проведен детальный анализ шумов, возникающих в вершинных детекторах, создаваемых на базе СВАО, как с теоретической точки зрения, так и с учетом данных эксперимента. Основными источниками шумов являются оптические перекрестные связи в мишени, рассеяние электронов в усилителях света и помехи от ПЗС-матрицы. На рис.38 приведено событие, зарегистрированное в пучке частиц с энергией 200 ГэВ: а) без фильтрации и б) с обработкой с помощью программы, учитывающей значение порога и пьедестала в ПЗС-матрице.

Совершенствование параметров оптоэлектронной системы может быть достигнуто путем как повышения световых выходов СВАО, так и улучшения квантовой эффективности электронно-оптических преобразователей. В описанном в [74] трековом детекторе получено разрешение двух треков на уровне 52 мкм и точность измерения прицельного параметра 9 мкм. Фильтрация и реконструкция событий выполняется в следующей последовательности:

1) Восстановление наиболее вероятных точек трека. Например, точки, ассоциированные менее чем с тремя бинами, отбрасываются.

2) Через центры восстановленных точек проводятся кандидаты в треки событий.

3) Используя заданные критерии, восстанавливаются полезные треки и топологии событий.

Если сравнивать вершинные детекторы, создаваемые на базе СВОС, с микрополосковыми полупроводниковыми детекторами, то при практически одинаковом разрешении первый тип детектора имеет всего одну плоскость считывания, что существенно упрощает систему регистрации информации. Единственным, пожалуй, слабым местом остается время считывания данных. Однако в связи с бурным развитием и совершенствованием мультианодных и позиционно-чувствительных ФЭУ с рабочей частотой до 100 МГц [75–77]

оптоэлектронные вершинные детекторы получают еще более широкое применение, особенно в экспериментах на коллайдерах. Создаваемый для таких экспериментов вершинный детектор на основе СВОС имеет цилиндрическую форму с четырьмя концентрическими детекторными плоскостями. Предполагается, что точность измерения прицельного параметра будет не хуже 20 мкм [78]. Ценные качества СВОС стимулируют дальнейшие исследования, направленные на улучшение такого важного параметра, как длина затухания  $\lambda$  — величина, при которой амплитуда сигнала уменьшается в  $e$  раз. В [79] описана разработка пластикового СВОС с  $\lambda = 2,8$  м. Такое достижение существенно расширяет область применения СВОС в физике высоких энергий.

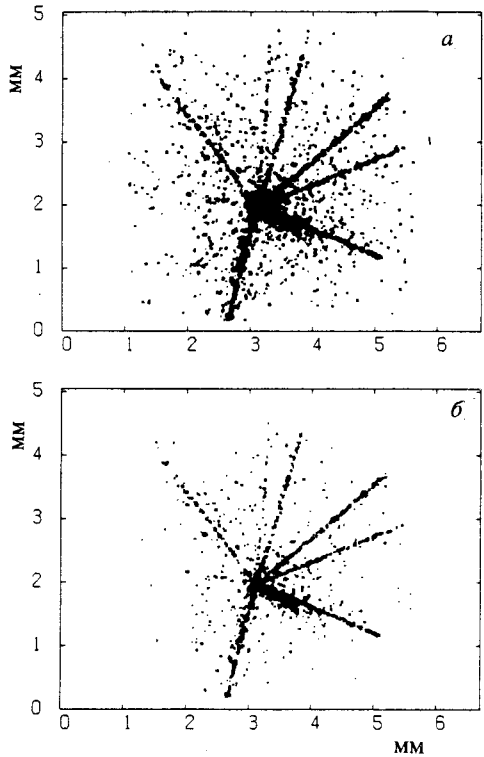


Рис.38. Топология события: а) до фильтрации шумов; б) после фильтрации

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полупроводниковые детекторы обеспечивают точность регистрации координат событий в микрометровом диапазоне и с учетом хорошо разработанной технологии имеют широкие перспективы массового изготовления и применения в качестве высокопрецизионных вершинных детекторов. Однако микрополосковые кремниевые детекторы с чтением данных с одной стороны кристалла имеют такой же недостаток, что и многопроволочные пропорциональные камеры — трудность реконструкции событий с большой множественностью, и их использование в экспериментах требует большого количества электроники и усложняет конструкцию вершинных детекторов. Поэтому разработка кремниевых микрополосковых детекторов с двусторонним считыванием обеспечивает дальнейшее развитие и использование этого типа детекторов в будущих экспериментах.

ПЗС-матрицы классического типа оказались во многих отношениях отличными двумерными регистраторами с памятью. Кроме того, малые размеры чувствительной ячейки хорошо согласуются с размерами СВОС. Поэтому ПЗС-матрицы широко используются в качестве монитора световых изображений в прецизионных детекторах, создаваемых на основе СВОС. Единственный, пожалуй, недостаток применяемых ПЗС-матриц — малая скорость считывания (десятки миллисекунд).

Новым этапом в развитии двумерных регистраторов следует считать разработку двухкоординатных кремниевых детекторов, в которых на одной подложке наряду с чувствительными ячейками изготавливается как регистрирующая электроника, так и устройства оцифровки и шифрации данных.

Микрополосковые газовые детекторы, которые уже начали использоваться в экспериментах, имеют широкие перспективы применения в будущих экспериментах.

Разработка прецизионных вершинных детекторов на основе СВОС несет в себе новое качество: применение для детектирования сложных событий оптических методов. В результате в вершинном детекторе используется только одна плоскость считывания данных — ПЗС-матрица. Как следствие, резко уменьшается число каналов считывания. В свою очередь, разработка мультианодных ФЭУ, содержащих до 1024 дискретных светочувствительных ячеек, позволит в будущем резко повысить быстродействие вершинных детекторов, создаваемых на основе СВОС [80].

В будущих экспериментах в качестве вершинных детекторов предполагается использовать также микрополосковые газовые детекторы.



Бурное развитие методики прецизионных вершинных детекторов стимулирует развитие специализированных интегральных микросхем и методики регистрации полезных событий и реконструкции треков в реальном времени. Наряду со специализированными процессорами, разрабатываемыми непосредственно для данного типа детектора, наметилась тенденция в создании трековых процессоров универсального типа на основе быстродействующих программируемых логических матриц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **McKey K.G.** — Phys. Rev., 1951, vol.84, p.829.
2. **Hall G.** — Reports on Progress in Physics, 1994, vol.57, p.49.
3. **McKenzie J.M.** — Nucl. Instr. and Meth., 1979, vol.162, p.49.
4. **Rehak P., Gatti E.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.410.
5. **Radeka V.** — Nucl. Instr. and Meth., 1984, vol.226, p.209.
6. **Klanner R.** — Preprint Max-Plank-Institut, MPI-PAE/Exp. E1. 135, Munchen, 1984.
7. **Batignini G., Bosi F., Basis L. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A274, p.147.
8. **Barate R., Bolamy P., Borgeaud P. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1985, vol.A235, p.235.
9. **Amendolia S.R., Batignini G., Gimmarchi M. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1984, vol.226, p.78.
10. **Adinolfi M., Angelini C., Barney D. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, vol.A329, p.117.
11. **Bellini C., Gimmarchi M., Manfredi P.F.** — Nucl. Instr. and Meth., 1986, vol.A252, p.366.
12. **Boland J.F., Beusch W., Dameri M. et al.** — Nucl. Physics (Proc. Suppl.), 1B, 1988, p.303.
13. **Darbo G., Rossi L.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.584.
14. **Darbo G., Heck B.W.** — Nucl. Instr. and Meth., 1987, vol.A257, p.567.
15. **Darbo G.** — Nucl. Instr. and Meth., 1981, vol.190, p.81.
16. **Beer A., Coree A., Forthaut Ph. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1994, vol.A337, p.280.
17. **Amendolia S.R., Bedeshi F., Belletini G. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.539.
18. **Denby B., Linblad Th., Lindsey G.S. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, vol.A335, p.296.
19. **Gadomski S., Turala M.** — Nucl. Instr. and Meth., 1994, vol.A344, p.125.
20. **Schwarz A.S.** — Preprint Max-Plank-Institut. MPI-PhE/92-05. Munchen, 1992.
21. **Adolphsen C., Jacobsen R.G., Luth V. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1992, vol.A313, p.63.
22. **Bingefors N., Borner H., Boulter R. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, vol.A328, p.447.

23. **Holl P., Dietl H., Fent J. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1987, vol.A257, p.587.
24. **Batignini G., Bauer C., Becker H. et al.** — Preprint INFN, INFN PI/AE 90/17, Pisa, 1990.
25. **Batignini G., Bauer C., Becker H. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, vol.A326, p.183.
26. **Brener R., Harr R., Rudge A. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, vol.A326, p.189.
27. **Allport P.P., Batley J.R., Beck G.A. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, vol.A324, p.34.
28. **Allport P.P., Batley J.R., Beck G.A. et al.** — Preprint CERN, CERN-PRE/94-16, Geneva, 1994.
29. **Alpat B., Ambrosi G., Barbagli G. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1992, vol.A315, p.197.
30. **Acciarri M., Adam A., Adriani O. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1994, vol.351, p.300.
31. **Ambrosi G., Babucci E., Battiston R. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1994, vol.A344, p.133.
32. **Carithers W.C., Ely R.P., Haber C. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.388.
33. **Barnet B., Boswell C., Mathews J. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1992, vol.A315, p.125.
34. **Tkaczuk S., Carter H., Flaughner B. et al.** — Preprint CDF/PUB/SEC/VTX/PUBLIC/2274, Fermilab-Conf-93/290-E, 1993.
35. **ATLAS Letter to Intent.** CERN/LHCC/92-4, LHCC-12, Geneva, 1992.
36. **CMS. The Compact Muon Solenoid.** CERN/LHCC 92-3, LHCC/11, Geneva, 1992.
37. **Gatti E., Manfredi P.F.** — Nucl. Instr. and Meth., 1984, vol.226, p.142.
38. **Butter W., Lutz G., Bergman V. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1988, vol.A273, p.778.
39. **Dorfan D.E.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.279, p.186.
40. **Brener R., Von der Lippe H. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1994, vol.A339, p.564.
41. **Kleinfelder S.A.** — IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1990, vol.NS-37, p.1230.
42. **Munday D., Parker A., Anghinolfi F. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, vol.A326, p.100.
43. **Oed A.** — Nucl. Instr. and Meth., 1988, vol.A283, p.351.
44. **Angelini F., Belazzini R., Brez A. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A283, p.755.
45. **Sauli F.** — Preprint CERN. CERN-PRE/94-150, Geneva, 1994.
46. **Geijsberts M., Hartes F.G., Pannekoek J.G. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1992, vol.A313, p.377.
47. **Angelini F., Belazzini R., Brez A. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, vol.A336, p.106.

48. **Bouclier R., Million G., Ropelevski L. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, vol.A332, p.100.
49. **Angelini F., Belazzini R., Brez A. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1992, vol.A315, p.21.
50. **Bedjidian M., Contardo D., Evangelov I. et al.** — Nucl. Physics (Proc. Suppl.), 1993, vol.32, p.189.
51. **Damarell C.J.S.** — Preprint Rutherford Appleton Laboratory. RAL-94-096. Daresbery, 1994.
52. **Damarell C.J.S., Farley F.J.M., Gillman A.R. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1981, vol.185, p.33.
53. **Сороко Л.М.** — ЭЧАЯ, 1979, т.10, вып.10, с.33.
54. **Damarel C.J.S., English C.L., Gillman A.R. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A275, p.484.
55. **Manfredi P.F., Ragusa F.** — Nucl. Instr. and Meth., 1986, vol.A252, p.208.
56. **Bacciolini M., Conti A., Caporiacco D. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1985, vol.A240, p.36.
57. **Strauss M.G.** — Preprint SLAC-PUB-6686, Stanford, 1994.
58. **Heine H.M., Jarron P.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A275, p.467.
59. **Dierickx B.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A275, p.542.
60. **Parker S.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A275, p.494.
61. **Hall G.** — Preprint Blackett Lab. IC/HEP/94-9, London, 1994.
62. **Heijne E.H., Antinori F., Arnold R. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1994, vol.A349, p.138.
63. **Kenney C., Parker S., Snoeys W. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1993, vol.A326, p.144;  
**Kenney C., Parker S.** — Nucl. Physics B (Proc. Suppl.), 1993, vol.32, p.460.
64. **Reynholds G.T., Condon P.E.** — Rev. Science Instr., 1957, vol.28, p.1098.
65. **Kirby J.** — Preprint CERN-EP/87-60, Geneva, 1987.
66. **Simon A.** — Preprint CERN/PRE 92-95, Geneva, 1992.
67. **Angelini C., Beush W., Cardini A. et al.** — Preprint CERN-EP/89-120, Geneva, 1989.
68. **Angelini C., Beush W., Cardini A. et al.** — Preprint CERN-EP/89-112, Geneva, 1989.
69. **Angelini C., Beush W., Cardini A. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.342.
70. **Fisher C.** — Nucl. Instr. and Meth., 1988, vol.A263, p.159.
71. **Angelini C., Beush W., Bloodworth I.J.** — Nucl. Instr. and Meth., 1989, vol.A277, p.132.
72. **Angelini C., Beush W., Cardini A.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.342.
73. **Angelini C., Beush W., Cardini A.** — Nucl. Instr. and Meth., 1990, vol.A289, p.356.
74. **Atkinson M.N., Crennell D.J., Fisher C.M. et al.** — Nucl. Instr. and Meth., 1988, vol.A263, p.333.

75. Salomon M., Coombes H., Nissen M. et al. — IEEE Trans. on Nucl. Science, 1987, vol.NS-34, p.525.
76. Bahr J., Hiller K., Hoffmann et al. — Preprint DESY 93-201, Zeuten, 1993.
77. Agoritas V., Akchurin N.N., Bergdolt A.M. et al. — Preprint CERN-PRE/94-126, Geneva, 1994.
78. Atkinson M., Crennell D., Fisher C.M. et al. — Nucl. Instr. and Meth., 1985, vol.A237, p.505.
79. Takasaki F., Saito H., Shimizu T. — Nucl. Instr. and Meth., 1987, vol.A262, p.224.
80. Timothy J.G. — IEEE Trans. on Nucl. Science, 1985, vol.NS-32, p.427.