

КООРДИНАТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

А.Г.Чилингаров

Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск

Дается обзор возникшего в начале 80-х годов и бурно развивавшегося в последнее десятилетие направления в методике экспериментов по физике элементарных частиц: координатных полупроводниковых детекторов. Описаны основные типы применяемых детекторов и их важнейшие характеристики. Приведены примеры использования детекторов в конкретных экспериментах по физике высоких энергий и перечислены некоторые предельно достигнутые параметры. Описаны специализированные микросхемы, применяющиеся для съема сигналов с микрополосковых детекторов. Рассмотрен вопрос о радиационной стойкости детекторов и сопутствующей электроники. Описано несколько новейших разработок в области полупроводниковых координатных детекторов и фотоприемников на их основе.

A review is given of semiconductor coordinate detectors — a new field in experimental technique for elementary particle physics appeared in early 80's and extensively developed during the last ten years. The main types of the detectors and their most important characteristics are described. The examples of the detector applications in several high-energy physics experiments and some record achieved parameters are given. The dedicated chips for microstrip detector readout are described. The question of radiation hardness of the detectors and front-end electronics is considered. Several new developments in semiconductor coordinate detectors and related photosensitive devices are described.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые детекторы являются хорошо известными в экспериментальной физике приборами и применяются уже почти сорок лет [1]. Они используются для регистрации всех видов излучений как в спектретрических, так и в координатных измерениях. В начале 80-х годов возник новый класс полупроводниковых координатных детекторов — микрополосковые [2,3]. Их появление было стимулировано потребностями физики высоких энергий и элементарных частиц. Уникальные возможности сверхточных координатных измерений с помощью таких детекторов обусловили быстрое развитие этой методики и появление боль-

шого числа перспективных приборов и разработок в области как самих координатных детекторов, так и специализированной микроэлектроники к ним [4—6]. На основе этих разработок возникли и новые предложения по спектрометрическим полупроводниковым детекторам, например, дрейфовые фотодиоды (см. разд.6). Настоящий обзор посвящен прогрессу в этой области методики экспериментов по физике элементарных частиц, достигнутому за прошедшее десятилетие.

1. СВОЙСТВА КРЕМНИЯ КАК ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА ДЕТЕКТОРОВ

Практически все используемые в настоящее время в физике элементарных частиц полупроводниковые детекторы сделаны из кремния. Поэтому целесообразно привести здесь основные характеристики этого материала.

Сравнительно малая ширина запрещенной зоны в кремнии (1,1 эВ) приводит к тому, что на образование одной электрон-дырочной пары расходуется 3,6 эВ, что примерно на порядок меньше, чем в газовых детекторах [7]. Это дает большой сигнал на единицу энергетических потерь в детекторе.

Минимально ионизирующая частица, проходя через 300 мкм кремния (что является типичной толщиной микрополоскового детектора), выделяет в среднем 120 кэВ энергии, что приводит к образованию 33 тыс. электрон-дырочных пар. Такой заряд может быть надежно зарегистрирован современными электронными приборами. Эта же высокая плотность ионизации потерь ведет к малому пробегу δ -электронов (несколько микрометров) и позволяет проводить прецизионные координатные измерения. Высокая подвижность носителей обеспечивает быстрое собирание образовавшегося заряда. Для типичного микрополоскового детектора это время порядка 10 нс. Малый коэффициент диффузии позволяет транспортировать заряд на заметные расстояния без существенных потерь в точности координатных измерений. Это лежит в основе кремниевых дрейфовых камер.

Ниже приведены основные свойства кремния. Данные взяты в основном из работы [9].

Основные свойства кремния

Атомный номер	14
Атомная масса	28,1
Плотность, г/см ³	2,33; 2,42 [7]

Число атомов в 1 см^3	$5,0 \cdot 10^{22}$
Температура плавления, °C	1460
Коэффициент линейного расширения, °C	$2,6 \cdot 10^{-6}$; $4,2 \cdot 10^{-6}$ [8]
Теплопроводность (0 °C), Вт·м ⁻¹ ·°C ⁻¹	84; 167 [7]
Теплоемкость (25 °C), Дж·кг ⁻¹ ·°C ⁻¹	760
Диэлектрическая константа	11,9
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,1
Собственная концентрация носителей n_i (300 K), см ⁻³	$1,5 \cdot 10^{10}$
Собственное удельное сопротивление (300 K), кОм·см	230
Коэффициент диффузии электронов (300 K), см ² ·с ⁻¹	35
То же для дырок	12
Подвижность электронов (300 K), см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹	1500; 1300 [7], 1900 [8]
То же для дырок	600; 500 [7]
Скорость насыщения (300 K), см·с ⁻¹	$8 \cdot 10^6$
Пробивное напряжение, В·см ⁻¹	$3 \cdot 10^5$
Работа выхода, В	4,8
Энергия на образование электрон-дырочной пары (300 K), эВ	3,62
(77 K), эВ	3,76
dE/dx минимум, МэВ·г ⁻¹ ·см ²	1,66
Радиационная длина, г·см ⁻²	21,8
Ядерная длина, г·см ⁻²	71

В тех случаях, когда значения каких-либо параметров существенно отличались от данных, опубликованных в других работах, приведено несколько цифр с указанием источников.

В кремниевых детекторах, как правило, присутствует оксид кремния SiO₂. Некоторые свойства этого материала, взятые из таблиц работ [7, 18] и работы [12], приведены ниже.

Некоторые свойства SiO₂

Плотность, г/см ³	2,6
Диэлектрическая константа	3,8
Ширина запрещенной зоны, эВ	8,8
Собственное удельное сопротивление (20 °C), кОм·см	10^{12}
Пробивное напряжение (20 °C), В·см ⁻¹	$6,5 \cdot 10$
Энергия на образование электрон-дырочной пары, эВ	18
dE/dx минимум, МэВ·г ⁻¹ ·см ²	1,7
Радиационная длина, г·см ⁻²	27

2. КООРДИНАТНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И ИХ ВАЖНЕЙШИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Полосковые детекторы. Наиболее широко распространенными координатными полупроводниковыми детекторами в физике элементарных частиц являются микрополосковые, принципиальная структура которых приведена на рис. 1.

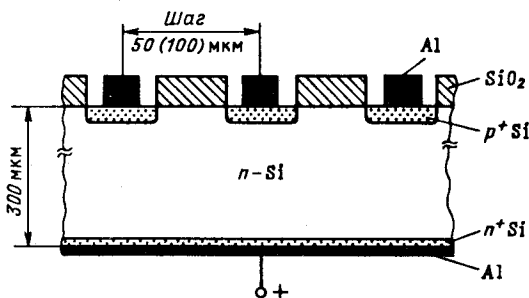
На основе из высокоомного кремния (обычно n -типа с проводимостью $1-3$ кОм·см) создаются $p-n$ -переходы в виде узких параллельных полос. Шаг полос определяется задачами эксперимента и возможностями съема информации и обычно составляет от 25 до 100 мкм. Ширина p -области чаще всего близка к половине шага полосок. На обратной стороне детектора формируется сильнолегированный слой n^+ -кремния. Между n^+ - и p^+ -слоями прикладывается обратное смещение, которое обычно выбирается таким, чтобы область обеднения основными носителями распространилась на всю толщину высокоомного кремния (так называемое напряжение полного обеднения).

В этом случае чувствительный объем определяется геометрическими размерами детектора и не зависит ни от однородности сопротивления высокоомного кремния, ни от стабильности напряжения смещения.

Каждая полоска работает при этом как отдельный независимый $p-i-n$ -диод, и, как показано в [10], координатное разрешение детектора практически не зависит от соотношения между шириной p -области и шагом полоски.

Для подачи смещения и съема сигнала в простейшем варианте детектора непосредственно на p^+ - и n^+ -области наносится алюминий. Напряжение полного обеднения U_0 , удельное сопротивление кремния ρ и толщина детектора d связаны формулой

$$d = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0\mu\rho(U_0 + \phi_0)},$$



где μ — подвижность основных носителей; ϵ — диэлектрическая проницаемость кремния; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — элек-

Рис. 1. Структура простейшего варианта полоскового детектора [17]

трическая постоянная; ϕ_0 — собственное напряжение p - n -перехода. В практически удобных единицах и в предположении $U_0 \gg \phi_0$ эту формулу (для кремния n -типа) можно переписать в следующем виде:

$$d \cong 18 \sqrt{\rho U_0},$$

где d — в мкм; ρ — кОм·см; U_0 — В.

Емкость каждой полоски на общий электрод в режиме полного обеднения может быть оценена по формуле

$$C = 105 S/d,$$

где S — площадь полоски, мм²; C — в пФ; d — в мкм. Характерное значение этой емкости на единицу длины полоски ($\sim 0,1$ пФ/см) мало по сравнению с типичным значением емкости между соседними полосками ~ 1 пФ/см (см., например, [11]). Именно второе из этих значений следует учитывать при оценках емкостной нагрузки, которую дает полоска, когда ее подсоединяют ко входу усилителя.

Темновой ток полоски определяется тремя компонентами: поверхностной, диффузионной и объемной:

$$I = I_{\text{пов}} + I_{\text{диф}} + I_{\text{об}}.$$

Первый член определяется, главным образом, технологией изготовления детектора. Обычно детектор считается хорошо сделанным, если вклад этого тока невелик по сравнению с остальными. Часто, однако, именно поверхностный ток определяет полный темновой ток.

Второй член связан с диффузией носителей из необедненных p^+ - и n^+ -областей соответственно электронов и дырок в область p - n -перехода, который для них смещен в прямом направлении. Для детекторов с p - i - n -структурой, работающих в режиме полного обеднения, этот ток обычно пренебрежимо мал при температурах ниже 100 °С [12].

Третий член — объемный генерационно-рекомбинационный ток — связан с собственной концентрацией носителей n_i и временем жизни основных носителей τ формулой

$$I_{\text{об}} = e n_i V / 2\tau$$

(V — объем полупроводника). Используя данные для n_i , приведенные на с. 787, получаем объемную плотность генерационно-рекомбинационного тока $I_{\text{об}}/V$:

$$j = \frac{1,2}{\tau} \quad (T = 300 \text{ К}),$$

где j — в нА/мм³, τ — в мс. Отсюда следует, что время жизни неосновных носителей в кремнии должно быть порядка миллисекунд, чтобы достигнуть темнового тока порядка 1 нА/мм³. Все три компоненты темнового тока увеличиваются с ростом температуры, но зависимость $I(T)$ у них различная. Так, объемный ток изменяется главным образом за счет изменения $n_i(T)$. Зависимость эта весьма резкая [13]:

$$n_i(T) = n_i(300\text{К}) \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} e^{-\frac{1,21}{2kT}} / e^{-\frac{1,21}{0,0517}}.$$

При комнатной температуре n_i меняется на 8—9% на каждый градус изменения температуры, а при изменении температуры на 8 градусов n_i , а вместе с ней и темновой ток, меняется примерно вдвое.

Темновой ток определяет дробовой шум на входе усилителя в единицах заряда:

$$\sigma_q = \sqrt{2eI\tau_\phi},$$

где τ_ϕ — время формирования сигнала в усилителе; e — заряд электрона.

Для численных оценок эту формулу удобно представить в виде

$$\sigma_{\text{др}} (\text{электронов}) = 112 \sqrt{I\tau_\phi}$$

(I — в нА; τ_ϕ — в мкс).

Для съема быстрого сигнала, возникающего при собирании рожденного внутри детектора заряда, естественно желание использовать емкостную развязку между полоской и усилителем. С одной стороны, это позволит избежать подачи на полоски напряжений со входа усилителей. С другой — усилитель в этом случае не регистрирует непосредственно темновой ток с полоски, который может:

- а) сильно отличаться от полоски к полоске;
- б) сильно меняться во время эксперимента из-за температурных колебаний и дозовых нагрузок;
- в) ограничивать динамический диапазон регистрации сигнала в усилителе, а в худших вариантах даже выводить усилитель из рабочего режима.

При использовании специализированной микроэлектроники с шагом каналов 50—100 мкм весьма сложно организовать на входе этих усилителей достаточно большие проходные емкости и сопротивления смещения мегаомного диапазона. Вместо этого были разработаны детекторы с емкостной развязкой непосредственно на детекторах [14]. В этом случае полоски алюминия наносятся на тонкую пленку оксида кремния, закрывающую p^+ -области, и таким образом получаются разделительные емкости

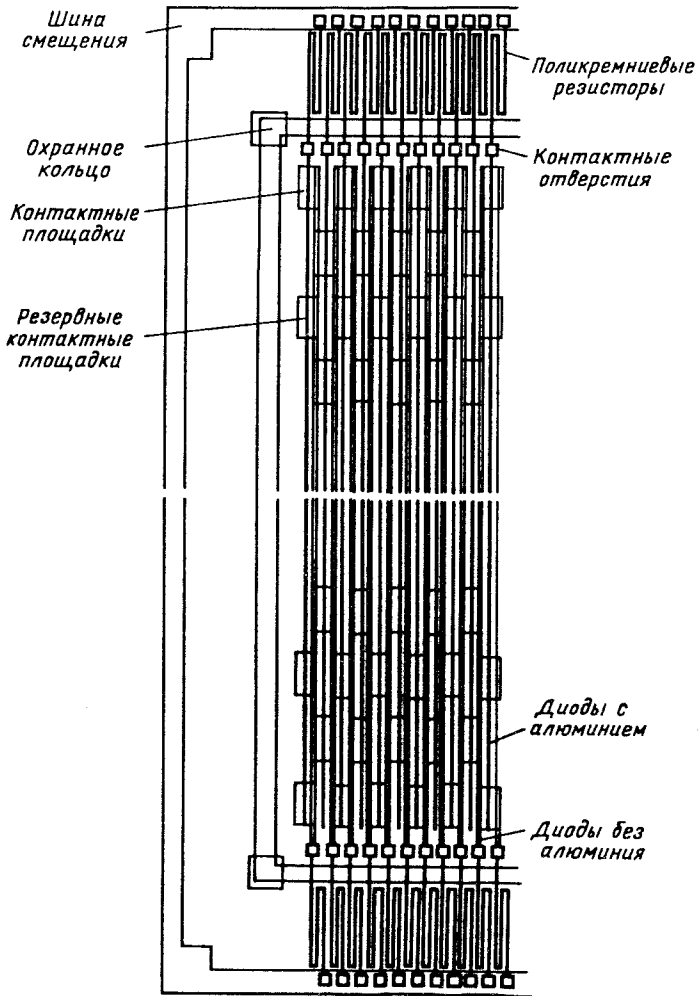


Рис. 2. Детектор с емкостной развязкой и сопротивлениями смещения из поликремния [15]. Съем сигнала предусмотрен с каждой второй полосу. Для измерения темного тока с отдельной полосы используются контактные площадки, соединенные непосредственно с p -областями. Кроме основных площадок для микросварки имеются соединенные с ними такие же резервные

порядка 100 пф на полосу. Сопротивления смещения, соединяющие p^+ -области с общим электродом, выполняются обычно из поликремния и составляют примерно 1—3 МОм. Детекторы такого типа используются в

эксперименте DELPHI. Они разработаны совместно ЦЕРН и Центром промышленных исследований в Осло [15]. Их конструкция показана на рис.2. Аналогичные детекторы разрабатываются в ОИЯИ (Дубна) [16] и Цойтене (Германия) [17].

Сопротивление смещения определяет тепловой шум этого сопротивления на входе, присоединенного к полоске предусилителя. Среднеквадратичный шумовой ток в единичной полосе частот ($A^2 \cdot \text{Гц}^{-1}$) равен

$$\langle I^2 \rangle = 4kT/R.$$

При времени формирования τ_ϕ это дает среднеквадратичный шумовой заряд

$$\sigma_q = \sqrt{4kT \tau_\phi / R}$$

или в практически удобных единицах и при комнатной температуре

$$\sigma_{\text{тепл}} (\text{электронов}) = 790 \sqrt{\tau_\phi / R}$$

(τ_ϕ — в мкс; R — в МОм). Это условие показывает необходимость иметь сопротивление смещения мегаомного диапазона.

Сделаем еще одно замечание относительно темнового тока полоски и сопротивления ее смещения. Дробовой шум от тока I , протекающего через сопротивление ее смещения R , сравнивается с тепловым шумом этого сопротивления при условии

$$2eI = 4kT/R,$$

что при комнатной температуре дает

$$IR \cong 5 \cdot 10^{-2} \text{ В.}$$

Это так называемое «правило 50 мВ» следует понимать следующим образом: если падение напряжения от темнового тока на резисторе смещения полоски превышает 50 мВ, то шум от этого сопротивления будет определяться дробовым шумом тока, а не тепловым шумом сопротивления. В практически удобных единицах это условие можно переписать так:

$$IR = 50$$

(I — в нА; R — в МОм). Отсюда, например, следует, что при токах утечки ~ 100 нА нет смысла делать сопротивление смещения заметно больше 0,5 МОм.

Естественным развитием однокоординатных стали двухкоординатные микрополосковые детекторы. Простейшее решение задачи съема одновременно двух координат — разделение на полоски также и n^+ -элект-

рода не работает из-за слоя электронов, всегда образующегося под SiO₂ на поверхности *n*-кремния из-за присутствия статистического положительного заряда на границе Si—SiO₂. На *p*⁺-стороне детектора эти электроны оттеснены от полосок областями обеднения *p*—*n*-перехода и совершенно исчезают с ростом размеров обедненной зоны. На *n*⁺-стороне этот слой электронов просто закорачивает между собой *n*⁺-полоски (рис.3). Было предложено и опробовано несколько способов преодоления этой трудности (см., например, [65]). Однако наибольшее распространение получил пока вариант разделения *n*⁺-полосок *p*⁺-областями. Принцип действия этого метода легко понять из рис.4.

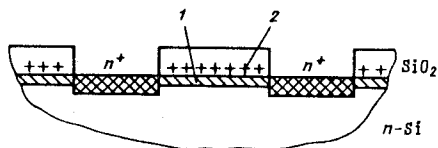


Рис. 3. Замыкание отдельных *n*⁺-полосок электронами поверхностного слоя (1) и положительный объемный заряд в SiO₂ (2)

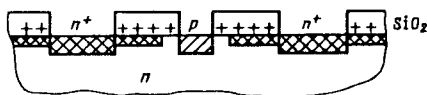


Рис. 4. Принцип изоляции *n*⁺-полосок с помощью промежуточных *p*⁺-полосок

Следующим шагом является совмещение емкостной развязки с изменением двух координат в одном детекторе. Простое распространение структуры однокоординатного детектора на две стороны (с учетом дополнительных *p*⁺-областей на *n*⁺-стороне детектора), конечно, возможно, но приводит к весьма сложной топологии и большому числу технологических операций в процессе изготовления детектора. Вместо этого для микровершинного детектора эксперимента ALEPH был разработан двухкоординатный детектор с принципиально новым методом подачи напряжения и одновременно гораздо более простой по технологии изготовления.

Основная идея состоит в использовании того самого поверхностного слоя электронов на *n*⁺-стороне, который не позволяет реализовать простейший вариант двухкоординатного микрополоскового детектора. Принципиальная схема детектора показана на рис.5 и 6 [19].

На первом из них изображен поперечный разрез детектора на *n*⁺-стороне. Видны *p*⁺-полоски, разрывающие слой поверхностных электронов. Доза при *p*-имплантации была выбрана в 10 раз больше оцененной плотности поверхностных зарядов. Имплантация на обеих сторонах проводилась прямо через слой оксида толщиной 220 нм. Энергия ионов составляла 60 кэВ для бора и 150 кэВ для фосфора.

Соединение *n*⁺-полосок с поперечной шиной смещения осуществляется с помощью поверхностного слоя электронов. На рис.6 видно, как с

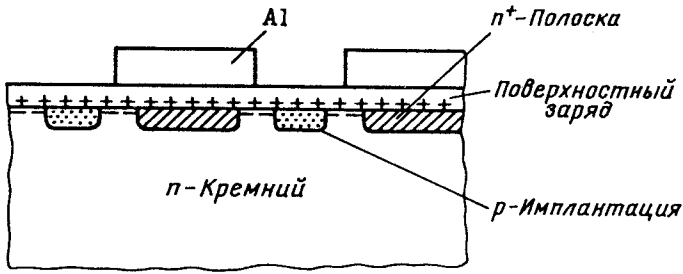


Рис. 5. Емкостный съем сигнала на n^+ -стороне с изолирующими p^+ -полосками

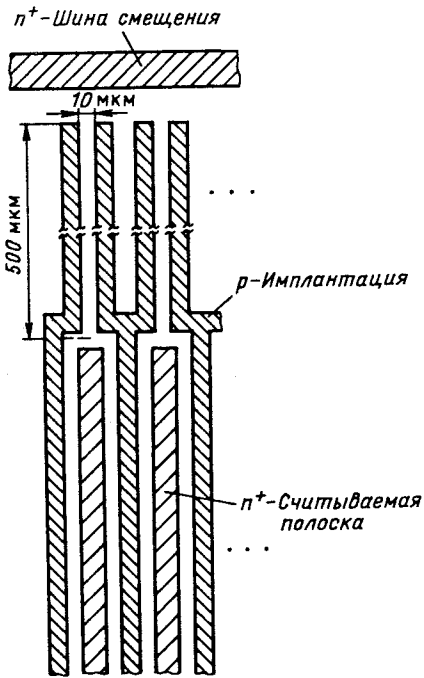


Рис. 6. Формирование сопротивлений смещения для n^+ -полосок из узких зон поверхностного слоя электронов, ограниченных p^+ -структурами [19]

помощью p^+ -структур образованы узкие (10 мкм) каналы длиной 500 мкм, идущие от n^+ -полосок к n^+ -шине смещения. Поверхностное сопротивление слоя электронов можно рассчитать по формуле

$$\rho = 1/(e \mu_e n_e),$$

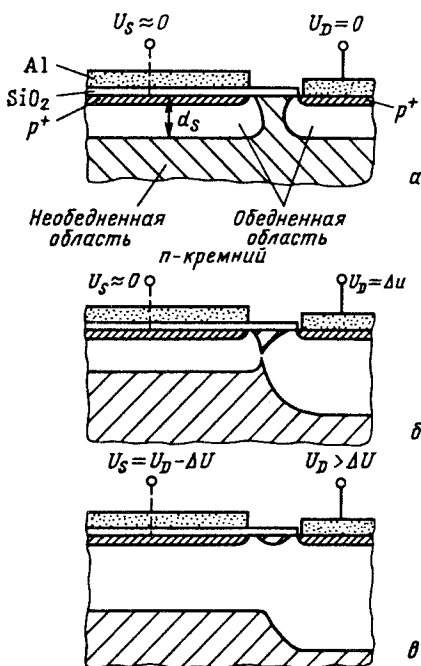
где e — заряд электрона; μ_e — его подвижность; n_e — поверхностная плотность зарядов. Принимая $n_e \cong 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и беря в качестве μ_e объемную подвижность электронов (поверхностная должна быть еще

примерно вдвое меньше), получаем нижнюю оценку для

$$\rho \cong 40 \text{ кОм}/100 \text{ мкм}^2.$$

При этом сопротивление канала 10×500 мкм получается не менее 2 МОм. Для улучшения однородности такие каналы были сделаны с обоих концов полосок. Интересно, что поверхностный слой электронов может исполь-

Рис.7. Схема подачи смещения на p^+ -полоски [19]; а — без напряжения; б — напряжение, при котором обедненная зона вокруг правого p^+ -контакта касается обедненной зоны вокруг неподключенной p^+ -полоски; в — при еще большем напряжении: смещение полоски увеличивается вместе с напряжением правого p^+ -контакта при почти постоянной разности потенциалов между ними



зваться вместо самих n^+ -полосок под сигнальными электродами из алюминия. Такие детекторы также были изготовлены и оказались даже лучше по темновым токам, чем детекторы с n^+ -полосками [19]. Позднее авторы [19] предложили и успешно опробовали идею [20] отказаться вообще от n^+ -имплантации и использовать для подачи напряжения на омическую сторону детектора (так в работе называется сторона, где обычно располагается n^+ -контакт) дополнительный p^+ -контакт, располагающийся на диодной стороне и включающийся в прямом направлении по отношению к n -кремнию. Кроме возможности полностью исключить n^+ -имплантацию и выполнить всю конструкцию с помощью только p -имплантации, этот вариант детектора имеет то дополнительное удобство при тестировании, что может запитываться только с одной (диодной) стороны.

Эта же группа предложила и новый метод подачи смещения на p^+ -полоски непосредственно через объем высокоомного кремния. Этот принцип иллюстрирован на рис.7 [19]. Расстояние (10 мкм) между p^+ -электродом, на который подается напряжение, и полосками и объемное сопротивление кремния определяют в этом случае сопротивление смещения, о котором в работе ничего не сообщается.

По сравнению с сопротивлениями смещения из поликремния этот способ не дает возможности отключать плохие p^+ -полоски от напряжения смещения (например, путем пережигания поликремниевого сопротивления).

В настоящее время изготовлен и успешно испытан другой вариант детектора [21] с двухкоординатным съемом информации и емкостной раз-

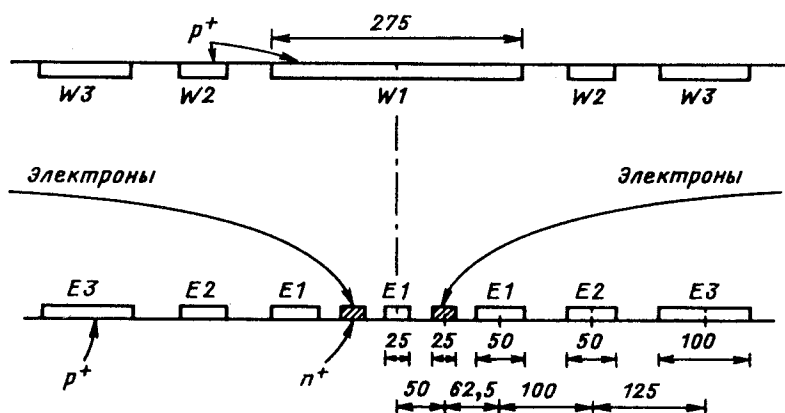


Рис. 8. Схема полупроводниковой дрейфовой камеры [72]. Сплошной линией показан дрейфовый канал для электронов. Все расстояния указаны в мкм

вязкой, где для разрыва поверхностного слоя электронов на n^+ -стороне используются дополнительные электроды под определенным напряжением, а смещение подается через поликремниевые сопротивления.

Обзор применения различных полосковых детекторов в экспериментах по физике высоких энергий и предельные достигнутые параметры даны в разд.3.

Полупроводниковые дрейфовые камеры. Предложенная Э.Гатти и П.Рехаком [22] идея полупроводниковой дрейфовой камеры (ПДК) пока не реализовалась в работающий в каком-нибудь эксперименте детектор, но оказала заметное влияние на разработку новых устройств с очень привлекательными параметрами (например, дрейфовые диоды, о которых пойдет речь в разд.6). Основная цель дрейфовой камеры — резко уменьшить число выходных контактов по сравнению с полосковым детектором и измерить пространственное положение возникшей в детекторе ионизации по времени ее дрейфа до собирающего электрода. Принципиальная схема ПДК показана на рис.8.

С обеих сторон пластины из высокоомного n -кремния расположены параллельные друг другу p^+ -полоски, на которые подается равномерно меняющийся потенциал. В центре структуры на одной из сторон расположен собирающий анод в виде n^+ -электрода. Обеднение всего объема кремния происходит через этот анодный электрод. Когда кремний полностью обеднен, в середине пластины образуется транспортный канал для электронов, дрейфующих в поле E . По времени их дрейфа (обычно в пре-

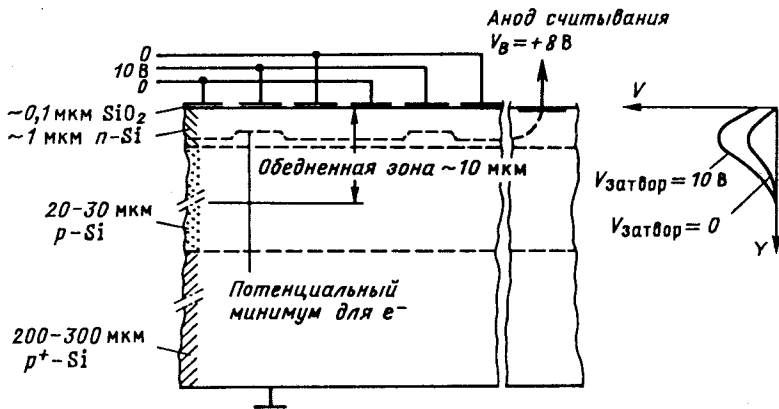


Рис. 9. Разрез ПЗС-структуры со скрытым каналом поперек МОП-электродов: верхняя штриховая линия показывает потенциальный минимум для электронов (максимум для положительных частиц). На правом рисунке — профиль напряжения под различными электродами

делах нескольких микросекунд) можно определить положение прошедшей частицы. Разделяя анодную полосу на отдельные части, можно получить двумерную информацию. Таким образом, при одномерном съеме можно значительно сократить число считываемых каналов, а при том же числе каналов, что и в одномерном полосковом детекторе, получить двумерную картину события, причем без проблемы установления соответствия между x и y координатами нескольких частиц, зарегистрированных в одном детекторе, которая возникает в двухкоординатных полосковых детекторах.

Если p^+ -полоски сделать в виде концентрических окружностей, то можно осуществить радиальный дрейф электронов. В этой конструкции особенно привлекательна возможность иметь малую (около 0,1 пФ) емкость анода для чувствительной области детектора порядка 1 см^2 . Это очень важно для спектрометрических измерений с предельной чувствительностью.

К недостаткам дрейфовых камер следует отнести зависимость координаты от изменений дрейфового поля в объеме детектора из-за неоднородности материала и зависимость подвижности электронов от температуры. Определенные сложности могут возникнуть при работе таких детекторов в магнитном поле из-за сноса дрейфующих электронов. Может оказаться, что усложнение электроники, связанное с большим количест-

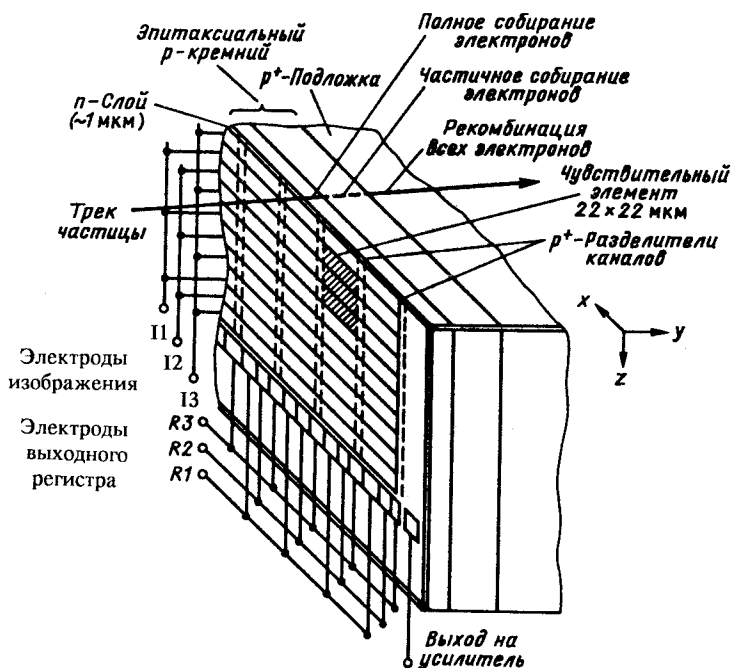


Рис. 10. Вид двумерной ПЗС-матрицы со скрытым каналом: $I1+I3$ — электроды переноса изображения; $R1+R3$ — электроды сдвигового регистра для передачи информации на считывающий анод

вом калибровок и необходимостью измерения времени, нивелирует основное достоинство дрейфовой камеры для координатных измерений — уменьшение каналов съема. Однако резкое уменьшение емкости детектора с большой чувствительной площадью остается несомненным преимуществом дрейфовой камеры для задач спектрометрии.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС). Широко распространенные для оптических измерений и промышленно выпускаемые ПЗС-матрицы со скрытым каналом могут непосредственно применяться для измерения координат ионизирующих частиц.

Структура ПЗС-матрицы показана на рис.9 и 10. В основе конструкции лежит МОП-структура: металлический электрод на тонкой (около 100 нм) пленке оксида, отделяющей его от полупроводника (обычно p -типа). Подавая периодический потенциал на электроды, можно создать потенциальные минимумы для электронов под некоторыми электродами. В ПЗС-структурах со скрытым каналом под слоем SiO_2 помещают тонкий

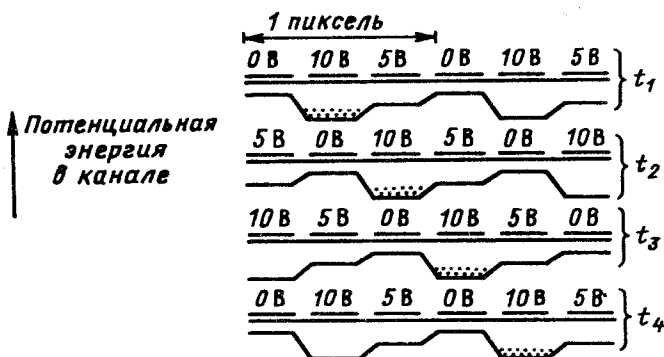


Рис. 11. Схема переноса заряда в ПЗС

(около 1 мкм) слой n -типа и тем самым отодвигают потенциальный минимум от поверхности, где высокая плотность дефектов в решетке кристалла уменьшает эффективность переноса зарядов. Обедненная зона в ПЗС-структурах обычно невелика, около 10 мкм, что на порядок меньше, чем в полосковых детекторах. Соответственно значительно меньше здесь сигнал от релятивистских частиц, который появляется в виде электронов начальной ионизации, собирающихся в потенциальном минимуме под электродом, через который пролетела частица. Как правило, требуется работать при пониженной температуре, чтобы достичь удовлетворительного соотношения сигнал/шум.

Изменяя нужным образом напряжения на электродах, можно передвигать электроны, собравшиеся в минимуме, из одной ячейки в другую. Этот процесс показан схематично на рис.11. Вводя разделительные p^+ -полоски поперек сдвиговых электродов, можно обеспечить двумерную структуру получаемой информации. В двумерной ПЗС-матрице (см. рис.10) сигнал последовательно сдвигается строка за строкой в одномерную ПЗС-линейку на краю детектора, из которой он ячейка за ячейкой передвигается на единственный выходной электрод. Обычно первый каскад предусилителя располагается непосредственно на ПЗС-кристалле. Шаг ячеек около 20 мкм позволяет достичь на ПЗС-матрицах примерно того же пространственного разрешения, что и в случае полосковых детекторов. Малая глубина обедненной зоны имеет то преимущество, что даже при значительных углах падения частиц на детектор по отношению к его вертикали число срабатывающих элементов (пикселей) не возрастает и соответственно не ухудшается пространственное разрешение (подробно этот вопрос рассмотрен в [12]).

Несомненным достоинством ПЗС-детекторов является истинно двумерная картина события и малое число каналов считывания. К недостаткам, кроме малого уровня сигнала, следует отнести, в первую очередь, большое время считывания (десятки миллисекунд) при непрерывной чувствительности устройства, в том числе и в период считывания. Невелики и размеры промышленно выпускаемых детекторов (около 1 см^2). Эти трудности заметно ограничивают возможности применения ПЗС-структур в экспериментах по физике высоких энергий. Об имеющихся примерах их использования рассказано в следующем разделе.

3. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ КООРДИНАТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДОСТИГНУТЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Эксперимент NA11/NA32. Одним из первых физических экспериментов, в котором активно использовались полосковые детекторы, был NA11/NA32 в ЦЕРН на ускорителе SPS. В нем для изучения процессов рождения и распада очарованных частиц применялся вершинный детектор из восьми плоскостей полосковых детекторов [23]. Являясь одной из важнейших частей спектрометра коллаборации ACCMOR, этот детектор проработал с 1982 по 1985 гг. на пучке с энергией пионов 200 ГэВ и дал ценную физическую информацию. Большое количество частиц ($>10^{12}$), пролетевших за это время через детекторы, дало возможность изучить в реальном эксперименте радиационную стойкость детекторов вплоть до 10^4 Гр (см. [24]).

Структура использовавшегося вершинного детектора приведена на рис.12 (учитывайте разный масштаб по горизонтали и вертикали!). Детекторы были выполнены на двухдюймовых шайбах из *n*-кремния тол-

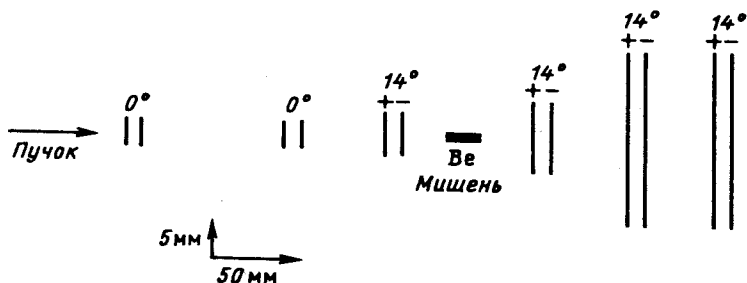


Рис. 12. Схема расположения полосковых детекторов в эксперименте NA11. Цифрами показан наклон полосок по отношению к горизонтали

щиной 280 мкм с объемным сопротивлением 3 кОм. Чувствительная область детекторов имела размер 24×36 мм и состояла из 1200 полосок с шагом 20 мкм и длиной 36 мм. Чтобы сэкономить число каналов съема, считывание велось в центральной части детектора с шагом 60 мкм, а по краям — с шагом 120 мкм. Сигнал с остальных полосок попадал в предусилители через взаимную емкость между полосками (так называемое емкостное деление сигнала), и координата определялась по центру тяжести возникшего на активных полосках сигнала. Для подачи смещения на полоски поперек них был нанесен специальный резистивный слой, обеспечивающий сопротивление 1 МОм между соседними полосками. Пространственное разрешение в центре детектора составляло 4,5 мкм или 7,5% шага считывания и 7,9 мкм (6,6% шага считывания) на краю детектора. Среднеквадратичный шум предусилителей равнялся 750 электронам, что составляло около 3% среднего значения сигнала в детекторе от минимально ионизирующей частицы. (Заметим, что если бы считывался каждый канал и использовались только номера сработавших полосок, то разрешение было бы $20 \text{ мкм} / \sqrt{12} = 5,8 \text{ мкм}$.) Эти данные характеризуют возможности метода определения координаты с помощью емкостного деления [25]. (Другой возможностью, кстати, является резистивное деление, проанализированное в [26].) Обратной стороной увеличения шага считывания является увеличение минимального расстояния между двумя различаемыми частицами. В данном случае авторы работы [23] считают, что оно совпадает с шагом считывания и составляет 60 и 120 мкм для разных областей детектора.

Детекторы устанавливались так, что полоски были повернуты относительно горизонтали на угол $\pm 14^\circ$ и обеспечивали точность восстановления вершины распада очарованной частицы в продольном направлении $\sigma_{||} \cong 130 \text{ мкм}$ и в поперечном $\sigma_{\perp} \cong 10 \text{ мкм}$. Типичное прицельное расстояние для продуктов распада составляло 60÷300 мкм, так что возможности детектора были вполне адекватны поставленным задачам. Электроника детектора была выполнена в обычном (неинтегральном) варианте.

Детектор успешно отработал четыре года на эксперименте и послужил прототипом для многих ему подобных систем, использовавшихся в экспериментах на прямых пучках. Одним из важнейших итогов его работы стало сформулированное в [24] утверждение о том, что доза порядка 10^4 Гр еще не делает полосковый детектор неработоспособным.

Детекторы MARK-II и DELPHI. Принципиально иные проблемы встали перед физиками, ведущими эксперименты на встречных пучках, при попытке применить полосковые детекторы для создания систем с почти полным перекрытием телесного угла вблизи места встречи пучков.

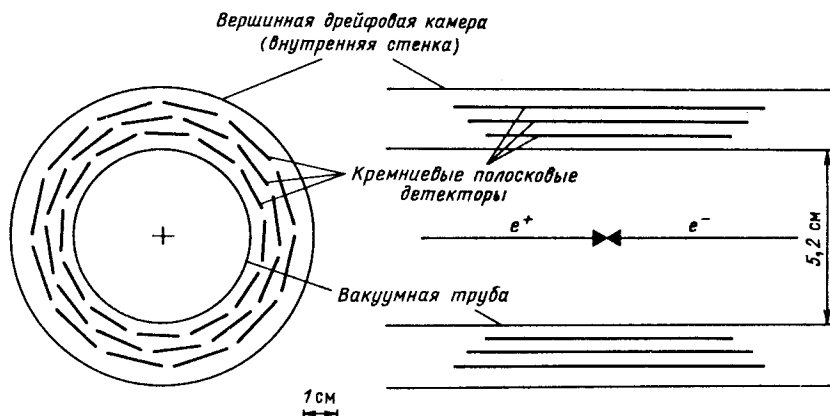


Рис. 13. Схема микровершинного детектора для эксперимента MARK-II на ускорителе SLC [28]: слева — вид в плоскости, перпендикулярной оси пучков, справа — вдоль оси пучков. Детектор монтируется на вакуумной камере. Верхней границей детектора служит входная стенка дрейфовой камеры

Высокая плотность каналов съема и недостаток места для размещения электроники вблизи детектора дали толчок к созданию специализированных микросхем с шагом считывания $50+100$ мкм и мультиплексированным выводом. Эта электроника более подробно описана в разд.5. Практически параллельно такая электроника разрабатывалась в двух местах: а) в SLAC совместно с физиками из ЦЕРН для микровершинной системы детектора MARK-II на ускорителе SLC (SLAC) и детектора DELPHI на ускорителе LEP (ЦЕРН); б) в Институте им.Макса Планка в Мюнхене для детектора ALEPH на LEP. Американская микросхема, получившая название MICROPLEX (МИКРОусилитель с мультиПЛЕКСором), появилась раньше, и с ней же были получены первые результаты на прототипе [27].

Измерения проводились на пучке позитронов с энергией 15 ГэВ. Использовались детекторы с шагом 25 мкм и активной длиной полоски 60 мм. Кристаллы MICROPLEX были присоединены с обоих концов детектора, так что при шаге усилителей 50 мкм считывалась каждая полоска с шагом 25 мкм. Толщина детекторов составляла около 300 мкм. Достигнутое соотношение сигнал/шум равнялось 17:1, что дает $\sigma_{\text{шум}} \cong \cong 1900$ электронов. Среднее (наиболее вероятное) число срабатывавших полосок равнялось двум. При этом, когда частица попадала в центр полоски, амплитуды сигналов на двух соседних полосках составляли по 16% суммарного сигнала, а на двух следующих по 2%. Это дает представле-

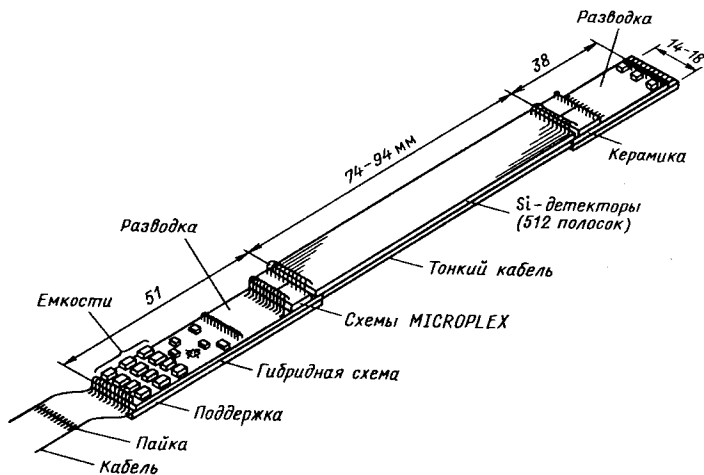


Рис. 14. Один модуль детектора, представленного на рис.13. Показаны микросхемы предусилителя-коммутатора MICROPLEX по две с каждой стороны детектора, что обеспечивает шаг считывания 25 мкм. Соединения выполнены микросваркой

ние о ширине проекции на регистрирующую плоскость ионизационного пятна от вертикально пролетевшей частицы. Координата частицы определялась по центру тяжести кластера сработавших полосок.

В результате измерений была получена пространственная точность в одном детекторе $\sigma = (3,4 \pm 0,3)$ мкм. До сих пор эта точность является рекордной для полосковых детекторов. Если пользоваться только информацией о номере сработавшей полоски, то разрешение составит

$$\sigma_{\text{дискр}} = 25/\sqrt{12} = 7,2 \text{ мкм,}$$

т.е. примерно вдвое хуже, чем было получено по измерению центра тяжести. Надо, однако, иметь в виду, что полученное разрешение относится к вертикально падающим частицам, и что оно быстро ухудшается с увеличением угла падения частицы по отношению к вертикали детектора. Подробный анализ этого можно найти в работе [12, с.34—35].

В [27] были подробно изучены возможности разделения двух близко расположенных треков и получено, что минимальное расстояние для разделения двух треков и измерения координаты каждого без ухудшения пространственного разрешения составляет 150 мкм или 6 полосок по 25 мкм.

На основании успешно проведенных испытаний прототипа был разработан и построен микровершинный детектор для MARK-II на SLC [28].

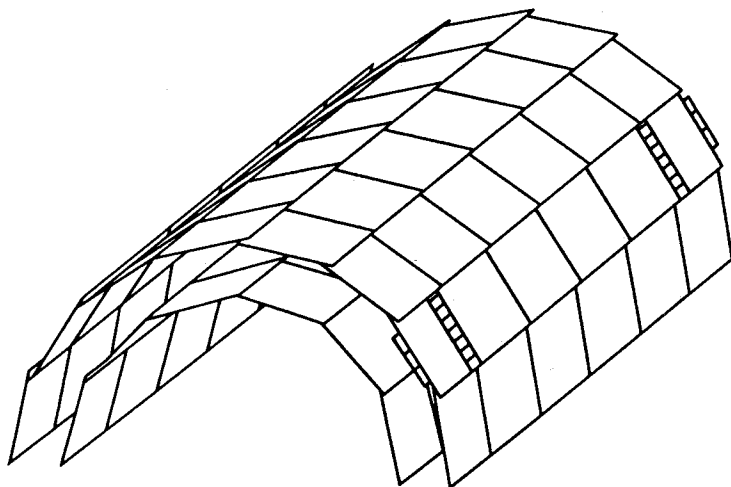


Рис. 15. Схема микровершинного детектора для эксперимента ALEPH [30], состоящего из 56 базовых модулей

Схема детектора приведена на рис.13. Он состоит из 36 отдельных детекторов с активной длиной от 72 до 90 мм, шагом полосок от 25 до 33 мкм, толщиной пластин 300 мкм и рабочим напряжением около 50 В (полное обеднение). Детекторы были изготовлены фирмой HAMAMATSU по специальному заказу. Предусилители в виде схем MICROPLEX размером 6,4×4,5 мм расположены непосредственно на детекторах, как показано на рис.14. В октябре 1989 г. детектор был установлен на ускоритель и на конференции по методике экспериментов на встречных пучках, состоявшейся в Новосибирске с 15 по 21 марта 1990 г., сообщалось об успешной работе детектора в реальном эксперименте. Разрешение детектора соответствует ожидаемому. Это первая реально работающая в эксперименте система полосковых детекторов с почти полным перекрытием телесного угла в геометрии, типичной для экспериментов на встречных пучках.

В настоящее время заканчивается сооружение микровершинной системы детектора DELPHI [29], во многом подобной описанной выше системе MARK-II. Отличие состоит в значительно больших геометрических размерах и использовании иной модификации интегральной микросхемы: МХ-3 вместо первоначально предполагавшейся схемы MICROPLEX. Различие между этими микросхемами описано в разд.5.

По масштабу микровершинный детектор DELPHI близок к аналогичному детектору в эксперименте ALEPH. Однако последний имеет ряд ин-

тересных особенностей и поэтому выбран в качестве следующего примера для более подробного рассмотрения.

Детектор ALEPH. Принципиальной особенностью микровершинного детектора ALEPH [30] является использование полосковых детекторов с двухкоординатным съемом информации. Схема микровершинного детектора показана на рис.15. Он состоит из 28 модулей, расположенных в двух слоях, со средними радиусами 90 мм (12 модулей) и 121 мм (16 модулей). Детектор установлен непосредственно на вакуумной камере ускорителя радиусом 80 мм.

Каждый модуль состоит из двух идентичных половинок, механически смонтированных на общей подложке. Вид одной такой половинки (так называемый базовый модуль) показан на рис.16 [31].

Базовый модуль состоит из двух полосковых детекторов с двухкоординатным съемом сигнала. На p^+ -стороне полоски обоих детекторов соединены последовательно. Шаг полосок на этой стороне составляет 25 мкм, шаг вывода 100 мкм. Шаг вывода определяется используемой микросхемой SAMEX-64, содержащей 64 канала с шагом 100 мкм. Длина полоски одного детектора 47,6 мм. Число каналов съема 476.

На n^+ -стороне детектора шаг полосок равен 50 мкм, шаг считывания 100 мкм (по той же причине, что и на p^+ -стороне). Длина полосок на этой стороне 46,1 мм, число каналов 483 на каждый детектор.

Координата частицы с обеих сторон определяется методом емкостного деления, ожидаемая точность $\sigma \cong 10$ мкм для обеих сторон (при этом делается предположение, что отношение сигнал/шум будет порядка 10:1, хотя на прототипах получены заметно лучшие результаты [31-]). Толщина детектора равняется 300 мкм, напряжение полного обеднения $\cong 65$ В [30]. Для установления соответствия между x и y координатами разных частиц, попавших в один базовый модуль, предполагается использовать корреляцию амплитуд сигналов на p^+ - и n^+ -сторонах, поскольку разброс амплитуд, определяющийся распределением Ландау, заметно больше, чем энергетическое разрешение. Полное число каналов съема с одного базового модуля 1442, а со всего микровершинного детектора $\cong 81 \cdot 10^3$. Полное число полосковых детекторов 112, микросхем SAMEX — 1344. Это одна из самых сложных и крупномасштабных систем, созданных к настоящему времени на основе полосковых детекторов.

Полосковые детекторы для этого эксперимента были разработаны и изготовлены в результате сотрудничества Института им.Макса Планка с фирмой Мессершмидт — Бельков — Блом в Мюнхене (ФРГ). В детекторах использована новая схема подачи смещения полоски, уже описанная в разд.2 [19], включающая в себя в том числе замену n^+ -полосок слоями

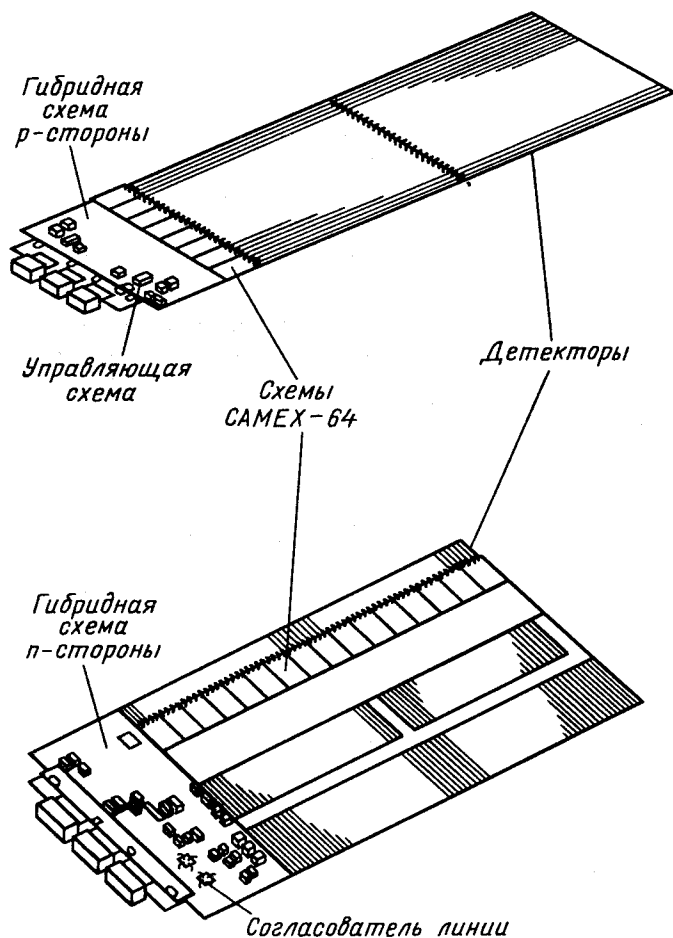
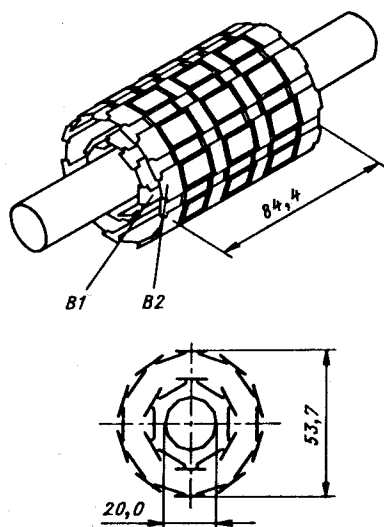


Рис. 16. Базовый модуль микровершинного детектора, изображенного на рис. 15, включающий в себя два полосковых детектора с двухкоординатным съемом: сверху — вид на сторону с p^+ -полосками, соединенными микросваркой между собой и с микросхемами CAMEX [50]; снизу — вид на n^+ -сторону, где поверхность детектора частично закрыта поддержкой для микросхем CAMEX

поверхностных электронов, ограниченных специальными p^+ -структурами. В настоящее время микровершинный детектор готовится к постановке на ускоритель.

Применение ПЗС-матриц. Одним из первых применений ПЗС-матриц стало их добавление к системе полосковых детекторов эксперимента

Рис. 17. Схема микровершинного детектора для эксперимента SLD [33]. ПЗС-матрицы располагаются с перекрытием на обеих сторонах модулей, из которых состоит детектор. Показана также вакуумная камера ускорителя. Все размеры даны в мм



NA32 (см. начало раздела). Чтобы улучшить точность восстановления вершины, было желательно разместить первый детектор как можно ближе к мишени. Но уже на расстоянии 50 мм от мишени использование полосковых детекторов было сильно затруднено перекрытием летящих в узком конусе частиц. Истинно двумерная картина события в ПЗС-матрице позволила использовать эти детекторы на расстоянии 10 и 20 мм от мишени [32]. На время считывания активной части матрицы (~ 15 мс) пучок на мишень не подавался. Использовались стандартные ПЗС-матрицы, предназначенные для оптических целей, но отобранные по низким шумам и хорошей эффективности переноса. Размер одного чувствительного элемента 20×20 мкм; достигнутое разрешение около 5 мкм по обеим координатам, что практически совпадает с разрешением чисто за счет дискретности ($20 \text{ мкм} / \sqrt{2} = 5,8 \text{ мкм}$). Размер чувствительной области матрицы 8×12 мм. Чтобы решить проблему малых сигналов, пришлось поместить детекторы в термостат и работать при температуре 180 К. Подробно эта система описана в работе [12, с.78].

В 1985 г. две ПЗС-матрицы были установлены и успешно отработали в эксперименте NA32, заметно улучшив его возможности идентификации очарованных частиц. Одним из результатов работы было опробование ПЗС-матриц в условиях больших дозовых нагрузок, что, в частности, позволило установить практический предел работоспособности этих детекторов на уровне 1000 Гр.

В настоящее время заканчивается подготовка микровершинного детектора для эксперимента SLD в SLAC на основе таких же ПЗС-матриц. Схема детектора показана на рис.17. Он состоит из 60 модулей, на каждом из которых расположены с некоторым перекрытием 8 ПЗС-матриц, что дает около 100×9 мм чувствительной области в одном модуле [33]. Весь детектор будет установлен непосредственно на вакуумной камере ускорителя диаметром всего лишь 20 мм и окружен термостатом, в котором будет поддерживаться рабочая температура 180 К.

Время считывания информации будет равняться 50 мс. Это допустимо, поскольку частота столкновений пучков в ускорителе SLC составляет не более 20 Гц. Печатляет полное число чувствительных элементов в системе: $\sim 120 \cdot 10^6$ [33]. Предполагаемое разрешение в одном слое $\sigma \cong 5$ мкм по обеим координатам, разделение двух близких частиц происходит на расстоянии больше 20 мкм, причем в двумерной плоскости, а не в проекции, как у полосковых детекторов.

В настоящее время детектор готовится к постановке на ускоритель.

Некоторые рекордные достижения. В предыдущих разделах уже приводились некоторые рекордные результаты. Упомянем для полноты еще несколько.

В системе мониторинга мюонных потоков нейтринных пучков в ЦЕРН была продемонстрирована возможность работы с полупроводниковыми детекторами (причем в спектрометрическом режиме) при импульсных интенсивностях вплоть до 10^{12} релятивистских частиц на $1/\text{см}^2$ в 1 с (см. [9, с.98]). Отметим, что при таких интенсивностях доза 10 кГр будет набираться всего за 40 с.

Для эксперимента WA-82 в ЦЕРН был разработан и изготовлен полосковый детектор с шагом 10 мкм и выводом с каждой полоски [34]. Размер чувствительной области $5 \times 5,2$ мм, причем все 512 каналов прямо на той же кремниевой шайбе разведены на края области 14×14 мм и только эти полоски с помощью микросварки соединяются со следующим веером полосок на стеклотекстолитовой плате. Толщина детектора 220 мкм, объемное сопротивление кремния 5 кОм·см. Детектор был изготовлен фирмой Micron Semiconductor (Великобритания). Разрешение измерялось на пучке с энергией 340 ГэВ с помощью монитора из детекторов с шагом 20 мкм. Погрешность монитора составляла 3,9 мкм. За вычетом этого вклада разрешение тестируемого детектора составило 2,5 мкм при определении координаты по центру тяжести сигнала с полосок и 3,6 мкм при чисто «да—нет»-ном съеме. Погрешность дискретности в этом случае $10/\sqrt{12} = 2,9$ мкм лежит между этими двумя результатами. Отношение сигнал/шум в этих измерениях составляло 15:1.

Впечатляющий по масштабам проект системы на основе полосковых детекторов был представлен на совещании по трековым детекторам для строящегося в США сверхускорителя SSC, происходившем в Ванкувере (Канада) 24—28 июля 1989 г. [35]. Схема этой системы показана на рис. 18. Только для ее цилиндрической части понадобится около 35 м^2 полосковых детекторов, что больше чем на 2 порядка превосходит существующие сегодня системы, например микровершинные детекторы для ALEPH или DELPHI. В некоторой степени работа [35] показывает масштабы применения полосковых детекторов в обозримом будущем.

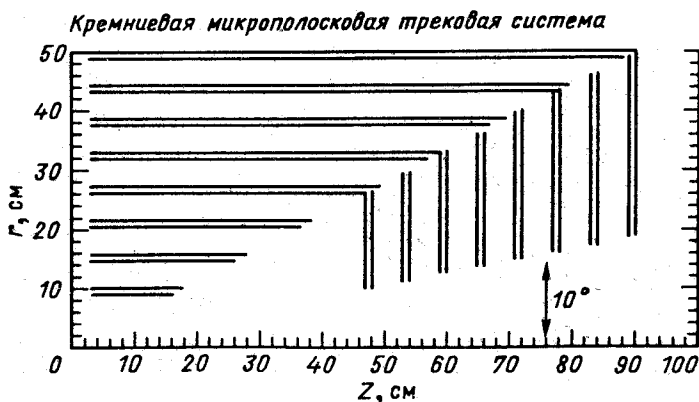
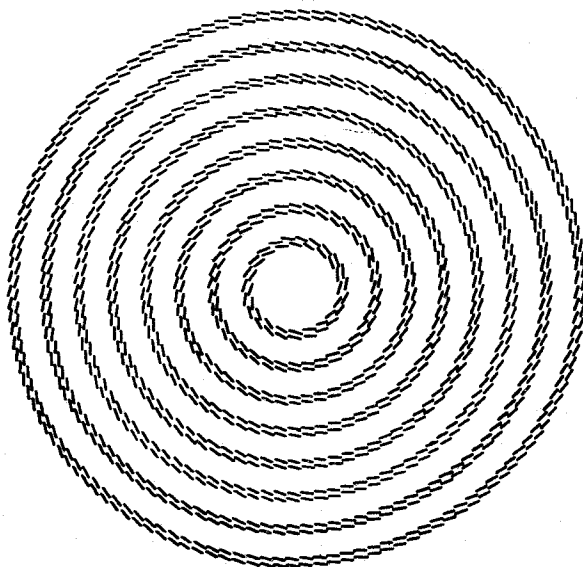


Рис. 18. Примерная схема трековой системы для одного из возможных экспериментов [35] на строящемся в США сверхускорителе SSC

4. РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ДЕТЕКТОРОВ

Этому сложному вопросу посвящено немало специальных исследований (см., например, [9, 12, 36, 37] и цитированную там литературу). Имеется также большое число разнообразных экспериментальных работ,

часто с весьма противоречивыми результатами. В данном обзоре сделана попытка взглянуть на эту проблему под чисто практическим углом зрения и постараться сформулировать основные устоявшиеся представления и факты, относящиеся к этому вопросу.

Вначале несколько замечаний общего характера. Как известно, воздействие ионизирующего излучения на кремниевый детектор подразделяется на объемное и поверхностное. В первом случае речь идет о взаимодействии с основным веществом детектора — высокоомным кремнием, во втором — главным образом с пленкой оксида SiO_2 , лежащей на поверхности кремния. И в том и в другом случае возможна ионизация, для которой требуется в среднем 3,6 эВ на образование одной электрон-дырочной пары в кремнии и около 18 эВ в SiO_2 (ширина запрещенной зоны 8,8 эВ). Этот процесс не вызывает никаких последствий в самом кремнии, откуда ионизация легко уносится электрическим полем, но заметно проявляется в SiO_2 в связи с исключительно малой подвижностью дырок в оксиде, из которого в обычных условиях они дрейфуют за время до 10^3 с. Кроме того, дырки могут захватываться поверхностными ловушками с вероятностью от 2 до 40% в зависимости от технологии изготовления детектора [12] и создавать дополнительное электрическое поле с разнообразными последствиями. Следует заметить, что видимый свет не имеет достаточной энергии для ионизации в SiO_2 и поэтому практически не портит детекторы, хотя и прекрасно регистрируется ими.

Объемное воздействие ионизирующих излучений (кроме ионизации) обычно рассматривается в терминах атомных столкновений, которые приводят к выбиванию атомов кремния из решетки. Эти процессы проявляются в виде следующих основных макроскопических эффектов:

а) уменьшение времени жизни неосновных носителей и соответствующий рост темнового тока;

б) изменение эффективной концентрации доноров, что может привести к уменьшению напряжения полного обеднения [24, 38] и даже к изменению типа проводимости детектора. Эти эффекты особенно заметны в высокоомном кремнии из-за его высокой чистоты. При неоднородном облучении этот эффект приводит к искажению картины электрического поля в детекторе, что может вызвать систематические погрешности в измерении координат [24];

в) при большой вероятности захвата начальной ионизации падает эффективность ее собирания в течение заданного времени и, следовательно, уменьшается сигнал с детектора.

Из всех этих проявлений радиационных повреждений наиболее часто обсуждается первое, поскольку второе и третье обычно или слабы, или появляются при таких дозах, что детектор уже практически неработоспособен в силу причины (а).

Энергия, необходимая для того, чтобы выбить атом кремния из решетки, составляет около 25 эВ. В зависимости от типа радиации это приводит к различным пороговым энергиям для создания атомных дефектов. В общем случае, для того чтобы частица с массой m_1 , падая на неподвижную частицу с массой M_2 , сообщила последней с помощью лобового упругого соударения кинетическую энергию T_2 , необходима кинетическая энергия

$$T_1 = \frac{T_2 + \sqrt{T_2^2 + 2M_2T_2(1 + m_1^2/M_2^2) + 4m_1^2}}{2} - m_1. \quad (1)$$

При $m_1 = M_2 = M$ эта формула дает очевидный ответ $T_1 = T_2$, а при $m_1 = 0$ (фотон):

$$T = E_\gamma^{\text{пор}} = (T_2 + P_2)/2, \quad (2)$$

где P_2 — импульс частицы 2 после столкновения. Формула (2) мгновенно получается из законов сохранения энергии и импульса, которые в случае $m_1 = 0$ имеют вид

$$E_\gamma^{\text{нач}} = T_2 + E_\gamma^{\text{кон}}; \quad E_\gamma^{\text{нач}} = P_2 - E_\gamma^{\text{кон}},$$

где $E_\gamma^{\text{нач(кон)}}$ — начальная (конечная) энергия фотона. Подставив в (1) $T_2 = 25$ эВ, $M_2 = 28m_p$ (m_p — масса протона), получим пороговую энергию для различных падающих частиц:

фотоны:	$T_\gamma^{\text{пор}} = 570$ кэВ;	
электроны:	$T_e^{\text{пор}} = 260$ кэВ;	(3)
протоны и нейтроны:	$T_N^{\text{пор}} = 0,19$ кэВ.	

Для фотона возможен каскадный процесс, начинающийся рождением комптоновского электрона с энергией больше 260 кэВ, способного выбить атом из решетки. Пороговая энергия фотона в этом случае оказывается равной 420 кэВ (из (1) при $T_2 = 260$ кэВ, $M_2 = 510$ кэВ).

На практике объемное и поверхностное воздействие излучения разделить очень сложно. По-видимому, одной из причин значительных расхождений в экспериментальных данных является то, что поверхностные эффекты вызывают сравнимые или даже гораздо бóльшие токи, чем эффекты объемные. В подтверждение этого укажем на результаты работы [39], где эффект воздействия на полосковый детектор электронов с энер-

гией 1,5 МэВ и фотонов с энергией 20—30 кэВ был практически одинаков. Но, как следует из (3), электроны вызывали и объемное и поверхностное воздействие, а фотоны этой энергии могли давать только поверхностные эффекты. В то же время объемный коэффициент воздействия электронов α , определяемый по формуле

$$\Delta I = \alpha VD$$

(ΔI — возрастание темнового тока в объеме V после облучения с дозой D), оказался примерно таким же, как и для облучений детекторов адронами и высокоэнергетичными фотонами [40].

Еще одно свидетельство в пользу того, что фотоны с энергией 20 кэВ порождают главным образом поверхностные токи на границе Si—SiO₂, можно получить, сравнивая соответствующие данные из работ [38] и [39], приведенные на рис. 19 и 20. Зависимости поверхностной плотности темнового тока, порожденного облучением фотонами с энергией 20 кэВ, от дозы облучения в обоих случаях сходны и имеют тенденцию к насыщению при дозах свыше $5 \cdot 10^3$ Гр. Однако по абсолютному значению эффек-

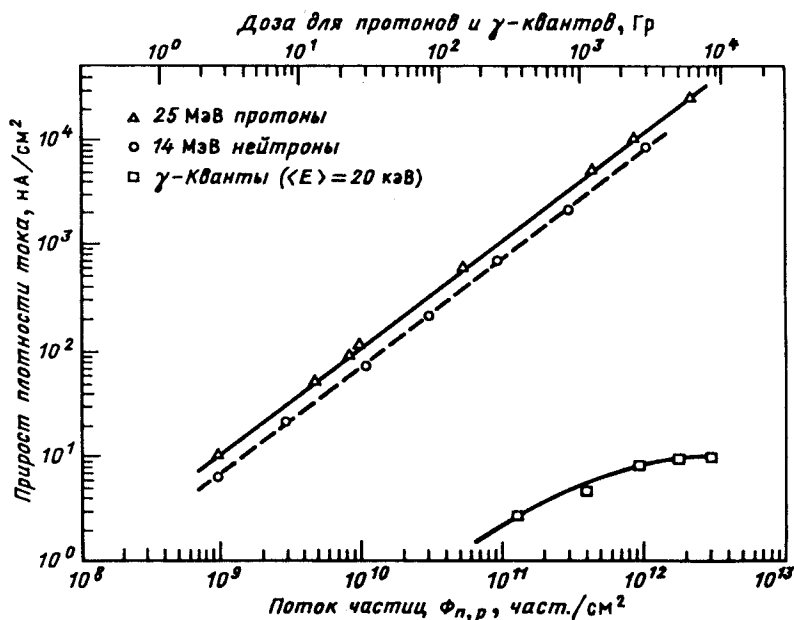


Рис. 19. Зависимость возрастания темнового тока на единицу площади детектора с толщиной 400 мкм от потоков частиц (в случае облучения протонами и нейтронами) — нижняя шкала; от поглощенной в детекторе дозы (для протонов и рентгеновских γ -квантов) — верхняя шкала [38]

ты отличаются более чем на 2 порядка. Это связано, по-видимому, с тем, что в полосковых детекторах, использовавшихся в работе [39], примерно половину поверхности детектора составляет граница раздела Si—SiO₂, в то время как в поверхностно-барьерных детекторах (Au—Si) с чувствительной площадью около 2 см² [38] пленка SiO₂ используется только для пассивации краев детектора и занимает очень малую часть его поверхности (облучение проводилось равномерно по всей физической площади детектора).

Данные работы [38] были дополнены в докладе этой же группы на Международной конференции по методике экспериментов на встречных пучках (15—21 марта 1990 г., Новосибирск) информацией об облучении тех же детекторов электронами с энергией 1,8 МэВ [41]. Объемный коэффициент возрастания темнового тока составил 0,15 нА/(см³·Гр), что как минимум в 20 раз меньше соответствующих данных, полученных в [39]. Это служит еще одним свидетельством в пользу того, что обнаруженное в работе [39] «необычное» поведение темнового тока от дозы ($\sim \sqrt{D}$) и сходство воздействия на детектор электронов с энергией 1,5 МэВ и фотонов с энергией 20 кэВ объясняется чисто поверхностными эффектами, которые в данном случае доминируют над объемными (для облучения электронами).

Для сравнения воздействия заряженных и нейтральных частиц на детектор применяется коэффициент возрастания объемного тока α_Φ , нормированный на поток частиц Φ , согласно формуле

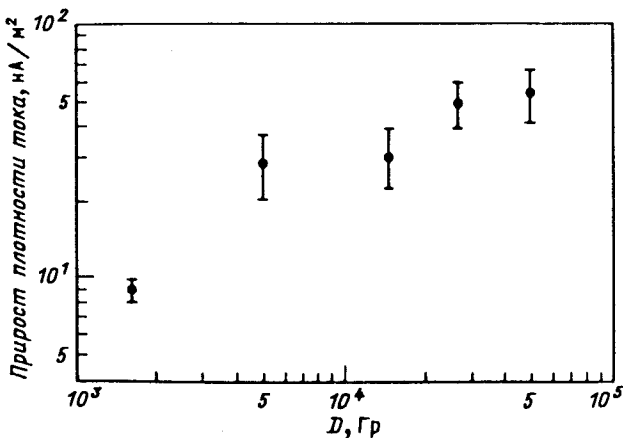


Рис. 20. То же, что и на рис. 19, для фотонов с энергией 6+30 кэВ по результатам работы [39]

$$\Delta I = \alpha_{\Phi} V\Phi.$$

Как следует из данных [38], этот коэффициент для протонов с энергией 25 МэВ примерно в $5 \cdot 10^3$ раз больше, чем для электронов с энергией 1,8 МэВ, в то время как ионизационные потери этих частиц отличаются только в 9 раз. Это не удивительно, поскольку сечения атомных столкновений и ионизации для этих частиц совершенно различны. Близкие результаты для протонов с энергией 25 МэВ и нейтронов с энергией 14 МэВ (см. рис.19) указывают на то, что в данном случае главную роль играют ядерные взаимодействия. При высоких энергиях адронов коэффициент α_{Φ} примерно на порядок меньше [24, 40, 42], чем при $T_{n,p} \cong 20$ МэВ.

Возникший в результате облучения темновой ток можно уменьшить, применяя различные методы высокотемпературной обработки детекторов (см., например, [13] и цитированную там литературу). При циклическом нагреве детекторов примерно до 200 °С удалось уменьшить темновой ток до 6% тока, измеренного через 1 ч после облучения, для детектора, облученного протонами, и до 17% для облученного нейтронами.

При комнатной температуре темновой ток также уменьшается со временем после облучения, но довольно медленно. Согласно данным из [13], за сутки ток падает до 70% от первоначального (через 1 ч после облучения), за месяц до 50%, за 100 сут до 40%. Это довольно медленное падение тока приводит к весьма слабой зависимости возрастания темнового тока от скорости набора дозы. Так, по данным [13], доза в 10^{13} нейтр./см², накопленная за год, приведет к возрастанию тока всего лишь втрое меньшему, чем если бы та же доза была получена за 1 ч работы.

Отметим, что ввиду разной природы объемных и поверхностных воздействий скорость самовосстановления детектора так же в этих случаях различна. Так, после облучения фотонами с энергией 20 кэВ, описанного в [39], темновой ток уменьшался за 6 ч примерно в 5 раз, а после облучения протонами и нейтронами, по данным [13], ток за 10 ч уменьшался на 20%.

Подводя итоги, можно сказать, что основным проявлением радиационного воздействия на полосковые детекторы является возрастание темнового тока от 10 до 100 нА/(см³·Гр), вызываемое как объемным, так и поверхностным воздействиями.

Для последних, вообще говоря, необходима нормировка на площадь, а не на объем детектора. Однако ввиду трудностей разделения поверхностных и объемных эффектов традиционно принятой является нормировка

на объем. Некоторым оправданием этому служит то, что толщина всех обычно используемых детекторов отличается не очень сильно (250÷400 мкм).

Считается, что предельно допустимый темновой ток с полоски не должен превышать 1 мкА. Принимая характерный объем полоски равным 1 мм^3 , получаем, что детектор способен выдержать от 10 до 100 кГр. Это значительно больше, чем может выдержать интегральная электроника, устанавливаемая обычно непосредственно на детекторе: для нее характерные предельные дозы составляют несколько сот грей.

ПЗС-матрицы имеют значительно меньшую радиационную стойкость, чем полосковые детекторы. По данным из работы [12] предельно допустимые дозы лежат в районе сотен грей. Дозы порядка 10 кГр ведут к серьезной деградации или полной неработоспособности детекторов. Более подробно эти вопросы рассмотрены в [12] и цитированной там литературе.

Ожидается, что наименее стойкими к радиации будут дрейфовые камеры ввиду серьезных требований к однородности дрейфового поля в детекторе и сильной зависимости координатного разрешения от уровня шумов и, следовательно, темнового тока. Однако экспериментальных данных по этому поводу пока нет.

5. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Для того чтобы решить проблему компактного съема информации с полосковых детекторов, имеющих шаг полосок 25÷50 мкм, были разработаны специальные микросхемы, содержащие зарядово-чувствительные усилители (ЗЧУ) с малыми $((1\div 2) \cdot 10^3$ электронов) шумами, расположенные с шагом 50÷100 мкм. В этих же микросхемах имеется коммутатор, позволяющий по одной шине последовательно выводить информацию, записанную параллельно в 64–128 каналах.

Микросхема MICROPLEX. Первое сообщение об этой совместной разработке физиков из США и ЦЕРН появилось в 1983 г. [6]. Позднее микросхема была значительно усовершенствована [43,44] и начала выпускаться промышленно фирмой ANALYTEK [45] под названием AN-301. Внешний вид микросхемы приведен на рис.21, ее принципиальная схема — на рис.22.

Микросхема выполнена по технологии NMOS с разрешением 5 мкм. Ее основные характеристики приведены ниже [46].

Основные характеристики микросхемы AN-301 (MICROPLEX)

Размер, мм	6,4×4,5
Число каналов	128
Диапазон входных сигналов, фКл	0÷200
Полоса пропускания сигнала, МГц	17,5
Входная емкость, пФ:	
статическая	~2
динамическая	~25
Минимальная длина управляющего сигнала для установления уровня лучше 1%, нс	50
Минимальное время нарастания управляющего сигнала, нс	5
Время хранения заряда при падении меньше 10%, мс	50
Линейность (без коррекций), %	±1
Полное усиление, мВ/фКл	10
Предельная частота считывания, МГц	2
Потребляемая мощность, мВт:	
аналоговая часть	2500
цифровая часть	500
полная	3000
Минимальное время установки при импульсном питании, мкс	2

Микросхема состоит из 128 каналов, обеспечивающих параллельное запоминание и последовательный вывод (при необходимости) аналоговой информации. Она достаточно универсальна и может применяться не только для полупроводниковых детекторов, но и в других устройствах, где требуется измерять большое количество аналоговых сигналов.

Основой канала является ЗЧУ с емкостью обратной связи порядка доли пикофарда. Напряжение на выходе ЗЧУ фиксируется в запоминающих емкостях C_1 и C_2 . В стандартном режиме работы на первой емкости запоминается состояние ЗЧУ до возможного события, на второй — после. При положительном решении внешней системы отбора (триггера) начинается процедура считывания накопленной информации, при отрицательном производится сброс заряда, накопленного в ЗЧУ, и цикл записи повторяется.

В режиме чтения информации в выходную линию обычно выдается разница напряжений на емкостях C_1 и C_2 , хотя возможно измерение напряжений на этих емкостях по отдельности. Переключение каналов происходит с помощью сдвигового регистра. Произвольная адресация невозможна, но чтение можно прервать, не доводя до конца, и очистить сдвиговый регистр. Кроме того, возможно предварительное считывание сумм по 16 каналов, а также суммы всех 128 каналов.

Несколько схем AN-301 можно объединить по выходу и опрашивать последовательно. Количество таким образом соединяемых схем опреде-

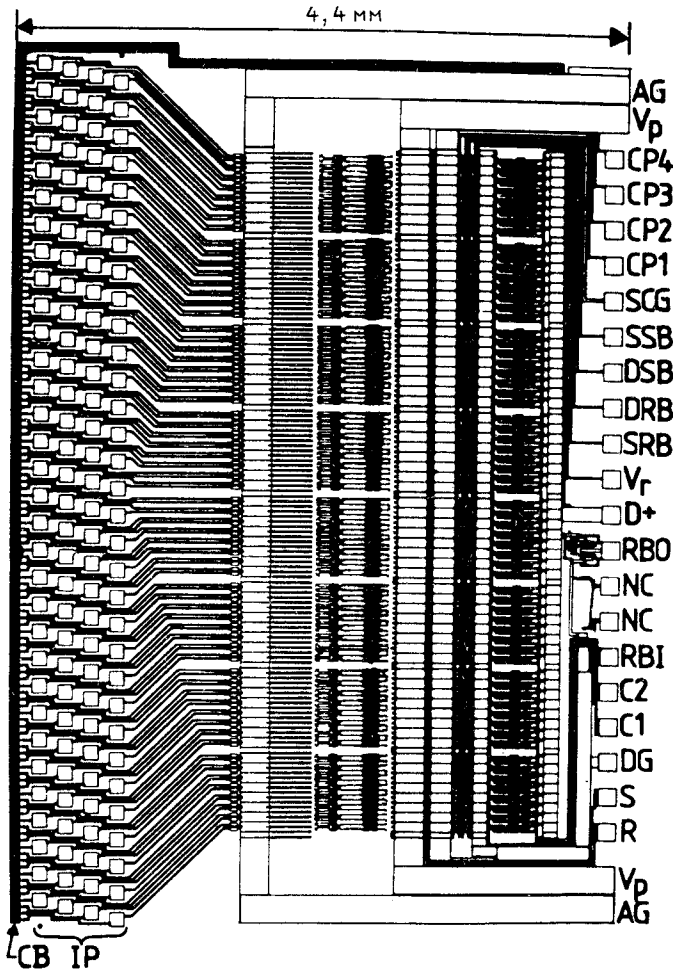


Рис. 21. Внешний вид одной из первых версий схемы MICROPLEX [6]: слева показаны 128 входных контактов, расположенных в 4 ряда; справа — контакты для подачи питания и сигналов управления

ляется допустимым в эксперименте временем чтения информации и временем памяти информации в емкостях C_1 и C_2 .

Шум, приведенный ко входу, зависит от деталей временной диаграммы, но ориентировочно может быть выражен формулой

$$\sigma_{\text{шум}}(\text{электр.}) = 350 + 100 C \text{ (C в пФ)}.$$

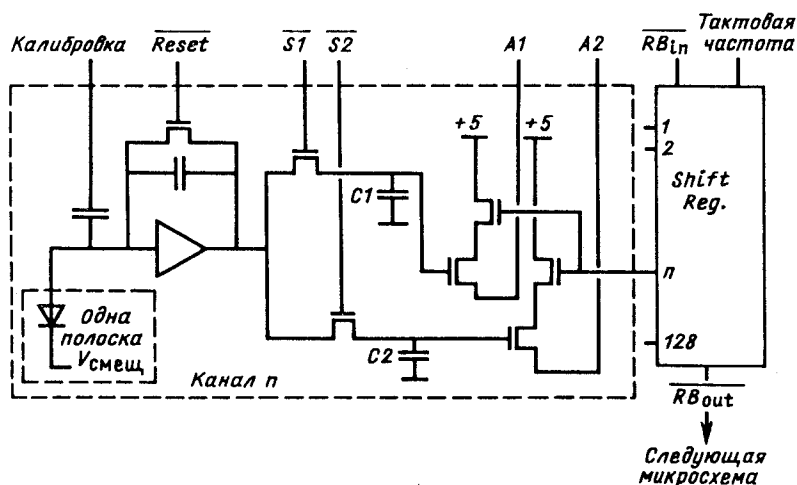


Рис. 22. Принципиальная схема MICROPLEX: Reset — ключ очистки интегрирующей емкости зарядово-чувствительного усилителя; S1 и S2 — ключи емкостей запоминания информации C1 и C2; A1 и A2 — контакты шины считывания; Shift Reg — сдвиговый регистр, поочередно подключающий C1 и C2 разных каналов к шинам A1 и A2 соответственно

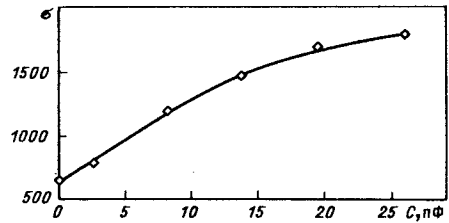
В [46] говорится, что при подключении к типичному полосковому детектору шум составляет около 2000 электронов. Примерно такой же результат следует из данных [27].

Для калибровки усилителей в микросхеме есть четыре канала, к которым через калибровочные емкости $\sim 0,01$ пФ присоединены входы всех усилителей через четыре (к первому каналу — усилители 1, 5, 9... и т.д.). Основным недостатком схемы является большая рассеиваемая мощность, что накладывает серьезные требования на обеспечение отвода тепла. В тех случаях, когда это возможно, как, например, в микровершинном детекторе MARK-II, используется импульсное питание в аналоговой части [28].

Микросхемы типа MX. Указанный выше недостаток послужил толчком к разработке совершенно аналогичной схемы, но выполненной в 5-мкм CMOS-технологии [47]. Эта микросхема, разработанная в Резерфордской лаборатории (Великобритания) и получившая название MX1, имела практически такие же параметры, но потребляла значительно меньшую мощность: 55 мВт суммарно для аналоговой и цифровой частей.

Дальнейшие усовершенствования привели к появлению микросхем MX2, а затем MX3 [48]. В них использована уже 3-мкм CMOS-техноло-

Рис. 23. Зависимость шума в электронах от емкости, подключенной на вход канала микросхемы МХЗ [48]. Время формирования ~ 7 мкс



гия. Размер микросхемы $6,40 \times 6,86$ мм, и она, как и все предыдущие, содержит 128 аналоговых

каналов и сдвиговый регистр для считывания. Полная потребляемая мощность не более 64 мВт. Предельная частота системы считывания составляет не менее 3 МГц [47]. Зависимость шума от емкости, присоединенной ко входу, при временах выборки ~ 7 мкс приведена на рис.23 [48].

Следует отметить, что совершенствование схемы сопровождалось уменьшением ее быстродействия по сравнению, например, со схемой MICROPLEX. Так, время нарастания сигналов в ЗЧУ микросхемы МХ2 составляет около 100 нс [29]. Микросхемы МХ3 планируется использовать в микровершинном детекторе в эксперименте DELPHI.

Микросхема CAMEX. Эта разработка, также опирающаяся на CMOS-технологии, началась практически одновременно с разработкой схемы MICROPLEX.

Микросхема разрабатывалась главным образом в Институте им.М.Планка в Мюнхене и предназначалась для микровершинного детектора эксперимента ALEPH [30]. В первых публикациях [5] рассматривалась возможность создания микросхемы, содержащей 128 каналов, расположенных с шагом 40 мкм, и энергопотреблением около 2 мВт/канал. Ход работ по этой микросхеме можно проследить по дальнейшим публикациям [49—51]. В последней из них говорится о существовании двух версий микросхемы: со 128 и 64 каналами, однако результаты даны только для версии с 64 каналами. В настоящее время промышленно выпускается только эта версия микросхемы, получившая название CAMEX-64 (CMOS Analog MultiPLExer). Ее производство освоила фирма ELMOS (ФРГ) [52]. Ниже приведены основные характеристики микросхемы [53].

Основные характеристики микросхемы CAMEX-64

Размер, мм	6,35×4,95
Число каналов	64
Диапазон входных сигналов, фКл	0÷100
Время нарастания сигнала в ЗЧУ, нс	70
Минимальное время выборки, нс	125
Минимальное время считывания одного канала, нс	300
Коэффициент усиления, мВ/фКл	15
Потребляемая мощность, мВт	не более 128

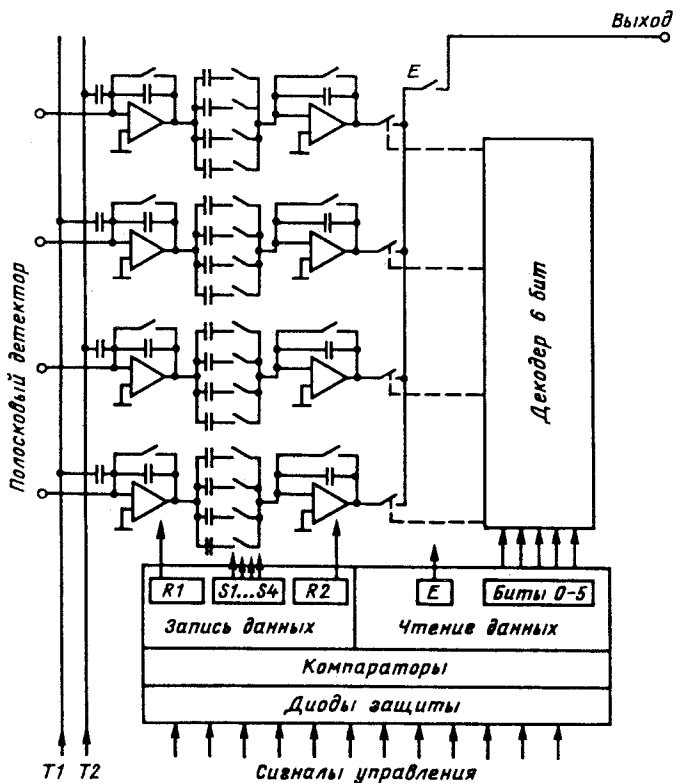


Рис. 24. Принципиальная схема CAMEX-64 (показаны 4 канала): $T1, T2$ — шины для подачи калибровочных сигналов; $R1, R2$ — ключи очистки интегрирующих емкостей первых и вторых зарядочувствительных усилителей во всех каналах; $S1+S4$ — ключи емкостей памяти между ЗЧУ₁ и ЗЧУ₂; E — ключ, присоединяющий выходную шину микросхемы к внешней магистрали; справа — 6-битовый декодер, подключающий индивидуальные каналы к выходной шине

Принципиальная схема приведена на рис.24, а внешний вид — на рис.25. Микросхема выполнена по 3-мкм CMOS-технологии [54].

Идеология CAMEX заметно отличается от идеологии, принятой в MICROPLEX и MX. Здесь имеется возможность произвести четыре двойных коррелированных выборки, в отличие от одной в схеме MICROPLEX. Это достигается за счет использования двух ЗЧУ в одном канале и четырех емкостей с ключами, расположенных между первым и вторым ЗЧУ

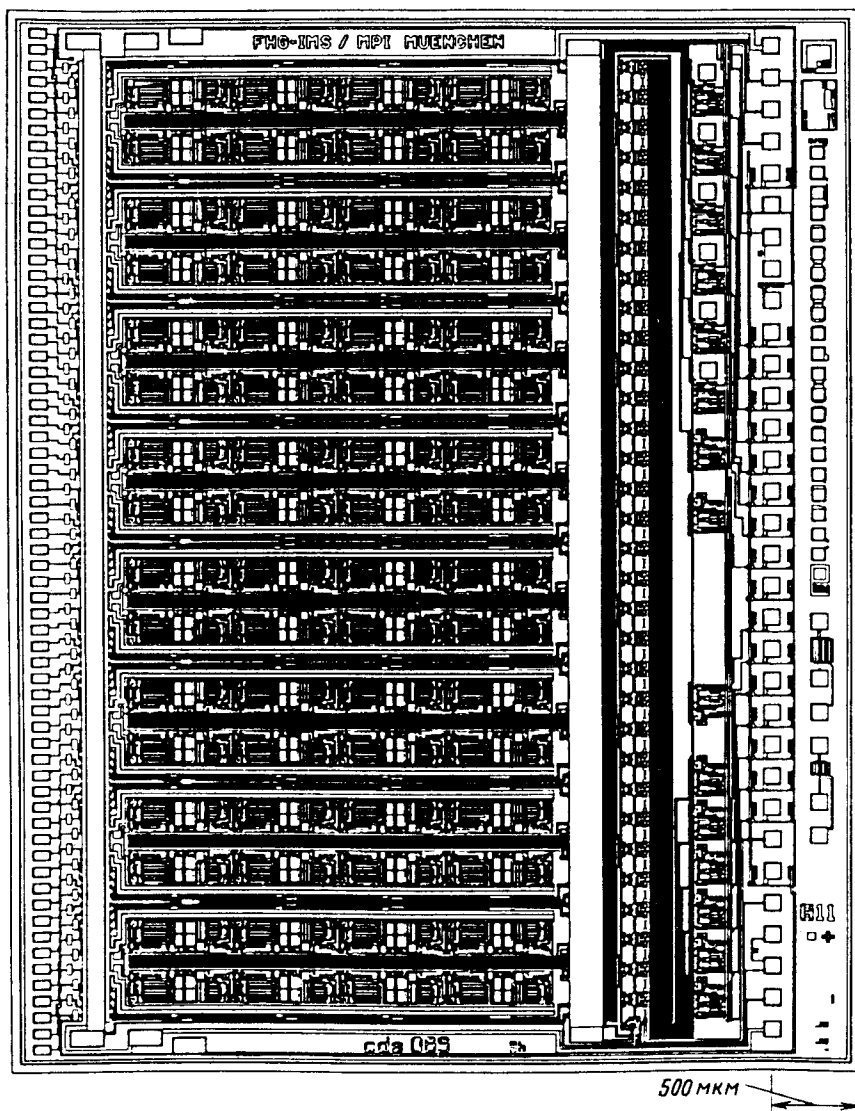


Рис. 25. Внешний вид микросхемы CAMEX-64: слева — 64 входа каналов, справа — на расстоянии 500 мкм от края — 32 контакта для подачи питания и сигналов управления. Некоторые управляющие контакты продублированы на верхнем и нижнем краях кристалла, для удобства соединения расположенных в ряд микросхем

Таблица. Шум канала микросхемы CAMEX

W , мВт	n	T , нс	σ_0 , эл	σ_c , эл/пФ
1,5	4	133	275	50
1,5	4	200	285	33
1,5	4	400	315	31
1,5	4	1000	335	30
1,5	4	1000	335	30
1,1	4	1000	340	30
0,75	4	1000	360	31
0,5	4	1000	510	38
1,5	4	1000	335	30
1,5	3	1000	390	35
1,5	2	1000	475	42
1,5	1	1000	670	58

(рис.24). Подключая эти емкости последовательно к выходу ЗЧУ₁, можно четырехкратно зафиксировать его состояние до момента появления сигнала. Интегрирующая емкость второго усилителя в это время закорочена. После прохождения сигнала включается ЗЧУ₂ и вновь последовательно замыкаются ключи четырех промежуточных емкостей. Если уровень сигнала на выходе ЗЧУ₁ после сигнала изменился, то емкости заряжаются на эту разность напряжений и этот ток регистрируется в ЗЧУ₂. В результате n выборок в ЗЧУ₂ накопится n -кратный сигнал и \sqrt{n} -кратный шум. При этом отношение сигнал/шум улучшается пропорционально корню из числа выборок.

В таблице приведены значения коэффициентов σ_0 и σ_c , определяющих шум канала по формуле

$$\sigma_{\text{полн}} = \sigma_0 + \sigma_c C$$

(C — в пФ) при различных наборах значений следующих основных параметров: потребляемая одним каналом мощность W , регулируемая напряжением питания; число двойных коррелированных выборок n и время выборки T (время между соседними включениями промежуточных емкостей). Следует иметь в виду, что для MICROPLEX и MX число $n = 1$. Из этой таблицы видно, что при $n = 1$ шум схемы CAMEX при нагрузке ~ 15 пФ, характерной для полоскового детектора, близок к тому, что получается в схемах MICROPLEX и MX3. Зависимость шума от n очень близка к ожидаемой $1/\sqrt{n}$. При нагрузках более 10 пФ выгодно увеличивать время выборки до значения не менее 300 нс.

Необходимо отметить также, что схема канала СAMEX, благодаря своей довольно сложной структуре, предоставляет большие возможности для оптимизации временной диаграммы управляющих сигналов в соответствии с конкретными условиями эксперимента, вплоть до изменения самой логики цикла записи информации.

Считывание информации в СAMEX ведется путем присоединения выходов вторых ЗЧУ к магистрали чтения. Но адрес читаемого канала задается не сдвиговым регистром, а декодером, что дает возможность произвольной адресации. Скорость считывания примерно такая же, как в схемах МХ.

Калибровочных линий в СAMEX только две: к одной подключены все нечетные, к другой — все четные каналы.

Недостатком схемы СAMEX по сравнению с МХ является вдвое меньшая плотность каналов. О реализации схемы СAMEX-128 опубликованных данных пока не имеется. Развитие этой работы идет по пути совершенствования имеющейся структуры. Одно из последних новшеств [54] состоит в замене выходного транзистора, что должно уменьшить шумы и увеличить радиационную стойкость микросхемы. Кроме того, предложена другая система проведения двойных коррелированных выборок, которая позволяет делать любое число выборок с помощью только одной емкости между ЗЧУ₁ и ЗЧУ₂. Новая микросхема, получившая название JAMEX-64, в настоящее время изготавливается и в будущем, возможно, заменит схемы СAMEX-64 в детекторе АLEPH [54].

Радиационная стойкость микросхем. Данные по этому вопросу весьма скудны и имеют широкий разброс. Общим в них является то, что предельно допустимая доза для микросхем, облучаемых при выключенном питании, значительно выше, чем при включенном. В первом случае дозы составляют несколько тысяч грей, во втором 100—200 Гр. Однако это только характерные цифры, а конкретные реализации микросхем дают очень разные результаты. Так, в работе [55] сообщается, что при облучении в выключенном состоянии γ -квантами от ^{60}Co три микросхемы MICROPLEX из четырех выдержали $\sim 10^4$ Гр, а одна вышла из строя при дозе 740 Гр. Восемь микросхем, облучавшихся во включенном состоянии, вышли из строя при дозах от 25 до 320 Гр. Подробное исследование причин отказа схем MICROPLEX проведено в работе [56].

О радиационной стойкости МХ1 известно [47], что дозу 30 Гр выдержали все восемь облучившихся во включенном состоянии микросхем, а 100 Гр не выдержала ни одна из них. При этом доза 30 Гр практически не сказалась на параметрах схемы. Облучение также проводилось с помощью источника ^{60}Co .

Аналогичным образом изучалась и радиационная стойкость микросхемы СAMEX. Кратко можно резюмировать результаты следующим об-

разом [57]: в выключенном состоянии микросхема сохраняет работоспособность вплоть до 2500 Гр, но шумы возрастают примерно вдвое уже при дозе 800 Гр [53]. При облучении во включенном состоянии схемы сохраняют работоспособность до 150—180 Гр с небольшим возрастанием шума, а затем скачкообразно выходят из строя полностью.

Таким образом, проблема радиационной стойкости специализированной электроники является весьма серьезной и ждет своего решения. Некоторые возможности подробно обсуждаются в [37].

6. НОВЕЙШИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ КООРДИНАТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ И ФОТОПРИЕМНИКОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Координатные полупроводниковые детекторы и электроника считывания тесно смыкаются и взаимно стимулируют развитие друг друга. В данном разделе рассмотрены некоторые разработки последних лет только в области собственно детекторов. Поэтому здесь отсутствует обсуждение таких активно развивающихся направлений, как предусилители, интегрированные на высокоомной пластине детектора, пиксельные детекторы, в которых диоды в виде полосок заменены диодами в виде отдельных эле-

ментов с размером порядка 100×100 мкм и где вся сложность проблемы сосредоточена в электронике считывания гигантского объема информации. Интересующимся этими вопросами можно порекомендовать некоторые недавние публикации [58—62] и цитированную там литературу.

Биполярный полосковый детектор. Эта совсем недавно появившаяся идея [63] принадлежит Р.Хорисберггеру из Института

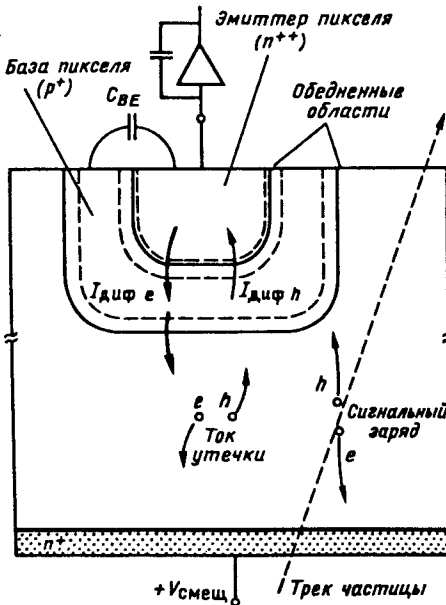


Рис. 26. Биполярный детектирующий элемент [63]: пунктиром показана траектория частицы, буквами e и h обозначены электроны и дырки, возникающие как вдоль трека частицы, так и по всему объему детектора вследствие тепловых флуктуаций. Принцип работы структуры см. в тексте

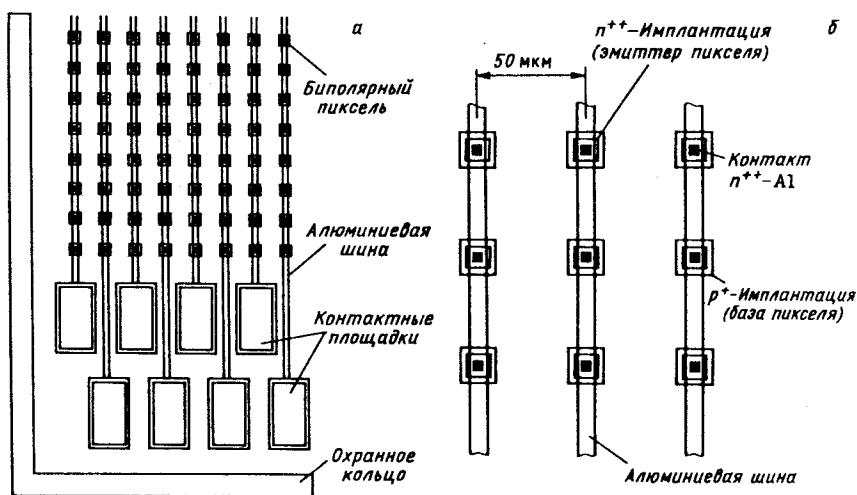


Рис. 27. Вариант объединения биполярных детектирующих элементов в полоски [63]

им.Пауля Шерера в Швейцарии. Суть ее проиллюстрирована на рис.26, где приведена схематично структура элемента, который автор назвал биполярным детектирующим элементом.

По сути, это биполярный транзистор, организованный на подложке из высокоомного n -кремния. Последняя вместе с n^+ -электродом является коллектором этого транзистора. Область p^+ служит базой транзистора, а небольшая n^{++} -область, в центре p^+ -зоны, — эмиттером, к которому присоединяется считывающая электроника. Запитывание транзистора происходит с помощью подачи на n^+ -сторону высокоомного кремния положительного смещения $+V_{смещ}$, а также через не показанный на рисунке очень высокоомный электрод, подключенный к p^+ -базе элемента.

Пересекшая высокоомный кремний заряженная частица оставит ионизационный след из электронов и дырок, которые в полностью обедненном слое коллектора немедленно дадут ток между n^+ и p^+ . В $n^{++}-p^+-n^+$ -транзисторе этот ток можно усилить, прежде чем он попадет в считывающую электронику. В обычных биполярных транзисторах легко достигается коэффициент усиления по току в сотни раз, но в данном случае вполне возможно, что усиления в 10—20 раз будет вполне достаточно для того, чтобы сделать последующую электронику простой и дешевой.

Для съема сигнала отдельные биполярные детектирующие элементы можно объединять в полоски, соединяя эмиттеры алюминиевой шиной, как показано на рис.27. Для двухкоординатного съема можно сделать в детектирующем элементе двойной эмиттер и объединить первые эмиттеры в x -, а вторые — в y -полоски. Конечно, сигнал по каждой из координат упадет при этом вдвое, но при наличии усиления в детектирующем элементе это не имеет значения. Существенно то, что все основные технологические операции осуществляются на одной стороне детектора и есть возможность в самом конце технологического процесса стравить с обратной стороны часть кремния, чтобы уменьшить толщину детектора. Это чрезвычайно важно для того, чтобы уменьшить многократное рассеяние частиц в детекторе. Уменьшение начальной ионизации преодолевается за счет усиления в детектирующем элементе.

В настоящее время заканчивается изготовление прототипа детектора [63], и скоро должны появиться результаты испытаний.

DEPMOS-структура. Эта структура была предложена в 1986 г. [64] Дж.Кеммером и Г.Лютцем из Мюнхена (ФРГ). Ее схема представлена на рис.28. По своей сути это расположенный на полностью обедненной (DEpleted) подложке из высокоомного кремния p -канальный полевой МОП-транзистор (PMOS). На обратной стороне высокоомного кремния

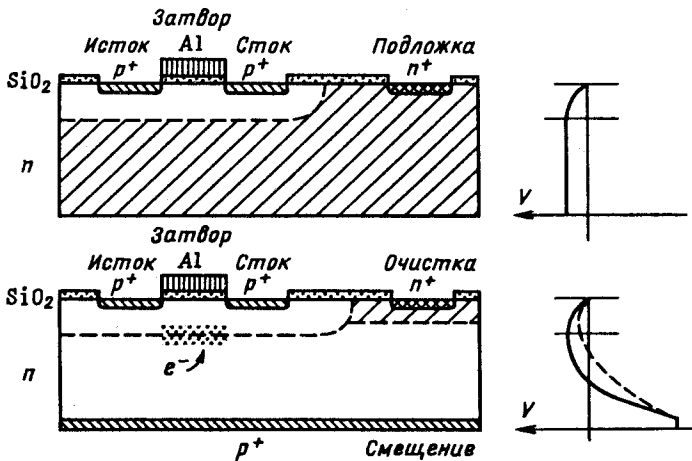


Рис. 28. Сравнение MOS-транзистора (верхний рисунок) и DEPMOS-структуры [64] (нижний рисунок): справа показан потенциал вдоль линии, идущей от нижнего края пластины к центру затвора. В потенциальном минимуме под затвором изображены электроны ионизации, собравшиеся из объема кремния; штриховой линией справа показан потенциал в присутствии заряда под затвором

расположен общий p^+ -электрод, а сбоку от структуры n^+ -электрод, через который происходит обеднение высокоомного кремния. Картина электрического поля в объеме высокоомного обедненного кремния похожа на ту, что возникает в полупроводниковой дрейфовой камере. Таким образом, можно сказать, что DEPMOS-структура — это комбинация ПДК и полевого транзистора.

Подавая необходимые напряжения на p^+ - и n^+ -электроды, можно сформировать потенциальный минимум для электронов вблизи поверхности, на которой расположен полевой транзистор, так что электроны ионизации, оставленной пролетевшей через высокоомный кремний частицей, соберутся в этом потенциальном минимуме под затвором полевого транзистора, как показано на рис.28. Распределение потенциала в объеме вдоль линии, идущей от общего p^+ -электрода к затвору транзистора, при этом изменится. Справа на рис.28 показан потенциал в отсутствие заряда под затвором (сплошная линия) и при наличии заряда (штриховая). Это изменение потенциала в объеме по своему действию на транзистор эквивалентно подаче некоторого напряжения на затвор, которое в обычном полевом транзисторе меняет проводимость канала от истока к стоку. Расчеты показывают [64], что влияние заряда q , попавшего в потенциальный минимум под затвором, почти такое же, как если бы этот заряд был инжектирован на свободный контакт затвора. В связи с этим авторы назвали такой потенциальный минимум внутренним затвором. Существенно, что заряд может храниться в потенциальном минимуме достаточно долго и его значение может быть измерено по состоянию транзистора, причем измерение никак не портит находящийся на «внутреннем затворе» заряд.

На основании последнего эффекта можно построить большое количество разнообразных детектирующих систем с усилением сигнала и органичным соединением DEPMOS-структуры с электроникой считывания. В качестве одного из примеров рассмотрим двумерный пиксельный детектор с произвольным неразрушающим съемом сигнала.

Структура устройства изображена на рис.29. [65]. Оно представляет собой двумерную матрицу, состоящую из DEPMOS-транзисторов с двумя затворами на полностью обедненной подложке, которая служит детектором частиц. Первые затворы всех транзисторов соединены в ряды, вторые (а также истоки и стоки транзисторов) — в столбцы. Индивидуальный транзистор может быть включен подачей отрицательного напряжения одновременно на соответствующий ряд и столбец затворов. Таким образом можно считать сигнал с отдельного элемента детектора. Кроме того, возможен быстрый грубый просмотр многих пикселей одновременно (напри-

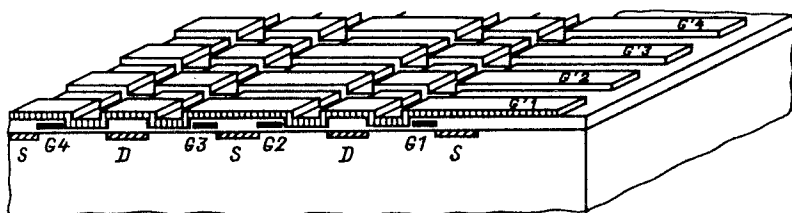


Рис. 29. Принципиальная схема пиксельного детектора с неразрушающим съемом информации и произвольной адресацией [65]: $G1+G4$ — затворы; S — истоки; D — стоки столбцов элементов (пикселей); $G'1 + G'4$ — затворы строк элементов

мер, всего ряда) для того, чтобы затем проводить подробный и медленный съем информации только с тех областей детектора, где есть сигнал.

Добавляя специальные электроды, можно организовать быструю очистку потенциальных минимумов (быстрый сброс сигнала), а также блокировку чувствительности детектора на нужное время [65]. Эти возможности выгодно отличают предложенный детектор от ПЗС-матрицы. Другое важное его достоинство: сбор ионизации с большей, чем в ПЗС, толщины плюс дополнительное усиление в полевом транзисторе — полностью снимает проблему слабых сигналов, столь сложную для ПЗС-детекторов. Все вместе делает предложенный детектор весьма перспективным для будущих экспериментов, где потребуются высокая пространственная точность и истинно двумерная реконструкция событий.

Еще более заманчивой выглядит высказанная в [65] идея многослойного пиксельного детектора, схема которого показана на рис.30. Суть состоит в том, чтобы сформировать под регистрирующей поверхностью несколько двумерных слоев потенциальных минимумов и создать систему электродов, позволяющую передвигать вертикально двумерное распределение зарядов.

Возможны два режима работы устройства. В первом событие регистрируется в детектирующей части из высокоомного кремния, лежащей под слоями хранения-сдвига. Затем информация собирается в нижнем из слоев и передвигается на хранение в вышележащий слой. По приходе следующего события процедура повторяется, и информация о первом событии передвигается еще выше. Когда она доходит до самого верхнего слоя, она считывается с помощью описанной выше двумерной системы DEPMOS-транзисторов или сбрасывается, если к тому моменту выяснится, что данное событие интереса не представляет. Устройство позволяет перераба-

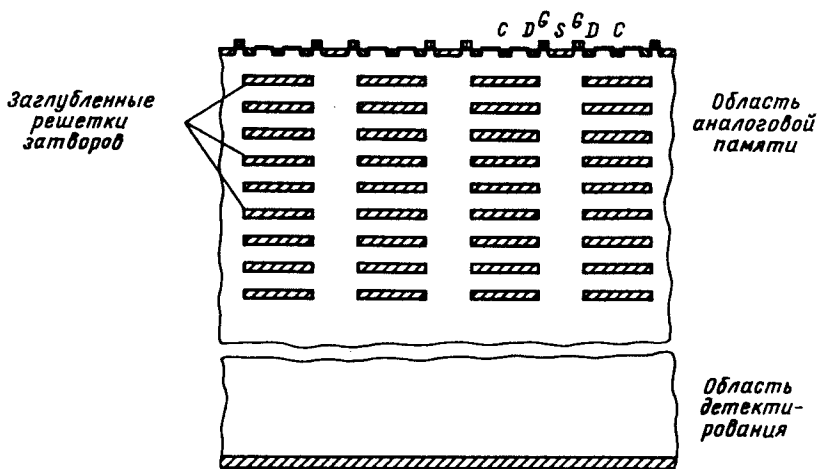


Рис. 30. Структура многослойного пиксельного детектора, предложенного Дж. Кеммером и Г. Лютцем [65]: в верхней части схематично показаны слои хранения сдвига аналоговой информации, внизу — детектирующая часть в виде объема обедненного кремния. На верхней плоскости детектора расположена регистрирующая часть, аналогичная изображенной на рис.29

тывать большие потоки событий и дает достаточное время для решения вопроса об отборе полезных событий (триггера).

В другом режиме система запоминающих — сдвигающих электродов распространяется на весь объем и является одновременно и чувствительной зоной детектора. В этом случае можно зафиксировать трехмерную картину энерговыделения в одном событии. Конечно, чувствительный объем, приходящийся на один слой, при этом становится весьма малым, но для специальных задач, например регистрации медленных частиц с небольшой глубиной проникновения и сильной ионизацией, это устройство может оказаться очень полезным. В некотором роде такую систему можно назвать «электронной фотоэмульсией». (Напомним, что в обычной фотоэмульсии оптическим методом восстанавливается подробная трехмерная картина энерговыделения частиц в тонком слое эмульсии.) Однако, в отличие от фотоэмульсии, электронный детектор управляем, т.е. может включаться или блокироваться в нужные моменты времени, и позволяет легко автоматизировать процесс сбора и обработки информации.

Конечно, предложенные идеи пока очень схематичны и требуют большого объема технологической проработки, чтобы дать ответ на вопрос о возможности их реализации, но их перспективность сомнений не вызывает.

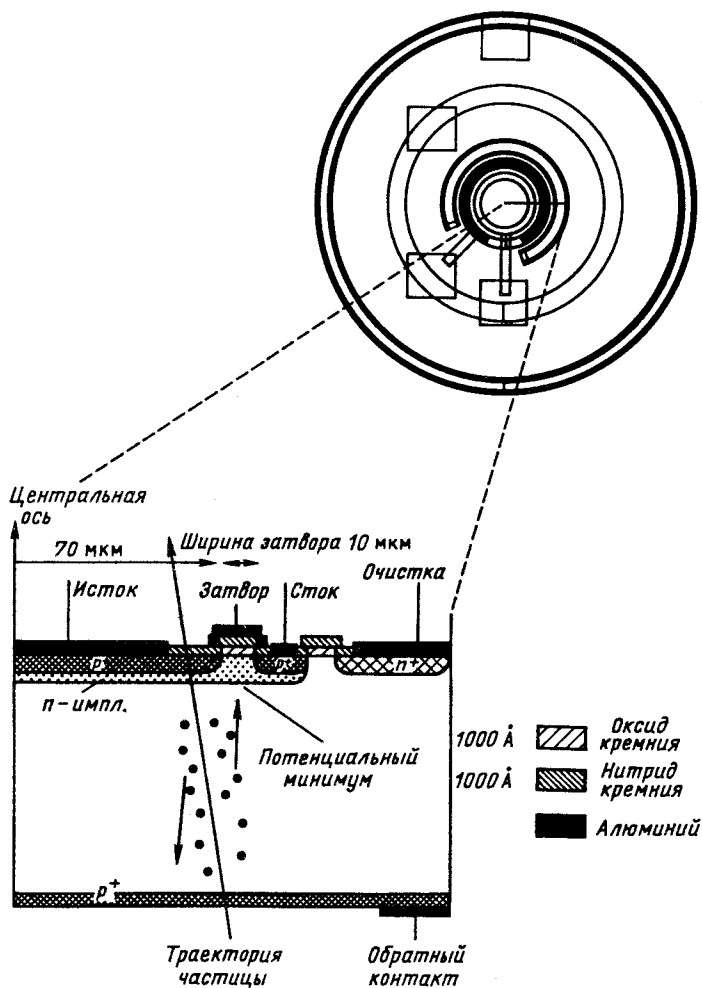


Рис. 31. Тестовая DEPMOS-структура [66]: вид сверху и разрез вдоль показанной на верхнем рисунке линии; на нижнем рисунке показана структура детектирующей части, аналогичной изображенной на рис. 28⁸; траектория частицы, пересекающей детектор, и порожденные ею электрон-дырочные пары, движущиеся вверх и вниз в электрическом поле обедненной области. Весь транзистор размещен внутри глубокой слаболегированной n -области, что улучшает характеристики прибора. Справа сверху на структуре — p^+ -электрод очистки потенциального минимума

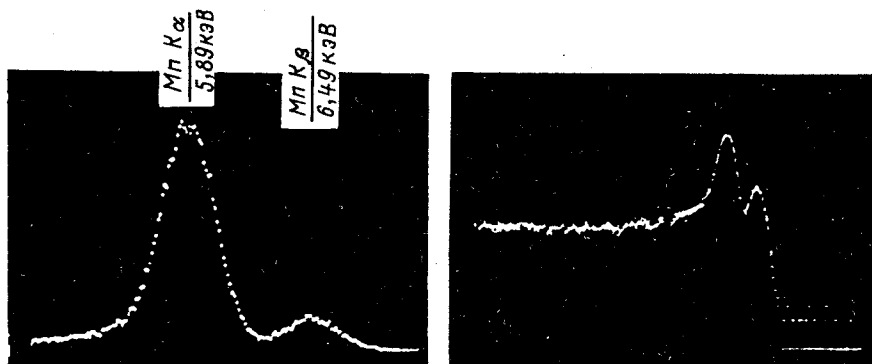


Рис. 32. Спектр фотонов от источника ^{55}Fe , соответствующий линиям 5,89 и 6,49 кэВ: слева — в линейном, справа — в логарифмическом масштабе. Полученное разрешение $\text{FWHM} = 250$ эВ, что соответствует шумам $\sigma = 30$ электронов

На последнем Мюнхенском симпозиуме по полупроводниковым детекторам в 1989 г. группа физиков из Института им. Макса Планка и фирмы Мессершмидт — Бельков — Блом, расположенных в Мюнхене, сообщила об экспериментальном подтверждении принципа работы DEPMOS-структуры [66]. Схема использовавшейся тестовой структуры показана на рис.31.

В ней присутствуют все основные элементы DEPMOS-транзистора, только для упрощения проблемы краевых эффектов геометрия выбрана цилиндрически-симметричной и затвор имеет форму окружности с радиусом 70 и шириной 10 мкм.

Измерения показали хорошее соответствие параметров структуры ожидаемым из приведенных детальных расчетов.

На γ -источнике ^{55}Fe с использованием усилителя с временем формирования 10 мкс были четко разделены линии 5,89 и 6,49 кэВ (рис.32). Ширина на полувысоте пика составляет 250 эВ, что дает шум электроники $\sigma = 30$ электронов. По-видимому, это лучшее на сегодняшний день разрешение для полупроводниковых детекторов при комнатной температуре. Следует отметить, что этот результат был получен при первых же измерениях с использованием очень простой аппаратуры и вовсе не является предельным. В работе [66] перечислен ряд усовершенствований, которые, по мнению авторов, должны заметно улучшить и эту рекордную цифру.

Подводя итог, можно сказать, что в настоящий момент DEPMOS-структуры являются одним из самых многообещающих направлений развития координатных полупроводниковых детекторов.

Дрейфовые фотодиоды. Еще одно устройство, порожденное идеей полупроводниковой дрейфовой камеры [22], было предложено в качестве фотодетектора со сверхмалой емкостью Дж.Кеммером и Г.Лютцем с соавторами. Идея и первые результаты, полученные на прототипе, приведены в работе [67].

Принцип действия структуры проиллюстрирован на рис.33. На одной стороне пластины из высокоомного n -кремния создана типичная для ПДК структура из p^+ -полосок, окружающих n^+ -анод. На другой стороне пластины расположен общий p^+ -электрод, который можно не подключать ни к какому напряжению, освободив эту поверхность детектора от электрических контактов и упростив тем самым ее оптический контакт с источником света, например скинтиллятором. Напряжение смещения подается между n^+ -анодом и крайней из p^+ -полосок. На оставшихся полосках напряжение устанавливается само собой, но для того чтобы сделать поле в детекторе более стабильным, по-видимому, стоит подключать, хотя бы частично, и остальные полоски через высокоомный резистивный делитель.

По мере роста напряжения смещения происходит обеднение сначала нижней части детектора при напряжении полного обеднения U_T (рис.33,а и б), а затем и верхней области при напряжении $U = 2U_T$ (рис.33,в и г). В результате в объеме структуры образуется дрейфовый канал для электронов, идущий от верхнего «плавающего» p^+ -электрода к n^+ -аноду, показанный на рис.33 сплошной линией (заметим, что при $U > U_T$ на верхнем p^+ -электроде устанавливается постоянное напряжение U_T). Фотоны, падающие на детектор со стороны верхнего p^+ -электрода, поглощаются в первых нескольких микрометрах поверхностного слоя. Родившиеся дырки уходят на край верхнего электрода и затем схватываются к крайней p^+ -полоске, а электроны стекают в дрейфовый канал и по нему собираются на анод. Время собирания заряда почти квадратично зависит от расстояния до анода, так как поле E убывает примерно пропорционально r , а скорость дрейфа $v \sim E$. Зависимость времени дрейфа и светочувствительности детектора от расстояния до анода в пределах 0,8 мм показана на рис.34.

В работе [67] отсутствует подробное описание геометрии структуры, но по косвенным данным можно заключить, что чувствительная область размером 1 см^2 разделена на четыре области $2 \times 12 \text{ мм}$ и каждая область представляла собой независимый прямоугольной формы фотодиод. Внешний p^+ -электрод располагался на расстоянии 0,8 мм от анода, а вре-

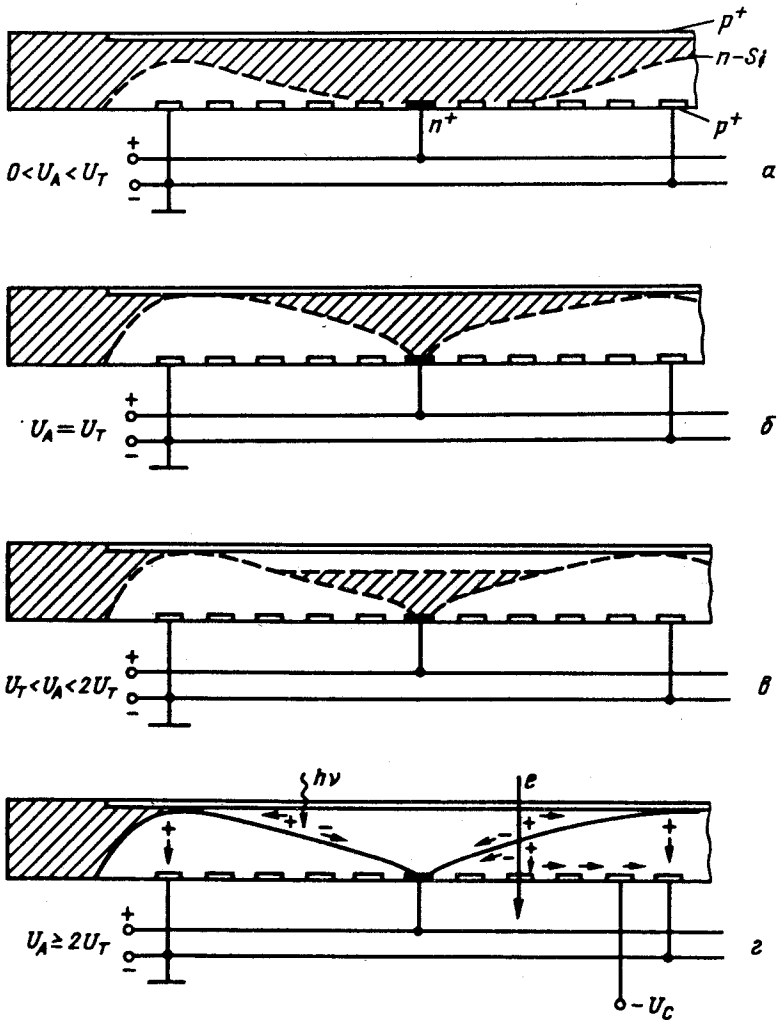


Рис. 33. Принципиальная схема дрейфового фотодиода со сверхмалой емкостью [67]. Показано распределение обедненных областей для различных напряжений. U_T соответствует напряжению, когда область обеднения касается верхнего «плавающего» p -электрода. Полное обеднение наступает при $U = 2U_T$. Сплошной линией на нижнем рисунке показан дрейфовый канал для электронов, собирающихся на анод, помеченный черным прямоугольником в центре нижней плоскости

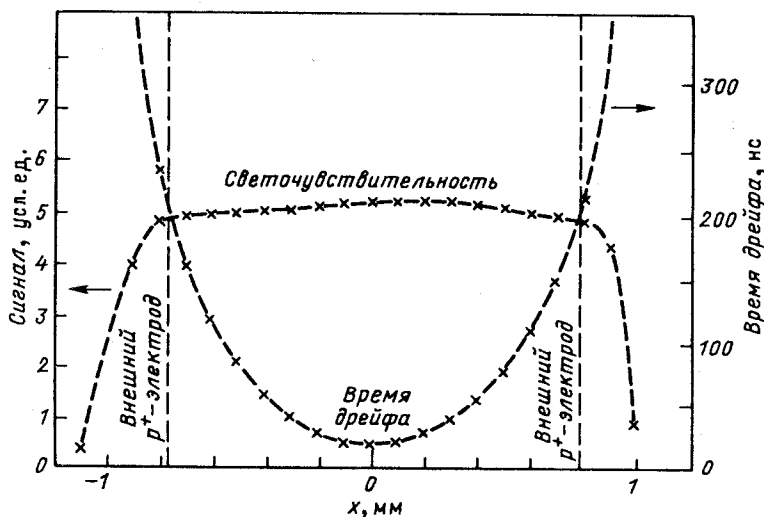


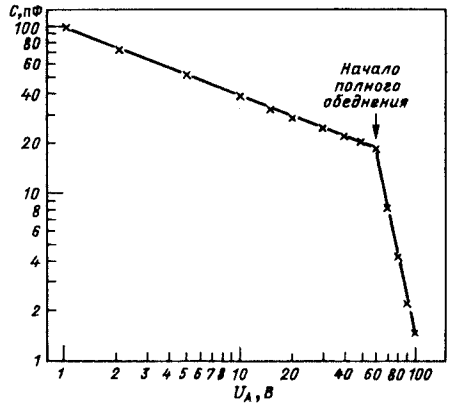
Рис. 34. Зависимость светочувствительности фотодиода и времени дрейфа сигнала на анод от расстояния до анода в интервале ± 1 мм. Подробности геометрии структуры см. в тексте

мя дрейфа и чувствительность, показанные на рис.34, измерены вдоль кратчайшего пути от внешнего p^+ -прямоугольного кольца к n^+ -аноду.

Максимальное время дрейфа при этом составляет 200 нс, а о времени дрейфа из угла структуры говорится, что оно около 300 нс. Фоточувствительность детектора, как видно из рис.34, практически постоянна внутри области, ограниченной внешним p^+ -кольцом.

Большое время собирания сигнала по сравнению с обычными $p-i-n$ -диодами [68], для которых оно составляет 10—15 нс, является основным недостатком дрейфового фотодиода. Однако большим его преимуществом является сверхмалая емкость анода. При полном обеднении структуры удастся получить емкость $\sim 1,5$ пФ/см² чувствительной области, в то время как для обычных $p-i-n$ -диодов эта цифра составляет около 70 пФ/см² [68]. На рис.35 показана зависимость емкости дрейфового фотодиода от напряжения смещения. При напряжении U_T , при котором обедненная область касается верхнего p^+ -электрода, на $C-V$ -характеристике наблюдается излом, после чего емкость резко убывает до очень малых значений. При временах высвечивания в несколько сот наносекунд, характерных для таких широко распространенных сцинтилляторов, как NaI и CsI, время дрейфа 200 нс является вполне приемлемым. В то же

Рис. 35. Зависимости емкости анода структуры, изображенной на рис.33, от напряжения смещения. Излом С-V-характеристики происходит при $U = U_T = 65$ В. Минимальная емкость 1,5 пФ, площадь структуры ~ 1 см². Четыре анодные полоски — на питании, внешнее p^+ -кольцо — на земле



время значение емкости анода является серьезной проблемой при достижении минимального уровня шумов предусилителя (см., например, [11]).

Фотодиоды, подобные описанным в [67], были изготовлены независимо другой группой физиков [69], которые подтвердили основные свойства этих структур.

Тем временем Дж.Кеммер и Г.Лютц с соавторами изготовили и испытали новую версию дрейфового фотодиода, так называемый «спиральный диод» [70]. Его основное отличие от описанного выше состоит в том, что p^+ -концентрические кольца заменены непрерывной p^+ -спиралью, на концы которой подается напряжение. Дрейфовое поле создается за счет равномерного падения напряжения на омическом сопротивлении p^+ -спирали. Чувствительная область имеет форму шестиугольника с площадью $\sim 1,5$ см². Практически точечный анод расположен в центре спирали. Благодаря такой геометрии при полном обеднении удалось добиться емкости анода $\sim 0,1$ пФ [70]. Другим важным достоинством предложенной структуры является вспомогательный анод, расположенный вблизи основного анода на самом выходе из образованного p^+ -электродом спиралевидного коридора. Главная задача вспомогательного анода — собирать поверхностный темновой ток, который сильно зависит от деталей технологического процесса и поэтому трудно предсказуем и часто бывает весьма большим. На основной анод при этом собирается только объемный темновой ток, стабильности которого при изготовлении детекторов добиться гораздо проще. На образце, изучавшемся в работе [70], был получен темновой ток основного анода менее 1 нА. Для фотодиода с такой площадью это на уровне лучших мировых стандартов.

К недостаткам описанной в [70] структуры относится очень большое время дрейфа сигнала с края детектора (в работе об этом ничего не говорится, но можно оценить, что он не меньше нескольких микросекунд) и высокие требования к однородности сопротивления p^+ -спирали. Кроме

того, ток, текущий по спирали, приводит к дополнительному нагреву структуры, что, в свою очередь, повышает объемный темновой ток. Представляется целесообразным попытаться совместить основные достоинства структур, описанных в работах [67, 69, 70], в едином устройстве. Детали геометрии при этом должны оптимизироваться с учетом данной конкретной задачи.

Тем не менее кажется весьма вероятным, что дрейфовые фотодиоды найдут широкое применение в будущих экспериментах по физике элементарных частиц (см., например, [71]).

В заключение автор выражает глубокую признательность В.М.Аульченко (ИЯФ СО РАН), Г.Линдстрему (I Институт экспериментальной физики Гамбургского университета), Э.Лоренцу и Г.Лютцу (Институт физики и астрофизики им.Макса Планка, Мюнхен) за многочисленные обсуждения, которые в немалой степени способствовали прояснению понимания автором многих проблем в целом ряде вышеизложенных вопросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McKay K.G. — *Phys. Rev.*, 1951, vol.84, p.829—832.
2. Kemmer J. — *NIM*, 1980, vol.169, p.499—502.
3. Nyams B. et al. — *NIM*, 1983, vol.205, p.99—105.
4. Hosticka B.J. — *NIM*, 1984, vol.226, p.185—189.
5. Hofmann R. et al. — *NIM*, 1984, vol.226, p.196—199.
6. Walker J.T. et al. — *NIM*, 1984, vol.226, p.200—203.
7. Таблицы физических величин: Справочник (Под ред. И.К.Кикоина). М.: Атомиздат, 1976.
8. Дирли Дж., Нортрон Д. — Полупроводниковые счетчики излучений: Пер. с англ. М.: Мир, 1966.
9. Heijne E.H.M. — CERN 83-06/EP, Geneva, 1983.
10. Ten Kate W.R.Th. — *NIM*, 1987, vol.A253, p.333—349.
11. Radeka V. — *NIM*, 1984, vol.226, p.209—218.
12. Damerell C.J.S. — *RAL*, 86-077, July, 1986.
13. Lindstrom G. et al. — Preprint DESY 89-105, August, 1989.
14. Caccia M. et al. — *NIM*, 1987, vol.A260, p.124—131.
15. Dijkstra H. et al. — Preprint CERN EP/88-144, October 25, 1988.
16. Astakhov V.I. et al. — *JINR Rapid Communications*, No.1 (40)-90, Dubna, 1990, p.45—51.
17. Lange W. et al. — *Proc. Intern. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics*. Novosibirsk. World Scientific, 1990, p.142—147.
18. Particle Data Group — *Phys. Lett.*, 1988, vol.B204.
19. Holl P. et al. — *IEEE Trans. NS*, 1989, vol.36, No.1, p.251—255.
20. Becker H. et al. — *IEEE Trans. NS*, 1990, vol.37, No.1, p.87—92.
21. Avset B.S. et al. — Preprint CERN EP/90-11, Geneva, 1990.
22. Gatti E., Rehak P. — *NIM*, 1984, vol.225, p.608—614.
23. Bailey R. et al. — *NIM*, 1984, vol.226, p.56—58.
24. Diefl H. et al. — *NIM*, 1987, vol.A253, p.460—466.
25. England J.B.D. et al. — *NIM*, 1981, vol.185, p.43—47.
26. Radeka V., Boie R. — *NIM*, 1980, vol.178, p.543—554.

27. Adolphsen C. et al. — NIM, 1987, vol.A253, p.444—449.
28. Litke A. et al. — NIM, 1988, vol.A265, p.93—98.
29. Burns M. et al. — NIM, 1989, vol.A277, p.154—159.
30. Holl P. et al. — NIM, 1987, vol.A257, p.587—590.
31. Becker H. et al. — IEEE Trans. on NS, 1989, vol.36, p.246—250.
32. Damerell C.J.S. et al. — NIM, 1987, vol.A253, p.478—481.
33. Damerell C.J.S. et al. — NIM, 1990, vol.A288, p.236—239.
34. Antinori F. et al. — NIM, 1990, vol.A238, p.82—86.
35. Sadrozinski H.F.-W., Seiden A. — Preprint SCIPP 89/50, October, 1989.
36. Van Lint V.A.J. — NIM, 1987, vol.A253, p.453—459.
37. Dawes W.R.Jr. — NIM, 1990, vol.A288, p.54—61.
38. Fretwurst E. et al. — NIM, 1990, vol.A288, p.1—12.
39. Chilingarov A.G. et al. — NIM, 1990, vol.A288, p.62—67.
40. Campanella M. et al. — NIM, 1986, vol.A243, p.93—97.
41. Lindström G. et al. — Proc. of the 5-th Intern. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Novosibirsk. World Scientific, 1990, p.331—347.
42. Ohsugi T. et al. — NIM, 1988, vol.A265, p.105—111.
43. Anzivino G. et al. — NIM, 1986, vol.A243, p.153—158.
44. Adolphsen C. et al. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1986, vol.33, p.57—59.
45. Analytek Ltd., 845 Oak Grove Ave.100, Menlo Park, CA 94025, USA.
46. Технические данные микросхемы, AN 301. ANALYTEK Ltd. June 1987.
47. Seller P. et al. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1989, vol.36, No.1, p.176—180.
48. Stanton J.C. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1989, vol.36, No.1, p.522—527.
49. Buttler W. et al. — NIM, 1987, A253, p.439—443.
50. Buttler W. et al. — NIM, 1988, vol.A273, p.778—783.
51. Buttler W. et al. — ICFA Instrumentation Bulletin, 1988, No.5, p.32—37.
52. ELMOS, Emil-Figge Str. 81, D-4600, Dortmund, BRD.
53. CAMEX-64, Data Sheet.
54. Buttler W. et al. — NIM, 1989, vol.A279, p.204—211.
55. Breakstone A. et al. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1987, vol.NS-34, p.491—496.
56. Dauncey P. et al. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1988, vol.35, p.166—170.
57. Lutz G. — Proc. of XXIV Intern. Conf. on High Energy Phys., Aug.4—10. Munich, 1988, p.1249—1255.
58. Wouters S.F. et al. — NIM, 1990, vol.A288, p.44—47.
59. Vanstraelen S. et al. — NIM, 1989, vol.A275, p.574—579.
60. Shapiro S.L. et al. — NIM, 1989, vol.A275, p.580—586.
61. Heijne E.H.M., Jarron P. — NIM, 1989, vol.A275, p.467—471.
62. Krummenacher E. et al. — NIM, 1990, vol.A288, p.176—179.
63. Horisberger R. — NIM, 1990, vol.A288, p.87—91.
64. Kemmer J., Lutz G. — NIM, 1987, vol.A253, p.365—377.
65. Kemmer J., Lutz G. — NIM, 1988, vol.A273, p.588—592.
66. Kemmer J. et al. — NIM, 1990, vol.A288, p.92—98.
67. Kemmer J. et al. — NIM, 1987, vol.A253, p.378—381.
68. Yamamoto K. et al. — NIM, 1987, vol.A253, p.542—547.
69. Avset B.S. et al. — NIM, 1990, vol.A288, p.131—136.
70. Rehak P. et al. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1989, vol.36, No.1, p.203—209.
71. Hall G. — Preprint, Imperial College, IC/HEP/89/7, October. London, 1989.
72. Rehak P. et al. — NIM, 1985, vol.A235, p.224—234.