

несовершенных носителей (обеднённые области). Потенциальные ямы под электродами разделены потенциальными барьерами. Совокупность потенциальных ям (ячеек) образует матрицу. Вводить заряд в ячейку можно термо- или фотогенерацией, а также за счёт свободных носителей фотона, образуемых заряж. частицей. При подаче на электроды последовательности тактовых импульсов напряжения происходит управляемое перемещение зарядов, накопившихся в потенциальных ямах, вдоль полупроводниковой подложки в выходной регистр и далее в выходное устройство [4].

До прихода управляющего (триггерного) сигнала (см. Триггер) напряжения на ячейках матрицы устанавливаются малыми. С помощью внеш. источника света все ячейки матрицы заполняются носителями (избыток уходит в подложку), чтобы потенциальные ямы полностью отсутствовали. В этой ситуации при прохождении частицы образовавшиеся носители диффузионно рассасываются и рекомбинируют (см. *Рекомбинация носителей заряда*). По триггерному сигналу через ~100 нс после регистрируемого события (время «быстрой электроники») на матрицу подаются рабочие напряжения, появляются потенциальные ямы, в к-рые происходит сбор носителей вблизи траектории частицы.

Комбинируя неск. матриц, просл. веществом мишени, создают т. н. вершинные детекторы [3,4]. По координатам точек прохождения и я частиц через ПЗС определяют траектории частиц. Пересечение траекторий позволяет непосредственно наблюдать точку (вершину) траектории, где произошло первичное взаимодействие или распад исследуемых частиц (см. *Комбинированные системы детекторов*).

Релятивистская частица оставляет в Si (подложке) ок. 110 электронно-дырочных пар на 1 мкм траектории. Сбор носителей заряда осуществляется с глубины потенциальной ямы ~10 мкм (пучок частиц направлен перпендикулярно матрице), а также за счёт диффузии с глубины ~50 мкм. В результате этого с учётом диффузионного размытия на центр ячейку приходится ~1,5 · 10³ носителей. Благодаря малой выходной ёмкости ПЗС (~0,1 пФ) этот заряд создаёт на выходе сигнал ~1 мВ.

ПЗС обычно состоит из двух независимых секций — накопления и памяти. Пучок частиц падает на секцию накопления. По приходе триггерного сигнала информация за время ~50 мкс быстро выносится из области пучка в секцию памяти, откуда поэлементно считывается.

Разрешающее время ПЗС-Д. (точность, с к-рой можно определить момент прохождения частицы через детектор) определяется диффузионным размытием заряда по ячейкам. За счёт диффузионного размытия трека до подачи триггерного сигнала собранный заряд для исследуемой частицы имеет распределение по ячейкам с шириной на половине высоты, равной 3 ячейкам. Для фоновых частиц это распределение имеет др. ширину. Анализируя быстрым процессором на выходе ПЗС ширины распределения, можно определить момент прохождения частицы с точностью до 400 нс при T = 300 К и 100 нс при T = 100 К.

Мёртвое время прибора τ_м определяется временем считывания информации. При тактовой частоте f ~ 10 МГц крупноформатная матрица считывается за время порядка 10 мс, для проектируемых ПЗС с f = 1 ГГц (время τ_м ~ 0,1 мс).

Шумы прибора включают шум предусилителя (расположенного на кристалле Si), флуктуации фонового заряда, системный шум (нестабильность источника питания и т. д.). Значит. часть шума можно подавить с помощью двойной коррелиров. выборки. Для частоты считывания ~10 МГц суммарный среднеквадратичный шум ~100 носителей при T = 300 К (~50 носителей при T = 100 К). Отношение сигнал/шум ~10. Эффективность регистрации одиночной релятивистской частицы > 98%.

Макс. загрузка детектора определяется кол-вом фоновых частиц за время его чувствительности (время накопления, быстрого сброса в секцию памяти и время считывания). При загрузках ~ 10⁶ с⁻¹ фоновых частиц с учётом т. н. гало пучка (~1%) срабатывает ~200 ячеек (0,2% полезной площади), т. е. эффективность регистрации исследуемых частиц практически не изменится.

Диффузионное размытие определяет координатное разрешение — точность локализации точки траектории. Исследуя «центр тяжести» распределения заряда по ячейкам, можно для ячеек размером 20 × 20 мкм² получить координатное разрешение σ = 1—6 мкм (в зависимости от ширины распределения). Разрешение между треками составляет 40—100 мкм. С увеличением детектирующих матриц координатное разрешение улучшается в 1/√n раз, где n — число матриц. Используя 10 матриц, можно измерять т. н. распадные длины (путь, проходимый короткоживущей частицей до распада) ~ 10 мкм и достичь возможности измерять времена жизни частиц ~ 5 · 10⁻¹⁵ с.

ПЗС применяют для съёма световой информации с искровых и стримерных камер, а также с пропорциональных камер. При этом свет путём переизлучения вводится в сцинтиллирующие волокна и далее в ПЗС. Перспективны сцинтилляц. годоскопы и детекторы на волокнах [5]. Свет от таких детекторов усиливается электронно-оптич. преобразователями и выводится на ПЗС. В детекторе на сцинтилляц. волокнах (диам. ~ 25 мкм) получено σ ~ 20 мкм при межтрековом разрешении ~50 мкм (см. *Сцинтилляционный детектор*). ПЗС — многоканальная система с аналоговой записью информации; поэтому в детекторах, где требуется обработка большого числа электр. сигналов (калориметры), можно эти сигналы преобразовать в световые с помощью следующей записью в ПЗС.

ПЗС применяются также для считывания электр. сигналов с детекторов частиц. Чаще всего это линейные ПЗС, к-рые служат задержками аналоговых сигналов, а также используются, напр., для считывания с полосковых кремниевых детекторов (см. *Полупроводниковый детектор*).

Лит.: 1) Секеи К., Томпсет М., Приборы с переносом заряда, пер. с англ., М., 1978; 2) Головкин С. В., Рыкалин В. И., Препринт ИФВЭ 80—10, Серпухов, 1980; 3) Головкин С. В., Рыкалин В. И., Препринт ИФВЭ 84—82, Серпухов, 1984; 4) Damerell C. J. S., Vertex detectors. Rutherford Appleton Laboratory, Preprint RAL—86—077, July, 1986; 5) Kirkby Jasper, Today and tomorrow for scintillating fibre detectors, Preprint CERN—EP 87—60, March, 1987. С. В. Головкин.

ПИ-ИМПУЛЬС (π-импульс) — импульс эл.-магн. излучения, резонансного двухуровневой квантовой системе, площадь к-рого

$$\theta = (1/\hbar)d_{21} \int_{-\infty}^{\infty} E(t) dt$$

равна π. Здесь E(t) — амплитуда импульса, d₂₁ — матричный элемент дипольного момента перехода между состояниями |1> и |2> (см. *Двухуровневая система*). Понятие площади применимо к импульсам, длительность к-рых существенно меньше времён продольной (T₁) и поперечной (T₂) релаксации, когда их взаимодействие с ансамблем двухуровневых систем имеет когерентный характер. В этом случае при условии точного резонанса эволюцию двухуровневой системы в эл.-магн. поле можно представить как вращение вектора Блоха R с пост. длиной вокруг «реактивной» оси, т. е. как вращение, при к-ром изменяются «продольная» компонента R_z (разность населённости уровней) и его «активная» составляющая R_⊥, ответственная за поглощение (или испускание) эл.-магн. излучения. При этом полный угол поворота вектора Блоха равен θ. Т. о., площадь импульса θ полностью определяет состояние двухуровневой системы по окончании взаимодействия. В частности, при θ = π состояние квантовой системы инвертируется: «активная» компонента и разность населённости принимают значения, равные по величине на-