

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ВЕРШИННОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ЛАВИННЫХ ДИОДОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Г.А. Сокол, В.Э. Шубин

Описаны принцип действия и основные характеристики нового типа полупроводниковых приборов с внутренним умножением заряда — кремниевых лавинных диодов с отрицательной обратной связью (ЛОС-диодов). Рассмотрена возможность создания многоэлементных ЛОС-структур, которые могут найти применение в качестве вершинного трекового детектора в экспериментах на будущих ускорителях протонов УНК, LHC, SSC.

Принципиальным и одним из существенных элементов практически всех экспериментальных установок, предназначенных для проведения экспериментов по физике высоких энергий на новом поколении ускорителей частиц — коллайдерах УНК, LHC, SSC, является вершинный координатный детектор. Ожидаемая на коллайдере SSC светимость $L = 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, сечение взаимодействия $\sigma_{pp} = 100 \text{ мбн}$, пересечение пучков должно происходить каждые 15 нс. Такие параметры требуют применения вершинных трековых детекторов с ультравысоким пространственным ($\Delta x, \Delta y = 30 \text{ мкм}$) и временным ($\Delta t = 15 \text{ нс}$) разрешениями, обеспечивающих раздельную регистрацию частиц при множественности $M = 100$ и более. Существенным при такой большой светимости и энергии сталкивающихся пучков ($E_p = 20 \text{ ТэВ}$) является и радиационная стойкость детектора. По оценкам необходимо, чтобы детектор выдерживал облучение, соответствующее дозе $F = 10 \text{ Мрад/год}$.

Естественным выбором в качестве элемента — плоскости вершинного трекового детектора является двумерная матрица на основе ячеистой (pixel) структуры. Использование нескольких слоев таких матриц обеспечивает получение 3-х мерной координатной информации, необходимой как для выявления деталей структуры сложных событий, так и для реконструкции вторичных вершин распада частиц, близких к первичной точке взаимодействия.

Необходимым условием для однозначной идентификации события и определения координат вершины распада частицы является возможно меньшее влияние многократного рассеяния частиц в детекторе, что прямо связано с толщиной пластины-матрицы. Важно также отсутствие кластерных явлений, т.е. срабатывания одновременно нескольких элементов матрицы при прохождении одной частицы. При ожидаемой на коллайдере SSC множественности и при сосредоточении многих частиц в узком угловом растворе (струя) возможно перекрытие кластеров от разных частиц и тогда

определение координат частиц становится затруднительным, если не невозможным.

В настоящее время наиболее адекватным отмеченным выше для SSC требованиям, хотя и не в полном объеме, является пиксельный вариант вершинного детектора, предложенный группой Шапиро из Стенфордского Университета США [1]. Однако этот высокосовременный по технологии вариант вершинного детектора имеет полную толщину на пути частицы $\Delta z = 600$ мкм в каждой координатной плоскости детектора, что является нежелательным из-за многократного рассеяния. Кроме того, в этом варианте вершинного детектора не исключена проблема кластеров.

В данной работе рассматривается предложение по созданию вершинного трекового детектора на основе использования вместо P-I-N-диодов кремниевых структур, обладающих внутренним умножением заряда. Это позволит создать необходимый зарядовый пакет на значительно меньшей толщине активной области детектора, что приводит практически к полному устранению кластеров (рис. 1). Возможно в этом случае и значительное уменьшение полной толщины пластины. Наличие внутреннего усиления и отсутствие кластеров позволит использовать простую и дешевую логическую электронику.

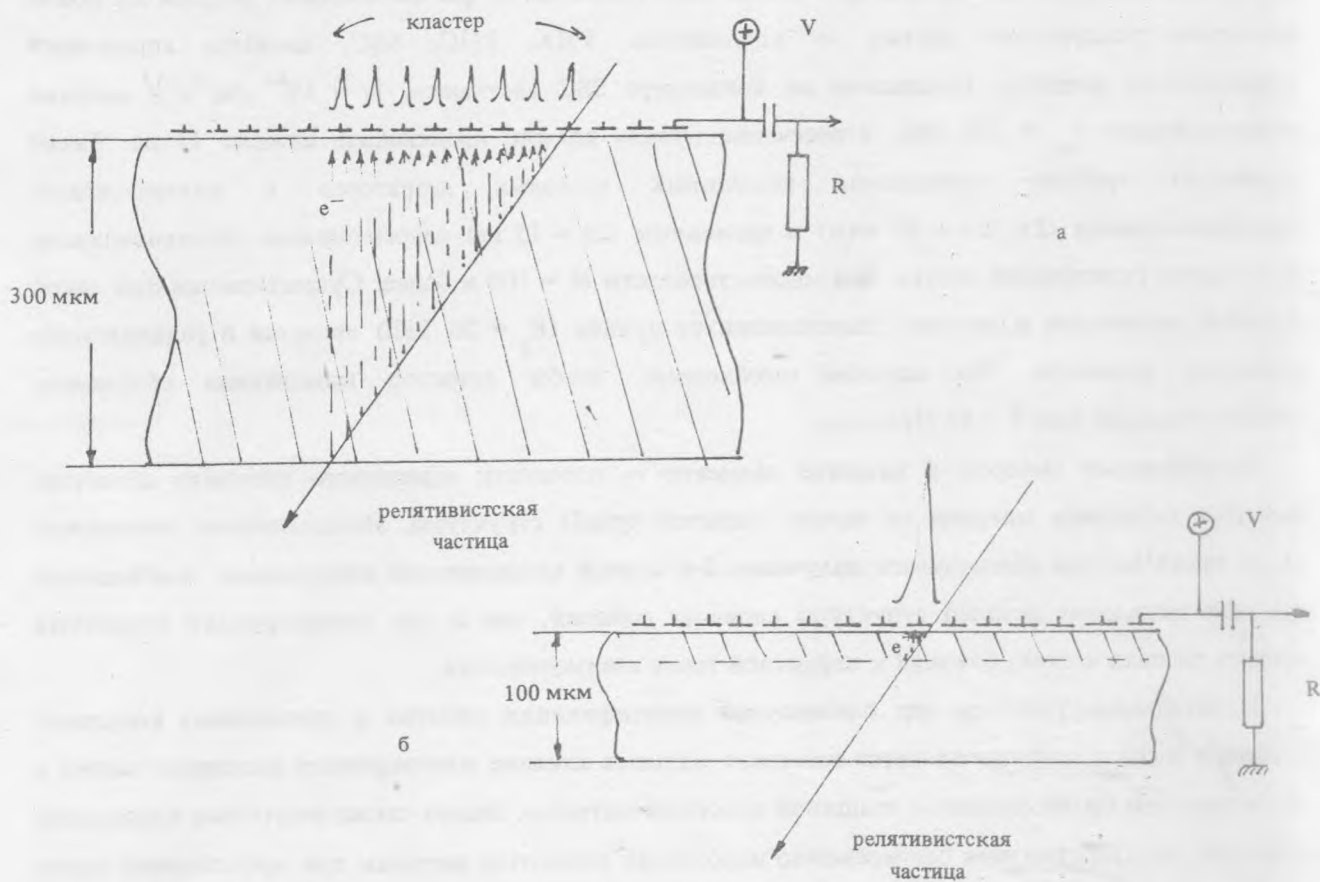


Рис. 1. Схема формирования сигнала в многоэлементных структурах на основе P-I-N-диодов (а) ($\rho = 3-5$ кОм·см) и ЛОС-диодов (б) ($\rho = 1-5$ Ом·см). Заштрихованная часть — обедненная область структуры.

Вариантом такого прибора с внутренним усилением мог бы служить лавинный фотодиод (ЛФ-диод), однако на основе обычных ЛФ-диодов нельзя создать многоэлементные структуры с одним источником питания из-за их очень крутой вольт-амперной характеристики и большой нестабильности лавинного процесса.

В ФИАН СССР была предложена новая концепция кремниевых лавинных приборов (ЛОС-диодов), в основе которой лежит принцип отрицательной обратной связи /2/. Суть принципа заключается в том, что в МДП-структуре специально создается слабопроводящий слой, образующий потенциальный барьер, в результате чего свободные носители, создаваемые в лавинном процессе, накапливаются перед барьером и частично экранируют электрическое поле, в котором происходит процесс ударной ионизации (рис. 2). Результатом действия такого встречного поля является локальная самостабилизация лавинного процесса, проявляющаяся как в существенно менее крутой по сравнению с обычными ЛФ-диодами вольт-амперной характеристике, так и в значительно большей однородности лавинного процесса по площади. Оба эти следствия отрицательной обратной связи позволяют решать задачу многоэлементных детекторов с одним источником питания, что очень важно для создания вершинного многоэлементного детектора.

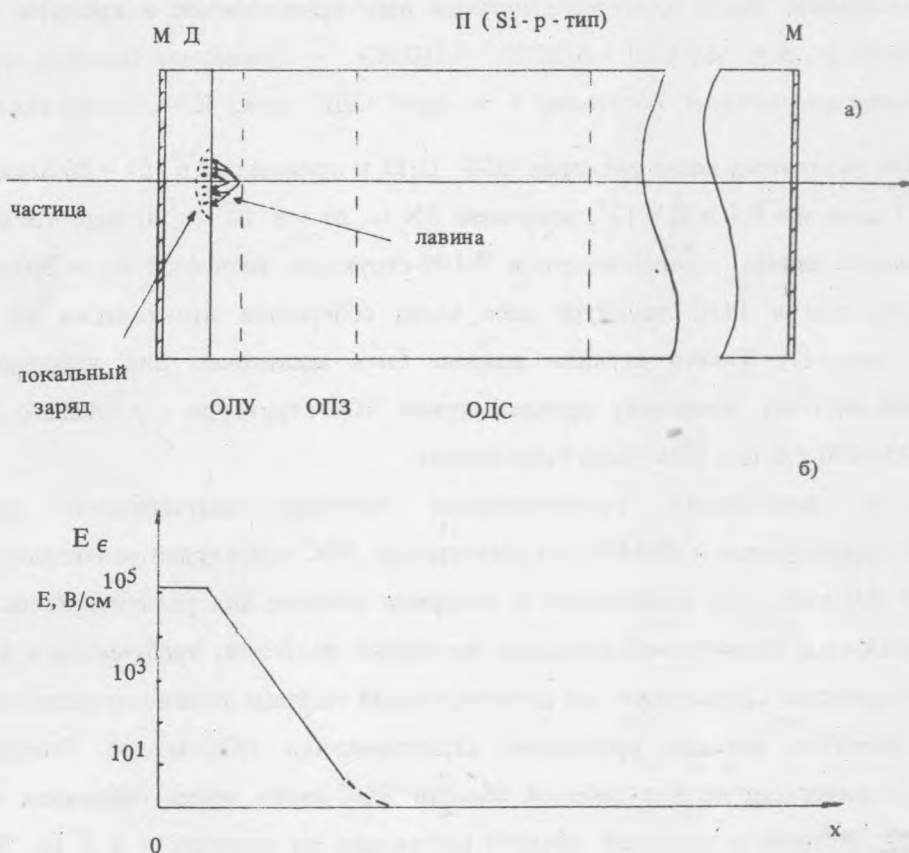


Рис. 2. Принципиальная схема ЛОС-диода: а) структура ЛОС-диода и схема возникновения локального заряда, снижающего поле при регистрации частицы (отрицательная обратная связь); б) распределение поля: М — металл, Д — диэлектрик, П — полупроводник.

Поскольку ЛОС-диоды разработаны для регистрации светового излучения, имеет смысл рассмотреть кратко физическую картину регистрации такой ЛОС-структурой заряженных, в основном релятивистских, частиц, что характерно для работы вершинного детектора.

В ЛОС-структуре (рис. 2) можно выделить следующие области: а) лавинного умножения (ОЛУ) размером $\Delta(\text{ОЛУ}) \approx 0,5$ мкм, где напряженность электрического поля $\epsilon_E \geq 10^5$ В/см достаточна для осуществления ударной ионизации; б) пространственного заряда (ОПЗ) размером $\Delta(\text{ОПЗ}) \approx 5$ мкм, где имеется электрическое поле, линейно изменяющееся на основной длине $\Delta(\text{ОПЗ})$, и в котором осуществляется дрейф носителей; в) диффузионного сбора носителей (ОДС), характеризующаяся размером $\Delta(\text{ОДС}) \approx 20$ мкм, где практически нет внешнего электрического поля, но носители из этой области могут попадать в ОПЗ и далее в ОЛУ за счет диффузии. Приведенные выше оценки размеров областей соответствуют удельному сопротивлению исходного кремния $\rho \approx 1$ Ом·см. На рис. 2 показана траектория релятивистской частицы в ЛОС-структуре. Только носители из областей ОЛУ, ОПЗ и частично из ОДС будут собраны и умножены.

Зарядовый пакет, собираемый от релятивистской частицы, будет равен $\Delta N(e, h) = K \Delta(\overline{\Delta p} / \Delta z)$, где $\overline{\Delta p} / \Delta z$ — среднее число электрон-дырочных пар, производимое в кремнии релятивистской частицей на пути Δz , $\Delta = \Delta(\text{ОЛУ}) + \Delta(\text{ОПЗ}) + \delta \Delta(\text{ОДС})$ — суммарная толщина активного слоя, с которого собираются частицы носители, δ — доля ОДС слоя, K — коэффициент умножения структуры. При указанных выше размерах ОЛУ, ОПЗ и принимая $\overline{\Delta p} / \Delta z = 80$ электрон-дырочных пар для $\Delta z = 1$ мкм, $\delta = 0,1$ и $K = 10^3$, получаем: $\Delta N(e, h) = 6 \cdot 10^5 (e, h)$ пар, что в 25 раз больше величины полного заряда, возникающего в P-I-N-структуре толщиной $\Delta z = 300$ мкм. При этом следует учесть, что в ЛОС-структуре весь заряд собирается практически на один элемент регистрации (рис. 1). Такого сигнала должно быть достаточно для уверенного выделения релятивистской частицы, поскольку уровень шумов ЛОС-структуры с площадью $S = 10$ мм² не превышает 300—350 e, h-пар (без учета умножения).

Возможность регистрации релятивистской частицы подтверждают предварительные эксперименты, проведенные в ФИАНе по регистрации ЛОС-структурой рентгеновского излучения от ^{55}Fe ($E_x = 5,9$ кэВ), что сопоставимо с потерями энергии для релятивистской частицы. При переходе к реальным значительно меньшим площадям пикселей, требующимся для вершинного детектора, соотношение сигнал/шум для релятивистской частицы должно существенно улучшиться.

Следует отметить высокие временные характеристики ЛОС-диодов. Благодаря высокому значению электрического поля в рабочей области ЛОС-диода время собирания заряда с трека релятивистской частицы в активной области составляет по оценкам $\tau \leq 5$ нс. Таким образом, практически без потери заряда возможно сформировать соответствующей логической электроникой сигналы, длительностью $\Delta t \approx 10$ —15 нс, требуемые условиями загрузок на коллайдере SSC.

Использование при изготовлении ЛОС-структур низкоомного кремния дает основание полагать, что радиационная стойкость детектора на ЛОС-диодах будет лучше, чем у детектора на P-I-N-диодах.

Таким образом, ЛОС-структуры позволяют реализовать в одном приборе уникальное сочетание характеристик, необходимых для трекового вершинного детектора. Ожидаемые характеристики вершинного детектора на основе лавинных ЛОС-диодов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Сравнительные характеристики вершинных детекторов

Характеристика	ЛОС-диоды	P-I-N-диоды
Коэффициент умножения, К	10^3-10^4	1
Полная толщина пластины, мкм	100	300
Толщина активной области, мкм	5-10	300
Число ячеек, срабатываемых при прохождении частицы (кластеры)	1	5-7
Минимальные размеры ячейки $\Delta x \times \Delta y$, мкм	30×30	30×30
Время сбора заряда τ , нс	5-10	20-50
Удельное сопротивление кремния ρ , Ом·см	1-5	$3-5 \cdot 10^3$
Напряжение питания V, В	40-50	200-300

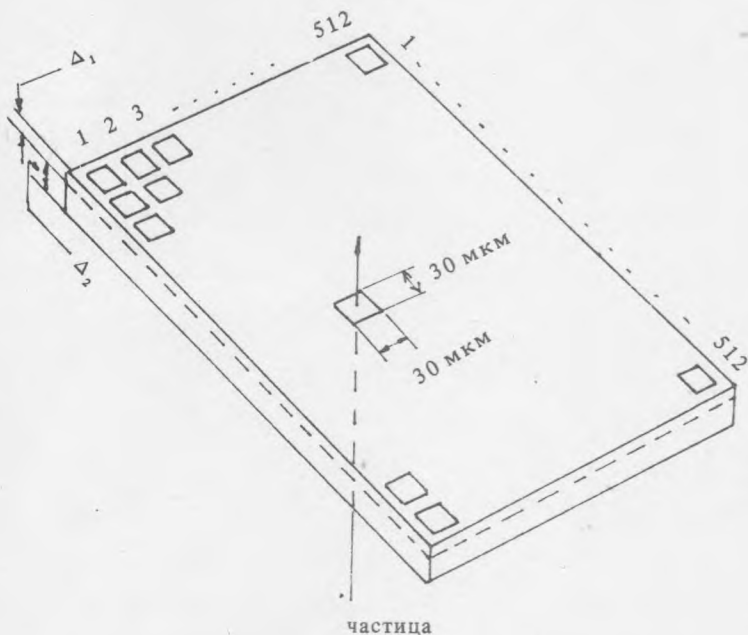


Рис. 3. Схематическое представление плоскости вершинного детектора на основе ЛОС-диодов, содержащей детекторную и электронную части в одной пластине кремния: $\Delta_1 = 30$ мкм — детекторная часть; $\Delta_2 = 70$ мкм — электронная часть.

Одним из перспективных решений вершинного детектора на основе ЛОС-структур явилось бы совмещение детекторной и электронной частей в одной кремниевой пластине. Как отмечалось в /1/, такая работа проводится в ряде лабораторий мира, однако она наталкивается на серьезные трудности, связанные с развитием интегральной электроники на высокоомном кремнии. При использовании идеологии ЛОС-диодов для вершинного детектора такое совмещение возможно, поскольку и для детекторной и для электронной частей используется низкоомный кремний. В этом случае прототип вершинного детектора (рис. 3) имел бы полную толщину вместе с электронной частью всего 100 мкм, что полностью удовлетворило бы требованиям эксперимента на SSC.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shapiro St. et al. Nucl. Inst. Meth., A275, 580 (1939).
2. Bogdanov S. et al. Phys. Stat. Sol., A93, 361 (1986).

Поступила в редакцию 27 февраля 1991 г.