

УДК 539.1.074.5

КРЕМНИЕВЫЙ МИКРОСТРИПОВЫЙ ДЕТЕКТОР С ВНУТРЕННИМ УСИЛЕНИЕМ

В. Б. Залесский¹, В. Л. Кашеваров, Г. А. Сокол, С.А. Шуневич¹

Описан координатный детектор нового типа – кремниевый микроstriповый детектор с внутренним лавинным умножением заряда. Коэффициент умножения для каждого striпа до 10^5 , длина striпа 5 мм, ширина striпа 35 мкм, шаг 75 мкм, число striпов 200.

Исследования на будущих коллайдерах – УНК, LHC и SSC – требуют применения внутренних координатных детекторов со следующими параметрами: координатное разрешение 20 мкм, временное разрешение 15 нс, радиационная стойкость 1-10 Мрад/год, эффективность регистрации минимально ионизирующей частицы 100%, толщина детектора $\leq 10^{-3}$ г/см², координатное разрешение двух одновременно регистрируемых частиц 20 мкм. Желательно также, чтобы детектор был относительно дешев.

В настоящее время разработано большое количество детекторов (газовых, сцинтилляционных, полупроводниковых), которые уже используются на существующих ускорителях. Однако большинство из них по ряду характеристик (радиационная стойкость, толщина, координатное разрешение для двух частиц, стоимость) не удовлетворяют предъявляемым выше требованиям. Это обстоятельство стимулирует работы по совершенствованию существующих и разработке новых типов координатных детекторов для экспериментов в физике высоких энергий.

В [1 – 4] была отмечена перспективность использования кремниевых лавинных структур для создания многоэлементных детекторов заряженных частиц. В настоящей работе сообщается о первых результатах по разработке координатного детектора нового типа – кремниевого микроstriпового лавинного детектора (КМЛД). Детектор

создан на базе МРП-структуры (металл – резистивный слой – полупроводник). В [5, 6] был рассмотрен вариант МРП-структуры на основе гетероперехода $SiC - Si$. Структура $SiC - Si$ изготавливалась ионно-плазменным осаждением резистивного слоя SiC на поверхность кремниевой пластины p -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Схема МРП-структуры как детектора частиц представлена на рис. 1. Благодаря низкому удельному сопротивлению исходного кремния напряжения в 25-37 В оказывается достаточно, чтобы вблизи границы $SiC - Si$ создать высокую напряженность электрического поля $\geq 3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$, необходимую для лавинного умножения заряда за счет ударной ионизации. При смещении $V_a = 37 \text{ В}$ глубина области умножения (ОУ) составляет 0,25 мкм, глубина области пространственного заряда (ОПЗ) $\omega = 2 \text{ мкм}$. После прохождения через структуру заряженной частицы носители заряда собираются из области, где имеется электрическое поле. Простые оценки показывают, что при коэффициенте умножения $M = 5 \cdot 10^4$ и при удельных потерях энергии 40 эВ/мкм, что соответствует наиболее вероятной потере энергии релятивистской частицы [8], в детекторе образуется зарядовый пакет, равный 10^6 электронов. Эта величина более чем в 100 раз превышает заряд, собираемый на один стрип в pin -структуре со стандартной толщиной рабочей области 300 мкм. Такое увеличение заряда в лавинном детекторе позволяет существенно упростить электронику, используемую для преобразования собранного заряда.

Характерным для МРП-структуры является возникновение отрицательной обратной связи (ООС) в процессе лавинного умножения, суть которой состоит в следующем. Развитие лавинного процесса означает увеличение тока в ОУ и накопление заряда на границе $SiC - Si$. В соответствии с этим происходит непрерывное перераспределение напряжения в структуре и появляется всевозрастающее по величине противоположное, экранирующее исходное электрическое поле. Так возникающая ООС приводит к снижению темпа развития лавинного процесса и даже к его прекращению. Важно отметить, что ООС носит локальный характер, обусловленный очень низкой тангенциальной проводимостью границы резистивного слоя с кремнием. Такая самостабилизация лавинного процесса характеризуется пологими вольт-амперными характеристиками, что позволяет создавать многоэлементные структуры с малым разбросом коэффициентов умножения отдельных элементов при едином источнике напряжения смещения.

В [7] были предложены варианты МРП-структуры, где на поверхности Si p -типа формировались неоднородности в виде отдельных областей n -типа проводимости. Основная идея состояла в локализации области лавинного умножения, что приводит к

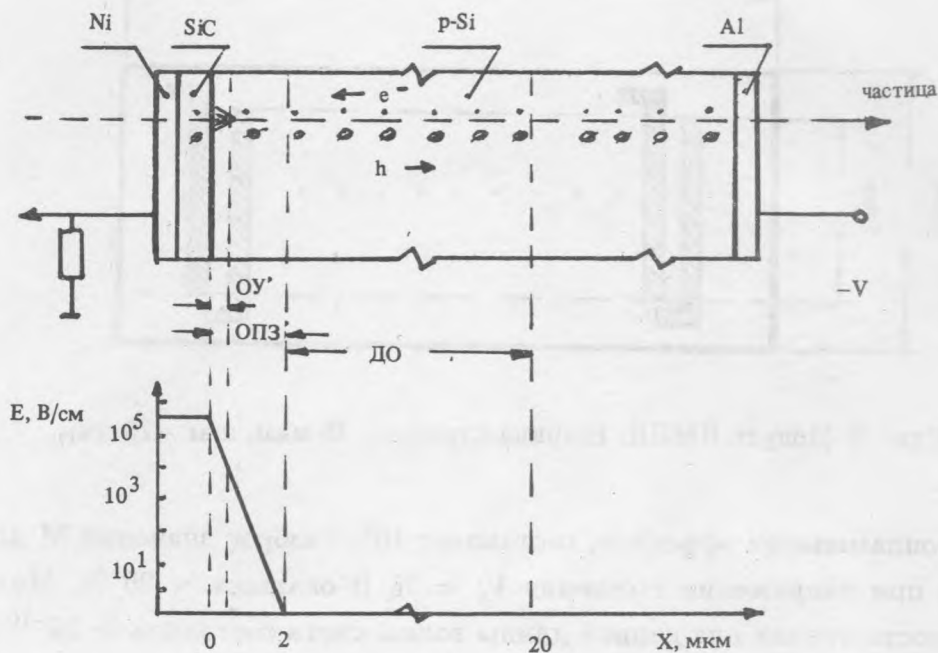


Рис. 1. Структура и распределение электрического поля E в МРП-детекторе. ОУ - область умножения, ОПЗ - область пространственного заряда, ДО - диффузионная область.

преимущественному умножению носителей одного знака и значительному уменьшению темнового тока. На основе МРП-структуры с регулярными локальными неоднородностями нами был изготовлен КМЛД со следующими характеристиками: длина стрипа 5 мм, ширина стрипа 35 мкм, шаг 75 мкм, общее число стрипов на одном модуле 200 (рис. 2). Малая глубина чувствительной области (2 мкм) является существенным преимуществом КМЛД перед микростриповыми детекторами на основе $p\text{-}i\text{-}n$ -структуры с глубиной чувствительной области 300 мкм, поскольку в КМЛД отсутствуют одновременные срабатывания нескольких стрипов при прохождении через детектор одной частицы [1].

Детектор исследовался с помощью сфокусированного светового пучка ($\lambda = 850$ нм) и альфа-частиц с энергией 5,15 МэВ (^{239}Pu). Исследования с помощью светового источника позволили определить коэффициент умножения M для разных напряжений смещения. Лавинное умножение осуществляется при напряжениях от 25 до 37 В. Разброс порогового напряжения для разных стрипов не превышает 0,5 В. Максимальный коэффициент умножения, при котором еще не наблюдается значительный рост шумовых импульсов

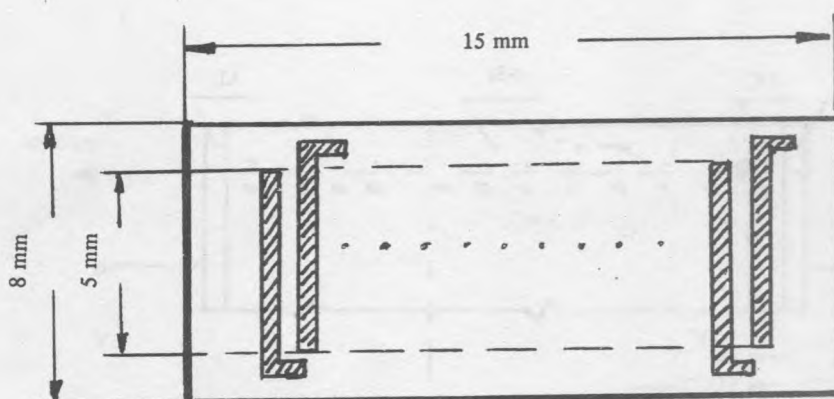


Рис. 2. Модуль КМЛД. Ширина стрипов - 35 мкм, шаг - 75 мкм.

за счет микроплазменных эффектов, составляет 10^5 . Разброс значений M для отдельных стрипов при напряжении смещения $V_a = 36$ В оказался $\sim 20\%$. Минимальная чувствительность стрипа для данной длины волны света составила $3 \cdot 10^{-10}$ Вт. Изменений параметров структуры после 1000 часов непрерывной работы не наблюдалось. При облучении стрипа сфокусированным пучком света сигналы на соседних стрипах отсутствуют.

При регистрации альфа-частиц первичная ионизация возникает не в точке, как в случае поглощения световых квантов, а реализуется в виде протяженного трека (длиной 22 мкм). Кроме того, величина первичной ионизации оказывается значительной ($\Delta E/\Delta x = 1,5 \cdot 10^5$ эВ/мкм в начале пробега), коэффициент умножения может зависеть от первичной ионизации. Действительно, максимальный коэффициент умножения для альфа-частиц при $V_c = 36$ В оказался равным 10^2 . Это означает, что в КМЛД возникает заряд $Q = (\Delta E/\Delta x)WM = 3 \cdot 10^7$ электронов. Из этих измерений следует, что для релятивистской частицы, для которой характерно выделение всего 10 – 100 эВ/мкм (с учетом флуктуаций потерь энергии в "тонких" слоях [8]) коэффициент умножения МРП-структуры может быть равным коэффициенту умножения для световых квантов.

Мы предполагаем провести исследование КМЛД непосредственно на пучке электронов, включая также измерение радиационной стойкости детектора. Поскольку КМЛД изготавливается из низкоомного кремния с концентрацией примесей $1,5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, можно ожидать существенно большей радиационной стойкости КМЛД, чем детекторов на основе рpn-диодов, изготавливаемых из высокоомного кремния ($\rho = (3-5) \cdot 10^3$ Ом · см).

Отметим следующие основные достоинства КМЛД на основе МРП-структуры.

1) Коэффициент умножения до 10^5 . Это существенно ослабляет требования к последующей электронике. 2) Малая глубина чувствительной области (2 мкм). Это обеспечивает раздельную регистрацию двух частиц, попадающих в соседние стрипы. 3) Малая полная толщина детектора, определяемая только механической прочностью кремниевой пластины. Уже сейчас при стандартной технологии возможно создание КМЛД с толщиной не более 50 мкм. Малая толщина детектора снижает влияние многократного рассеяния частиц (при восстановлении треков это существенно) и уменьшает радиационный фон. 4) Высокое быстродействие: время сбора заряда из ОУ и ОПЗ составляет $\simeq 1$ нс. Сформированные импульсы имеют длительности около 20 нс, что определяется параметрами детектора и последующей электроники. 5) Практическое отсутствие мертвого времени. Вся поверхность стрипа, кроме малой области, где в результате прохождения частицы возник лавинный процесс, сохраняет чувствительность к регистрации частиц. Это связано с локальностью развития лавинного процесса в детекторе. 6) Высокая ожидаемая радиационная стойкость, определяемая низким удельным сопротивлением применяемого кремния. 7) Относительная дешевизна детектора, поскольку используется дешевый низкоомный кремний. 8) Широкий диапазон чувствительности к свету: $\Delta\lambda = 400\text{--}1100$ нм при эффективности регистрации света с $\lambda = 850$ нм до 70%. Это позволит использовать детекторы на основе МРП-структуры в сочетании со сцинтилляторами в условиях, когда требуются детекторы малой площади (для сцинтилляционных нитей, например) и нечувствительные к магнитным полям.

Однако есть и недостатки таких КМЛД. 1) Относительно большие емкости p-n-перехода (100 пФ/мм²), определяемые малой толщиной чувствительной области. Это затрудняет реализацию предельно высокого быстродействия КМЛД, определяемого длительностью лавинного процесса. Нами планируется переход к МРП-структурам, имеющим толщину ОПЗ 5 мкм. Это должно существенно улучшить соотношение сигнал/шум для релятивистской частицы и уменьшить влияние емкости p-n-перехода на временные характеристики детектора. 2) Наличие диффузионной области, приводящей к затягиванию токового сигнала при регистрации частицы и являющейся источником дополнительного шума детектора. 3) Зависимость коэффициента умножения от величины первичной ионизации. Эту зависимость необходимо исследовать более детально, однако в области потерь энергии до 100 эВ/мкм, что соответствует регистрации релятивистских частиц, нелинейность, по-видимому, незначительна и сопоставима с дисперсией коэффициента умножения.

Нам представляется, что описанный в настоящей работе координатный детектор в значительной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к координатным детекторам в области физики высоких энергий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сокол Г.А., Шубин В.Э. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 7, 3 (1991).
- [2] Гольбрайх Н.И., Плотников А.Ф., Шубин В.Э. Квантовая электроника, 1975, 2, 2624 (1975).
- [3] Кравченко А.Б. и др. Квант. электроника, 8, 785 (1987).
- [4] Гасанов А.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 14, 706 (1988).
- [5] Залесский В.Б. и др. Приборостроение, N 11, 24 (1989).
- [6] Гасанов А.Г. и др. Микроэлектроника, 18, 88 (1989).
- [7] Гасанов А.Г. и др. Препринт ИЯИ АН СССР, П-0673, М., 1990.
- [8] Wischel H. Nucl. Instr. Meth., 52, 136 (1990).

Поступила в редакцию 17 июля 1992 г.