Применение кремниевых детекторов в некоторых современных экспериментах физики высоких энергий

С.В. Рогожин
Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ
E-mail: rogozhin@silab.sinp.msu.ru

This paper describes several major current high energy physics experiments that involve silicon detectors. A brief description of silicon sensor operational principles and types is given. Silicon detector systems of D0, ATLAS, CMS and CLAS12 experiments are described.

Полупроводниковые сенсоры используются в физике высоких энергий уже более пятидесяти лет. Основным материалом для сенсоров является кремний благодаря следующим свойствам: малая ширина запрещённой зоны, высокая подвижность носителей заряда, сравнительно долгое время жизни электронно-дырочных пар, а также возможность работы при комнатной температуре [1]. Для применения кремниевых сенсоров в физике высоких энергий крайне важными стали два открытия. Во-первых, планарная технология, позволившая создавать на поверхности кремния достаточно сложные структуры; во-вторых, появление интегральных микросхем малого размера, которые стало возможно размещать в непосредственной близости от сенсоров [2].

По топологии кремниевые детекторы можно разделить на микростриповые, падовые и пиксельные. В микростриповых детекторах ячейкой является стрип – полоса шириной порядка сотни микрон и длиной до десятков сантиметров, если несколько сенсоров последовательно соединены в линейку – «лэдер». В падовых и пиксельных детекторах ячейка имеет сравнимые длину и ширину. Пиксельные системы применяются в условиях высокой загрузки, что позволяет снизить частоту событий в одной ячейке. Обратной стороной этого является необходимость считывать большее число каналов. Пиксельный сенсор определяет сразу две координаты; в микростриповых детекторах для этого двусторонние сенсоры или два сенсора устанавливаются «спина к спине» так, чтобы их стрипы пересекались.

Эксперимент D0 (Tevatron)

Эксперимент D0 проводится на ускорителе Tevatron (FNAL), имеющем энергию до 1.96 ТэВ в СЦМ и светимость $2{,}5\times10^{32}$ см$^{-2}$с$^{-1}$. Цикл работы ускорителя представляет собой 36 столкновений сгустков («банчей») протонов и антипротонов с интервалом в 132 нс [3].

Кремниевый микростриповый детектор эксперимента D0 состоит из трех основных частей: центрального кремниевого детектора, внутренних дисков (F-disks) и торцевых дисков (H-disks). Общее число каналов считывания составляет почти 800 000.

Центральный детектор имеет длину около 70 см и представляет собой шесть цилиндрических модулей – «баррелей». Каждый модуль состоит из четырёх слоёв кремниевых детекторов. С торцов каждого барреля

расположены диски, составленные из 12 двусторонних трапециевидных детекторов. Внутренние диски располагются между баррелями (4 диска) и с торцов (8 дисков). На большем удалении (100 и 121 см) от мишени располагаются торцевые диски. В баррелях используются три типа сенсоров: как односторонние, так и двусторонние. Шаг стрипов составляет 50, 62,5 и 153,5 мкм.

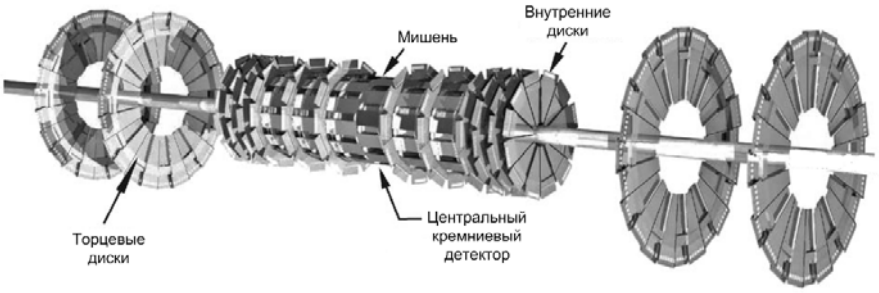

Рис. 1. Общий вид кремниевой детекторной системы эксперимента D0 [3].

Диски собраны из сенсоров трапециевидной формы. В торцевых дисках используются односторонние сенсоры с шагом стрипов 80 мкм, составленные «спина к спине» с углом между стрипами 15°. Внутренние диски собраны из двусторонних сенсоров с шагом 50 и 62,5 мкм; угол между стрипами двух сторон – 30°.

Считывание осуществляется микросхемами SVXIIe. Микросхема SVXIIe имеет 128 входных каналов, оснащённых зарядочувствительными усилителями (ЗЧУ). Режим работы микросхемы привязан к такту ускорителя: после каждого столкновения банчей пучка ЗЧУ сохраняют данные со всех каналов в аналоговую память ёмкостью 36 ячеек. В перерыве между столкновениями избранные ячейки преобразуются АЦП и считываются.

Эксперимент ATLAS (LHC)

Эксперимент ATLAS проводится на протон-антипротонном коллайдере LHC (Large Hadron Collider), энергия пучков в котором достигает 7 ТэВ. Ожидаемая светимость составляет порядка 10^{34} см$^{-2}$с$^{-1}$. В одном цикле работы ускорителя с интервалом 25 нс происходит 2808 столкновений банчей. Кремниевая система эксперимента ATLAS состоит из пиксельной и стриповой частей [4].

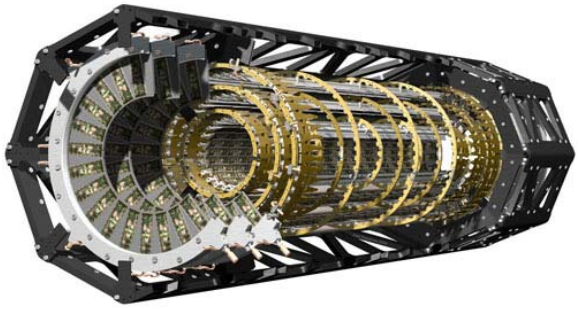

Рис. 2. Пиксельный детектор эксперимента ATLAS.

Пиксельный детектор состоит из трёх баррелей радиусами 5, 9 и 12 см соответственно. С торцов, на расстоянии от 11 до 20 см от мишени, расположены десять дисков. В баррельной и дисковой части используются

похожие пиксельные сенсоры. Кажды сенсор имеет 62,4 мм в длину и 22,4 мм в ширину, на нём расположены 61 440 пикселей. Размеры пикселей – 50 на 300 мкм.

Пиксельную часть эксперимента ATLAS обслуживают микросхемы FEI3. Микросхема имеет 2 880 входных каналов в массиве 18 на 160. Каждый модуль обслуживают 16 чипов. Если сигнал в одном из каналов превышает установленный порог – информация записывается в буфер. По прошествии установленного времени содержимое считывается или сбрасывается.

Микростриповый детектор составлен из четырёх баррелей и 18 дисков. Радиусы баррелей составляют 30, 37, 44 и 51 см; длина баррелей – 160 см. Размер сенсоров составляет 6,36 на 6,4 см, на каждом с шагом 80 мкм размещены 768 стрипов. Четыре сенсора объединены в модуль: соединены по двое, и пары сенсоров составлены спина к спине под углом 40 мрад. С каждого из торцов баррелей, на удалении от 83 до 279 см от мишени находятся 9 дисков радиусами от 26 до 56 см. Стрипы направлены по радиусу дисков; шаг стрипов изменяется от 50 до 90 мкм.

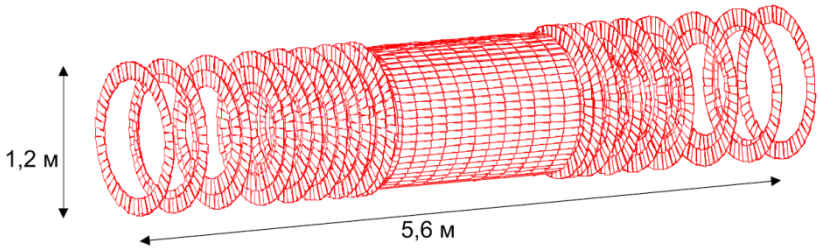

Рис. 3. Микростриповый детектор эксперимента ATLAS.

Считывание осуществляется микросхемами ABCD3T. Микросхема имеет 128 входных каналов. Если уровень сигнала в канале превышает установленный порог – данные о событии записываются в двоичную память глубиной 132 ячейки. По внешнему триггеру считывается информация из трёх последовательных ячеек. Микросхемы проходят специальную обработку по технологии DMILL для повышения радиационной стойкости.

Эксперимент CMS (LHC)

Эксперимент CMS также провдится на ускорителе LHC. Кремниевая детекторная система эксперимента CMS состоит из стриповой и пиксельной части [5]. В радиусе до 10 см, в регионе с наибольшей интенсивностью событий, расположена пиксельная система. В области от 20 до 55 см поток частиц ослабевает достаточно для того, чтобы можно было использовать стриповые детекторы. В этом регионе расположены четыре барреля и три диска. На радиусах, превышающих 55 см, применяются стрипы с бо́льшим шагом – от 120 до 180 мкм.

Три барреля пиксельного детектора имеют радиусы 4, 7 и 11 см и длину 53 см. С каждого из торцов расположены два диска, на удалении в 34,5 и 46,5 см, соответственно. Внутренний радиус дисков – 6 см; внешний – 15 см. Размеры пикселей составляют 100 на 150 микрон. Геометрия дисков напоминает турбину: сенсоры повёрнуты на угол 20°. Это сделано для того, чтобы электроны отклонялись от прямолинейного дрейфа под действием силы

Лоренца, распределяя, таким образом, заряд по объёму сенсора, что позволит использовать сигналы с нескольких соседних пикселей. В каждой «лопасти» турбины находятся 7 сенсоров.

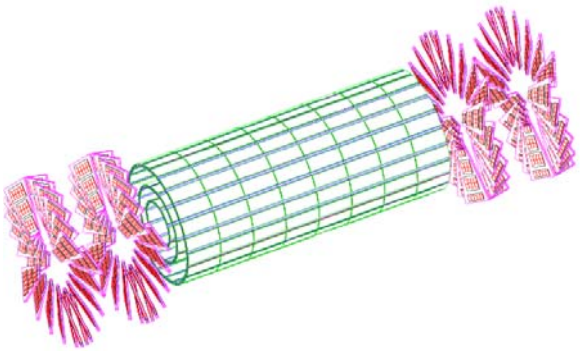

Рис. 4. Пиксельный детектор эксперимента CMS.

Считывание осуществляется микросхемами PSI46. Каждая микросхема имеет 4 160 входных каналов. Если сигнал в одном из каналов превышает установленный порог – информация о событии записывается в буфер данных. По прошествии установленного времени, если в микросхему не поступает триггер, содержимое буфера сбрасывается.

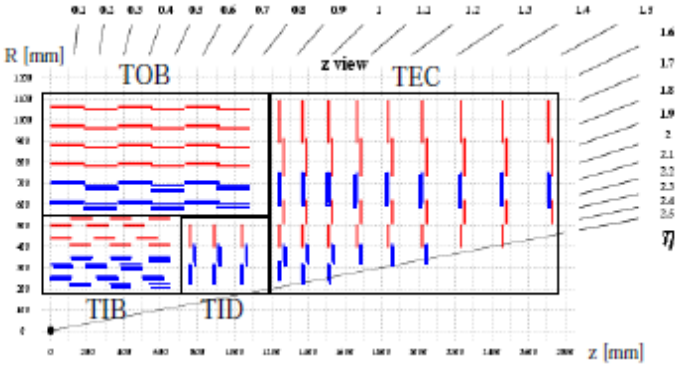

Рис. 5. Четверть микрострипового детектора эксперимента CMS в разрезе вдоль направления пучка; мишень расположена в левом нижнем углу. Синим цветом выделены двусторонние модули, угол между стрипами в них составляет 100 мрад.

Внутренний баррель микрострипового детектора (Tracker Inner Barrel) расположен в радиусах от 20 до 55 см; состоит из четырёх слоёв. Длина внутреннего барреля – 130 см. Внешний баррель (Tracker Outer Barrel) расположен от 55 до 110 см; состоит из шести слоёв. Длина внешнего барреля – 220 см. С каждого из торцов в регионе z от 120 до 280 см расположены 9 торцевых дисков (Tracker End Caps). Между внутренним баррелем и торцевыми дисками расположены 6 малых внутренних дисков (Tracker Inner Disks), по 3 с каждой стороны. В установке используются разные типы сенсоров: толщина сенсоров составляет от 320 до 500 мкм, а шаг стрипов – от 80 до 205 мкм.

Считывание сигнала осуществляют микросхемы APV25. Микросхемы сконструированы с использованием радиационно стойкой КМОП технологии. Каждая микросхема имеет 128 входных каналов; сигналы хранятся в аналоговой памяти глубиной 192 ячейки. Ячейки считываются по внешнему

триггеру, в зависимости от режима работы может считываться только запрошенная ячейка или дополнительно к ней предыдущая и последующая.

Эксперимент CLAS12 (CEBAF)

Эксперимент CLAS12 проводится на ускорителе CEBAF. Ускоритель CEBAF – микротрон с непрерывным электронным пучком энергией 6 ГэВ. В настоящее время идёт модернизация ускорителя, в ходе которой энергия пучка будет повышена до 12 ГэВ при светимости 10^{35} см$^{-2}$с$^{-1}$.

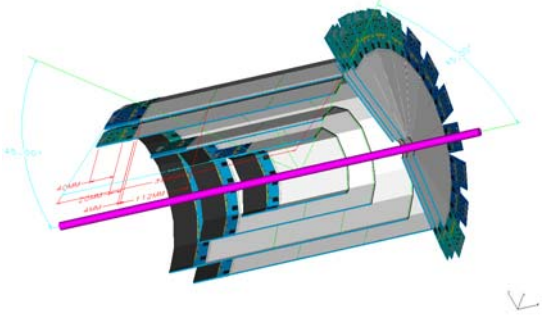

Рис. 6. Кремниевый вершинный детектор эксперимента CLAS12.

Кремниевый вершинный детектор (Silicon Vertex Tracker, SVT) эксперимента CLAS12 состоит из двух секций: цилиндра и дисков. В цилиндрической части - четыре барреля радиусами 5, 8, 12 и 16 см, состоящие из 8, 12, 18 и 24 секторов, соответственно. Длина лэдеров – составляет от 15 см (2 сенсора) в первом барреле до 30 см (4 сенсора) в четвёртом. Сенсоры для баррельной части – односторонние, с шагом считывания 150 мкм, составлены «спина к спине» с углом между стрипами 3°. Дисковая часть состоит из трёх дисков, расположенных на расстояниях 23,8, 25,3 и 26,8 см от мишени. Внешний радиус дисков – 18,8 см, внутренний – 2,3 см. Каждый диск разделён на двенадцать секторов.

Для считывания используется микросхема FSSR2 новой архитектуры «data-driven»: как только сигнал в одном из 128 каналов превышает установленный порог, контроллер микросхемы инициирует передачу данных. Это обусловлено непрерывным пучком ускорителя CEBAF.

1. Чилингаров А.Г. Координатные полупроводниковые детекторы в физике элементарных частиц //ФЭЧАЯ. 1992. Т. 23. Вып. 3. С. 785.
2. H. F-W. Sadrozinski. Applications of Silicon Detectors. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 48, no. 4, pp. 933-939, Aug. 2001.
3. The D0 Collaboration. The Upgraded D0 Detector. Nucl. Instrum. Meth., vol. A565, pp. 463–537, 2006
4. ATLAS Inner Detector Community, ATLAS Inner Detector Technical Design Report Vol. I, II. CERN/LHCC/97-16, CERN/LHCC/97-17.
5. CMS Collaboration. CMS Physics Technical Design Report Volume I CERN/LHCC 2006-001
6. Conceptual Design Report for The Science and Experimental Equipment for The 12 GeV Upgrade of CEBAF. Jefferson Lab – March 25, 2005.