



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

98-61

На правах рукописи

Кресло Игорь Евгеньевич

**Система считывания для сцинтилляционных детекторов  
на основе крупноформатного ПЗС с электронной  
бомбардировкой**

01.04.03 – радиофизика

А т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Протвино 1998

УДК 537.86

М-24

Работа выполнена в Серпуховском научно-экспериментальном отделе Объединенного института ядерных исследований (г.Протвино, РФ), Европейском центре ядерных исследований CERN (г.Женева, Швейцария) и Национальном Институте Ядерных Исследований INFN (г.Рим, Италия).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук Р.С.Шувалов (ИФВЭ, Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.И.Крышкин, доктор физико-математических наук В.И.Беляков-Бодин.

Ведущая организация – Институт физики высоких энергий (г.Протвино).

Защита диссертации состоится «3» октября 1998 г. в    часов на заседании диссертационного совета К-063.91.03 при факультете общей и прикладной физики Московского физико-технического института (141700, г.Долгопрудный, Московской обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИФВЭ и МФТИ.

Автореферат разослан «3» октября 1998 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета К-063.91.03

Коршунов С.М.

© Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт физики высоких энергий, 1998

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность проблемы.** В современной экспериментальной физике элементарных частиц остро стоит проблема построения компактных многоканальных систем считывания оптической информации с детекторов заряженных частиц. Система считывания на основе ПЗС с электронной бомбардировкой (EBCCD) способна считывать более миллиона каналов и обладает способностью регистрировать отдельные фотоны, что делает ее весьма перспективной при считывании изображения со сцинтиляционных координатных детекторов высокого разрешения.

**Цель диссертационной работы** – разработка, изготовление и изучение характеристик системы считывания для сцинтиляционных детекторов на основе EBCCD с электронным затвором, обладающей чувствительностью к отдельным фотонам. Тестирование и использование системы в реальных экспериментах физики высоких энергий.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в создании и исследовании характеристик системы на основе прибора нового поколения – крупноформатного EBCCD с числом ячеек более  $10^6$  и электронным затвором, пригодной для использования в экспериментальной физике и обладающей однофотонной чувствительностью.

### **Основные результаты проведенных исследований:**

- Методом измерений шума проведена калибровка выходного узла ПЗС: крутизна  $\alpha=1.1$  мкВ/электрон с погрешностью в пределах 6%, темновой ток при  $t^0 = -10$  °C не превышает 5750 электронов на ячейку за 100 мс. Шум, в пересчете на выход EBCCD, эквивалентен величине 209 электронов на ячейку.
- Изучены амплитудные распределения кластеров различного размера, порожденных отдельными фотонами. Отношение сигнал/шум для кластеров, состоящих из одной ячейки, достигает 15. Исследованы размеры электронного облака в кремнии, его диаметр сравним с размерами пикселя ( $13.1 \times 13.1$  мкм<sup>2</sup>).
- Изучена зависимость внутреннего усиления EBCCD от ускоряющего напряжения. Исследованы особенности «мертвого» слоя подложки ПЗС. При ускоряющем напряжении 15 кВ усиление достигает 4000 электронов на фотоэлектрон.
- Описаны примеры использования системы для реальных экспериментов в физике высоких энергий.

**Апробация работы и публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 5 научных работ. Основные результаты, использованные в диссертации, опубликованы в виде препринтов CERN, в журналах «Nuclear Instruments & Methods»,

«Nuclear Physics B». Результаты докладывались на конференциях SPIE95 (San Diego 1995), PSD4 (Manchester 1996), SCIFI97 (South Bend 1997), семинарах коллаборации RD46 в CERN.

**Структура диссертации.** Работа изложена на 70 страницах, состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 29 рисунков и список цитируемой литературы, включающий 36 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** отмечено, что современная физика элементарных частиц имеет тенденцию углубления в область все более высоких энергий, точностей и больших потоков частиц. В таких условиях требования к экспериментальной технике становятся весьма жесткими. Они характеризуются, в первую очередь, высоким координатным разрешением детектора и способностью переносить большие загрузки. Детектор должен обладать высокой радиационной стойкостью, хорошими пространственным и временным разрешениями.

Множество проектов детекторов, как действующих, так и предлагаемых для будущих экспериментов, используют сцинтилирующие волокна разных типов для обнаружения заряженных частиц. В настоящее время разработки ведутся в нескольких направлениях.

### Вершинные детекторы.

Типичными ограничениями для такого детектора служат радиационная стойкость, высокое пространственное разрешение и быстродействие. Это детекторы, работающие в наиболее тяжелых условиях и требующие максимально высоких параметров при минимальных габаритах. В настоящее время наиболее перспективными вариантами являются полупроводниковые вершинные детекторы и волоконные детекторы на капиллярах с жидким сцинтиллятором (ЖС).

### Трековые детекторы.

В области трековых детекторов интенсивности облучения обычно меньше, чем для вершинных детекторов, поэтому во многих случаях возможно использовать полимерные сцинтилирующие волокна. Они характеризуются высокой технологичностью, приемлемой стоимостью и простотой эксплуатации.

### Калориметры.

В последнее время полимерные сцинтилирующие и спектросмещающие волокна нашли широкое применение в калориметрии. Они используются либо самостоятельно в качестве активной части калориметра, либо для перехвата сцинтилляционного света от сегментов сцинтиллятора и передачи его кчитывающей системе.

**В первой главе** в качестве примера вершинного детектора высокого разрешения рассмотрен волоконный детектор на капиллярах, наполненных жидким органическим сцинтиллятором (рис.1).

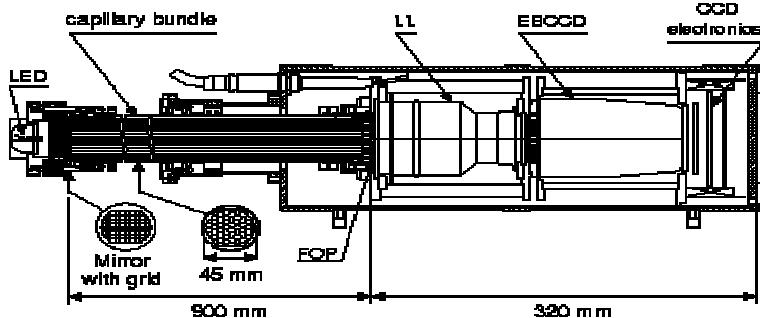


Рис.1. Конструкция трекового детектора на капиллярах с ЖС.

Чувствительная часть детектора представляет собой пакет (сборку) стеклянных капилляров диаметром несколько десятков микрон каждый (рис.2). Полный объем детектора (порядка  $10^6$  капилляров) набирается из пакетов, содержащих порядка 10000 капилляров каждый и имеющих квадратное, либо гексагональное сечение. Каждый пакет изготовлен путем вытягивания сборки стеклянных трубок при температуре размягчения и представляет собой конструктивную единицу достаточной механической прочности. После предварительной обработки капиллярной сборки чистящим составом ее заполняют под вакуумом жидким сцинтиллятором (ЖС). В качестве ЖС используется 1-метилнафталин с добавкой красителя с относительно высокой концентрацией (3 г/л), выполняющего функцию излучателя. Молекулы метилнафталина, возбуждаясь от пролетающей заряженной частицы, передают энергию молекулам красителя в основном безызлучательным путем, что приводит к высокой локальности высвечивания и хорошему координатному разрешению детектора. В качестве добавки обычно выбирается краситель, излучающий в зеленой области видимого спектра, что увеличивает длину затухания света в капиллярах. Типичный показатель экспоненты высвечивания равен 5-6 нс, т.е. потенциальное временное разрешение детектора исчисляется наносекундами.

В силу того, что для изготовления капилляров используется стекло с показателем преломления ниже, чем у метилнафталина, капилляр работает как световод, и часть излучения, захваченная им, передается к торцу сборки. Таким образом, на торце возникает изображение проекции трека заряженной частицы. Считывающая система преобразует его в цифровую форму, удобную для хранения и обработки.

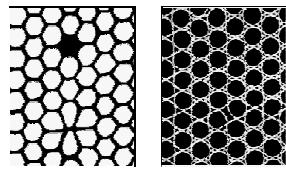


Рис.2. Микрофотография капиллярной сборки

В первой главе также описаны варианты считывающих систем для сцинтилляционных детекторов. Количество света, достигающего торца сборки весьма мало. Типичная величина – 30 фотонов на миллиметр трека. Для считывания необходим прибор, обладающий достаточной квантовой эффективностью в видимой области спектра, и способный регистрировать отдельные фотоны.

Visible Light Photon Counter (VLPC) – разработка Rockwell Science Center – представляет собой твердотельный фотоумножитель. В кремниевом кристалле со специальной многослойной структурой легирования реализуются условия для лавинного размножения носителей заряда. Прибор работает при температурах около 5К и смещении 6.5 В. В приборе достигается усиление  $10^5$  при квантовой эффективности 60%.

HPD, или гибридный фотоумножитель представляет собой электронно-оптический преобразователь, где в плоскости фосфора помещен кремниевый детектор, например Si-PAD матрица. Прибор работает при ускоряющем напряжении в 10-15 кВ и имеет усиление несколько тысяч. Квантовая эффективность определяется фотокатодом и не превышает 20%.

MPM, или многоанодные фотоумножители в последнее время получили признание благодаря разработкам Hamamatsu Inc. Приборы с 256 каналами уже присутствуют на рынке и показывают относительно хорошие параметры такие, как большое усиление, высокое отношение сигнал/шум.

**Во второй главе** описаны устройство и принцип действия крупноформатного ПЗС с электронной бомбардировкой (Megapixel EBCCD), а также методика калибровки ПЗС.

Прибор представляет собой электронно-оптический преобразователь с электростатической (или электромагнитной) фокусировкой, где на месте люминесцирующего экрана установлен держатель со специально подготовленным кристаллом ПЗС.

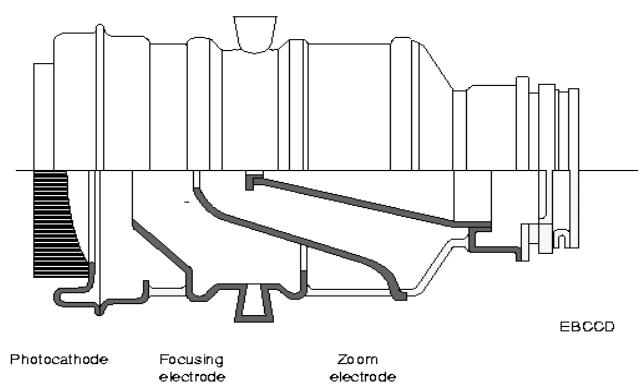


Рис.3. Конструкция ПЗС с электронной бомбардировкой (Megapixel EBCCD).

Кремниевый кристалл размерами  $17 \times 17 \times 0.3 \text{мм}^3$  стравлен со стороны подложки в области  $13.4 \times 13.4 \text{мм}$  до толщины 10 микрон и помещен в трубку так, что электроны с фотокатода бомбардируют обратную сторону кристалла (со стороны травления).

Электрон, ускоренный до 15 кэВ, проникает в подложку кремниевого кристалла и теряет свою энергию, рождая по пути электронно-дырочные пары. В среднем на одну пару тратится 3.6 эВ, следовательно, один фотоэлектрон рождает в подложке ПЗС около 4000 электронно-дырочных пар. Далее облако носителей дрейфует в сторону электродов ПЗС, где в конце концов захватывается потенциальной ямой ближайшей ячейки. Изображение, усиленное таким образом в несколько тысяч раз, затем сдвигается построчно в выходной регистр ПЗС и последовательно, ячейка за ячейкой, попадает на выход ПЗС. Усиленный и отфильтрованный аналоговый сигнал затем оцифровывается и записывается на носитель информации в ЭВМ.

Насыщение потенциальной ямы ячейки ПЗС наступает примерно при 150000 электронах в яме, при этом ожидаемый шум на выходе ПЗС не превышает 210 электронов RMS. Поэтому прибор способен работать как в режиме большой засветки, так и в режиме регистрации отдельных фотонов.

Для тестовых измерений в режиме счета электронов использовались специально разработанная электроника управления ПЗС и тракт обработки аналогового сигнала. Формирование управляющей последовательности импульсов для тактирования ПЗС реализовано в микросхеме программируемой логической матрицы (FPGA) фирмы ALTERA. Специальные преобразователи уровней и стабилизированные источники питания задают необходимые напряжения для работы ПЗС. Сигнал с выхода ПЗС, усиленный предусилителем, через специальный фильтр поступает на устройство выборки-хранения. Таким образом, из композитного выходного сигнала ПЗС выделяется полезная составляющая, несущая информацию об изображении. Далее она еще раз усиливается оконечным каскадом и совместно с синхросигналами передается на вход блока приема изображения в ЭВМ (фрейм-граббера). Таким образом, между количеством электронов в потенциальной яме N и выходным сигналом U [мВ] выполняется соотношение  $U=k\alpha N$ , где  $\alpha$  [мкВ/электрон] – коэффициент передачи выходного узла ПЗС, а k – коэффициент передачи аналогового тракта.

Основными источниками шума при малых засветках в такой конструкции являются:

- статистические флуктуации уровня темнового тока в ПЗС  $\sigma_{U_{dark}}$  [мВ]  $\sim \sqrt{N}$ ,
- шум выходного транзистора ПЗС  $\sigma_{U_{ot}}$  [мВ],
- шум канала обработки аналогового сигнала  $\sigma_{U_{tract}}$  [мВ].

В выходном видеосигнале разделить второй и третий источники шума не представляется возможным:  $\sigma_{U_{ot}}^2 + \sigma_{U_{tract}}^2 = \sigma_{U_{el}}^2$ . Однако измерив уровень темнового тока  $U_{dark}$  и его флуктуации, вполне можно отделить первый источник шума от остальных и получить коэффициент пересчета между количеством электронов в яме и выходным сигналом с ПЗС.

Для уменьшения компоненты  $\sigma_{U_{dark}}$  принятые меры по снижению рабочей температуры кристалла ПЗС. Для этого к заднему фланцу EBCCD, который находится в

тепловом контакте с кристаллом, прижат полупроводниковый холодильник (элемент Пельтье). Теплоотвод от холодильника обеспечивается проточной водой при комнатной температуре, а кристалл при этом удается поддерживать примерно при  $-10^{\circ}\text{C}$ . Это значительно снижает уровень темнового тока и, как следствие, вклад в суммарный шум.

Для проведения калибровки построены распределения амплитуд ячеек ПЗС при двух условиях. В первом случае ПЗС находится в рабочем режиме при полном охлаждении и считывается полный кадр за 100 мс. Во втором случае считывание выходного регистра происходит как обычно, но строки в ПЗС матрице сдвигаются в направлении от регистра, обеспечивая, таким образом, практически нулевой сигнал, не содержащий компоненты  $\sigma U_{\text{dark}}$ . Распределения для первого и второго случаев соответственно показаны на рис.4 Амплитуда сигнала по абсциссе выражена в отсчетах АЦП. Коэффициент пересчета составляет 9.0 мВ/отсчет.

Для первого случая имеем

$$\sigma U_{\text{total}}^2 = (k\alpha \sqrt{N_{\text{dark}}})^2 + \sigma U_{\text{el}}^2. \quad (1)$$

$$U_{\text{dark}} = k\alpha N_{\text{dark}}. \quad (2)$$

И для второго соответственно

$$\sigma U_{\text{total}}^2 = \sigma U_{\text{el}}^2. \quad (3)$$

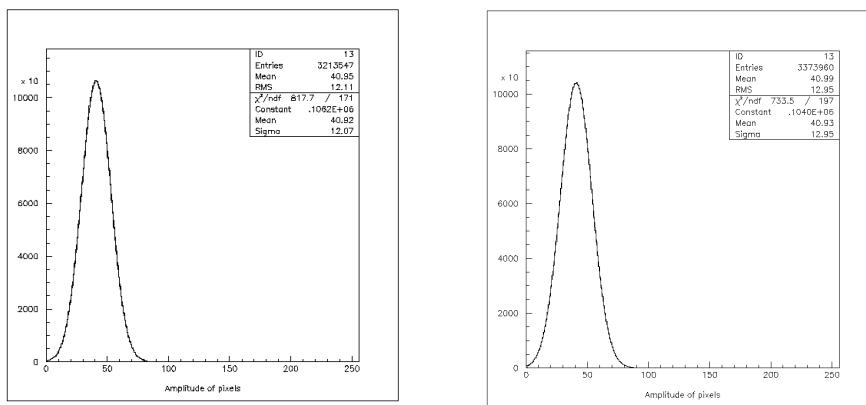


Рис.4. Распределения амплитуд ячеек ПЗС для ненулевого и нулевого темнового токов.

Подставив численные значения в милливольтах и решив совместно уравнения, получим:

$$k\alpha = 0.56 \pm 0.03 \text{ мВ/электрон}$$

Принимая во внимание, что  $k = 500$ , имеем крутизну выходного узла ПЗС:

$$\alpha = 1.1 \text{ мкВ/электрон с погрешностью в пределах } 6\%.$$

Компоненты шума в пересчете на выход ПЗС составляют:

$$\sigma U_{\text{dark}} = 43 \text{ мВ или } 76 \text{ электронов};$$

$$\sigma U_{\text{el}} = 108 \text{ мВ или } 195 \text{ электронов};$$

$$\sigma U_{\text{total}} = 117 \text{ мВ или } 209 \text{ электронов}.$$

**В третьей главе** описываются методика и результаты исследования работы системы в режиме однофотонной чувствительности.

Для проведения измерений в режиме однофотонной чувствительности фотокатод EBCCD засвечивался равномерно зеленым светом с предельно малой интенсивностью. Среднее количество фотоэлектронов на ячейку ПЗС в одном кадре не превышало 0.1, так чтобы наблюдать отдельные фотоэлектроны с малой вероятностью слияния сигналов от соседних фотоэлектронов. Распределение амплитуд ячеек ПЗС в этих условиях показано на рис.6а. Как было отмечено выше, фотоэлектрон, влетая в кремний, рождает там облако носителей, которое дрейфует к электродам ПЗС. Размер облака, вообще говоря, зависит от скорости дрейфа и толщины подложки, и вполне может превышать размеры ячейки. Макроскопические измерения пространственного разрешения прибора указывают на то, что это превышение, если и имеет место, то незначительно. Поэтому сигнал от одиночного фотоэлектрона будет представлять собой кластер из нескольких пикселов, содержащих полный заряд облака (~4000 электронов). Таким образом, задача выделения сигналов от отдельных фотоэлектронов сводится к поиску таких кластеров.

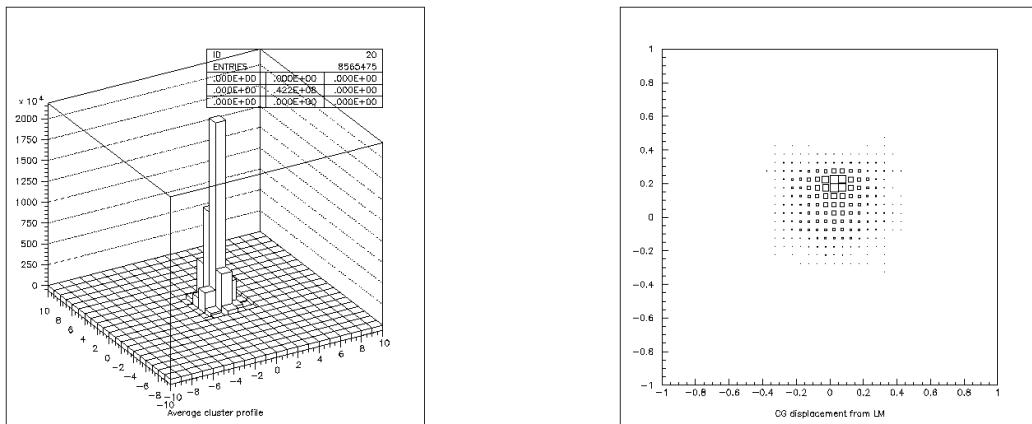


Рис.5. Распределение заряда в кластере от одиночного фотоэлектрона (а) и распределение положения центра тяжести кластера по отношению к центру локального максимума (б).

При анализе амплитудного распределения кластеров используется алгоритм поиска локальных максимумов амплитуды. Затем вокруг каждой ячейки-максимума суммируются  $M$  ячеек (включая сам максимум), и данная сумма называется амплитудой кластера из  $M$  ячеек. Амплитудные спектры таких кластеров для разных  $M$  показаны на рис.6 б,в,г.

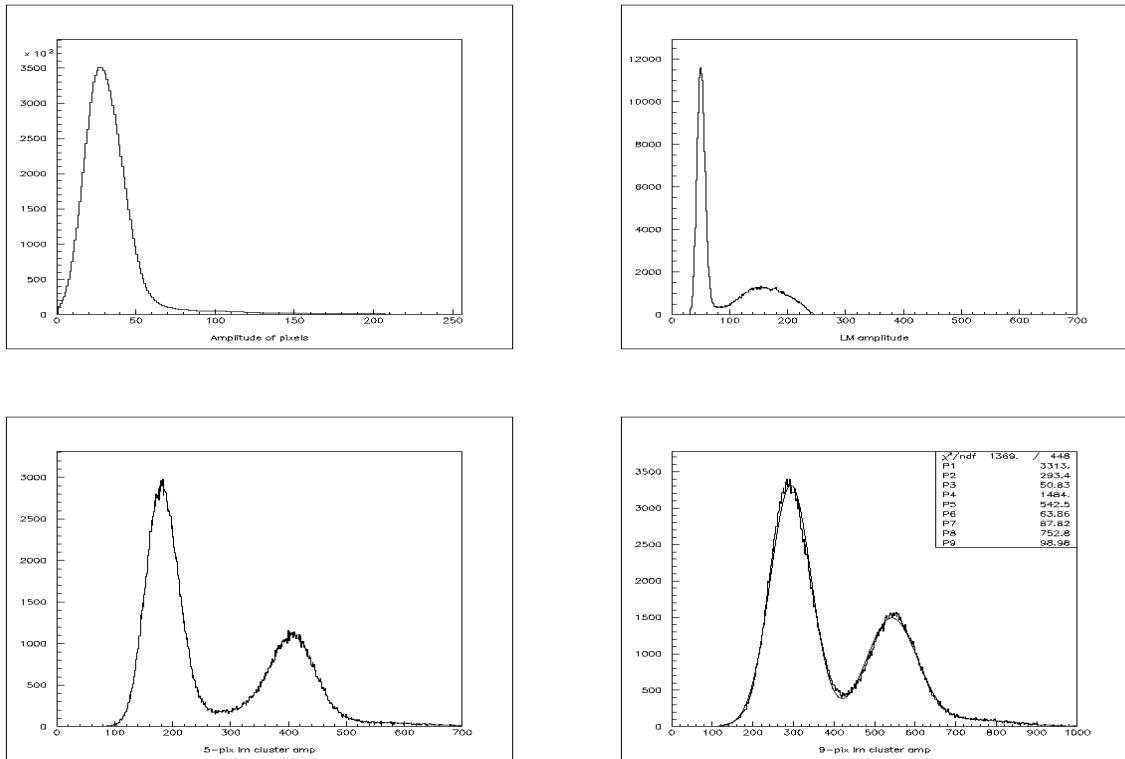


Рис.6. Распределения амплитуд: (а) всех ячеек ПЗС, а также кластеров состоящих из: (б) 1 ячейки, (в) 5 ячеек и (г) 9 ячеек ПЗС.

Первый пик на спектрах б, в и г – шумовой. Второй соответствует одиночному фотоэлектрону. Для анализа примерного распределения заряда в кластере построено распределение амплитуд пикселов в кластере  $3 \times 3$  вокруг локального максимума (рис.5а). Кластер несимметричен, в частности, из-за ненулевой неэффективности переноса, а также из-за ограничения полосы пропускания аналогового тракта в области высоких частот.

**В четвертой главе** приводятся результаты измерения внутреннего усиления EBCCD.

Для режима регистрации отдельных фотоэлектронов была снята кривая усиления, т.е. зависимости суммарного заряда в кластере от ускоряющего напряжения. Для ее получения построены спектры амплитуд кластеров при разных ускоряющих напряжениях. На рис.7 показаны пять серий спектров. Каждая серия соответствует определенному размеру кластера: 1, 2, 3, 5 и 9 пикселов соответственно. Каждая серия содержит четыре спектра соответствующих ускоряющим напряжениям 8, 10, 12 и 14.3 кВ.

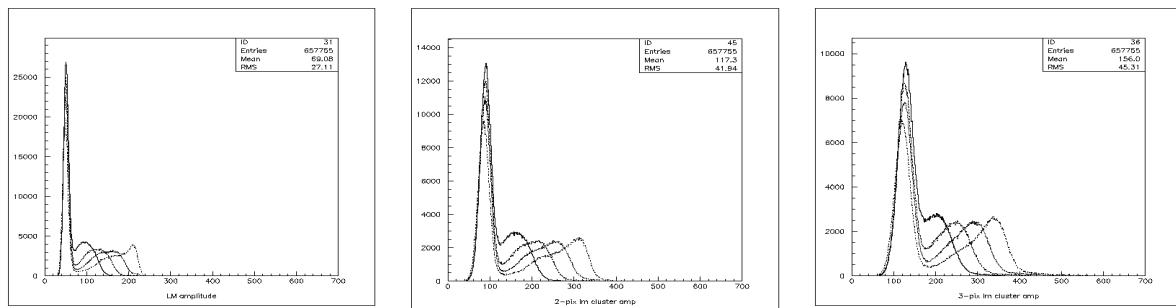
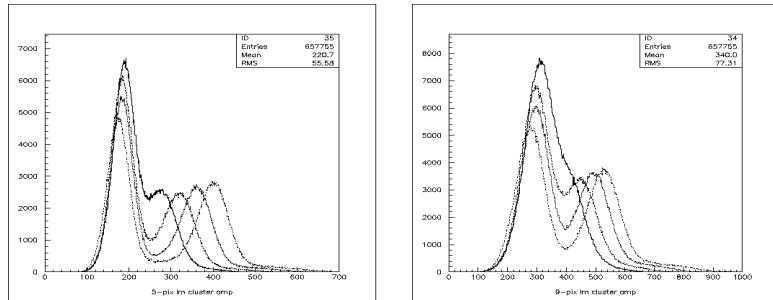
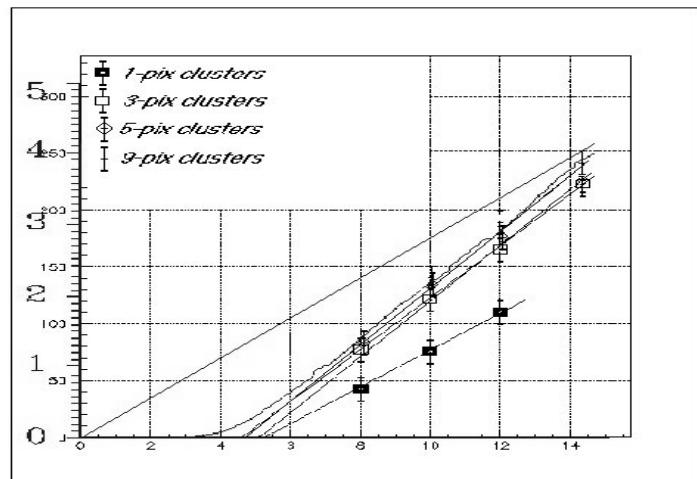


Рис.7 Амплитудные спектры кластеров пяти размеров (1,2,3,5 и 9 ячеек) при разных ускоряющих напряжениях на трубке: 8, 10, 12, 14.3 кВ.



По результатам этих серий построены зависимости средних амплитуд кластеров разных размеров от ускоряющего напряжения. Зависимости аппроксимированы линейными функциями (рис.8). Точка пересечения продолжения прямых с абсциссой дает представление о пороге чувствительности прибора. Порог этот обязан своим существованием так называемому “мертвому слою” на поверхности кремния со стороны подложки. Порог этот составляет обычно 3-5 кВ.

Рис.8. Кривые усиления EBCCD для различного размера кластеров. Крупные цифры по оси Y – усиление в тысячах электронов на фотоэлектрон. Прямая, проходящая через (0,0), имеет наклон соответствующий 3.6 эВ/е. Плавная кривая отражает результаты токовых измерений усиления при больших засветках (для сравнения).



Из рис.8 также видно, что уже кластеры из трех ячеек содержат подавляющую часть заряда (93%), порожденного фотоэлектроном, что подтверждает также и форма кластера на рис.5а.

**В пятой главе** описаны эксперименты, в которых использовались системы считывания на основе крупноформатного ПЗС с электронной бомбардировкой, созданные в ходе исследований с 1995 года по настоящее время.

- Эксперимент E289 на ускорителе PS в KEK, Япония.

Эксперимент E289, или SigN, посвящен исследованию рассеяния  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^-$ , и  $\Lambda^\circ$  гиперонов на протонах. В эксперименте используется активная мишень, служащая одновременно вершинным детектором, выполненная из полимерных сцинтиллирующих волокон (рис.9).

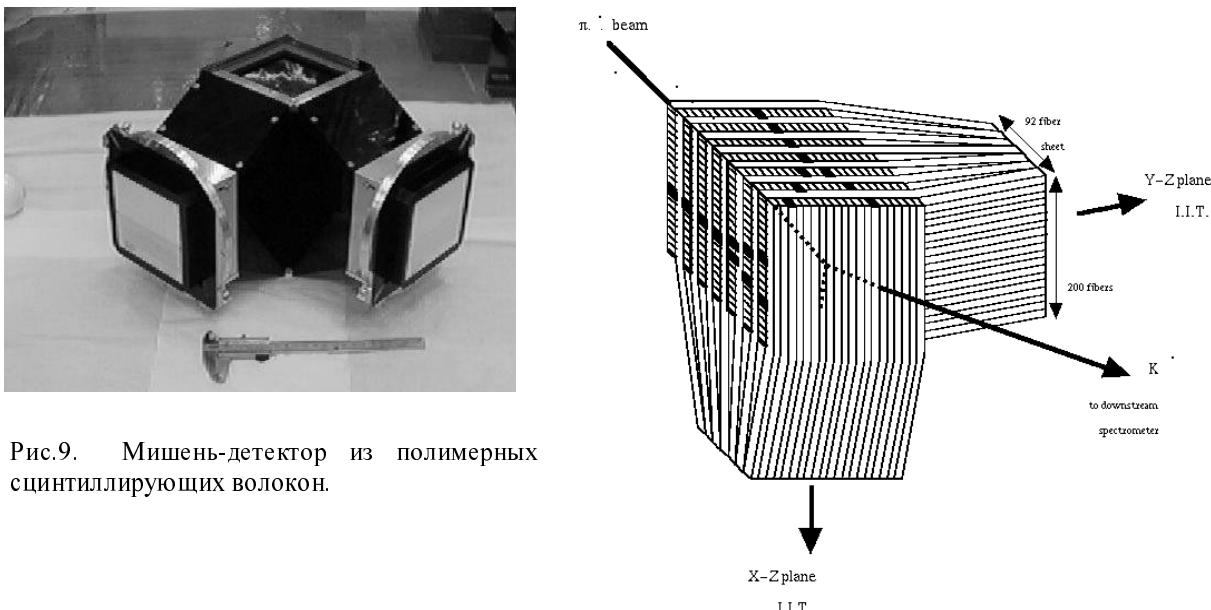


Рис.9. Мишень-детектор из полимерных сцинтиллирующих волокон.

Изображение трека с мишени ( $10 \times 10 \text{ см}^2$ ) считывается посредством цепочки электронно-оптических преобразователей и EBCCD. Использовался EBCCD с форматом ПЗС  $532 \times 580$  и диаметром фотокатода 25 мм. В данной геометрии необходимо уменьшить изображение, чтобы согласовать размеры чувствительной области детектора с чувствительной областью EBCCD. Для этой цели использовались дополнительные электронно-оптические преобразователи. В связи с этим не было необходимости увеличивать усиление EBCCD до режима одноэлектронной чувствительности. Прибор работал с усилением порядка 500. Примеры событий, полученных в эксперименте, показаны на рис.10.

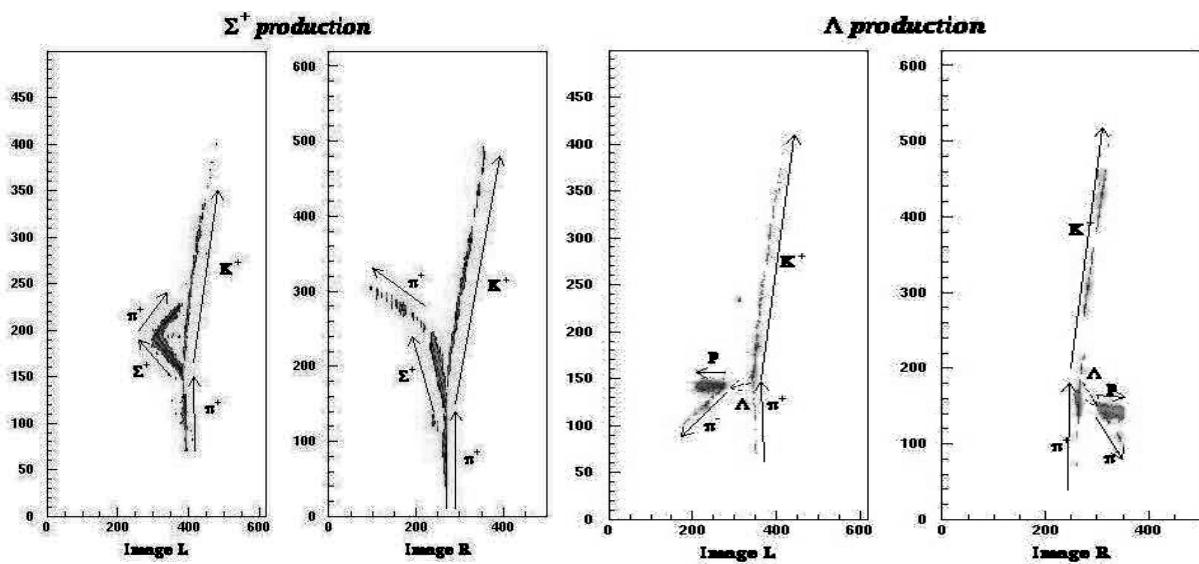


Рис.10. Изображения событий в эксперименте E289.

Достигнуты координатное разрешение порядка 300 микрон в плоскости события (дисперсия трека) и угловое разрешение  $\sim 2$  мрад. В настоящее время набор статистики закончен, и ведется обработка и анализ событий.

- Эксперимент по обнаружению нейтринных осцилляций CHORUS (CERN). Методические измерения на широком нейтринном пучке ускорителя SPS.

Капиллярный трековый детектор, являющийся предметом Pilot Project, был установлен на широком нейтринном пучке ускорителя SPS в CERN в 1995 году и проработал до мая 1998. Детектор был установлен в экспериментальной зоне CHORUS перед эмульсионным детектором и использовался в основном для методических измерений и исследования способности детектора разрешать вершину события. За время работы записано множество событий взаимодействий нейтрино с веществом детектора (рис.11).

Структура детектора показана на рис.2. Мишень представляет собой капиллярную сборку длиной 1.5 м. Сечение мишени – шестиугольник, вписанный в окружность диаметром 40 мм. Мишень содержит более  $10^6$  капилляров, диаметром 20 микрон каждый. Детектор подробно описан в главе 1. Приведем только основные результаты, полученные за время работы детектора. В EBCCD использована ПЗС матрица, форматом 1024x1024 пикселов. Достигнуто пространственное разрешение в плоскости события 13 микрон при условии наилучшей фокусировки по оси Y получен размер кластера 8мкм (сигма) (рис.12).

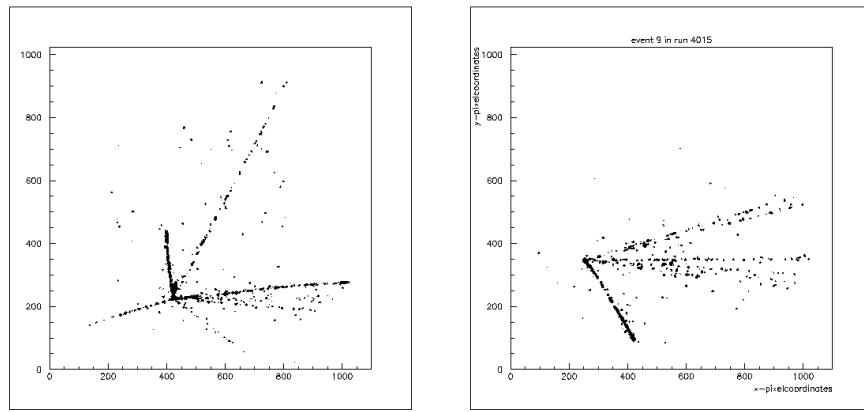


Рис.11. Нейтринные взаимодействия в капиллярной мишени с жидким сцинтиллятором.

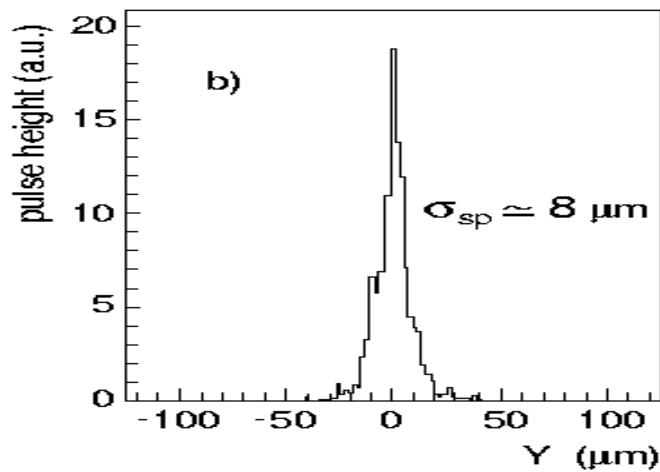


Рис.12. Координатное разрешение детектора.

- Проект CERN/RD46. Прототип вершинного детектора.

Прототип вершинного детектора представляет собой набор плоскостей длиной 250 мм и сечением 20x2 мм<sup>2</sup>, набранных из капиллярных микросборок квадратного сечения 2x2 мм<sup>2</sup>. Каждая микросборка состоит из 10000 капилляров диаметром 20 мкм, наполненных жидким сцинтиллятором. Для увеличения светового выхода с торца, противоположного считающей системе, установлено зеркало. На зеркало травлением нанесена сетка с шагом 2 мм и шириной каждой прозрачной линии 20 микрон. Таким образом, освещая мишень светодиодом со стороны зеркала, можно провести геометрическую калибровку детектора (рис.13).

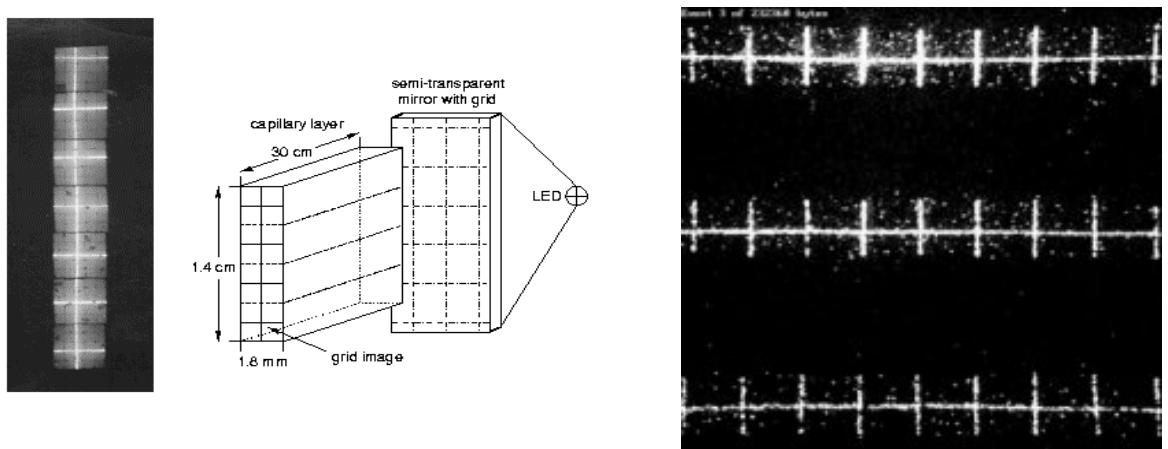


Рис.13. Капиллярная мишень с изображением сетки (слева – микрофотография со схемой, справа – изображение с EBCCD).

Три таких слоя, установленные на расстоянии 5мм друг от друга, составляли прототип детектора. Для исследования его параметров использовались космические частицы. Триггер вырабатывался телескопом из двух сцинтилляционных счетчиков. Частота совпадений в среднем достигала  $0.1 \text{ мин}^{-1}$ . Пример трека космической релятивистской частицы показан на рис.14. По сравнению с набором кремниевых пиксельных детекторов, один слой капилляров обеспечивает не только координаты пересечения, но и микровектор, значительно облегчающий реконструкцию множественных событий.

В детекторе использовалась конфигурациячитывающей системы, аналогичная описанной в главе 1.

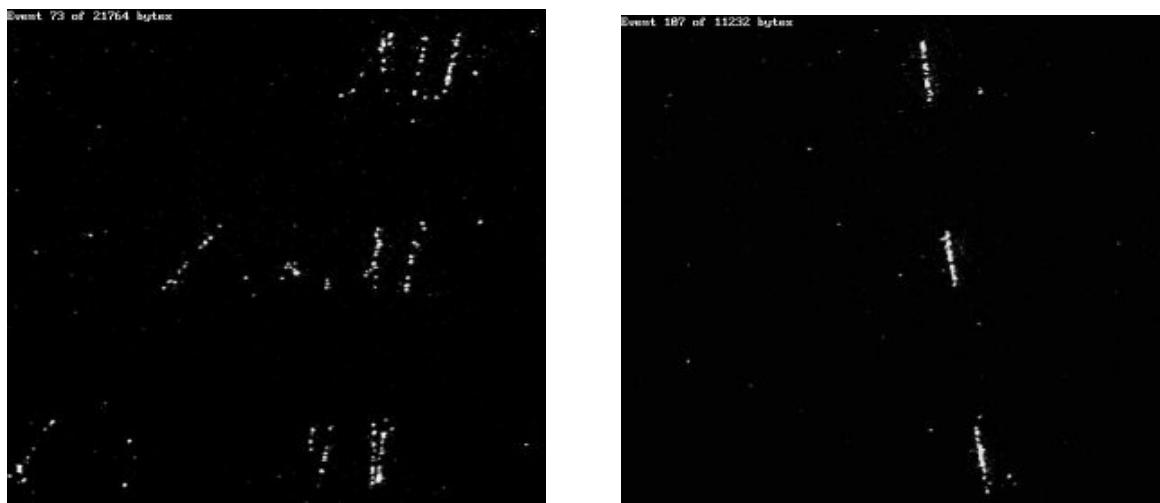


Рис.14. Треки космических частиц, зарегистрированные в трех слоях детектора.

Отмечен ряд преимуществ созданного детектора. Радиационная стойкость достигает величины 100 Мрад, количество вещества на одну точку трека значительно меньше, чем у кремниевых детекторов. Для кремниевых детекторов типичная толщина пластины составляет 300 мкм, что при радиационной длине 9.4 см дает примерно 300 точек трека на одну радиационную длину. Для капиллярного детектора средняя радиационная длина равна 40 см, что при плотности трека в 8 точек на миллиметр обеспечивает 3200 точек на радиационную длину.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы проделанной работы, а также отмечены дальнейшие перспективы (см. стр.2).

## Список литературы

- [1] S.Buontempo, G.Chiodi, I.N.Dalinenko, A.Ereditato, A.V.Ekimov, J.P.Fabre, V.Yu..Fedorov, A.Frenkel, F.Galeazzi, F.Garufi, S.V.Golovkin, V.N.Govorun, N.N.Kalashnikova, V.G.Kossov, E.N.Kozarenko, I.E.Kreslo, L.Yu.Lazovsky, B.Liberty, A.M.Malyarov, G.Martellotti, A.M.Medvedkov, G.Penso, G.I.Vishnevsky, T.Wolff, A.Zhuk. The Megapixel EBCCD: a high-resolution imaging tube sensitive to single photons. «Nuclear Instr. And Methods A», Март1998.
- [2] P.Annis, G.Auriemma, A.Bay, D.Bonekamper, S.Buontempo, C.Currat, R.v.Danzig, A.Ereditato, J.P.Fabre, D.Frekers, A.Frenkel, F.Galeazzi, F.Garufi, J.Goldberg, S.V.Golovkin, K.Hoepfner, K.Holtz, K.Konijn, E.Kozarenko, I.Kreslo, B.Liberty, M.Litaath, G.Martellotti, A.Medvedkov, P.Migliozzi, C.Mommaert, J.Panman, G.Penso, Yu.Petukhov, D.Rondeshagen, C.Satriano, V.Tyukov, V.Vasil'chenko, P.Vilain, J.L.Visschers, G.Wilquet, K.Winter, T.Wolff, H.Wong; H.J.Wortche. A single photon multichannel detector: the Megapixel EBCCD. Материалы конференции SCIFI97, South Bend, USA. Октябрь1997.
- [3] I.N.Dalinenko, J.P.Fabre, V.Yu..Fedorov, A.Frenkel, S.V.Golovkin, N.N.Kalashnikova, V.G.Kossov, E.N.Kozarenko, I.E.Kreslo, L.Yu.Lazovsky, A.M.Malyarov, G.Martellotti, A.M.Medvedkov, G.Penso, G.I.Vishnevsky. A new tool for high resolution multichannel readout: Megapixel electron-bombarded CCD image zoom tube. Материалы конференции SPIE95, v.2551 p.197-205,1995.
- [4] P.Annis, A.Bay, D.Bonekamper, S.Buontempo, G.Chiodi, A.Ereditato, J.P.Fabre, G.Fiorillo, D.Frekers, A.Frenkel, F.Galeazzi, F.Garufi, J.Goldberg, S.V.Golovkin, K.Hoepfner, K.Konijn, E.Kozarenko, I.Kreslo, B.Liberty, G.Martellotti, A.Medvedkov, J.Panman, G.Penso, Yu.Petukhov, D.Rondeshagen, A.Soloviev, V.Tyukov, V.Vasil'chenko, P.Vilain, J.L.Visschers, G.Wilquet, K.Winter, T.Wolff, H.Wong. Tracking with capillaries and liquid scintillator. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 61B(1998) 390-395.

[5] J.K.Ahn, J.Arview, B.Bassalleck, M.S.Chung, W.M.Chung, H.En'yo, T.Fukuda, H.Funahashi, S.Golovkin, A.Gorin, Y.Goto, T.Hayakawa, A.Higashi, A.Ichikawa, M.Ieiri, M.Iinuma, K.Imai, M.Ishino, Y.Itow, H.Kanda, Y.D.Kim, Y.Kondo, E.Kozarenko, I.Kreslo, J.M.Lee, A.Masaike, Y.Matsuda, S.Mihara, K.Nakai, K.Nakazawa, K.Ozawa, I.S.Park, Y.M.Park, I.Petoukhov, N.Saito, A.Sato, Y.M..Shin, K.S.Sim, R.Susukita, T.Tabaru, F.Takeutchi, P.Tlusty, K.Yamamoto, S.Yamashita, S.Yokkaichi, M.Yoshida. Hyperon-Proton Scattering Experiments with a Scintillating Fiber Detector at KEK. Материалы конференции HYP97, BNL, USA, Октябрь1997.

И.Е.Кресло

Система считывания для сцинтилляционных детекторов на основе крупноформатного ПЗС с электронной бомбардировкой.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Microsoft Word.

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 10.09.98.

Формат 60x84/8.

Офсетная печать.

Печ.л. 1,8. Уч.-изд.л. 1,4.

Тираж 100.

Заказ 243.

Индекс 3649.

ЛР №020498 06.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.