

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

ЧИРИКОВ – ЗОРИН
Игорь Евгеньевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ И ГАЗОРАЗРЯДНЫХ
ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2014

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова
Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор
Владимир Федорович Образцов
ФГБУ «ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий» г. Протвино

кандидат физико-математических наук
Дмитрий Евгеньевич Карманов
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
(НИИЯФ) МГУ, г. Москва

Ведущая организация:

ФГБУ «ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики»,
г. Москва

Защита состоится «__» _____ 2014 г. в «__» часов на заседании
диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединенном институте ядерных
исследований, расположенном по адресу: 141980, Моск. обл., г. Дубна,
ул. Жолио-Кюри, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и
на сайте Объединенного института ядерных исследований

http://wwwinfo.jinr.ru/dissertation/DC_dlnp.htm

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Г.А. Карамышева

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Достижения физики высоких энергий неразрывно связаны с развитием методов регистрации частиц. Сцинтилляционные и проволочные газоразрядные детекторы в настоящее время составляют основу спектрометрических комплексов для экспериментов по физике частиц. Постоянное развитие и совершенствование этих методов регистрации частиц является актуальным, так как расширяет возможности физического эксперимента и в значительной мере определяет дальнейший прогресс в экспериментальной физике высоких энергий.

Диссертация посвящена дальнейшему развитию и совершенствованию методов регистрации заряженных частиц для экспериментов на действующих и планируемых ускорительных комплексах: Тэватрон (Фермилаб), LHC (ЦЕРН), SSC (Даллас), УНК (Протвино), NICA (ОИЯИ).

Цель работы состояла в разработке и исследованию новых сцинтилляционных детекторов, пластмассовых сцинтилляторов, фотоприемников, прецизионных, быстродействующих дрейфовых камер для планируемых экспериментов на установках: SDC (SSC), ATLAS (LHC), COMPASS (CERN), МЧС (УНК), MPD (NICA), а также разработке и созданию сцинтилляционных счетчиков нового поколения для модернизации детектора мюонов установки CDF II (Фермилаб).

Научная новизна и практическая ценность работы заключается в предложении и реализации автором ряда методических решений, позволивших создать новые и усовершенствовать существующие сцинтилляционные и проволочные газоразрядные детекторы заряженных частиц, а также в разработке методов абсолютной калибровки и исследования фотодетекторов.

Предложен и разработан новый метод абсолютной калибровки и мониторинга спектрометрического канала ФЭУ, который получил широкое распространение в мировой практике.

При исследовании одноэлектронных спектров новых сверхминиатюрных ФЭУ R5600 и R5900 (Hamamatsu) с металло-канальным динодом обнаружена значительная фотоэмиссия с первого динода, которая достигает 60 % от сигнала с фотокатода и существенно ухудшает спектрометрические характеристики ФЭУ. Важным следствием обнаруженного эффекта является радикальное улучшение фирмой Hamamatsu спектрометрических свойств новых модификаций ФЭУ R7400 и R5900, в которых фотоэффект на первом диноде был подавлен.

Разработана методика и исследованы основные параметры разных типов микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД) – детекторов фотонов нового поколения.

Создан и исследован новый полистирольный сцинтиллятор UPS 923А, который по совокупности сцинтилляционных и эксплуатационных параметров превосходит лучшие мировые аналоги и в настоящее время широко применяется в экспериментах по физике частиц.

Разработан и исследован новый позиционно-чувствительный сцинтилляционный счетчик, в котором система спектросмещающих полосковых световодов впервые применена для определения координат заряженных частиц.

Предложена принципиальная схема и разработаны крупногабаритные сцинтилляционные счетчики нового поколения с компактным съемом информации спектросмещающими волокнами, которые получили широкое распространение в практике.

Разработаны конструкция, технология массового производства, методика тестирования и создано более 600 крупногабаритных (длиной до 3,2 м) сцинтилляционных счетчиков нового поколения из сцинтиллятора UPS 923А для модернизации детектора мюонов установки CDF II, предназначенной для исследований свойств тяжелых t , b , c – кварков на Тэватроне Фермилаб.

Разработаны и исследованы проволочные газоразрядные трековые детекторы нового поколения – мини-дрейфовые камеры (МДК), сочетающие в себе простоту конструкции, быстродействие и загрузочную способность пропорциональных камер с высокой пространственной точностью дрейфовых камер.

Проведен анализ основных физических процессов определяющих пространственное разрешение МДК и оценены их вклады в погрешность измерения координат траекторий частиц.

Разработаны, созданы и исследованы дрейфовые камеры нового типа на основе блоков лавсановых трубок. Обнаружено явление существенного увеличения интенсивности шумовых сигналов в камерах из алюминизированных лавсановых трубок при воздействии видимого света, которые устраняются применением графитированного лавсана. Отсюда следует важный практический вывод о том, что для изготовления трубок необходимо использовать лавсан с графитовым токопроводящим покрытием.

Определен ресурс работы дрейфовых камер на основе блоков лавсановых трубок; суммарная загрузка составляет не менее 10^{18} электронов на миллиметр длины анодной проволоки.

Обнаружено и исследовано новое свойство проволочного газоразрядного счетчика с катодом из алюминия – регистрация фотонов видимого света. На основе анализа экспериментальных данных создана теория этого эффекта, которая объясняет светочувствительность и другие особенности работы газоразрядных детекторов (нестабильность шумов, послеразряды, старение и др.) ранее трудно поддающиеся объяснению.

Основные положения, представленные к защите:

1. Предложение и разработку нового метода абсолютной калибровки и мониторинга спектрометрического канала ФЭУ.

2. Разработку методики и результаты исследования основных параметров разных типов микропиксельных лавинных фотодиодов – фотодетекторов нового поколения.

3. Создание и исследование основных свойств нового пластмассового сцинтиллятора UPS 923A (световыход, ослабление света, кинетика радиолуминесценции, долговременная стабильность).

4. Предложение и разработку крупногабаритных сцинтилляционных счетчиков нового поколения с компактным съемом информации плоским оптическим кабелем из спектрсмещающих волокон.

5. Разработку и исследование нового позиционно-чувствительного сцинтилляционного счетчика, в котором система спектрсмещающих полосковых световодов впервые применена для определения координат частиц.

6. Разработку конструкции, технологии массового производства, методики тестирования и создание более 600 крупногабаритных (длиной до 3,2 м) сцинтилляционных счетчиков нового поколения для модернизации детектора мюонов установки CDF II.

7. Результаты разработки и исследования дрейфовых камер нового типа на основе блоков лавсановых трубок и мини - дрейфовых камер – трековых детекторов нового поколения.

8. Обнаружение и исследование нового свойства проволочного газоразрядного счетчика с катодом из алюминия – регистрация фотонов видимого света и создание теории эффекта.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах ЛЯП ОИЯИ, сессии ОЯФ АН СССР (Москва, 1987), международном симпозиуме по координатным детекторам (Дубна, 1987), 8th, 10th 11th Pisa Meeting on Advanced Detectors, La Biodola, Isola d'Elba, Italy 2000, 2006, 2009, международной конференции «Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии» ИСМАРТ- 2010; и опубликованы в отечественных и зарубежных научных журналах, трудах конференций, а также в виде препринтов ОИЯИ.

Циклы работ автора с коллегами по разработке и созданию новых детекторов и регистрирующих систем на основе пластмассовых сцинтилляторов были дважды отмечены первыми ОИЯИ за 1998 г. (№ 2478) и 2005 г. (№ 3146), а также второй премией в конкурсе на лучшие публикации 2006 г. в журнале «Письма в ЭЧАЯ».

В диссертации обобщены результаты ряда работ, выполненных автором в ОИЯИ и опубликованных в отечественных и зарубежных научных журналах, материалах конференций, препринтах ОИЯИ и защищенных авторским свидетельством [1-23].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложена на 195 страницах, содержит 105 рисунков, 10 таблиц и список цитируемой литературы из 106 наименований.

Содержание работы

Диссертация состоит из двух частей. В первой части, состоящей из трех глав, представлены результаты разработок и исследований новых сцинтилляционных детекторов, пластмассовых сцинтилляторов и фотоприемников для планируемых экспериментов на установках SDC (SSC), ATLAS (LHC), COMPASS (CERN), MPD (NICA), а также результаты разработки и создания сцинтилляционных счетчиков нового поколения для модернизации детектора мюонов установки CDF II (Тэватрон). Вторая часть содержит четвертую и пятую главы, в которых представлены результаты разработок и исследований новых прецизионных быстродействующих дрейфовых камер для планируемых в восьмидесятые годы экспериментов на УНК (г. Протвино).

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели, отмечена ее новизна и практическая ценность, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описан новый метод абсолютной калибровки и представлены результаты исследований фотодетекторов этим методом [1-6].

Новый прецизионный метод абсолютной калибровки и мониторинга спектротрического канала ФЭУ, основан на применении вспышек света низкой интенсивности (~10 фотонов), когда вероятность образования фотоэлектронов на фотокатодке невысокая; и анализе одноэлектронных спектров с помощью функции отклика, основанной на простой статистической модели работы ФЭУ с традиционной диодной структурой (линейные фокусирующие диоды, жалюзийные диоды, коробочные диоды). Функцией отклика является свертка отклика идеального бесшумного ФЭУ – $S_{ideal}(x)$ и фоновых процессов $B(x)$:

$$S_{real}(x) = \int_{Q_0}^x S_{ideal}(x') B(x - x') dx', \quad S_{ideal}(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \cdot \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi n}} \exp\left(-\frac{(x - Q_0 - nQ_1)^2}{2n\sigma_1^2}\right),$$

$$B(x) = \frac{(1-w)}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - Q_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) + w \theta(x - Q_0) \alpha \exp[-\alpha(x - Q_0)],$$

где μ – среднее значение пуассоновского распределения фотоэлектронов образованных на фотокатодке и собранных на первом диоде, Q_1 , σ_1 – средний заряд и стандартное отклонение гауссовского распределения одноэлектронного отклика диодной системы, Q_0 , σ_0 , w , α – параметры фонового распределения, $\theta(x)$ – шаговая функция.

Функция отклика реального ФЭУ содержит семь физических параметров. Два из них Q_0 и σ_0 определяют пьедестал. Два других w и α характеризуют дискретный фон, а остальные три параметра Q_1 , σ_1 и μ описывают спектр выходных сигналов. Параметр μ пропорционален интенсивности света, а Q_1 и σ_1 описывают статистический процесс умножения электронов диодной системой ФЭУ.

Таким образом, интенсивность импульсного источника света и коэффициент усиления определяются разными параметрами функции отклика, поэтому параметр Q_1 можно использовать для калибровки и мониторинга стабильности спектрометрического канала ФЭУ, а стабильность интенсивности источника света будет мониториться параметром μ .

На рис. 1 показана деконволюция зарядового спектра от светодиода со средним количеством фотоэлектронов $\mu \approx 1,7$. Сплошная линия является результатом фитирования спектра функцией отклика, полученные параметры фита представлены на рисунке. Штриховыми кривыми показаны фон и соответствующие распределения для $n = 1, 2, 3, \dots$ фотоэлектронов испущенных фотокатодом. Из рис. 1 видно, что экспериментальный спектр фитируется хорошо ($\chi^2 \approx 1$), а интересующий нас калибровочный параметр Q_1 (кан/ф.э.) определяется с высокой точностью ($< 1\%$). Для исследования стабильности процедуры деконволюции и области применения метода были проведены серии измерений с разными интенсивностями света. Полученные результаты демонстрируют хорошую стабильность процедуры деконволюции для большой области интенсивностей тестового сигнала μ от 0,1 до 5 фотоэлектронов.

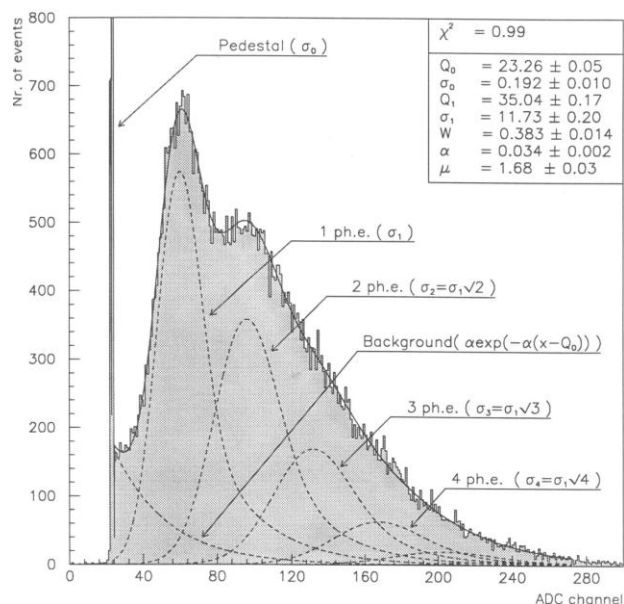


Рис. 1. Деконволюция типичного однофотоэлектронного светодиодного спектра ФЭУ ЕМ1 9814В с $\mu \approx 1,7$ ф.э.

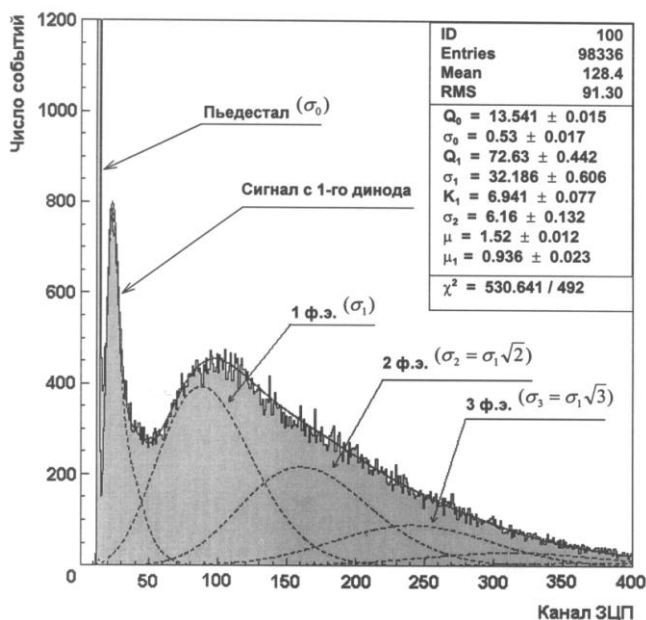


Рис. 2. Деконволюция типичного однофотоэлектронного светодиодного спектра нового сверхминиатюрного ФЭУ R5600 с $\mu \approx 1,5$

При исследовании одноэлектронных спектров новых сверхминиатюрных ФЭУ R5600 и R5900 (Hamamatsu) с компактной диодной системой – «металло-канальный диод» обнаружена значительная фотоэмиссия с первого диода. Поэтому для правильного описания одноэлектронных спектров новых ФЭУ функция отклика должна учитывать фотоэффект на первом диоде, а также пуассоновские флуктуации числа вторичных электронов на первом диоде.

Деконволюция спектра от светодиода сверхминиатюрного ФЭУ R5600 усложненной функцией отклика показана на рис.2. На рисунке отчетливо виден первый пик после «пьедестала», который связан с фотоэффектом на первом диоде и соответствующие распределения для $n = 1, 2, 3, \dots$ фотоэлектронов испущенных фотокатодом. Экспериментальный спектр также фитируется хорошо ($\chi^2 \approx 1,1$).

Микропиксельные лавинные фотодиоды (МЛФД) представляют собой матрицу из небольших p-n переходов – пикселей, созданных на поверхности или в глубине кремниевой подложки.

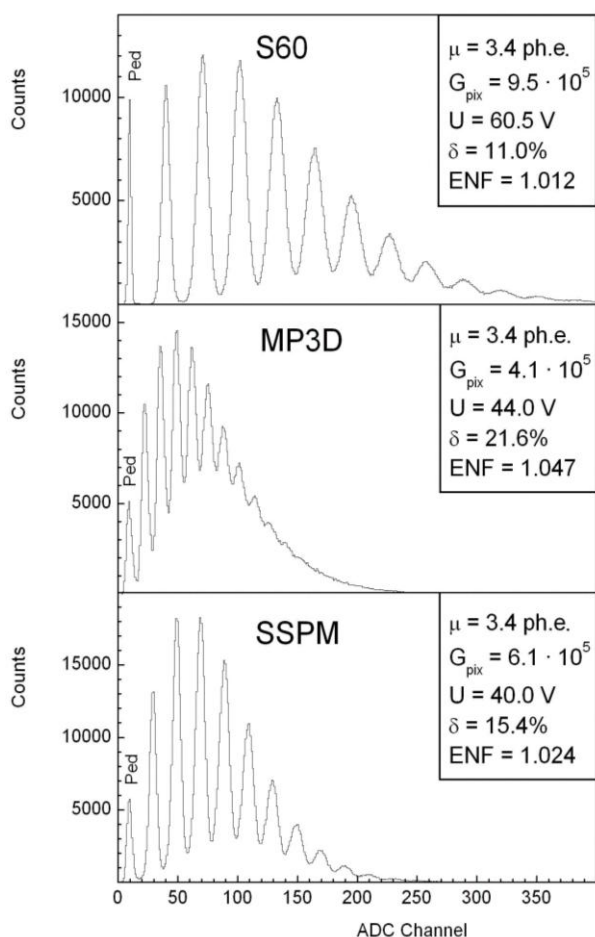


Рис. 3. Типичные однофотоэлектронные светодиодные спектры МЛФД с поверхностными пикселями со средним количеством фотоэлектронов $\mu = 3,4$ при $T = 22^\circ\text{C}$

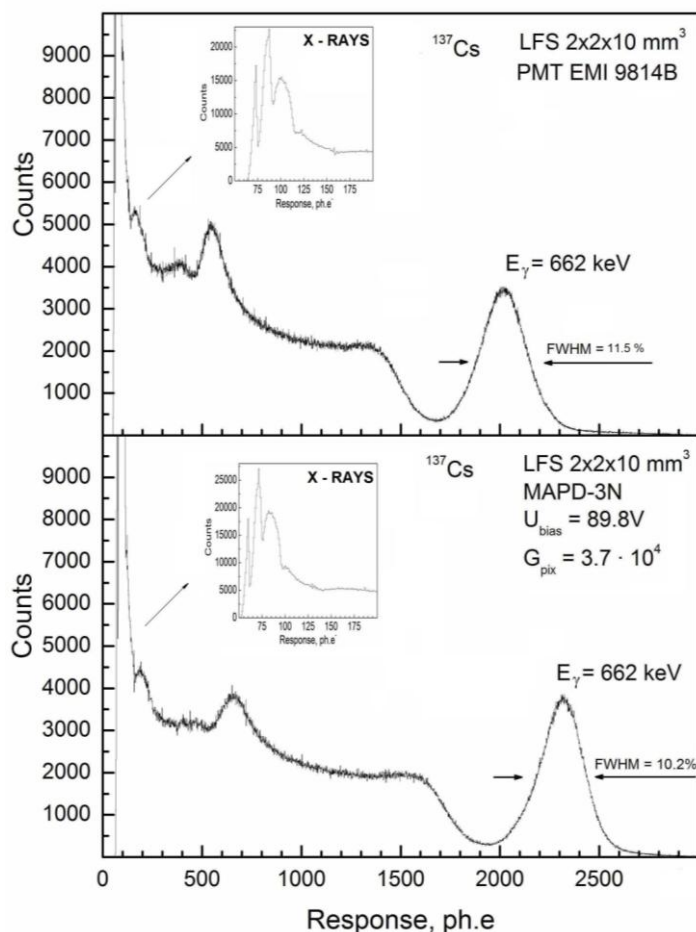


Рис. 4. Сравнительные спектры фотоэлектронов измеренные ФЭУ EMI 9814B и MAPD-3N при регистрации γ -излучения ^{137}Cs сцинтилляционным кристаллом LFS размером $2 \times 2 \times 10 \text{ mm}^3$ при $T = 15^\circ\text{C}$

МЛФД работают в так называемом гейгеровском режиме при напряжении смещения превышающим пробойное на 10–20%, имеют при комнатной температуре большой коэффициент усиления 10^4 – 10^6 и способны регистрировать слабые световые потоки на уровне счета отдельных фотонов.

Исследования основных характеристик МЛФД (коэффициент усиления пикселя, эффективность регистрации фотона и др.) проводилось методом световых вспышек низкой интенсивности представленным выше.

Изучались разные типы МЛФД: S60 с индивидуальными поверхностными дрейфовыми каналами, МРЗD с индивидуальными поверхностными резисторами, МЛФД-3A(N) со сверхвысокой плотностью глубинных пикселей разработанные З. Я. Садыговым и SSPM-050701GR-TO18 коммерческий прибор фирмы Photonique (Швейцария).

Проведенные сравнительные исследования показали, что все приборы имеют коэффициент усиления $>10^4$ при комнатной температуре, высокое одноэлектронное разрешение (δ) 10% – 20% и способны регистрировать слабые световые потоки на уровне счета отдельных фотонов (рис. 3), а МЛФД-3N со сверхвысокой плотностью глубинных пикселей $1,5 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2}$ и площадью $3 \times 3 \text{ мм}$ можно использовать вместо ФЭУ в спектрометрических счетчиках с неорганическими сцинтилляторами (рис. 4).

Во второй главе представлены результаты разработок и исследований новых сцинтилляционных детекторов и нового пластмассового сцинтиллятора UPS 923A [7-12].

Созданы прототипы больших мюонных сцинтилляционных счетчиков размерами $200 \times 30 \times 2 \text{ см}^3$, $300 \times 30 \times 2 \text{ см}^3$ из разработанного нами пластмассового сцинтиллятора UPS 923A на основе полистирола (PS) с добавками 2% РТР и 0,03% РОРОР и хорошо известного западного сцинтиллятора NE 114 на основе поливинилтолуола (PVT). Свет на ФЭУ ЕМІ 9814В собирался с торцов сцинтилляционных пластин стандартным образом, посредством световодов типа «рыбий хвост».

Результаты сравнительных исследования светосбора с помощью космических мюонов в созданных счетчиках представлены на рис.5. Технические длины ослабления сцинтилляционного света пластинами UPS 923A и NE 114 сравнимы и составляют 130 см и 114 см соответственно, но светосбор в UPS 923A счетчика приблизительно на 25% больше, чем в NE 114. Счетчики с большими ФЭУ

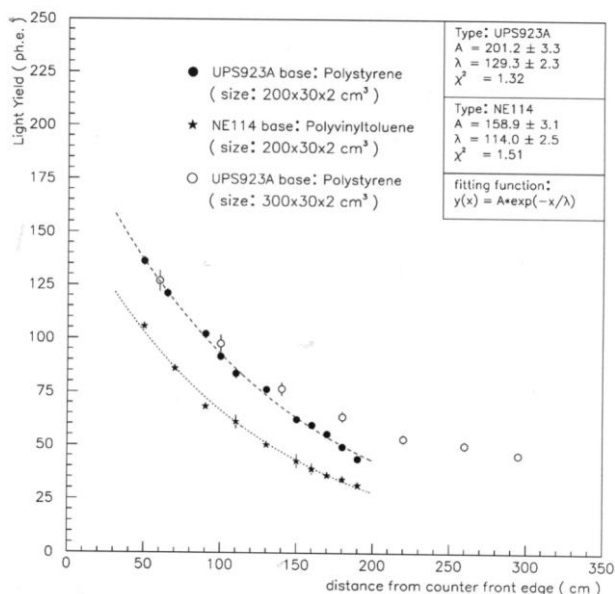


Рис. 5. Зависимости светосбора с трех счетчиков от расстояния до переднего края сцинтилляционных пластин

и световодами типа «рыбий хвост» имеют существенные недостатки.

Автором предложена принципиальная схема и разработаны крупногабаритные

(длиной до 3 м) сцинтилляционные счетчики нового поколения с компактным съемом информации, в которых впервые светосбор осуществляется плоским оптическим кабелем из спектросмещающих волокон, имеющим оптический контакт с узкой длинной гранью сцинтилляционной пластины, а регистрация света – новыми сверхминиатюрными ФЭУ R5600 (Hamamatsu) (рис.6)

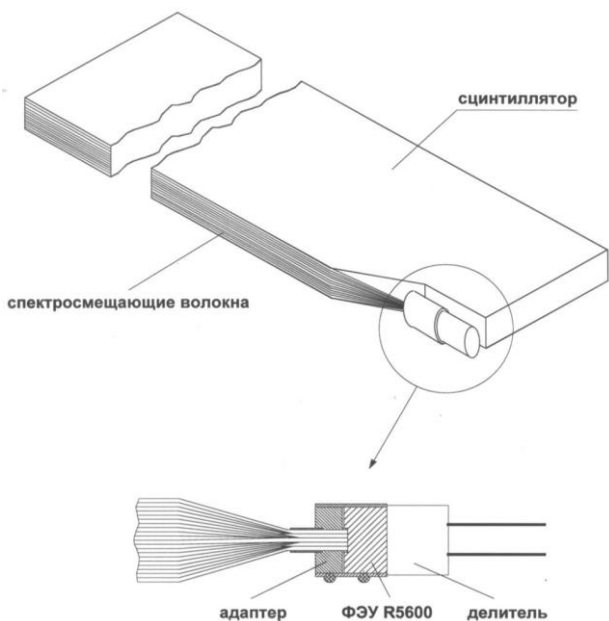


Рис. 6. Конструкция сцинтилляционного счетчика со светосбором лентой световодом из спектросмещающих волокон

помощью космических мюонов. В прототипе BSU эффективная длина затухания света составляет $\lambda=201$ см с зачерненными торцами волокон и $\lambda=293$ см, когда на дальних торцах волокон была приклеена полоска алюминиевой фольги.

Для исследования возможности измерения координат заряженных частиц по центру тяжести интенсивности света в пластмассовом сцинтилляторе был изготовлен счетчик, в котором система спектросмещающих полосковых световодов

(ширина 20 мм) впервые применена для определения координат. Точность измерения координат электронов от радиоактивного источника ^{106}Ru вследствие многократного кулоновского рассеяния была невысокой и составляла 3 мм. При имитации треков коллимированным светодиодом с шириной щели 0,8 мм точность определения координаты источника света составляла 1,3 мм.

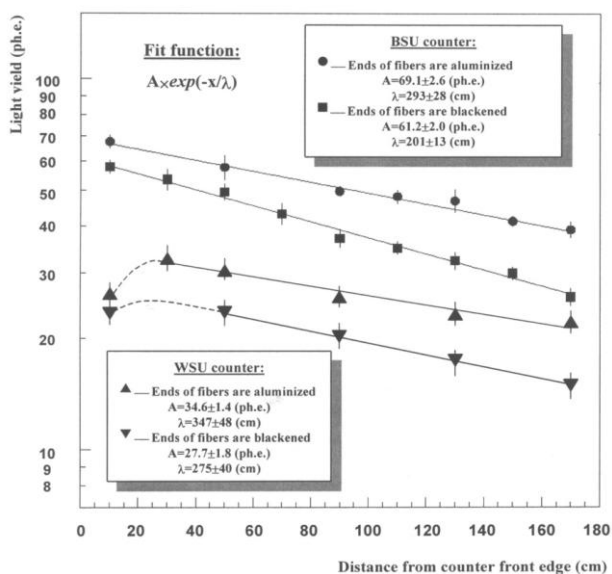


Рис. 7. Кривые затухания света в BSU и WSU счетчиках с алюминизированными и зачерненными концами волокон

Детально исследованы основные характеристики разработанного пластмассового сцинтиллятора UPS 923A: световыход, ослабление света, долговременная стабильность, а также кинетика

радиолюминесценции сцинтиллятора и спектросмещающих волокон.

Прозрачность сцинтилляционного материала определяется объёмной длиной ослабления λ_B ; это длина, на которой световой сигнал уменьшается в e раз по закону Бугера-Ламберта. Измерения λ_B сцинтиллятора к собственному излучению проведены с помощью параллельного пучка света со спектром, очень близким к спектру излучения сцинтиллятора (спектр спектросмещающей добавки РОРОР). Спектры излучения и поглощения добавки РОРОР частично перекрываются и поэтому коротковолновое крыло спектра излучённого света (<400 нм) при распространении в сцинтилляторе очень быстро поглощается в основном вследствие реабсорбции. Таким образом, спектр излучения обрывается и смещается в длинноволновую область, где влияние процессов поглощения и реабсорбции менее существенны, поэтому прозрачность сцинтилляционного материала увеличивается (рис.8).

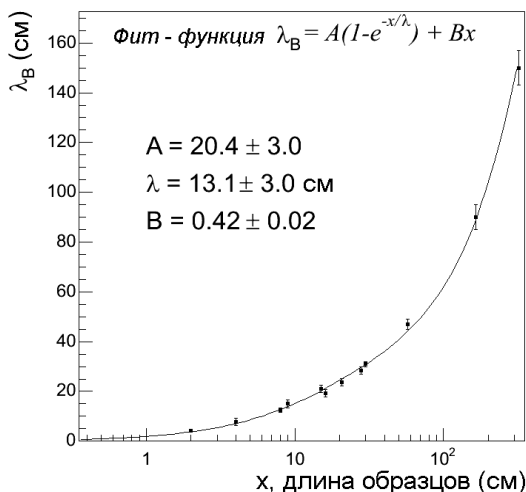


Рис. 8. Зависимость объёмной длины ослабления λ_B от пути распространения (длины образцов) света в сцинтилляторе UPS 923A

Кинетика радиолюминесценции сцинтиллятора и спектросмещающих волокон исследована однофотонным методом Боллингера и Томаса с помощью оригинального временного спектрометра ($\sigma_{\text{аппар}}=150$ пс) созданного автором. В таблице 1 приведены временные параметры формы световых импульсов

Таблица 1. Измеренные временные параметры формы импульсов света

Материал	Время нарастания, нс (уровень 0.1 - 0.9)	Время спада, нс (уровень 0.9 - 0.1)	ПШПМ, нс (уровень 0.5 - 0.5)	Длительность импульса, нс (уровень 0.1 - 0.1)
UPS 923A	0,8	5,3	3	7,2
UPS 923A + K27	1,7	17,3	7,8	19,1
UPS 923A + Y11	2,2	18	8,8	22,4
Плексиглас	0,23	0,23	0,33	0,65

сцинтиллятора и спектросмещающих волокон, а также параметры аппаратной функции, измеренной при помощи излучения Черенкова.

Проведены сравнительные исследования естественного старения пластмассовых сцинтилляторов UPS 923A на основе PS и NE 114 на основе PVT. Для этих исследований были изготовлены два длинных счётчика ($200 \times 30 \times 2$ см³) из сцинтилляторов UPS 923A, NE 114 со съёмом света световодами типа «рыбий хвост» и изучена деградация светосбора за четыре года. Обнаружено, что уменьшение светосбора сцинтиллятора NE 114

(18%/год) идет более чем в два раза быстрее в сравнении со сцинтиллятором UPS 923A (7,5%/год). Для оценки естественной деградации световыходов сцинтиллятора UPS 923A автор проводил измерения светосбора небольшого образца ($\varnothing 16$ мм, $h=10$ мм) в течение 12 лет. Естественной деградации световыходов сцинтиллятора UPS 923A за двенадцатилетний период не обнаружено. Таким образом, можно сделать вывод, что естественное старение пластмассовых сцинтилляторов в основном определяется деструкцией полимерной основы (уменьшением прозрачности), а не люминесцентных добавок.

В третьей главе представлены конструкция, технология массового производства методика тестирования и результаты исследований более 600 крупногабаритных (длиной до 3,2 м) пластмассовых сцинтилляционных счетчиков нового поколения детектора мюонов установки CDF II [13-15].

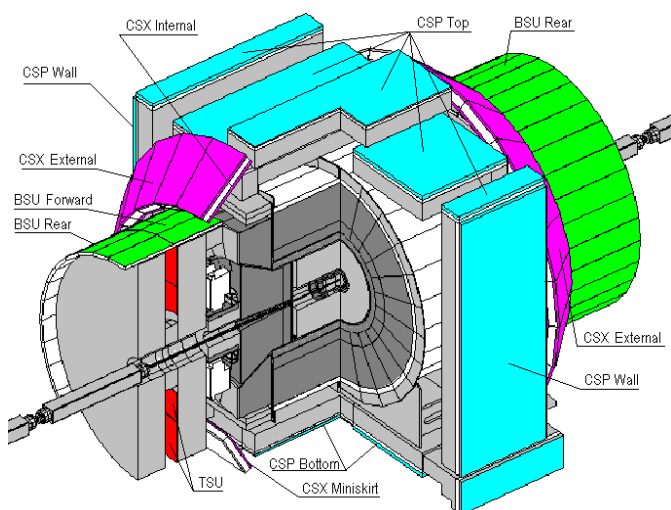


Рис. 9. Установка CDF II

Детектор мюонов CDF II состоит из дрейфовых камер и триггерных сцинтилляционных годоскопов: CSP, BSU, TSU, CSX (рис.9). Для модернизации детектора мюонов CDF были разработаны пластмассовые сцинтилляционные счетчики с компактным съемом света (см. гл.2), которые почти лишены недостатков присущих счетчикам стандартной конструкции со световодами типа «рыбий хвост».

Конструкция счетчика нового поколения со светосбором лентой – световодом из спектросмещающих волокон показана на рис.10. В одном из углов сцинтилляционной пластины сделан небольшой срез для размещения малогабаритного фотосенсора H5783 на основе сверхминиатюрного ФЭУ R5600 (Hamamatsu). Площадь среза составляет всего несколько долей процента от полной площади счетчика и несущественно уменьшает геометрическую эффективность. Для съема света к узкой длинной грани пластины приклеивались оптическим клеем BC-600 параллельно друг другу 15 или 20 (в зависимости от толщины пластины) спектросмещающих волокон диаметром 1 мм, образующие ленту-световод. У среза лента формировалась в цилиндрический жгут и вклеивалась в адаптер, торец которого шлифовался и полировался для соединения с ФЭУ. С целью увеличения светосбора к дальнему от ФЭУ торцу волоконной ленты приклеивалось серебряное зеркало. Для приклейки ленточного световода к сцинтилляционным пластинам был разработан специальный универсальный сборочный стапель. Ленточные световоды для большинства счетчиков

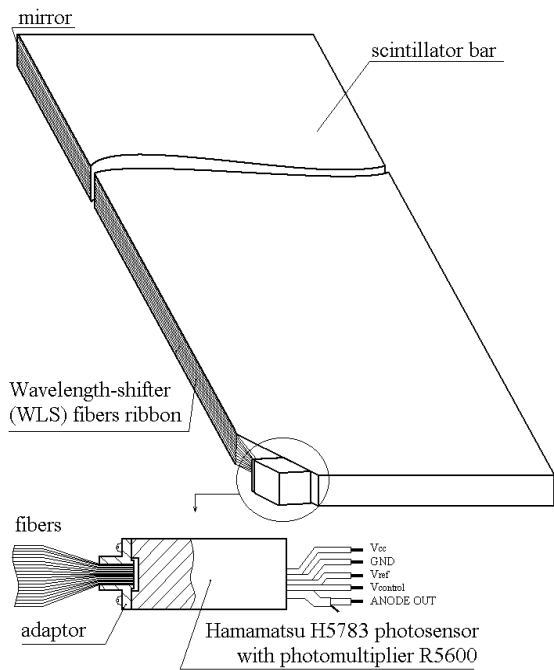


Рис. 10. Конструкция сцинтилляционных счетчиков CSP и BSU

изготавливались из многооболочечных спектросмещающих волокон S-типа Y11 (250 ppm) фирмы «Kuraray» (Япония). Аналогичные волокна фирмы Pol.Ni.Tech.(Италия) K27 (200 ppm) были использованы для $\approx 30\%$ BSU счетчиков.

Главное достоинство счетчиков нового поколения – это их компактность: чувствительная область детектора практически достигает его геометрической поверхности за счет отсутствия больших световодов и крупногабаритных ФЭУ, применяемых в традиционных конструкциях. Другие преимущества так же существенны: понижаются требования к качеству полировки поверхности, прозрачности и световыходу сцинтиллятора, а также значительно ослабляется воздействие естественной и радиационной деградации этих параметров

во времени на характеристики счетчиков; возможность применения в сильных магнитных полях; простая технология изготовления и, как следствие, существенное удешевление детектора и др.

Размеры и количество CSP и BSU счетчиков созданных в ОИЯИ для модернизации мюонной системы CDF II приведены в таблице 2.

Таблица 2. Размеры и количество CSP и BSU счетчиков

тип	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Количество, шт
CSP L1	2400	305	20	13
CSP L2	3100	305	20	38
CSP L3	3200	305	20	106
BSU	1638	166	15	450

Исследование характеристик и контроль качества изготовленных детекторов проводились с помощью космических мюонов. На рис.11 представлены распределения светосбора с дальних концов счетчиков созданных в ОИЯИ. Отметим, что для $\approx 100\%$ эффективности регистрации мюонов достаточно ≈ 10 фотоэлектронов.

Подчеркнем, что важным достоинством новых счетчиков является незначительная зависимость сигнала от прозрачности сцинтиллятора. Корреляция между светосбором и объемной длиной ослабления сцинтилляционного света λ_D для партии из 55 BSU счетчиков показана на рис.12. Из рисунка видно, что

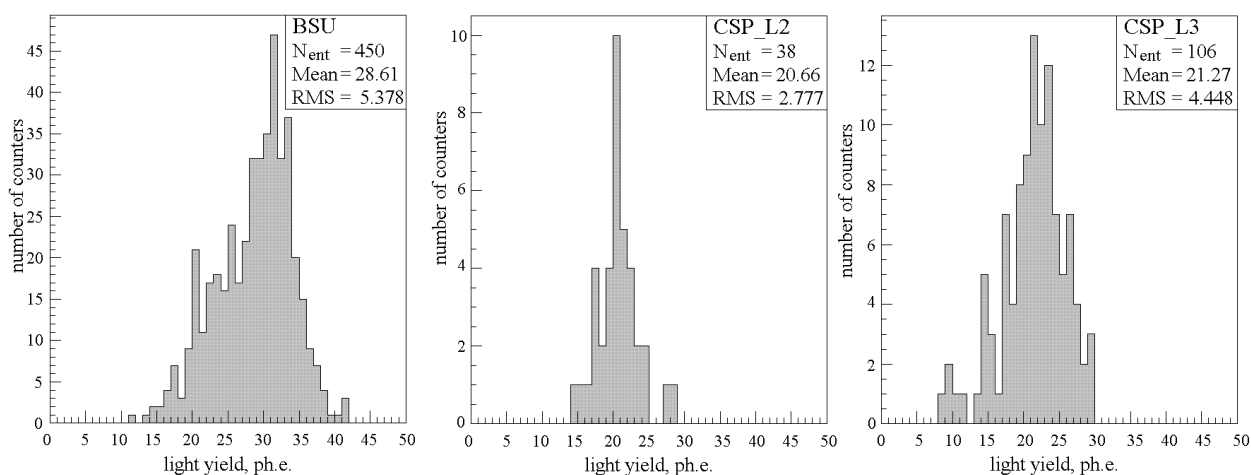


Рис. 11. Распределение светосбора с дальних концов BSU, CSP L2 и CSP L3

светосбор в счетчиках слабо зависит от λ_B (см. гл.2), так как свет к волоконному световоду проходит незначительное расстояние вдоль меньшей стороны сцинтилляционной пластины и поэтому потери за счет объемного поглощения в сцинтилляторе становятся менее значимыми.

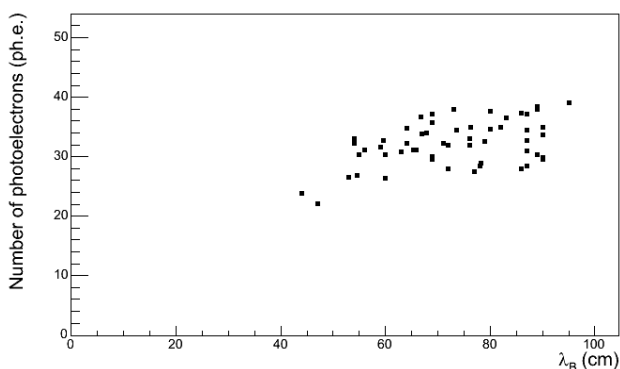


Рис. 12. Корреляция между светосбором от дальних концов BSU счетчиков и объемной длиной ослабления сцинтилляционного света

фона от мюонов, образовавшихся вне области взаимодействия пучков Тэватрона.

В четвертой главе представлены результаты разработок и исследований новых прецизионных дрейфовых камер для высокоинтенсивных пучков [16-22].

В дрейфовых камерах с дрейфовым промежутком всего несколько миллиметров объединяются лучшие свойства как пропорциональных, так и дрейфовых камер. Конструкция таких мини-дрейфовых камерах (МДК) довольно проста; она мало отличается от обычных пропорциональных камер и состоит из массива параллельных анодных и потенциальных проволочек, расположенных между двумя плоскими эквипотенциальными катодными электродами (рис.13).

При помощи β -источника исследованы счетные и дрейфовые характеристики МДК с дрейфовым промежутком 4 мм. Камера обладает хорошей линейностью дрейфовой характеристики за исключением области вблизи потенциальной проволоки, которая составляет 0,5 - 0,6 мм и является

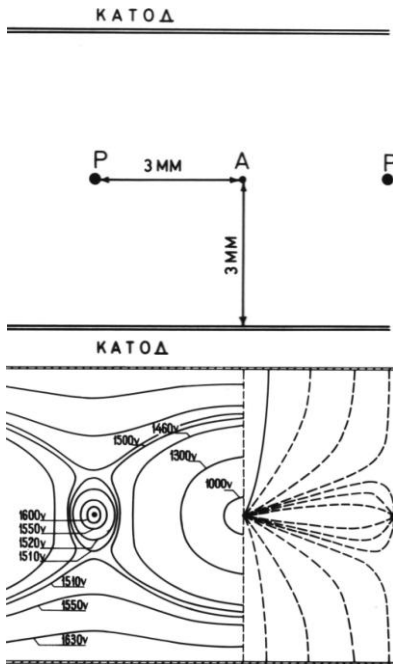


Рис. 13. Конфигурация электродов и электрического поля оптимальной МДК: А – анодная проволока $\varnothing 30$ мкм, Р – потенциальная $\varnothing 100$ мкм

следствием как уменьшения скорости дрейфа в этой зоне, так и увеличения путей дрейфа электронов. С целью достижения минимальных размеров зоны нелинейности проведено моделирование электрических полей с разными конфигурациями электродов камеры. Оптимальной конфигурацией МДК, оказалась геометрия элементарной ячейки типа "квадрат" с равными межэлектродными расстояниями (рис.13).

Характеристики МДК с оптимальной геометрией ячейки и дрейфовым промежутком 3 мм исследованы в пучке заряженных частиц с импульсом 10 ГэВ/с. Камера обладает хорошей линейностью дрейфовой характеристики, высокой точностью (в центральной зоне дрейфового промежутка достигает $\sigma \approx 45$ мкм) и надежно работает загрузке $\approx 3 \cdot 10^5$ частиц/с \cdot см².

Пространственное разрешение дрейфовой камеры определяется выражением $\sigma_x^2 = \sigma_s^2 + \sigma_D^2 + \sigma_0^2$, которое учитывает статистические флуктуации плотности кластеров первичной ионизации (σ_s), диффузию электронов при дрейфе в электрическом поле (σ_D) и аппаратные ошибки (σ_0), включающие разрешение электроники, флуктуацию коэффициента газового усиления и т.п. При измерении времени дрейфа первого кластера трека σ_D и σ_s определяются формулами:

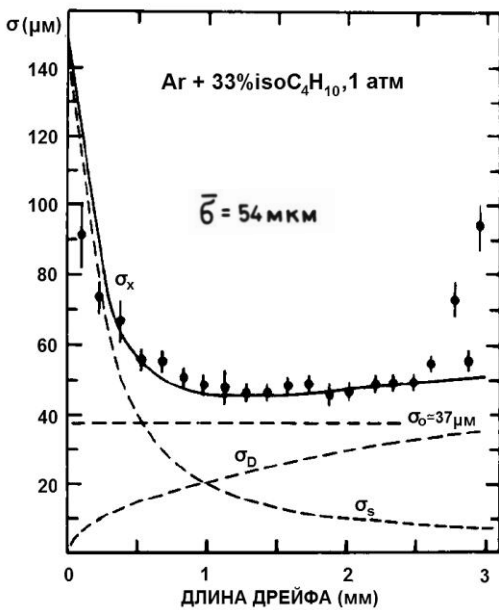


Рис.14. Пространственное разрешение оптимальной МДК и его составляющие

$$\sigma_D = \frac{\pi \sigma_L \sqrt{L}}{2\sqrt{3 \ln n_e}}, \quad \sigma_s \approx \frac{1}{2n_c \sqrt{1 + 4n_c^2 L^2}},$$

где L – длина дрейфа, σ_L – среднеквадратичное отклонение электрона за счет продольной диффузии (в направлении силовых линий электрического поля) при дрейфе на расстояние 1 см и давлении 1 атм, n_e – количество электронов собранных на аноде и n_c – количество кластеров первичной ионизации на единице длины трека. Зависимость пространственного разрешения МДК от длины дрейфа и оценки его составляющих при пороге регистрации соответствующему одному (первому) кластеру трека представлены на рис.14.

Дрейфовые камеры (ДК), изготавливаемые в виде набора тонкостенных лавсановых

трубок с токопроводящим покрытием (“straw-tubes”) по сравнению со стандартными конструкциями пропорциональных и дрейфовых камер, в которых анодные проволоки помещаются в общий газовый объем, имеют значительные преимущества: существенно большую надежность (случайный обрыв одной проволоки приводит к выводу из строя только одной трубки); улучшенную координатную точность благодаря повышенному давлению газа в трубках; удобство формирования цилиндрической или иной поверхности камеры и др.

Разработаны и испытаны несколько ДК нового типа размерами $0,15 \times 0,1 \text{ м}^2$ и $0,85 \times 0,7 \text{ м}^2$ на основе блоков лавсановых трубок* диаметром 10 мм. С целью изучения влияния материала катода на работу ДК блоки трубок изготавливались из алюминизированного и графитированного лавсана толщиной 100 мкм. Счетные характеристики ДК из алюминизированного лавсана при разных давлениях газовой смеси ($\text{Ar}+25\%+\text{isoC}_4\text{H}_{10}+3\%\text{CH}_2(\text{OCH}_3)_2$) и толщинах анодной проволоки показаны на рис.15. Во всех случаях ширина рабочей

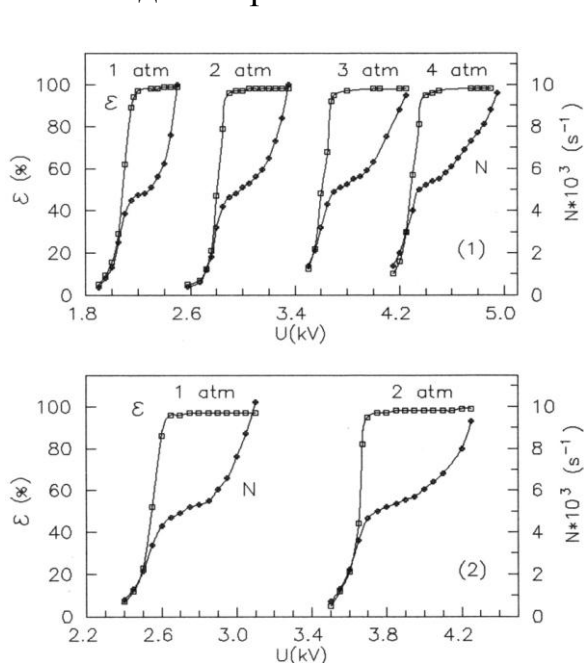


Рис. 15. Зависимость эффективности (ε) и скорости счета (N) от напряжения питания камеры (U): 1) – диаметр анодной проволоки - 50 мкм; 2) – диаметранодной проволоки - 100 мкм

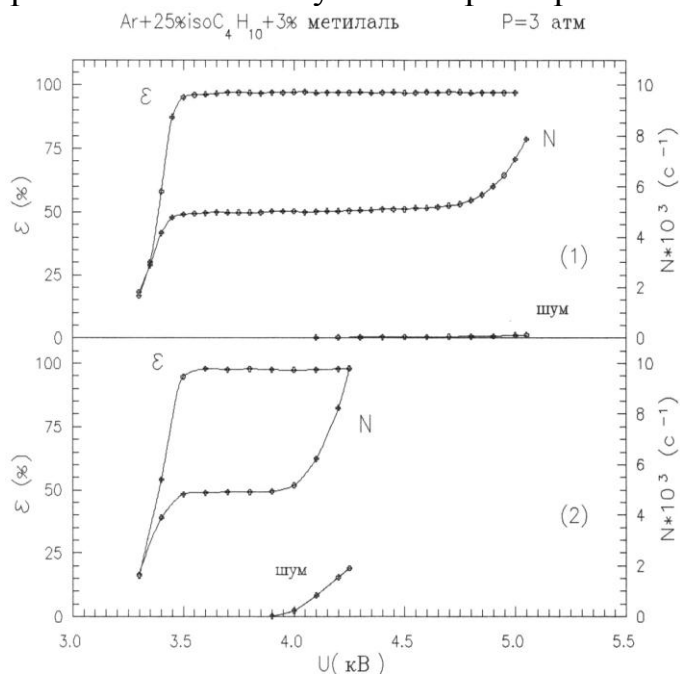


Рис. 16. Зависимость эффективности (ε), скорости счета (N) и интенсивности шума от напряжения питания (U) ДК из алюминизированного лавсана. Диаметр анодной проволоки – 50 мкм: 1) камера светоизолирована; 2) камера без светоизоляции

области по напряжению питания превышает 400 В.

Исследования ДК, изготовленной из графитированных лавсановых трубок, показали, что она обладает значительно большей шириной плато счетной характеристики по сравнению с камерой из алюминизированного лавсана, а также имеет более низкий уровень шумов.

*Технология формования блоков лавсановых трубок разработана Л.Б. Головановым.

При дальнейшем детальном изучении камеры из алюминизированного лавсана выяснилось, что она чувствительна к видимому свету. Затемнение камеры расширяет плато счетной характеристики до величины, равной длине плато ДК из графитированного лавсана (рис.16). Обрыв плато незатемненной камеры происходит из-за увеличения скорости счета фотонов при естественном освещении, когда амплитуда одноэлектронных сигналов превышает порог регистрации электроники.

Таким образом, для изготовления ДК предпочтительнее использовать графитированный лавсан, поскольку применение этого материала не требует затемнения камеры для получения низкой интенсивности шумовых сигналов и больших счетных областей по напряжению.

Для регистрации информации с дрейфовых камер с малыми (1–5 мм) дрейфовыми промежутками (МДК, “straw-tubes”) предложен новый параллельно-последовательный способ съема информации, который в сотый раз уменьшает количество используемых ВЦП. Реализация предложенного способа на ЭСЛ-интегральных схемах позволила создать систему съема информации с высоким временным разрешением $\sigma_t < 1$ нс. При испытаниях системы совместно с блоком МДК в пучке частиц укорителя была достигнута рекордная точность измерения координат частиц ($\sigma_x < 50$ мкм).

Пятая глава посвящена обнаружению и исследованию нового свойства проволочного газоразрядного счетчика с катодом из алюминия – регистрации фотонов видимого света и созданию теории эффекта [19,23].

При исследовании счетных и шумовых характеристик ДК на основе блоков лавсановых трубок из алюминизированного лавсана (счетчиков) были замечены некоторые особенности их поведения, трудно поддающиеся объяснению. На рис.17 приведены шумовые характеристики счетчика на плато, измеренные при разных условиях. Кривая 1 получена в процессе измерения счетной характеристики, для этого на время измерения интенсивности шума прекращалось облучение счетчика радиоактивным источником.

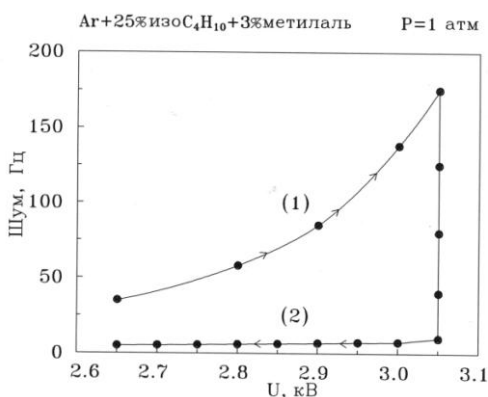


Рис. 17. Зависимость интенсивности шума от напряжения питания счетчика. Стрелками показано изменение напряжения питания

лось облучение счетчика радиоактивным источником. Кривая 2 получена после измерения счетной характеристики. При этом интенсивность шума в конце плато ($U=3,05$ кВ) сразу после прекращения облучения счетчика была нестабильна и падала со временем (минуты) до некоторого постоянного значения, слабо убывающего с уменьшением напряжения. Если подвергать счетчик повторному кратковременному облучению, то интенсивность шумов восстанавливается до значений кривой 1, в соответствии с приложенным напряжением, а затем медленно падает до величин кривой 2, имевших место до облучения. Впоследствии, при детальном

исследовании счетчика было замечено, что интенсивность шумов, а также длина плато счетной характеристики коррелируют с уровнем естественного освещения (рис.16).

Таким образом, было обнаружено новое свойство пропорционального счетчика с катодом из лавсановой пленки с полупрозрачным алюминиевым слоем – чувствительность к видимому свету.

Необходимо отметить, что энергии квантов видимого света ($h\nu < 3,1\text{эВ}$) недостаточно для фотоэлектронной эмиссии из алюминиевого катода (работа выхода Al составляет 4,25 эВ), а также для фотоионизации газового наполнения счетчика (потенциал ионизации более 10 эВ).

С целью выяснения механизма эффекта были измерены временные спектры сигналов со счетчика от импульсного источника видимого света и показано, что светочувствительность газоразрядного счетчика обусловлена фотоэффектом на алюминиевом катоде.

В результате проведенных исследований установлены следующие особенности эффекта чувствительности к видимому свету газоразрядного счетчика с катодом из алюминизированной лавсановой пленки: 1) светочувствительность возникает под воздействием ионизирующего излучения; 2) растет при увеличении силы газоразрядного тока, т.е. количества электрического заряда, образующегося при работе счетчика; 3) наблюдается падение с течением времени светочувствительности счетчика после значительного уменьшения интенсивности внешнего ионизирующего излучения; 4) светочувствительность в видимой области спектра обусловлена фотоэффектом на тонкослойном полупрозрачном катоде из алюминия, красная граница которого находится в ультрафиолетовой области, это указывает на то, что работа выхода алюминиевого катода счетчика уменьшается в результате протекания газоразрядного тока.

Анализируя вышеизложенные закономерности, рассмотрим механизм эффекта, основанный на понижении работы выхода электронов алюминиевого катода электрическим полем по Шоттки. Схема, поясняющая механизм явления, приведена на рис.18.

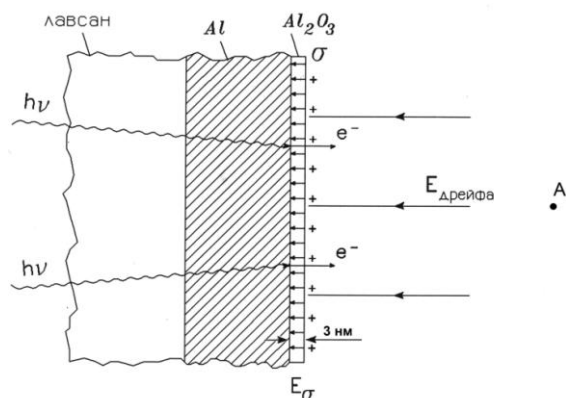


Рис. 18. Принцип светочувствительности счетчика

Положительные ионы, возникающие в газовом разряде у анодной проволоочки (А), дрейфуют к катоду и осаждаются на поверхности диэлектрической оксидной пленки. Образованный положительный поверхностный заряд (σ) создает в диэлектрическом слое электрическое поле (E_σ), тянущее электроны к поверхности металлической подложки. В этом случае работа выхода электронов из катода определяется законом Шоттки

$$\chi = \chi_0 - e \sqrt{e E_\sigma},$$

где χ_0 - работа выхода алюминия при внешнем электрическом поле, равном нулю, e - заряд электрона.

Внешнее электрическое поле понижает потенциальный барьер на границе металл-диэлектрик на величину

$$\Delta\varphi = \sqrt{e E_\sigma} = 3,79 \times 10^{-4} \sqrt{E_\sigma}.$$

Определим напряженность электрического поля, необходимую для сдвига красной границы фотоэффекта из ультрафиолетовой области в видимую. Для этого нужно уменьшить работу выхода алюминия на величину

$$\Delta\chi = \chi_0 - h\nu \approx 1,2 \text{ эВ} \quad \text{или} \quad \Delta\varphi \approx 1,2 \text{ В},$$

где $h\nu$ - энергия кванта света в фиолетовой области спектра ($\lambda = 400 \text{ нм}$), равная $\approx 3,1 \text{ эВ}$. Отсюда находим, что $E_\sigma = 7 \times 10^6 (\Delta\varphi)^2 = 10^7 \text{ В/см}$. Следовательно для существования фотоэффекта в видимой области спектра на алюминиевом катоде необходимо, чтобы диэлектрическая пленка Al_2O_3 выдерживала без электрического пробоя напряженность поля $\sim 10^7 \text{ В/см}$.

Пробивная напряженность для различных твердых диэлектриков одного и того же порядка и составляет $\sim 10^6 \text{ В/см}$. Но наблюдается резкий рост пробивной напряженности поля при малых толщинах диэлектрических слоев $< 0,1 \text{ мкм}$. Алюминиевый катод счетчика покрыт плотной тончайшей естественной пленкой диэлектрика Al_2O_3 толщиной всего $0,003 \text{ мкм}$, которая может выдерживать напряженность электрического поля $\sim 10^7 \text{ В/см}$. Таким образом обеспечивается стационарное существование сильного электрического поля в тонком слое диэлектрика у поверхности алюминиевого катода, которое существенно понижает работу выхода алюминия и сдвигает красную границу фотоэффекта из ультрафиолетовой в видимую область спектра.

С помощью обнаруженного эффекта объяснено влияние материала катода на некоторые особенности работы газоразрядных детекторов (нестабильность шумов, послеразряды, старение и др.), ранее трудно поддающиеся объяснению, а также рассмотрено возможное использование эффекта в практике.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации:

1. Предложен и разработан новый метод абсолютной калибровки и мониторинга спектрометрического канала ФЭУ, основанный на деконволюции одноэлектронных спектров от импульсного источника света низкой интенсивности (~ 10 фотонов). Метод получил широкое распространение в мировой практике.

2. Разработана методика и исследованы основные параметры разных типов микропиксельных лавинных фотодиодов S60, MP3D, SSPM-050701GR-TO18, МЛФД-3А(Н). Показано, что приборы имеют при комнатной температуре коэффициент усиления $>10^4$, высокое одноэлектронное разрешение $\delta \approx 10\%$ и способны регистрировать слабые световые потоки на уровне счета отдельных фотонов, а МЛФД-3Н со сверхвысокой плотностью глубинных пикселей $1,5 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2}$ можно использовать вместо ФЭУ в спектрометрических счетчиках с неорганическими сцинтилляторами.

3. В сотрудничестве с Институтом Монокристаллов (г. Харьков) создан и исследован новый полистирольный сцинтиллятор UPS 923А, который по совокупности сцинтилляционных и эксплуатационных параметров превосходит лучшие мировые аналоги и в настоящее время широко используется в физике частиц.

4. Предложена принципиальная схема и разработаны крупногабаритные (длиной до 3 м) сцинтилляционные счетчики нового поколения с компактным съемом информации, в которых впервые светосбор осуществляется плоским оптическим кабелем из спектрсмещающих волокон, имеющим оптический контакт с узкой длинной гранью сцинтилляционной пластины, а регистрация света – новыми сверхминиатюрными ФЭУ R5600 (Hamamatsu).

5. Разработан и исследован новый позиционно - чувствительный сцинтилляционный счетчик, в котором система спектрсмещающих полосковых световодов впервые применена для определения координат заряженных частиц по центру тяжести распределений интенсивности света в пластмассовом сцинтилляторе. Достигнутая координатная точность $\sigma \approx 1 \text{ мм}$ при ширине полосковых световодов 20 мм.

6. Разработаны конструкция и технология массового производства крупногабаритных (длиной до 320 см) пластмассовых сцинтилляционных счетчиков нового поколения с компактным съемом света плоским оптическим кабелем из спектрсмещающих волокон. Создано более 600 крупногабаритных сцинтилляционных счетчиков из разработанного полистирольного сцинтиллятора UPS 923А для модернизации детектора мюонов установки CDF II, предназначенной для исследований свойств тяжелых t , b , c – кварков на Тэватрон Фермилаб.

7. Разработаны и исследованы проволочные газоразрядные трековые детекторы нового поколения – мини-дрейфовые камеры (МДК), в которых объединяются лучшие свойства пропорциональных и дрейфовых камер. Впервые показано, что в МДК при измерении времени дрейфа первого кластера трека первичной ионизации достигается рекордное координатное разрешение ($\sigma_x \approx 45 \text{ мкм}$ в центре дрейфового промежутка при атмосферном давлении газового наполнения).

8. Разработаны и исследованы при давлении газового наполнения 1–4 атм дрейфовые камеры нового типа на основе блоков лавсановых трубок размерами до $0,85 \times 0,7 \text{ м}^2$. Обнаружено явление существенного увеличения интенсивности шумовых сигналов в камерах из алюминизированных лавсановых трубок при воздействии видимого света, которые ограничивают достижение рекордных характеристик в таких детекторах. Обнаруженный эффект устраняется применением графитированного лавсана и поэтому для изготовления трубок предпочтительнее использовать лавсан с графитовым токопроводящим покрытием.

9. Обнаружено новое свойство проволочного газоразрядного счетчика с катодом из алюминия – регистрация фотонов видимого света и показано, что светочувствительность обусловлена фотоэффектом на алюминиевом катоде, красная граница которого находится в ультрафиолетовой области. Создана теория эффекта, основанная на существенном понижении работы выхода алюминиевого катода счетчика по закону Шоттки сильным электрическим полем ($E_{\sigma} \sim 10^7 \text{ В/см.}$), созданным поверхностным зарядом положительных ионов, образующихся в газовом разряде и осаждающихся на тонкой диэлектрической оксидной пленке алюминия.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

- [1] E.H. Bellamy,..., I.E. Chirikov - Zorin et al., Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier. Nucl. Instr. and Meth. A339 (1994) 468.
- [2] S.Tokar,..., I. Chirikov - Zorin et al., Response function for analysis of the metal dynode photomultiplier single photoelectron spectra. Acta Phys. Univ. Comeniana XL (1999)105.
- [3] I. Chirikov - Zorin et al., Method for precise analysis of the metal package photomultiplier single photoelectron spectra. Nucl. Instr. and Meth. A456 (2001) 310.
- [4] I. Chirikov - Zorin et al., Precise analysis of the metal package photomultiplier spectra. Nucl. Instr. and Meth. A461 (2001) 587.
- [5] N. Anfimov, I. Chirikov - Zorin et al., Test of micropixel avalanche photodiodes. Nucl. Instr. and Meth. A572 (2007) 413.
- [6] N. Anfimov, I. Chirikov - Zorin et al., Beam test of Shashlyk EM calorimeter prototypes readout by novel MAPD with super high linearity. Nucl. Instr. and Meth. A617 (2010) 78.
- [7] E.H. Bellamy,..., I.E. Chirikov - Zorin et al., Test of long scintillation counters for supercollider detectors. Nucl. Instr. and Meth. A334 (1994) 484.

- [8] Ю.А. Будагов, ..., И.Е. Чириков - Зорин и др., Большие сцинтилляционные счетчики со световодами из спектросмещающих волокон. Препринт ОИЯИ, P13-98-304, Дубна, 1998.
- [9] Ju.Budagov, ..., I. Chirikov - Zorin et al., Test of long scintillating counter prototypes for CDF II. Preprint JINR, E13-2000-127, Dubna, 2000.
- [10] L.S. Varabash, ..., I.E. Chirikov - Zorin et al., Measurement of the coordinates of particle tracks by the centre of gravity of a light flash in scintillator. Nucl. Instr. and Meth. A461 (2001) 587.
- [11] A. Artikov, ..., I. Chirikov - Zorin et al., Properties of Ukraine polystyrene-based plastic scintillator UPS 923A. Nucl. Instr. and Meth. A555 (2005) 125.
- [12] I. Chirikov-Zorin, Comment to "On the aging of the scintillation counters for RUN II Muon System at CDF. Nucl. Instr. and Meth. A591 (2008) 467.
- [13] A.Artikov, ..., I. Chirikov - Zorin et al., Design and construction of new central and forward muon counters for CDF II. Nucl. Instr. and Meth. A538 (2005) 358.
- [14] A. Artikov, ..., I. Chirikov - Zorin et al., New generation large area muon scintillation counters with wavelength shifter fiber for CDF II. Part. Nucl. Lett. 2006, V.3, №3 (132) p.81.
- [15] A. Artikov, ..., I. Chirikov - Zorin et al., The "miniskirt" counter array at CDF II. Part. Nucl. Lett. 2002. №5 (114) p.25.
- [16] Давыдов Ю.И., ..., Чириков - Зорин И.Е. и др. Мини-дрейфовая камера. Труды международного симпозиума по координатным детекторам в физике высоких энергий. ОИЯИ, Д1, 13-88-172, Дубна, 1988.
- [17] Давыдов Ю.И., ..., Чириков - Зорин И.Е. и др. Мини-дрейфовая камера с зазором 4 мм. Сообщение ОИЯИ, 13-86-327, Дубна, 1986.
- [18] I.E. Chirikov - Zorin et al., Characteristics of a mini drift chamber. Nucl. Instr. and Meth. A260 (1987) 142.
- [19] Yu. Budagov, I. Chirikov - Zorin et al., Drift chambers on the basis of mylar tube blocks. Nucl. Instr. and Meth. A330 (1993) 458.
- [20] A.Larichev, ..., I. Chirikov - Zorin et al., The mylar straw tubes: Test results and application to muon tracking. GEM TN-92-105 (1992).
- [21] П. Стремень, ..., И.Е. Чириков - Зорин, Система получения информации с многопроводной дрейфовой камеры. Авторское свидетельство СССР №1281014 от 28.02.85 г. Бюллетень ОИПОТЗ, 1989, №30.
- [22] I.E. Chirikov - Zorin et al., Parallel-series readout for multiwire drift chamber. Nucl. Instr. and Meth. A285 (1989) 484.
- [23] I.E. Chirikov - Zorin, O.E. Pukhov, On sensitivity of gas-discharge detectors to light. Nucl. Instr. and Meth. A371 (1996) 375.