

УДК 539.1.074.23

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ГАЗОВЫЕ КООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

М. Д. Шафранов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	1204
МИКРОСТРИПОВАЯ ГАЗОВАЯ КАМЕРА И ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ЕЕ МОДИФИКАЦИИ	1206
Микростриповая газовая камера	1206
Микроазорная камера	1206
Микроазорная проволочная камера	1210
Микроазорная газовая камера	1211
ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ	1211
Детектор для регистрации тепловых нейтронов	1211
Детектор MICROMEGAS	1212
Газовый электронный умножитель	1214
Микроточечный детектор	1216
Счетчик с канавкой	1217
Микропроволочный детектор	1218
Детектор новой геометрии — микрощелевой газовый де- тектор	1220
Камера из капиллярных трубок	1221
Детектор на основе многопроволочного газового элек- тронного умножителя	1221
МИКРОСТРИПОВЫЕ ГАЗОВЫЕ КАМЕРЫ	1222
ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ MSGC	1227
ВЫВОДЫ	1230
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	1231

УДК 539.1.074.23

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ГАЗОВЫЕ КООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

М. Д. Шафранов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматривается новый класс детекторов — микроструктурные газовые координатные детекторы частиц. Такие детекторы обладают высоким временным и пространственным разрешением и большой нагрузочной способностью. Благодаря своим уникальным свойствам они находят применение в экспериментальной физике частиц, γ -астрономии, медицинской диагностике и в других областях науки и техники. Особенно перспективны они для исследований на новых ускорителях частиц в пучках высокой интенсивности.

The review is devoted to the new class of detectors to micro-pattern gaseous coordinate detectors. Such detectors have high temporary and space permission and high count rate. Due to the unique properties they find a use in experimental physics of particles, γ -astronomy, medical diagnostics and in other areas of science and engineering. They are especially perspective for researches on new accelerators in high intensive particle beams.

*Посвящается светлой памяти
Александра Михайловича Балдина,
стимулировавшего эту работу*

ВВЕДЕНИЕ

Успехи в экспериментальной физике частиц всегда были связаны не только с развитием технологии детекторов, но и с эффективным применением детекторов и точной интерпретацией полученных результатов. Достаточно вспомнить некоторые примеры. Камера Вильсона в магнитном поле — открытие позитрона, ядерные фотоэмульсии — открытие π -мезона, сцинтилляционные и черенковские счетчики — открытие антипротона. Эксперименты с использованием пузырьковых камер привели к открытию самой тяжелой частицы из группы гиперонов — Ω^- и большого семейства нестабильных частиц — резонансов. Применение управляемых искровых камер с магнитострикционным съемом информации, обеспечившим их быстродействие, и эксперименты с ними открыли новое явление в физике элементарных частиц — CP -нарушение. Появление следующего поколения координатных детекторов — многопроволочных пропорциональных и дрейфовых камер (МПК

и ДК) — привело к многочисленным открытиям и достижениям в физике высоких энергий и элементарных частиц, в том числе к открытию семейств частиц с новыми квантовыми числами.

Уже из первых публикаций будущего нобелевского лауреата Ж. Шарпака и его коллег [1, 2] было понятно, что МПК и ДК имеют широкие перспективы применения. Эти работы инициировали поток исследований свойств многопроволочных камер, а также поиск возможностей их применения не только в экспериментах по физике элементарных частиц, но и в прикладных областях исследований.

В этих же работах было указано, что механизм газового умножения может служить для улучшения некоторых характеристик координатных детекторов. Впервые этот механизм был использован в ионизационной камере с параллельным размещением электродов [3]. Широкое применение механизма газового умножения началось после объединения двух и более параллельных усиливающих элементов в одной структуре [4]. Детекторы на основе газового умножения получили название лавинных камер. Результаты последующего изучения камер на основе лавинных процессов [5–9] позволили начать их применение в качестве детекторов самого широкого назначения [10].

В стандартных многопроволочных пропорциональных камерах расстояние между соседними сигнальными проволочками равно 2 мм. Пространственное разрешение определяется этим расстоянием и характеризуется двухтрековым разрешением порядка 1 мм. Постановка экспериментов на ускорителях следующего поколения, таких как LHC, предъявляет все более жесткие требования к загрузочной способности, временному разрешению и координатной точности. Загрузочная способность и временное разрешение определяются временем сбора заряженных ионов на катоде. При нагрузках, превышающих 10^4 Гц/мм, ионы образуют большой пространственный заряд вокруг анодной проволочки, снижающий величину действующего электрического поля и, следовательно, уменьшающий газовое умножение.

Уменьшить время сбора заряженных ионов до необходимых величин можно только за счет уменьшения пути их дрейфа, т.е. расстояния между анодом и катодом. Это, в свою очередь, приводит к возможности размещения на той же площади большего числа элементов.

Детекторы, разрабатываемые по приведенной схеме, получили название микроструктурных. В микроструктурных детекторах со стороны регистрируемого пучка частиц находится электрод (верхний электрод), на который подается отрицательное напряжение. На расстоянии в несколько миллиметров от него расположена система газового умножения. Зазор между ней и верхним электродом получил название дрейфового. Электроны, возникающие вследствие ионизации, дрейфуют к системе умножения, где происходит развитие лавины. В некоторых детекторах анодная и катодная системы размещены на одной достаточно тонкой подложке. В этом случае газовое умноже-

ние происходит в районе анода, как в многопроволочной пропорциональной камере. Регистрация осуществляется непосредственно с анодной плоскости, представляющей полосковую (стриповую) систему. В ряде микроструктурных детекторов система умножения и анодная система разделены промежутком. В таких детекторах электроны после умножения дрейфуют к анодной системе и собираются на ее стрипах. В другом типе детекторов дрейфовый промежуток от анодной системы разделен сеточным электродом, образующим вместе с анодной системой промежуток газового умножения.

1. МИКРОСТРИПОВАЯ ГАЗОВАЯ КАМЕРА И ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ЕЕ МОДИФИКАЦИИ

1.1. Микростриповая газовая камера (MSGC) была первым микроструктурным детектором, предназначавшимся, по замыслу автора, для регистрации нейтронов и γ -квантов [11]. Структура электродов камеры показана на рис. 1. На одной из сторон подложки из диэлектрика с высоким поверхностным и объемным сопротивлением на расстоянии в несколько сотен мкм наносится анод в виде отдельных полосок (стрипов) шириной от 2 до 10 мкм. Между

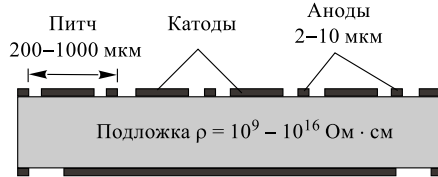


Рис. 1. Структурная схема микростриповой газовой камеры

анодными стрипами размещаются катодные стрипы, образуя с анодными зазор, который иногда меньше ширины катодного стрипа. На обратную сторону подложки напыляется проводящий слой. Если эту пленку проводника нанести в виде полосок, перпендикулярных анодным стрипам, то эта система позволит создать двухкоординатный детектор. На расстоянии в несколько миллиметров от плоскости подложки находится верхний

электрод, образуя ионизационное или дрейфовое пространство. Конфигурация электрического поля промежутка катод–анод обеспечивает соответствующее газовое умножение. По направлению к верхнему электроду неоднородное поле постепенно переходит в однородное, обеспечивая дрейф электронов первичной ионизации в область газового умножения. Подробнее эти камеры, их особенности и применение в различных экспериментах будут рассмотрены ниже.

1.2. Микрозазорная камера (Micro Gap Chamber — MGC) [12], по существу, является развитием MSGC. Одна из первых камер образована подложкой из изолятора (стекло толщиной 1,5 мм), на поверхность которого наносится сплошная пленка Al толщиной 1 мкм — катодная поверхность. Вместо

сплошного катода можно использовать полосковый для организации двухкоординатного детектора. На поверхности катода на расстоянии 200 мкм нанесены полосы изолятора из полиимида, на которых находятся анодные полосы шириной в 9 мкм. Ширина стрипа изолятора на 8 мкм больше ширины анода. На расстоянии 3 мм от подложки находится верхний электрод, образующий ионизационный и дрейфовый зазор (рис. 2). Небольшой зазор между катодом и анодом обеспечивает малое время сбора ионов и, как следствие этого, — большие загрузки (до $2 \cdot 10^6$ Гц/мм²) и более быстрый фронт нарастания импульса, чем в MSGC. Увеличение толщины анодных стрипов подложки ведет к уменьшению емкости анод–катод, увеличению объема сильного электрического поля и, в конечном итоге, газового умножения. Поэтому в следующем образце толщина стрипов увеличена с 5 до 8 мкм [13]. В детекторе коэффициент газового умножения (КГУ) $\sim 10^4$, но это все же несколько меньше, чем в MSGC.

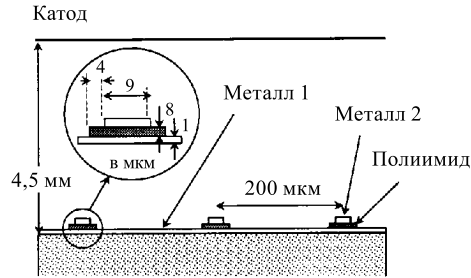


Рис. 2. Поперечное сечение и структура микрозазорной камеры

Результаты исследований свойств микрозазорной камеры (MGC), предназначенной для медицинского применения в пучке γ -квантов и исследований синхротронного излучения, представлены в [14, 15]. При исследовании использовался газовый детектор с газовой смесью криптон–углекислый газ в соотношении 90/10 при давлении 6 бар. Он подвергался рентгеновскому излучению с энергией 12 кэВ. Подложкой детектора служил кремний с алюминиевыми электродами, а в качестве изоляционных стрипов — окись кремния. Расстояние между анодами равно 100 мкм. В [15] изучалось влияние ширины анодных стрипов и ширины стрипов изолятора на величину тока анода и катода и их соотношение. Исследовались детекторы при ширине стрипа анода 3 и 10 мкм и при ширине стрипов изолятора 10 и 25 мкм соответственно. Показано, что ширина анодных стрипов и стрипов изолятора существенно влияет на величину тока анода и катода и на их соотношение, которое существенно возрастает при изменении напряжения в дрейфовом промежутке. Так, при изменении напряжения от 500 до 2000 В и загрузке $1,6 \cdot 10^5$ Гц/мм² отношение токов анода и катода изменялось от 0,13 до 0,32. Вместе с тем оно несколько уменьшается с увеличением загрузки. При напряжении 1000 В в дрейфовом промежутке КГУ с 10 %-ной точностью достигает значения 150. При таком небольшом КГУ детектор предполагается использовать в двухкаскадной системе совместно с GEM.

Еще в 1926 г., используя камеру Вильсона в качестве детектора, Оже обнаружил зависимость угловых распределений электронов эмиссии с K -оболочки атома от степени линейной поляризации γ -квантов. В [16] исследовалась возможность создания поляриметра для изучения поляризации γ -квантов с энергией меньше 10 кэВ. Исследователи промоделировали процессы, а результаты сравнили с поставленными экспериментами. Использовались неполяризованные и поляризованные γ -кванты с энергиями 5,4 и 8,04 кэВ. В качестве детектора была использована МГС как прибор с высоким пространственным разрешением. Большинство экспериментальных данных получено на газовой смеси Ne-DME (90 ÷ 10 %) при газовом умножении ~ 2000 . Обширный экспериментальный материал позволил сделать вывод о возможности создания прибора на основе микроструктурных детекторов с высокой степенью сегментации для γ -астрономии, исследований излучения Солнца и внегалактических источников.

Возможное широкое использование микроазорных камер в различных экспериментах заставило исследователей провести ряд работ для проверки долговременной стабильности, выяснения режимов возникновения разрядов, сопровождающихся существенным повреждением анодных стрипов. В [17] представлены результаты систематических исследований по указанной тематике. Камера изготавливалась в соответствии с разработанной специальной технологией на кремниевой подложке с низким омическим сопротивлением. На подложку наносились стрипы из окиси кремния толщиной 2 и шириной 19 мкм с последующим нанесением анодного стрипа шириной 9 мкм. В качестве материала анода использовались различные металлы: Au, Ni, Al, Cr, Ti/W. С тремя газовыми смесями измерялось газовое умножение в зависимости от дрейфового напряжения, от разности потенциалов катод–анод, исследовалась временная стабильность газового умножения.

Основное внимание уделялось режиму возникновения разрядов в зависимости от энергии искры, которая определялась величиной присоединяемых внешних емкостей (100 ÷ 4000 пкФ). Работа проводилась без изменения на-

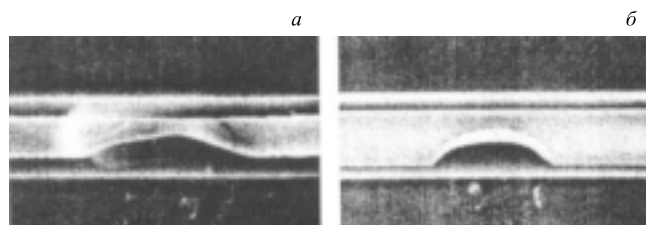


Рис. 3. Микрофотографии анодов МГС: а) Cr-анод толщиной 0,5 мкм; б) Ni-анод толщиной 0,25 мкм

пряжения на аноде. На рис. 3 показаны микрофотографии анода, поврежденного в результате разрядов.

Исследования [17] показали сильную корреляцию между повреждением анода и энергией искры. Предпочтительны полосы из металла, обладающего высоким омическим сопротивлением и/или высокой температурой испарения. Авторы отдают предпочтение условно хорошим металлам Au и Ni и термически прочным Cr и Ti/W (10/90), как наименее подверженным повреждению от разряда.

Исследования камеры с малым зазором (Small Gap Chamber — SGC) проведены в работах [18, 19]. Результаты исследований подобных детекторов, отличающихся формой и размерами изолирующих стрипов, опубликованы в [20].

Два варианта камер прошли испытания на высокоинтенсивном пучке протонного синхротрона. Использовалась газовая смесь DME/Ne в пропорции 2/1. Детектор изготовлен на кремниевой подложке с диэлектрическим покрытием, на которое нанесены стрипы — анодные шириной 20 мкм и катодные шириной 160 мкм, одинаковые по толщине. Стрипы разделены между собой полиимидным изолятором шириной 10 мкм и такой же толщиной, как анодные и катодные стрипы. На стрипы нанесены полоски изолятора шириной 12 и толщиной 2,2 мкм. Тем самым создавалась защита краев анодных полос с помощью изоляционного покрытия, имеющего T-образное сечение (рис. 4). Исследовалась зависимость КГУ от напряжения на катоде и величины напряжения в дрейфовом промежутке. Оба коэффициента имеют экспоненциальную зависимость: $\exp(-2 \cdot 10^{-2}) V_K$ и $\exp(-5 \cdot 10^{-4}) V_D$ для катода и напряжения в дрейфовом промежутке соответственно. При напряжении на катоде -480 В и напряжении в дрейфовом промежутке -3000 В $KGU = 7 \cdot 10^4$.

Исследовался режим появления стримеров в зависимости от катодного напряжения. Стримерный режим возникает при напряжении в дрейфовом промежутке -3250 В. Зависимость числа стримеров от напряжения носит экспоненциальный характер. При напряжении катода -450 В возникает около четырех стримеров в час. С появлением стримерного режима происходит частичное повреждение стрипов анода. В адронном пучке с интенсивностью $3 \cdot 10^3$ Гц/мм² наблюдалось появление 113 стримеров, при этом был поврежден один стрип.

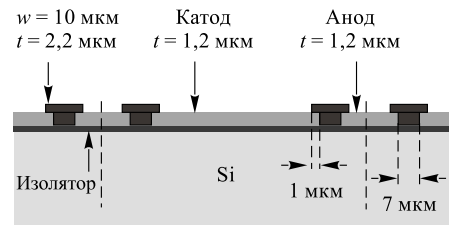


Рис. 4. Схема микрозазорной камеры SGC в сечении. Края анодных стрипов защищены с помощью изоляционного покрытия

Анализируя результаты исследований, авторы делают заключение, что камера с малым зазором является хорошим кандидатом для использования на LHC.

1.3. Микроазорная проволочная камера (MGWC) [21] по конструкции подобна микроазорному счетчику MGC [12]. Отличие заключается в том, что вместо анодных стрипов применяются проволочки диаметром несколько микрометров (рис. 5).

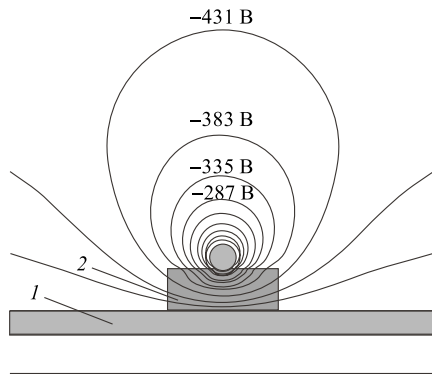


Рис. 5. Эквипотенциали в области анода микроазорной проволочной камеры MGWC: прямоугольник 1 на поверхности светлой подложки — катодная поверхность при сильном увеличении; прямоугольник 2 — изоляционная подложка под проволочным анодом в виде круга

Свойства камеры исследовались на прототипе с размером чувствительной области $2,6 \times 2,6$ см. По утверждению авторов возможно изготовление больших камер с размером до 20×20 см. Технология изготовления детекторов подобного рода более сложная: предварительно сигнальные проволочки необходимо наклеить на рамку, которая переносится на основную конструкцию. На керамическую подложку толщиной 0,7 мм наносится тонкий слой золота, служащий катодом. На эту поверхность фотолитографическим способом наносятся полиимидные стрипы шириной 30 и толщиной 15 мкм. Вдоль стрипов по их осям приклеиваются 10 мкм сигнальные (анодные) проволочки. В камере используется 128 анодных проволочек. Поверхность катода разделена зазором вдоль стрипов на две равные части. Таким образом, над каждой его частью находится по 64 проволочки. Дрейфовый промежуток высотой 3 мм образован пленкой майлара толщиной 6 мкм с алюминиевым покрытием. Применялись различные газовые смеси: 90% Ar + 10% CH₄, 90% He + 10% CH₄, 75% CH₄ + 25% C₂H₆. Источники излучения — ⁹⁰Sr и ⁵⁵Fe. Исследовалась форма анодного и катодного сигнала. При использовании газовой смеси He + CH₄ катодный сигнал меньше анодного на 20%, его фронт нарастания равен 8 нс. Фронт нарастания анодного сигнала ≤ 2 нс. Длительность сигнала — около 40 нс. Для рабочей смеси CH₄ + C₂H₆ исследовалась зависимость КГУ от разности потенциалов на промежутке катод–анод. В диапазоне напряжений 400 ÷ 575 В эта зависимость носит экспоненциальный характер. В детекторе подобного типа коэффициент газового умножения достигает 10⁵. Камера сочетает в себе свойства МППК и микроазорного счетчика.

Свойства камеры исследовались на прототипе с размером чувствительной области $2,6 \times 2,6$ см. По утверждению авторов возможно изготовление больших камер с размером до 20×20 см. Технология изготовления детекторов подобного рода более сложная: предварительно сигнальные проволочки необходимо наклеить на рамку, которая переносится на основную конструкцию. На керамическую подложку толщиной 0,7 мм наносится тонкий слой золота, служащий катодом. На эту поверхность фотолитографическим способом наносятся полиимидные стрипы шириной 30 и толщиной 15 мкм. Вдоль стрипов по их осям приклеиваются 10 мкм сигнальные (анодные) проволочки. В камере используется 128 анодных проволочек. Поверхность катода разделена зазором вдоль стрипов на две равные части. Таким образом, над каждой его частью находится по 64 проволочки. Дрейфовый промежуток высотой 3 мм образован пленкой майлара толщиной 6 мкм с алюминиевым покрытием. Применялись различные газовые смеси: 90% Ar + 10% CH₄, 90% He + 10% CH₄, 75% CH₄ + 25% C₂H₆. Источники излучения — ⁹⁰Sr и ⁵⁵Fe. Исследовалась форма анодного и катодного сигнала. При использовании газовой смеси He + CH₄ катодный сигнал меньше анодного на 20%, его фронт нарастания равен 8 нс. Фронт нарастания анодного сигнала ≤ 2 нс. Длительность сигнала — около 40 нс. Для рабочей смеси CH₄ + C₂H₆ исследовалась зависимость КГУ от разности потенциалов на промежутке катод–анод. В диапазоне напряжений 400 ÷ 575 В эта зависимость носит экспоненциальный характер. В детекторе подобного типа коэффициент газового умножения достигает 10⁵. Камера сочетает в себе свойства МППК и микроазорного счетчика.

1.4. Микрозазорная газовая камера. При уменьшении расстояния между анодом и катодом (уменьшении величины зазора) в MSGC уменьшается влияние проводимости изолирующей подложки в высоких электрических полях и влияние зарядов, высаживающихся в промежутке [22]. Новое и, возможно, эффективное решение этой проблемы дано в конструкции микрозазорной газовой камеры (Small Gap MSGC) [23].

Если величина зазора очень мала (меньше $1/20$ ширины катодного стрипа), то изолятор не влияет на величину газового умножения [24], но, к сожалению, КГУ в лучшем случае не превышает 1000. Из-за сильного электрического поля на кромке катодного стрипа начинается эмиссия электронов.

Существуют два способа устранения этих трудностей. В первом случае кромка катода покрывается изолятором. Это позволяет получить величину газового умножения в 10 раз больше [18]. Второй путь — создание условий для рассасывания зарядов, собирающихся в межэлектродных зазорах. В этом случае детектор изготавливается на подложке с небольшой проводимостью. Рассасывание зарядов обеспечивается и созданием в зазоре нескольких проводящих стрипов, на которые подается потенциал, возрастающий по направлению к аноду [25]. Такая система также препятствует накоплению зарядов в промежутке между анодом и катодом детектора.

2. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

2.1. Детектор для регистрации тепловых нейтронов предложен в [26]. В этом детекторе на стеклянную подложку нанесен металлический электрод, служащий анодом. Катодная поверхность с отверстиями диаметром 1,4 мкм на расстоянии 5 мкм друг от друга изолирована от поверхности анода путем напыления слоя окиси кремния толщиной 1,5 мкм. Толщина катода составляет 0,4 мкм (рис. 6). При максимально допустимом напряжении в промежутке анод–катод 13 В получен КГУ = 20.

Идея, осуществленная в этом детекторе, лежит в основе многих микроструктурных детекторов, в том числе получивших названия CAT [27] и WELL [28, 29]. Французскими исследователями на основе механизма газового умножения был предложен счетчик только с одним отверстием, на-

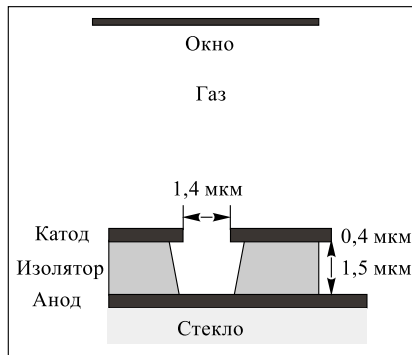


Рис. 6. Схема электродов детектора нейтронов — прототипа детекторов CAT и WELL

званный «Compteur A Trou» (CAT). На этот «счетчик с отверстием» авторами был получен патент [30]. CAT является счетчиком с катодом из медно-бериллиевой фольги толщиной 200 мкм, на поверхности которого находится отверстие диаметром 700 мкм. Фольга нанесена на изолятор с отверстием диаметром 700 мкм. Умножение происходит в сильном электрическом поле газового объема отверстия изолятора, электроны собираются на аноде (рис. 7). Подробное изложение некоторых результатов исследований одиночного счетчика дано в [31]. Перед началом исследований было проведено численное моделирование некоторых параметров: электрических полей, газового умножения для различных газовых смесей, режимов работы счетчика. Расчетные характеристики сравнивались с экспериментальными. Измеренный в эксперименте КГУ хорошо описывается при численном моделировании. Исследованы амплитудные распределения при смещении коллимированного источника излучения вдоль радиуса отверстия.

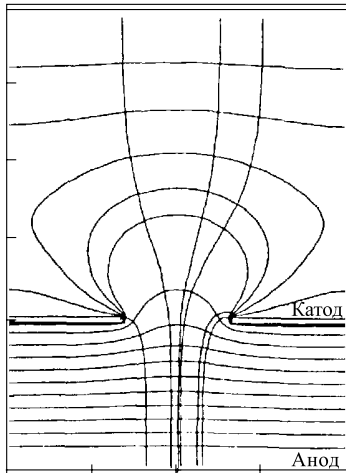


Рис. 7. Конфигурация электрического поля и эквипотенциалей детектора CAT

Дальнейшее развитие система получила в работе [32], в которой представлены результаты исследований прибора как детектора рентгеновского излучения при нагрузках до 10^6 фотон/с · мм². В отличие от счетчика CAT умножающая часть детектора MicroCAT образована 60 мкм Ni сеткой с отверстиями диаметром $45 \div 16$ мкм. Между сеткой и анодом отсутствует диэлектрик. Расстояние между ними регулируется с помощью небольших прокладок высотой 200 мкм. В [33] показаны возможности этого детектора для получения плоских и пространственных изображений, а также перспективы его использования.

Для регистрации нейтронов и γ -квантов, а также для получения двумерных распределений предназначен детектор, описанный в [34].

2.2. Детектор MICROMEGAS. Концепция несимметричной многопроволочной камеры была рассмотрена Ж. Шарпаком в самых ранних публикациях [1, 2]. Возврат к реализации концепции связан с новыми жесткими требованиями к координатным детекторам, предъявляемыми при постановке экспериментов на строящихся ускорителях. Исследования многопроволочной камеры с несимметричным расположением анодных проволочек, предназначенной, по замыслу авторов, для работы при высоких нагрузках и обеспечивающей высокое пространственное разрешение, проведены Шарпаком и др. в [35]. Исследо-

валась несимметричная камера, состоящая из анодных проволочек диаметром 7 мкм, расположенных между полевыми проволочками в плоскости анодных проволочек. Над ними на расстоянии 3 мм расположена проволочная катодная плоскость. Съём координатной информации осуществлялся микрострипами печатной платы, размещаемой на расстоянии 600 мкм ниже плоскости анодных проволочек. Расстояние между проволочками катодной плоскости и полевыми проволочками составляло 1 мм. Ортогональное расположение стрипов печатной платы позволило создать двухкоординатную систему.

Следующим шагом в этой работе явилось предложение уменьшить расстояния между проволочками до 200 мкм, сместить плоскость анодных проволочек к печатной плате до 200 мкм. В случае этой конфигурации можно было ожидать высокого пространственного разрешения при больших нагрузках регистрируемых частиц. Необходимый коэффициент газового умножения обеспечивался сильным электрическим полем в районе анодной проволочки.

Это предложение, судя по всему, не было реализовано. Можно только предполагать дальнейший ход рассуждения исследователей. Что произойдет при исключении из рассматриваемой системы анодных проволочек и уменьшении расстояния между плоскостью полевых проволочек и печатной платой, например, до 100 мкм? Рассмотрим систему «плоскость полевых проволочек — плоскость стрипов» печатной платы как плоский конденсатор. Простой расчет показывает, что при разности потенциалов между этими плоскостями, например 700 В, напряженность электрического поля может составить до 70 кВ/см. Механизм газового умножения начинает работать при напряженности около 12,5 кВ/см. С учетом величины промежутка в этом случае достигим КГУ до 10^4 . Возможно, проведенные нами рассуждения и легли в основу концепции нового двухступенчатого детектора высокого пространственного разрешения на основе механизма газового умножения в однородном электрическом поле, предложенного Шарпаком и др. [34]. Новый прибор, основанный на свойствах фокусирующих и ускоряющих сеток, был назван его авторами MICROMEGAS (Micro-Mesh-Gaseous Structure)*.

Первая ступень нового прибора ограничена сеточным электродом, образующим дрейфовое пространство. В объеме второй ступени происходит развитие лавины. Между газовыми объемами первой и второй ступеней в 3 мм от сеточного электрода размещена микросетка с квадратными отверстиями (со стороной 22 мкм), являющаяся катодом (рис. 8). Анодом является микро-

*Представляется, что название детектора образовано из двух греческих слов *микрос* и *мегас*, достаточно широко применяемых в научной терминологии. 250 лет тому назад в Лондоне вышла философская повесть Вольтера, названная по имени ее главного героя «Микромегас». Может быть, наследие знаменитого француза вдохновило автора названия детектора? Но, может, это произошло независимо, что подтверждает известную поговорку: «Новое — хорошо забытое старое».

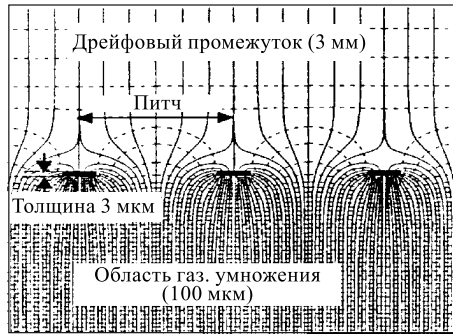


Рис. 8. Конфигурация электрического поля детектора MICROMEGAS в районе сеточного электрода между верхним электродом и анодом. Под сеточным электродом находится объем газового умножения

ставляло 10^5) относительный коэффициент газового умножения не менялся вплоть до загрузок 10^9 Гц/мм². Для MSGC величина загрузок была в 1000 раз меньше. Исследовались характеристики детекторов, различных по своим геометрическим размерам. Испытывались детекторы с дрейфовым промежутком от 1 до 3 мм и промежутком газового умножения от 50 до 10 мкм. Рассматривались два варианта: с размерами отверстия сетки 100 и 317 мкм. На пучке пионов ($pc = 100$ ГэВ) и высокоинтенсивном пионном пучке ($pc = 300$ МэВ) исследовались процессы возникновения стримерного режима и разрядов [39]. При отношении сигнал/шум $S/N = 20$ и загрузках до 30 Гц/мм² счет стримеров не превышал 0,5 в секунду. В этом эксперименте испытывалась интегральная регистрирующая электроника (PREMUX22), показавшая высокие эксплуатационные свойства. Электроника канала выдерживала до 10^5 пробоев без повреждения. Высокие характеристики детекторов MICROMEGAS позволили изготовить опытный образец размером 26×36 см, прошедший жесткие всесторонние испытания. Детекторы этого типа предполагается использовать в экспериментах установки COMPASS в CERN в пучке интенсивностью до $2 \cdot 10^8$ мюонов за двухсекундный цикл ускорителя [40].

2.3. Газовый электронный умножитель (Gas Electron Multiplier — GEM), предложенный Саули [41], представляет собой структуру, состоящую из двух слоев сетки из медной фольги с диэлектрической пленкой между ними (рис. 9). Круглые отверстия сетки имеют диаметр от 40 до 120 мкм. Изготавливается электронный умножитель стандартными методами фотолитографии с последующим травлением. В целях быстрых и всесторонних исследований Саули организовал испытания такого типа детекторов в институтах несколь-

стриповая структура, нанесенная на печатную плату.

Результаты испытания MICROMEGAS в течение нескольких месяцев в высокоинтенсивном пучке протонного синхротрона CERN представлены в [37, 38]. Были определены пространственное и временное разрешения детектора, проведены сравнительные испытания с многопроволочными камерами и микроstriповыми газовыми камерами. Как и ожидалось, MICROMEGAS является прибором высокого пространственного и временного разрешения. При фиксированном числе регистрируемых электронов (в лавине их число со-

ких стран, имеющих опыт работы с газовыми координатными детекторами. Исследовались детекторы с различными газовыми смесями. Получены данные по коэффициентам газового умножения, проведены исследования режимов возникновения разрядов. Изучены долговременные режимы работы при высоких нагрузках [42–46], а также возможность применения в экспериментах двух- и трехкаскадных сборок. Рассматривалась возможность работы в сочетании с микроstriповыми камерами. В случае двухкаскадного детектора вероятно появление разрядов на уровне 10^{-4} при КГУ ~ 4500 . Для трехкаскадного детектора разряды с той же вероятностью проявляются при КГУ ~ 30000 [47].

Газовый электронный умножитель позволяет получить высокое и стабильное газовое умножение в соединении с микроstriповой камерой и другими микроструктурными детекторами. GEM является радиационно стойким прибором с высоким пространственным и временным разрешением. Для экспериментов на установке HERA-B изготовлены 200 детекторов GEM размером 27×25 см. Они будут использоваться как предусилители с другими микроструктурными детекторами. Некоторые другие возможности применения GEM: γ -астрономия, медицинская диагностика и многие другие области науки и техники [47].

Французские исследователи [25] считают, что детекторы MICROMEGAS и GEM, представленные в [36, 41], базируются именно на принципе действия их счетчика. Восстанавливая справедливость, необходимо напомнить, что идея создания подобного детектора была сформулирована ранее Оедом [26] и реализована для регистрации тепловых нейтронов.

Фокусирующие и ускоряющие свойства круглых диафрагм и сеток, являющихся составной частью детекторов CAT, MICROMEGAS, GEM и многих других микроструктурных газовых детекторов, хорошо известны и с успехом используются в приборах электронной оптики. Фокусирующие свойства сеточных электродов использовались в ламповых триодах, в плоскопараллельных ионизационных камерах для исключения зависимости амплитуды импульса от положения трека частицы [48]. Прибор, в котором был применен впервые механизм газового умножения [3], является плоскопараллельной ионизационной камерой с сеточным электродом, в объеме второй ступени которой происходит развитие лавины. Фокусирующие свойства смещенных

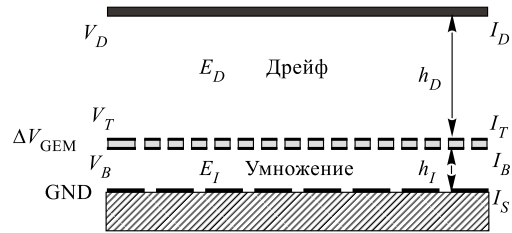


Рис. 9. Схема микроструктурного детектора GEM

нечетных и четных анодных проволок использовались для увеличения вдвое пространственного разрешения стандартной пропорциональной камеры [49].

2.4. Микроточечный детектор (MDOT) исследователей Ливерпульского университета изготовлен на кварцевой подложке, на которую наносится тонкий слой изолятора с катодами кольцевой формы, соединенными между собой [50]. В центре каждого кольца катода находятся точечные аноды, соединенные между собой вдоль одной линии полосковой проводника. Эта полоска предназначена для съема анодных сигналов и наносится вместе с анодами на поверхность кварцевой подложки под слой изолятора. Оптимальная конфигурация формы и взаимное расположение анода, катода и электродов считывания были найдены численным моделированием. Элементы детектора размещены по гексагональной системе. Соединение точечных анодов с помощью полосковой линии считывания приводит к дефокусировке дрейфующих электронов. Для уменьшения этого эффекта каждый точечный анод окружен кольцевым электродом, на котором образуется «плавающий» потенциал (рис. 10). В результате моделирования выбран вариант с двумя и даже тремя кольцевыми электродами. Катоды одной линии соединяются между собой, образуя двухкоординатную систему.

Исследования газового умножения проведены для детектора с расстоянием между анодами 200 и 100 мкм [51]. Предельный КГУ первого детектора для смеси Ar-DME (50/50) составляет 50000. Для второго — 40000. Пространственное разрешение — 35 и 18 мкм соответственно для детекторов первого и второго типа. Энергетическое разрешение в зависимости от режима (загрузка, КГУ) меняется от 14 до 19%. Вместе с тем накопление заряда на диэлектрических элементах детектора приводит к существенному уменьшению КГУ. Время работоспособности в условиях ЛНС равно примерно 12 годам при 25% уменьшении газового умножения.

Исследователи Лоуренсовской лаборатории нашли собственный вариант уменьшения влияния дефокусировки. Они использовали проводящий аморфный слой карбида кремния вместо кольцевых электродов с плавающим потенциалом [52]. На толстой кварцевой подложке с помощью соответствующей технологии сделаны точечные аноды с системой считывания. Поверхность покрыта слоем кварца толщиной $\sim 7,5$ мкм ($\rho \sim 10^{13}$ Ом/см). На нее

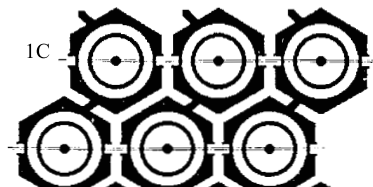


Рис. 10. Структура микроточечного детектора. Изображенные точками аноды соединены между собой проводником, служащим для определения координаты x . Катоде шестигранной структуры, расположенные около прямой перпендикулярной линии анодов, соединены между собой линией для определения координаты y . Вокруг каждого анода находятся кольцевые электроды с «плавающим» потенциалом

наносилась пленка карбида кремния (a-Si:C:H) толщиной $\sim 0,1$ мкм ($\rho_s \sim 10^{13}$ Ом/□). Элементы детектора располагались на вершинах квадрата. Катоды соединены полосковой линией, перпендикулярной системе анодного считывания. Исследование свойств детектора выполнено с использованием газовой смеси Ar–этан (50/50) при атмосферном давлении. Сравнительные исследования проведены на детекторах с плавающим потенциалом. Для детектора без покрытия карбидом кремния (питч 200 мкм) достигнут КГУ = $1,2 \cdot 10^4$ ($1 \cdot 10^4$ для детектора с покрытием). По такой же схеме изготовлены и исследованы детекторы с катодом, образованным по сторонам квадрата, но они показали худшие результаты, что, видимо, связано с изменением конфигурации электрического поля.

Группа из Ливерпульского университета проводила дальнейшие исследования с использованием аморфного слоя карбида кремния с присадкой бора, что придало покрытию полупроводниковые свойства [53]. Использовались детекторы двух типов, которые отличались расстоянием между анодами (100 и 200 мкм). Исследования выполнены для смесей Ar, Ne, He в девяти пропорциях с DME для каждого благородного газа. Исследованные микроточечные детекторы обладают большой загрузочной способностью, КГУ до $2 \cdot 10^4$, высоким пространственным разрешением при высокой радиационной стойкости.

Раздельное использование каждого анода позволяет применять детектор для регистрации одиночных УФ-фотонов, следовательно, в черенковских счетчиках кольцевого изображения [54].

2.5. Счетчик с канавкой (Trench Counter) описан в [55], его свойства экспериментально не проверялись.

Идея этого счетчика с некоторой модификацией нашла свое воплощение в новом детекторе, изготовление которого ведется по технологии печатных плат [56]. Детектор изготавливается из металлизированной с обеих сторон каптоновой пленки. На ней с одной (верхней) стороны травлением образованы катодные стрипы, а с другой — перпендикулярные им анодные стрипы. Пленка со стороны анодных стрипов наклеивается на диэлектрическую подложку толщиной в 300 мкм, а пространство между катодными стрипами травится на всю глубину подложки до анодных стрипов. В сечении протравленное пространство имеет форму трапецевидной канавки или бороздки, поэтому детектор получил название **микробороздкового детектора** (Micro-Grove Detector — MGD).

Авторы рассматривают MGD как адаптацию идеи микроазорной камеры (MGC) [12, 13] к технологии изготовления печатных плат. Основные отличия — использование толстой, металлизированной с обеих сторон каптоновой пленки толщиной 50 мкм вместо 10 мкм и изменение взаимного расположения анода и катода. В MGD катодная плоскость находится на верхней стороне подложки, со стороны падающих частиц. Анодная поверхность не-

посредственно примыкает к толстой подложке (рис. 11). По сравнению с микросазорной камерой увеличены ширина анодных стрипов до 35 мкм и их толщина — до 5 мкм.

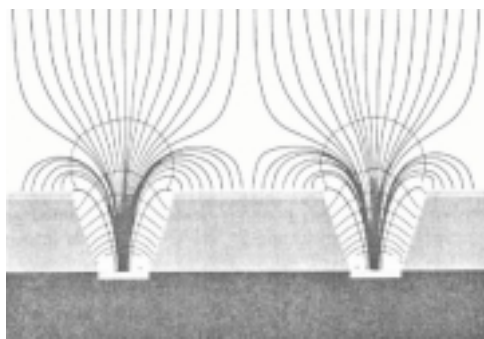


Рис. 11. Структура MGD-детектора и карта силовых линий и эквипотенциалей в области газового умножения

Характеристики детектора исследовались на опытном образце размером $2,6 \times 2,6$ см. Ширина бороздки 70 мкм на верхней и 30 мкм на нижней поверхности 50 мкм каптоновой пленки. Расстояние между бороздками 200 мкм. Для съема информации служили электроды, образующие между собой стереоугол 200 мрад. Использовались четыре газовые смеси: Ne–DME (50/50), Ne–DME (70/30), Ne–DME (40/60), Ar–DME (50/50).

Первоначально были исследованы соотношения сигналов, получаемых на аноде и катоде. Они оказались близкими к идеальному, т. е. равны единице. Режим работы детектора для трех значений величины дрейфового электрического поля 3, 6 и 9 кВ/см численно моделировался. Абсолютный коэффициент сбора электронов ионизации составил 100, 95 и 80 % соответственно. На основании результатов моделирования рекомендован режим, соответствующий 100 % сбору электронов на аноде.

Зависимость величины газового умножения от напряжения на катоде при нулевом напряжении на аноде была получена для всех четырех газовых смесей. Источник излучения — рентгеновская трубка с Sr анодом. Энергия γ -квантов равна 5,4 кэВ. Для рекомендованной газовой смеси КГУ ≈ 16000 . Исследования показали большую однородность сигнала вдоль стрипов и достаточно высокое энергетическое разрешение, слабо меняющееся (22–25 %) при изменении дрейфового поля от 4 до 11,5 кВ/см. Детектор показал высокую долговременную стабильность в процессе всего времени исследований (340 ч). На основании результатов исследований принято решение о создании детекторов с размерами $12,5 \times 10$ и 25×10 см.

2.6. Микропроволочный детектор (MWD) изготовлен по технологии печатных плат [57]. Основой детектора является каптоновая пленка с двухсторонней металлизацией. Сначала производится травление металлических покрытий. На нижней поверхности после двухстороннего травления находятся анодные стрипы шириной 25 мкм при расстоянии между их центрами 100 мкм. Верхняя медная фольга травится с образованием квадратных от-

верстий со стороны квадрата 70 мкм. Их оси находятся точно над осями анодных стрипов. Далее проводится травление каптоновой подложки. Анодные стрипы находятся в окружении газовой среды за исключением небольших участков между отверстиями в месте пересечения анодных и катодных стрипов (рис. 12).

В первом опытном образце размером 10×10 см пленка толщиной 50 мкм с анодным и катодным электродами размещалась на равном расстоянии между двумя пленочными электродами с зазором 6 мм. На электрод со стороны катодных стрипов (верхний электрод) подается отрицательное напряжение, формирующее поле дрейфа в ионизационном промежутке. Нижний электрод и анодные стрипы в процессе исследования находятся под нулевым потенциалом, катодные стрипы и верхний электрод — под отрицательным потенциалом, формирующим в окрестности анода сильное электрическое поле.

Детектор облучался γ -квантами от источника излучения ^{55}Fe с энергией 5,9 кэВ. Использовалась газовая смесь Ag–DME в пропорции 50/50. Исследовалась зависимость КГУ от катодного потенциала и напряжения на верхнем электроде. Второй образец детектора создан на каптоновой пленке толщиной 25 мкм. Были проведены сравнительные измерения КГУ в той же газовой смеси с первым и вторым образцами, а также для первого образца с газовой смесью Ag–CO₂ в пропорции 50/50. Источником излучения служила рентгеновская трубка с Cг анодом. Хотя КГУ для второго образца выше, чем для первого, авторы отмечают преимущества первого образца не только по прочностным механическим, но и по хорошим электрическим характеристикам. Хорошее качество изготовления детектора подтверждается высокой стабильностью КГУ, измеренного вдоль стрипа. Преимуществом детекторов этого типа является небольшая (0,3 пФ/см) емкость между анодом и катодом. Загрузочная способность детектора превышает $0,4 \cdot 10^6$ Гц/см², КГУ достигает $\sim 2 \cdot 10^4$ при напряжении на катоде ~ 550 В.

В дальнейших исследованиях использовались детекторы с различными размерами катодных отверстий (70×70 , 200×200 мкм), с зазорами между катодом и анодом 50 и 125 мкм [58]. Ширина анодного стрипа во всех случаях была равна 20 мкм, анодный питч составлял 100–300 мкм. В некоторых случаях исследовалась двухкаскадная система. В качестве первого каскада системы использовался газовый электронный множитель. Источником излу-

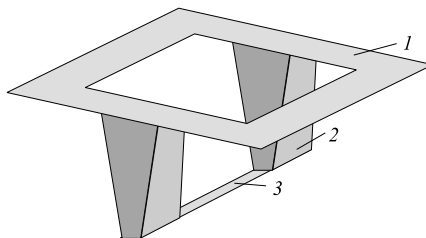


Рис. 12. Схематическое изображение ячейки микропроволочного детектора MWD: 1 — катод детектора; 2 — призмы изолятора; 3 — полоска анода. По этой же схеме построен микрошелевой газовый детектор MSGD

чения служил ^{59}Fe (энергия γ -квантов 5,9 кэВ). Некоторые образцы детекторов облучались в пучке отрицательных пионов ($pc = 220$ МэВ) и в пучке положительных частиц ($pc = 350$ МэВ). Особое внимание было уделено исследованию режимов, приводящих к возникновению разрядов. В этих экспериментах использовались и однокаскадная система, и двухкаскадная вместе с GEM с разным газовым наполнением. Основным результатом этих испытаний: двухкаскадная система наиболее надежна. Вероятность появления разрядов не превышает значения $2 \cdot 10^{-9}$ даже при КГУ = 10^4 . Выяснились преимущества детекторов на основе 125 мкм подложки, а также преимущество газовой смеси на основе неона.

При сравнении с другими микроструктурными детекторами отмечены следующие преимущества микропроволочных детекторов (MWD):

- большая надежность прибора при простоте изготовления из-за отсутствия диэлектрической подложки около анода;
- большая радиационная стойкость и небольшое количество вещества;
- высокий эффективный коэффициент газового умножения из-за полного сбора зарядов на анодном стрипе;
- высокая пространственная однородность умножения по всей поверхности испытанных детекторов (изменения однородности не превышают 10% на площади 10×10 см).

2.7. Детектор новой геометрии — микрощелевой газовый детектор (Micro Slit Gas Detector — MSGD) также изготовлен по технологии печатных плат [59]. Его основой является 50 мкм каптоновая пленка с двухсторонней металлизацией. На нижней поверхности после травления находятся анодные стрипы шириной 30 мкм при расстоянии между их центрами 200 мкм. Верхняя медная фольга вместе с каптоновой подложкой травится с образованием практически прямоугольных отверстий (с закруглением в углах) шириной в 105 мкм и длиной 6 мм на расстоянии 200 мкм по длине от соседнего отверстия. Их оси находятся точно над осями анодных стрипов. Таким образом, анодные стрипы находятся полностью в окружении газовой среды за исключением небольших (200 мкм) участков между двумя отверстиями. По конструкции микрощелевой детектор очень похож на микропроволочный, но отличается от последнего размерами структурного элемента.

В опытном образце пленка с анодным и катодным электродами размещалась эквидистантно между двумя пленочными электродами, находящимися на расстоянии 6 мм друг от друга. На электрод со стороны катодных стрипов (верхний электрод) подается отрицательное напряжение, формирующее поле дрейфа в ионизационном промежутке. Нижний электрод и анодные стрипы в процессе исследований находятся под нулевым потенциалом, катодные стрипы, как и верхний электрод, — под отрицательным потенциалом, формирующим сильное электрическое поле в окрестности анода. Детектор облучался рентгеновскими лучами. Использовалась газовая смесь Ar–DME,

состав которой изменялся в пропорции от 90/10 до 50/50. Исследовалась зависимость КГУ от катодного потенциала для различных пропорций газовой смеси. Получены амплитудные распределения сигналов при нулевом потенциале нижнего электрода и при подаче на него положительного напряжения, а также после облучения высокоинтенсивным пучком. Был измерен КГУ при различных режимах работы. Авторами отмечены высокая нагрузочная способность детектора MSGD ($2,5 \text{ МГц/мм}^2$) и отсутствие разрядов.

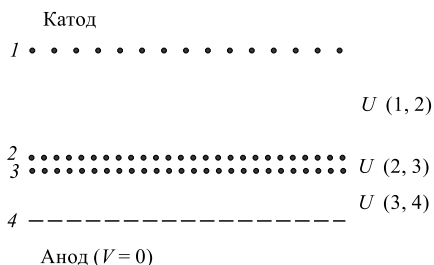


Рис. 13. Схематическое изображение многопроволочного газового электронного умножителя МПГЭУ: 1 — верхний электрод; 2, 3 — система умножения; 4 — полосковые аноды (повернуты на 90°)

2.8. Камера из капиллярных трубок (Capillary Plate gas Proportional Counter — CGPC) является оригинальным детектором, в основе которого лежат газовые умножающие структуры с серией отверстий. CGPC состоит из множества стеклянных тонкостенных капилляров диаметром 100 и длиной 800 мкм, объединенных в плату толщиной 1 мм, расположенную между двумя электродами [60]. Структура детектора подобна микроканальному фотоэлектронному умножителю. Газовое умножение происходит практически в постоянном электрическом поле внутри капилляра, достигающем значения $2 \cdot 10^4 \text{ кВ/см}$. Электроны собираются на нижней анодной поверхности. При работе с КГУ до 10^4 на смеси газов Ar–метан энергетическое разрешение составляет 26%. В принципе система обеспечивает газовое умножение 10^6 без разрядов. Комбинация двух детекторов (CGPC и MSGC) позволяет легко реализовать детектор рентгеновского излучения.

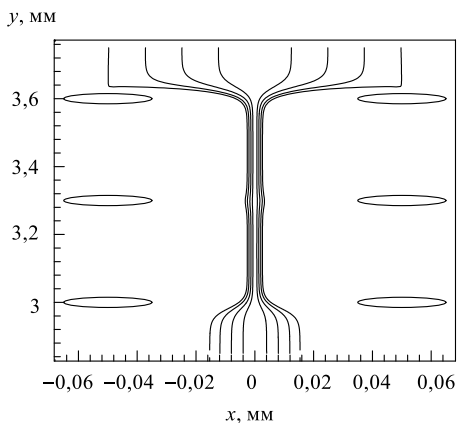


Рис. 14. Конфигурация электрического поля двухкаскадного МПГЭУ

2.9. Детектор на основе многопроволочного газового электронного умножителя (МПГЭУ) предложен в [61], там же приведены результаты моделирования электрических полей детектора. Схематическое изображение однокаскадного детектора показано на рис. 13. Распределение электрического поля

внутри канала умножения практически однородно. При разности потенциалов системы умножения 900 В электрическое поле $E = 30$ кВ/см на эффективной длине канала умножения 220 мкм. О конфигурации электрического поля двухкаскадного детектора можно судить по рис. 14. Как и в многопроволочной пропорциональной камере, все элементы детектора находятся в окружении газовой среды, в детекторе отсутствует твердый диэлектрик. Поэтому накопления заряженных ионов не произойдет, а следовательно, изменения конфигурации электрического поля из-за накопления зарядов диэлектриком не будет. По оценкам авторов в детекторе достигается $KГУ = 4 \cdot 10^5$.

3. МИКРОСТРИПОВЫЕ ГАЗОВЫЕ КАМЕРЫ

Схематическое изображение микроstriповой газовой камеры представлено на рис. 1. MSGC является ионизационным координатным детектором, в котором анодные и катодные стрипы в виде тонких металлических слоев нанесены на изолирующую или слабопроводящую подложку. Изготовление ведется фотолитографическим методом. Точность расположения стрипов к настоящему времени составляет $\pm 0,2$ мкм на длине в несколько сотен мм. Если первоначально MSGC рассматривалась как детектор рентгеновского излучения и нейтронов, то проведенные исследования показали, что эти приборы могут успешно применяться в качестве координатных детекторов релятивистских заряженных частиц.

На традиционной шестой Венской международной конференции по пропорциональным камерам (1992 г.) было представлено семь докладов по результатам исследований MSGC. Исследованиями показано, что микроstriповые газовые камеры обладают высоким пространственным и временным разрешением. Вместе с тем выяснились и слабые стороны: коэффициент газового умножения при регистрации релятивистских частиц не должен превышать 10^4 , он примерно в десять раз меньше для сильноионизирующих ядер. MSGC в условиях максимального газового умножения может быть необратимо повреждена разрядом [62]. Указанные обстоятельства являются серьезным ограничением применения подобного детектора во многих случаях и вызвали целый поток исследований, направленных на сведение к минимуму выявленных недостатков.

На седьмой Венской международной конференции по пропорциональным камерам (1995 г.) в докладе Оеда [63] дан анализ представленных докладов по MSGC. В докладе подведен некоторый итог исследований за несколько лет. Рассматривались вопросы сравнения загрузочной способности с многопроволочными камерами временного, энергетического и пространственного разрешения. Особое внимание уделялось материалу подложки и ее влиянию на свойства детектора. Отмечены два типа нестабильностей, связанных

с подложкой. Первая нестабильность кратковременная, связанная с накоплением на диэлектрике подложки положительно заряженных ионов, создающих потенциалы не только в промежутке анод–катод, но и с обратной стороны подложки. Вторая — долговременная, которая определяется уменьшением амплитуды сигнала со временем и его зависимостью от величины загрузки. Она объясняется изменением свойств подложки, ее проводимости из-за электролитической декомпозиции в электрических полях под действием излучения. В докладе приводится обширный список литературы.

Численное моделирование электрических полей для детекторов разных геометрических размеров с учетом проводимости подложки, на которую наносятся анодные и катодные стрипы, способствовало выяснению механизма возникновения возможных повреждений в MSGC [64, 65].

Из этих работ следует, что результаты моделирования процессов движения и накопления зарядов в фокусирующих полях MSGC находятся в хорошем согласии с экспериментом. Это позволило продолжить моделирование процессов для исследований зависимости величины газового умножения детекторов с учетом диэлектрических свойств подложки, ее толщины, проводимости и потенциала, возникающего на обратной стороне подложки [66, 67]. Показано, что стабильность величины газового умножения базируется на соотношении между положительно и отрицательно заряженными элементами поверхности.

Исследование влияния геометрических параметров MSGC на величину возможного максимального газового умножения (МГУ) показало, что порог разряда и величина МГУ зависят от ширины катодного стрипа камеры. В соответствии с предсказаниями численного моделирования МГУ порог разряда увеличивается с уменьшением ширины катодного стрипа [68]. Среди возможных причин возникновения разрядов авторы выделяют как фотонные, так и ионные обратные связи. Исследования возникновения разрядов при регистрации сильноионизирующих частиц (5 МэВ α -частицы) показали, что для сохранения безопасных условий работы при ионизационной потере энергии в газе детектора 1 МэВ необходимо уменьшить МГУ в два раза по сравнению с режимом регистрации 6 кэВ рентгеновского излучения.

Механизм возникновения разряда в MSGC исследовался в работе [69]. Для того чтобы лучше понять роль диэлектрической подложки, исследовались детекторы, электрическая структура которых подобна MSGC. Измерения характеристик выполнялись с различными смесями на основе аргона и ксенона с использованием в качестве гасящих и стабилизирующих добавок изобутана, изобутилена, CH_4 , DME и TME. В результате исследований установлено, что при отсутствии подложки достигается величина МГУ в 5–10 раз большая, чем в системе на подложке. Ограничение роста газового умножения связано с появлением самогасящихся стримеров. Появление разрядов в детекторах на подложке авторы связывают также с появлением самогасящихся стримеров,

быстро переходящих в разряд. Исследования показывают, что наибольшее газовое умножение перед возможным пробоем получено в случаях электронного умножения только в области анода с подавлением газового умножения около катода. Возможность уменьшения риска пробоев достигается несколькими способами: уменьшением площади анодного стрипа, увеличением зазора анод–катод, использованием смеси газов с высоким значением коэффициента Таунсенда. Конечно, оптимальным является детектор без подложки. В детекторах с диэлектрической подложкой вероятность пробоев можно снизить путем применения катодного стрипа специальной формы для уменьшения взаимного влияния в электрических полях системы катод–подложка.

Влияние материала электродов MSGC на возможность возникновения разрядов при работе детекторов с электродами из Au, Al, Cr, W и Rh исследовалось в [70]. Авторы исследования сформулировали следующие выводы:

- вероятность разряда не зависит от материала электродов;
- частота разрядов очень быстро нарастает с ростом катодного напряжения и слабо зависит от величины поля дрейфа;
- увеличение величины зазора анод–катод ведет к уменьшению частоты появления разрядов, но приводит к большей величине повреждений анодного стрипа;
- аноды из материала высокого омического сопротивления (Cr, Rh) выдерживают до миллиона разрядов перед разрушением. Аноды из материала меньшего омического сопротивления (Au, Al, W) выдерживают до разрушения около тысячи разрядов на 1 см длины анода;
- процессы разряда хорошо воспроизводятся с помощью численного моделирования в соответствии с результатами эксперимента. Моделирование показывает, что происходит существенное увеличение энергии разряда в детекторах с электродами высокой проводимости;
- высокая проводимость электродов, обеспечивающих быстрый сигнал, и большое сопротивление разрядам находятся в противоречии друг с другом.

Наряду с решением проблемы предотвращения разрядов в MSGC необходимо решить проблему долговременной устойчивости работы детектора или его старения. Ее актуальность связана с тем, что заменить детекторы в процессе использования экспериментального оборудования до завершения всего комплекса экспериментов невозможно. Старение — непрерывная деградация рабочих свойств, характеристик в полях радиации — хорошо исследовано применительно к многопроволочным детекторам. Исследования привели к ясному пониманию процессов, приводящих к старению многопроволочных детекторов, влиянию материала сигнальных проволочек и элементов конструкции, а также газовой смеси.

Результаты многолетних систематических исследований процессов старения MSGC при высоких нагрузках (до 10^7 част./с·мм) отражены в работах [71, 72]. Целями этих исследований являлись поиск материалов для

изготовления детектора, определение необходимой степени чистоты рабочей газовой смеси, обеспечивающих долговременную стабильность характеристик для экспериментов на ускорителе ЛНС. Предполагались следующие условия работы на ускорителе: поток частиц минимальной ионизации $4 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, число электронов в искре 10^5 , что соответствует току в 0,5 нА/мм и накоплению заряда 10 мКл/см стрипа за каждый эффективный год (10^7 с) работы на ускорителе ЛНС.

На основании ранних результатов исследований с пропорциональными камерами и предварительных данных [73] была разработана методика исследования процессов старения детектора. Создана новая газовая система, исключающая поступление в детектор посторонних примесей, в том числе из материала подводящих трубок. Система была обеспечена всеми необходимыми устройствами контроля состава и очистки рабочей газовой смеси, в том числе хроматографом и масс-спектрометром.

Период непрерывного облучения одного типа детектора продолжался несколько месяцев. Продолжительность связана с моментом получения необходимых результатов. Облучение камеры проводилось хорошо коллимированным рентгеновским излучением трубки с медной и железной мишенями. В этих случаях основная доля излучения приходилась на пики 6 и 8 кэВ соответственно. Поток γ -квантов мог ослабляться с помощью attenuатора или изменения напряжения на трубке. Типичная скорость счета составляла $10^6 \text{ с}^{-1} \cdot \text{мм}^{-2}$ в рабочих условиях. Контроль потока излучения обеспечивался пропорциональным счетчиком, который облучался тем же источником со скоростью счета не более 10 имп./с и размещался вне основного пучка. Счетчик продувался одинаковой газовой смесью, что и испытываемый детектор. В процессе исследований проводился непрерывный компьютерный контроль его работы и функционирования счетчика. Независимо измерялись токи, амплитуды сигналов и скорость счета детектора и контрольного счетчика.

Полученные данные обрабатывались с учетом всевозможных флуктуаций, при необходимости проводилась коррекция, основанная на изменении внешних параметров — температуры и давления. Окончательно старение детектора характеризовалось отношением $R = -\Delta M/QM_0$, где Q — полный заряд в Кл или Кл/см, здесь $\Delta M/M_0$ — относительное изменение газового умножения детектора. Как и в других работах, отмечено влияние подложки. Пример одного из результатов исследований, иллюстрирующего долговременную стабильность, приведен на рис. 15. В этом случае использовалась подложка из стекла марки S-8900, Shott с электронной проводимостью. В детекторе с подложкой из боросиликатного стекла (D-263, DESAG) с малой электронной проводимостью величина относительного умножения уменьшается на 40% при накоплении заряда 2 мКл/см. Напыление на эту подложку тонкого алмазного слоя (500 \AA) сохраняет без изменений свойства детектора даже после трехмесячной экспозиции при накоплении заряда 80 мКл/см.

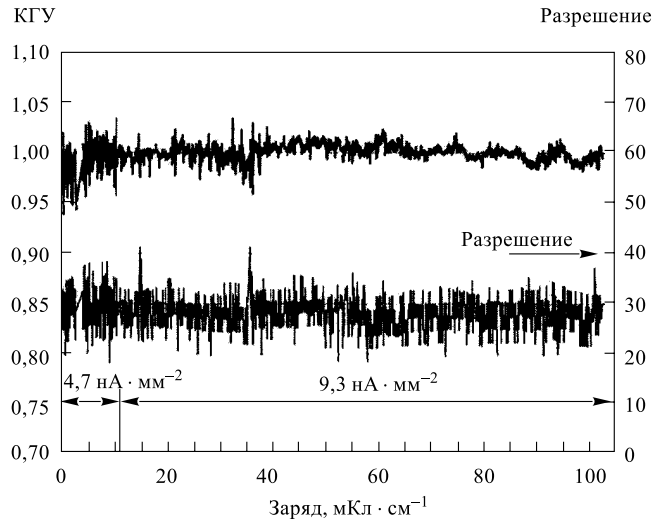


Рис. 15. Долговременная стабильность газового умножения и энергетического разрешения MSGC в процессе накопления зарядов ионов на диэлектрической подложке детектора. Стабильность обеспечена оптимальным подбором материала подложки, при необходимой поддержке состава газовой смеси и степени ее чистоты

Отметим некоторые результаты.

Основные механизмы, ведущие к старению детектора, можно разделить на две группы. К первой группе относится образование полимеров в плазме лавины из ионов и радикалов газа, наполняющего объем камеры, или молекул загрязняющих примесей. Полимеры постепенно высаживаются на поверхность электродов, полимеризация увеличивается за счет присутствия катализаторов и пластификаторов в газе из полимерных элементов системы, например, трубок для продува газа.

Вторая группа — непосредственное осаждение тяжелых молекул посторонних примесей и масел на поверхности электродов под действием электрического поля. Эти процессы легко идентифицируются и отделяются от других источников деградации (микроразряды на электродах, эмиссия на краях электродов, недостаточно высокое качество изготовления всей системы).

На поверхности электродов также возможно образование раковин. Появление раковин связано с присутствием в плазме лавины молекул четырехфтористого углерода. В целом механизм старения является сложным комплексным процессом. По сравнению с пропорциональными камерами MSGC являются очень деликатными приборами, в них используются тонкие элек-

троды, размещаемые на подложке. Высаживание молекул примесей и полимеров приводит к изменению поверхностной проводимости и конфигурации электрического поля. Из-за малых расстояний между анодом и катодом высокая плотность энергии в лавине ведет к росту эффективности полимеризации.

4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ MSGC

Наличие диэлектрической подложки в MSGC создает определенные трудности, связанные со старением детектора при длительной экспозиции в экспериментах на интенсивных пучках ускорителя, но не является существенным препятствием для создания двухкоординатного детектора, используемого при умеренных нагрузках [74].

Для реализации детектора необходимо использовать тонкую подложку, на которую наносятся катодные и анодные стрипы, позволяющие определять x -координату; y -координата определяется по наведенному заряду на стрипы обратной стороны подложки, перпендикулярных по отношению к анодным стрипам. MSGC с рабочей площадью 5×5 см вместе с соответствующей электроникой представляют собой единый блок, изготовленный по модульной технологии на печатной плате. В детекторе используется 500-канальная система электроники считывания. По утверждению авторов [74] возможно изготовление системы размером 20×20 см.

Анодная и катодная системы нанесены на 17 мкм полиимидную подложку, стрипы наносятся на обратную сторону керамической подложки. Все электроды выполнены из слоя золота толщиной 1 мкм. Детектор обладает пространственным разрешением 60 мкм.

Детекторы изображений подобного типа предназначены для исследований дифракционных явлений на пучках ультравысоких интенсивностей γ -квантов. На рис. 16 показано изображение металлического кулона в пучке 6 кэВ рентгеновского излучения.

Как это видно из многочисленных исследований, MSGC рассматриваются в качестве детекторов для экспериментов на ускорителях заряженных частиц. Одно из предложений — использовать MSGC на LHC в качестве трекера установки CMS (компактный мюонный соленоид) [75]. Трекер — это



Рис. 16. Изображение металлического кулона, облучаемого γ -квантами, полученное с помощью двухкоординатной камеры

система координатных детекторов, окружающих место встречи пучков ускорителя. Как правило, трекер размещается в установке сразу за вершинным детектором, служащим для точного определения координаты точки взаимодействия.

В качестве вершинного детектора предлагается использовать кремниевые детекторы двух типов, обеспечивающие измерение пространственных координат с точностью 15 мкм в направлении по нормали к оси пучка и с точностью 90 мкм вдоль пучка. MSGC должны обеспечить точность измерения 45 мкм и 2 мм в соответствующих направлениях. Все MSGC состоят из двух частей: детекторы, размещаемые по цилиндрическим поверхностям (Barrel Detectors (BD)), и детекторы торцевых частей (Endcap Detectors (ECD)). В первоначальном проекте предполагалось, что BD объединят 3456 детекторов на $3,3 \cdot 10^6$ каналов, а ECD — 12348 детекторов на $8 \cdot 10^6$ каналов регистрации [76]. Предполагаемые загрузки на внутреннем трекаре составят 5 кГц/мм² для частиц с минимальной ионизацией (MIP) и $10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{мм}^2$ для нейтронов.

В качестве подложки используется боросиликатное стекло (D-263, DESAG) толщиной 0,3 мм, на которое нанесен 1 мкм слой стекла с малой электронной проводимостью (S-8900, Shott). Тем самым обеспечивается поверхностное сопротивление, равное 10^{16} Ом. Золотые анодные и катодные стрипы, толщиной 1 мкм и длиной 125 мм при ширине 7 и 133 мкм соответственно, нанесены на подложку с расстоянием между центрами ближайших катодов (pitch), равным 240 мкм вместо 200 мкм проектных. Увеличение связано с экономией средств. MSGC в составе трекара прошла всесторонние испытания на 350 МэВ пучке π -мезонов ускорителя при счете 5–7 кГц/см² (1997–1999 гг.). В целом получены положительные результаты, показывающие возможность использования трекара на ускорителе LHC. Полученные результаты в основном совпадают с результатами других работ. MSGC в торцевых частях трекара, имея трапециевидную форму, образуют многослойную дисковую структуру. Стрипы камер находятся вдоль радиусов. Всесторонние испытания шести модулей, располагавшихся друг за другом, проведены на 100 ГэВ мюонном пучке CERN [77].

На несколько лет раньше, чем на LHC, начнутся эксперименты по исследованию CP -нарушения в распадах $B^0, \bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ на установке HERA-B протонного кольца ускорителя DESY (Гамбург) [78]. На углеродной мишени в пучке протонов с энергией 820 ГэВ будут рождаться B -мезоны. Для получения достаточного числа B -мезонов скорость счета взаимодействий должна быть ~ 40 МГц. Около 40% всех B -мезонов будут проходить через внутренний трекер. В соответствии с проектом трекер будет включать 184 MSGC, перекрывающих поверхность 17 м² [79]. Детектор MSGC рассчитан на 141312 аналоговых каналов съема информации. 96 камер детектора включены в триггер первого уровня, при этом используются 9984 триггерных каналов. Камеры объединяются в 10 станций. Станция состоит из трех

плоскостей, каждая из которых, в свою очередь, должна состоять из четырех MSGC. При этом обеспечивается эффективность регистрации больше 99 %. Одна из плоскостей соответствует вертикальному расположению стрипов (0°). Две другие стереоплоскости повернуты вокруг оси пучка на стереоугол, равный $\pm 5^\circ$. Такая станция позволит определять координаты поворота частиц магнитным полем в x -плоскости с точностью 100 мкм и менее чем 1 мм — в вертикальной y -плоскости. Ожидается, что ошибка в определении координат вдоль оси пучка не будет превышать 3 мм. Ориентировочно поток частиц с минимальной ионизацией составит $2 \cdot 10^4$ Гц/мм².

В стандартной камере в качестве подложки используется стекло толщиной 400 мкм. Анодные стрипы шириной 10 мкм и катодные шириной 170 мкм изготавливаются из золота. Шаг камеры равен 300 мкм.

При исследованиях в рентгеновских лучах до уровня накопления заряда на стрипах 48 мКл/см выяснилось, что происходит 10 %-ное уменьшение выходного сигнала детектора. При облучении камер пучком π -мезонов с энергией 150 МэВ при потоке, равном $3 \cdot 10^3$ Гц/мм, были выявлены необратимые повреждения анодных стрипов из-за возникающих разрядов при стандартных коэффициентах газового умножения. Решение проблемы разрядов заключалось в предварительном газовом умножении с использованием MSGC в качестве вторичного элемента.

Совершенствованию MSGC и улучшению их радиационной стойкости уделено большое внимание во многих исследовательских центрах мира в связи с возможностью долговременного их использования. Поэтому, несмотря на более чем десятилетний период исследований и применений MSGC в целом ряде научных центров, продолжается их совершенствование [80–87]. Параллельно эти детекторы используются в различных по своим целям и характеру экспериментах [88–94]. Использование механизма предварительного газового умножения в других микроструктурных детекторах может существенно расширить возможности MSGC.

Преимущества различных по структуре и свойствам детекторов можно оценить только при исследованиях в одинаковых условиях по стандартной методике. Поэтому большой группой ведущих исследователей из семи институтов были проведены сравнительные испытания микроструктурных детекторов: двух типов микростриповых камер, пяти вариантов GEM и по одному детектору MicroCAT, MICROMEGAS и MicroDOT [95]. Для всех типов детекторов исследованы газовое умножение, случаи появления разрядов и зависимость числа разрядов от напряжения на промежутке катод–анод. Отсылая читателя к выводам [95], приводим только два рисунка из [95]. На них показана зависимость КГУ и вероятность пробоя в исследуемом интервале напряжений (рис. 17, 18).

Изготовление и внедрение микроструктурных приборов на основе механизма газового умножения в эксперимент стало возможным благодаря ис-

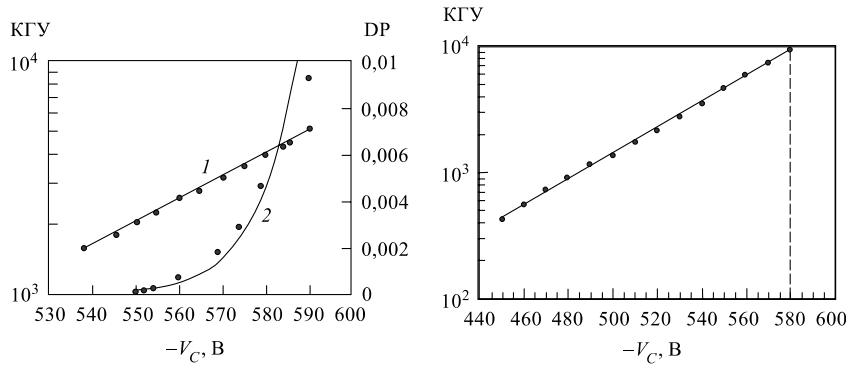


Рис. 17. Зависимость газового умножения (1) и вероятности возникновения разрядов (DP) (кривая 2) от разности потенциалов между анодом и катодом в MSGC. При КГУ $\sim 1 \cdot 10^3$ вероятность разряда DP равна $5 \cdot 10^{-3}$

Рис. 18. Зависимость газового умножения от разности потенциалов между анодом и катодом в MicroDOT. Во всем интервале коэффициента газового умножения до $1 \cdot 10^4$ не наблюдалось ни одного разряда

пользованию в процессе изготовления детекторов технологии многослойных печатных плат, основанной на фотолитографии, травлении. Технология печатных плат создает предпосылки массового создания детекторов с практически идентичными свойствами.

Существенную роль в процессе разработки и создания детектора играют результаты численного моделирования будущего прибора. В настоящее время программы моделирования позволяют вычислять и представлять в графическом виде электрические поля и потенциалы, процессы ионизации и движения электронной компоненты с учетом многократного рассеяния, процессы газового умножения, траектории движения ионов к катоду и многие другие полезные вещи. Одной из ведущих программ таких расчетов является программа GARFIELD [96]. Основа программы заложена Р. Вееenhoфом (R. Veenhof), она продолжает совершенствоваться как ее разработчиком так и его коллегами.

ВЫВОДЫ

В ряде исследовательских центров мира ведутся хорошо скоординированные между собой, всесторонние исследования микроструктурных детекторов частиц. Образцовым примером этого является организация работ по газовым электронным умножителям GEM для экспериментов LHC (CERN) и HERA-B

(DESY). Наиболее перспективными по характеристикам в настоящее время представляются детекторы GEM, MICROMEGAS и тонкопленочные детекторы, изготавливаемые по технологии многослойных печатных плат.

В последнее время в печати появилось несколько десятков работ по тематике обзора. Были опубликованы материалы традиционной Венской конференции [97] и 5-й Международной конференции по позиционно-чувствительным детекторам [98]. Выделим из большого списка публикаций текущего года наиболее значимые, по мнению автора, работы.

Прогресс в методике микроструктурных детекторов отражен в [99–101]. В [102] представлены результаты численного моделирования практически всех процессов, происходящих в однокаскадных детекторах GEM. Обзор методов аккуратного моделирования различных характеристик детекторов GEM дан в [103]. Последним экспериментальным результатам исследований с детектором MICROMEGAS посвящена работа [104]. В [105] подробно описаны конструкция, системы съема координатной информации, результаты лабораторных исследований и испытаний на пучке ускорителя трехкаскадных детекторов GEM для экспериментов на установке COMPASS [106].

Проблемы старения газовых детекторов описаны в трех работах. Хотя исследования [107] относятся к явлениям старения дрейфовых трубок (straw drift tube), они представляют общий интерес. Исследование поверхности анода было выполнено с помощью электронной микроскопии в процессах облучения рентгеновскими лучами. Для исследований распределения легких элементов по глубине анода применялся анализ по ядерным реакциям при облучении анода протонами и дейтронами в диапазоне энергий $0,7 \div 1,1$ МэВ. Исследовалось влияние кислорода и некоторых активных химических радикалов.

Результаты систематических исследований величины газового умножения и вероятности возникновения разрядов при облучении в пучках сильноионизирующих ионов одно- и двухкаскадных детекторов GEM приведены в [108]. Процессам старения и возникновения разрядов в системе детектора на основе комбинации MSGC–GEM посвящена работа [109]. MSGC- и GEM-детекторы составляют внутреннюю трековую систему установки HERA-B [78].

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность М. Г. Шафрановой за участие в редактировании статьи и всестороннюю помощь, а также признательность коллективу научно-технической библиотеки ОИЯИ за содействие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Charpak G. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1968. V. 62. P. 235;
Amato G. et al. // Proc. of Dubna Meeting Filmless and Streamer Chambers, April 1969.
2. Charpak G., Rahm D., Steiner H. // Nucl. Instr. Meth. 1970. V. 80. P. 13.

3. *Sikkema C. P.* // Nucl. Instr. Meth. 1970. V. 81. P. 189.
4. *Charpak G., Sauli F.* // Phys. Lett. B. 1978. V. 78. P. 523.
5. *Breskin A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1979. V. 161. P. 19.
6. *Breskin A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1980. V. 178. P. 11.
7. *Bouclier R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1983. V. 205. P. 403.
8. *Charpak G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. V. 283. P. 596.
9. *Breskin A., Chechik R., Sauvage D.* // Ibid. V. 286. P. 596.
10. Research on Particle Imaging Detectors / Ed. G. Charpak // Series in 20th Century Physics. Singapore, 1995. V. 6.
11. *Oed A.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1988. V. 263. P. 351.
12. *Angelini F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 335. P. 69–77.
13. *Angelini F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 362. P. 273–276.
14. *Fraga F. A. F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 392. P. 135–139.
15. *Fraga F. A. F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 419. P. 460–463.
16. *Soffitta P. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 469. P. 164–184.
17. *Cho H. S. et al.* // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1998. V. 61. P. 258–263.
18. *Chorowicz V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 419. P. 464–468.
19. *Chorowicz V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 401. P. 238–242.
20. *Clergeau J.-F. et al.* // Ibid. V. 392. P. 140.
21. *Christophel E. et al.* // Ibid. V. 398. P. 195.
22. *Sauli F. et al.* // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1999. V. 49. P. 341.
23. *Cicognani G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 416. P. 263–266.
24. *Yu Z. Q. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 372. P. 35.
25. *Takahashi H. et al.* // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A. 2002. V. 477. P. 13–16.
26. *Oed A.* // Proc. of MSGC Workshop, ILL, Grenoble, June 1991.
27. *Bartol F. et al.* // J. Phys. III (France). 1996. V. 6. P. 337–347.
28. *Bellazzini V. R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 423. P. 125.
29. *Pitts W. K. et al.* // Ibid. V. 438. P. 277.
30. French Patent No. 2727 525. Submitted Nov. 1994.
31. *Chaplier G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 426. P. 339–355.
32. *Sarvestani A. et al.* // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1999. V. 78. P. 431–437.
33. *Sarvestani A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 465. P. 354–364.
34. *Sarvestani A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 453. P. 530–535.
35. *Sharpak G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 346. P. 506–509.
36. *Giomataris Y. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 376. P. 29–35.
37. *Giomataris Y. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 419. P. 239–250.
38. *Barouch G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 423. P. 32–48.
39. *Jeanneau F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 450. P. 313–324.

40. *Thers D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 469. P. 133–146.
41. *Sauli F.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 386. P. 531.
42. *Benlloch J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 419. P. 410–417.
43. *Buzulutskov A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 443. P. 164–180.
44. *Bressan A. et al.* // Ibid. V. 424. P. 321–342.
45. *Bachmann S. et al.* // Ibid. V. 438. P. 376–408;
Bachmann S. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 470. P. 545–561.
46. *Bellazzini V.R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 471. P. 41–54.
47. *Sauli F.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 461. P. 47–54.
48. *Buneman O., Granshjaw T. E., Harvey J. A.* // Canad. J. Res. A. 1949. V. 27. P. 191.
49. *Shafranov M. D.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367. P. 125–128.
50. *Biagi S. F. et al.* // Ibid. V. 361. P. 72–76.
51. *Biagi S. F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 392. P. 131–134.
52. *Cho H. S. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 422. P. 296–299.
53. *Biagi S. F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 419. P. 438–443.
54. *Biagi S. F. et al.* // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1998. V. 61. P. 311–314.
55. *Schmitz J.* Preprint IKHEF-H/91-14. Amsterdam, 1991.
56. *Bellazini R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 424. P. 444.
57. *Adeva B. et al.* // Ibid. V. 435. P. 402.
58. *Adeva B.* // Ibid. V. 461. P. 33.
59. *Labbé J. C. et al.* // Ibid. V. 430. P. 54.
60. *Sakurai H. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 374. P. 341.
61. *Шафранов М. Д., Тонурия Т. П.* // Письма в ЭЧАЯ. 2001. №2[105]. С. 11–25.
62. *Nagae T. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1988. V. 263. P. 351.
63. *Oed A.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367. P. 34–40.
64. *Florent J. J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 329. P. 125–132.
65. *Fang R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 361. P. 85–90.
66. *Fang R. et al.* // Ibid. V. 365. P. 59–64.
67. *Fang R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 378. P. 439–442.
68. *Bouclier R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 365. P. 65–69.
69. *Peskov V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 392. P. 89–93.
70. *Keller S. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 419. P. 382–387.
71. *Bouclier R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367. P. 168–172.
72. *Bouclier R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 381. P. 289–319.
73. *Bouclier R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 323. P. 240–246.
74. *Toru Tanimori et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 381. P. 280–288.
75. CMS Technical Proposal. CERN/LHCC 94-38. 1994. P. 28–30.
76. *Latronico L.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 446. P. 346–354.

77. Pooth O. // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 419. P. 375–380.
78. Hartouni E. et al. An Experiment to Study CP Violation in the B System at the HERA Proton Ring. DESY-PRC 95/01. 1995.
79. Hott T. // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 408. P. 258–265.
80. Sauli F. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1998. V. 61. P. 236–243.
81. Barr A. et al. // Ibid. P. 264–269.
82. Barr A. et al. // Ibid. P. 315–320.
83. Boimska B. et al. // Ibid. P. 498–503.
84. Duerdoth I. P. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 392. P. 127–130.
85. Van den Berg F. D. et al. // Ibid. P. 94–98.
86. Cicognani G. et al. // Ibid. P. 115–119.
87. Schmidt B. // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 419. P. 230–238.
88. Zeuner T. // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 392. P. 105–108.
89. Zhukov V. et al. // Ibid. P. 83–88.
90. Ochi A. et al. // Ibid. P. 124–126.
91. Velletaz N. et al. // Ibid. P. 73–79.
92. Clergerau J. F. et al. // Ibid. P. 60–68.
93. Zavattini G. et al. // Ibid. V. 401. P. 206–216.
94. Bellazzini R. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 457. P. 22–42.
95. Bressan A. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 424. P. 321–342.
96. Veenhof R. // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 419. P. 726–730.
97. Proc. of Vienna Conf. on Instrumentation 2001 // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 478, No. 1–2.
98. 5th Intern. Conf. on Position-Sensitive Detectors // Ibid. V. 477, No. 1–3.
99. Sauli F. // Ibid. P. 1–7.
100. Bellazzini R. et al. // Ibid. V. 478. P. 13–25.
101. Charpak G. et al. // Ibid. P. 26–36.
102. Richter C. et al. // Ibid. P. 538–558.
103. Tikhonov V., Veenhof R. // Ibid. P. 452–558.
104. Bay A. et al. // Ibid. V. 488. P. 162–174.
105. Altunbas C. et al. // Ibid. V. 490. P. 177–203.
106. COMPASS, Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy. CERN/SPSLC 96–14. 1996.
107. Ferguson T. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 483. P. 698–712.
108. Bachmann S. et al. // Ibid. V. 479. P. 294–308.
109. Bagaturia Y. et al. // Ibid. V. 490. P. 223–242.