

Л. И. Шехтман<sup>1,2</sup>, А. Д. Долгов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: L.I.Shekhtman@inp.nsk.su

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ КООРДИНАТНЫЕ ГАЗОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ \*

Описаны новые координатные детекторы, основанные на газовой микроструктурной технологии, которые применяются в экспериментах по физике элементарных частиц и для регистрации рентгеновского излучения в экспериментах на пучках СИ. Рассматриваются микрополосковые газовые камеры на подложках с электронной проводимостью. Показано, что такие детекторы, обладая пространственным разрешением существенно лучше 100 мкм для релятивистских заряженных частиц, способны эффективно работать при потоках до  $10^6 \text{ с}^{-1} \text{ мм}^{-2}$ , что по крайней мере на 2 порядка превышает быстродействие многопроволочных пропорциональных камер. Значительная часть обзора посвящена исследованию свойств каскадов газовых электронных умножителей (ГЭУ). В частности, обсуждается зависимость газового усиления и условий возникновения пробоя при облучении адронами от количества ГЭУ в каскаде, от распределения потенциалов между электродами ГЭУ в каскаде, а также от газовой смеси. Газовая микроструктурная технология широко применяется для разработки координатных детекторов. В качестве примера описаны детекторы на основе тройных ГЭУ для системы регистрации рассеянных электронов эксперимента КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М.

*Ключевые слова:* микрополосковая газовая камера, газовый электронный умножитель, микроструктурные газовые детекторы.

### Введение

Координатные детекторы, измеряющие траектории заряженных частиц, играют существенную роль практически в каждом эксперименте в физике элементарных частиц. Точное знание треков частиц дает информацию о точке взаимодействия, пробеге короткоживущих частиц, а при наличии магнитного поля – об импульсе частицы [1]. Значительный прогресс в развитии технологий координатных детекторов в последние десятилетия был обусловлен возрастающими требованиями со стороны физики элементарных частиц к пространственному разрешению, способности работать в условиях значительных фоновых потоков (быст-

родействию), стабильной работе при высоких интегральных дозах облучения (радиационная стойкость) и невысокой стоимости, позволяющей создавать системы с площадью чувствительной поверхности в сотни квадратных метров [2–4].

В конце 80-х гг. прошлого века основным типом координатных детекторов, применявшихся в экспериментах в физике элементарных частиц, были многопроволочные пропорциональные камеры (МПК) и их модификации [5–7]. Начавшееся во второй половине 1980-х гг. проектирование Большого адронного коллайдера (БАК) [8] в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) сразу же привело к пониманию того, что технология проволочных камер должна

\* Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (грант № 11.G34.31.0047).

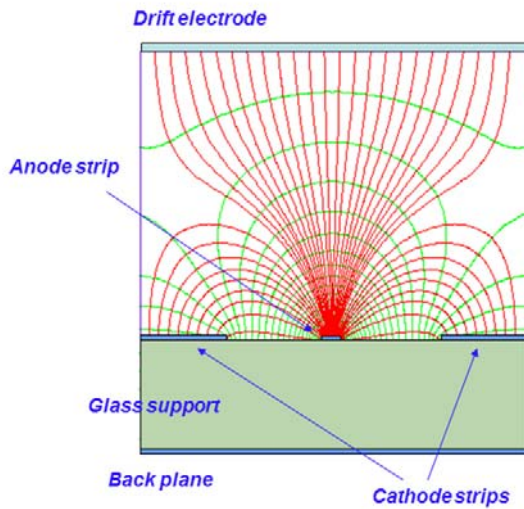


Рис. 1. Схема МПГК с эквипотенциалами и силовыми линиями электрического поля

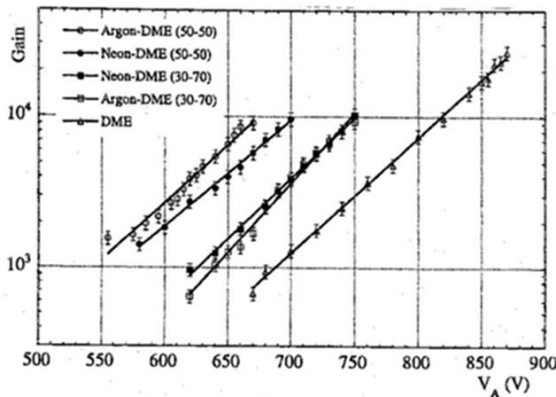


Рис. 2. Пример зависимости коэффициента газового усиления от напряжения между анодом и катодом МПГК для различных смесей благородных газов с диметилэфиром

быть существенно улучшена, чтобы будущие детекторы смогли работать в условиях высоких потоков частиц и высоких доз облучения вокруг места встречи в будущем коллайдере [9].

Изобретение в 1988 г. микрополосковой газовой камеры (МПГК) [10], казалось, решило эту проблему. Электроды в МПГК могли быть расположены по крайней мере в 10 раз плотнее, чем в МПК, что значительно увеличивало быстродействие этого типа детекторов. Были предприняты значительные усилия по изучению МПГК [11–17] и оптимизации ее характеристик, в особенности быстродействия [18–22] и устойчивости к

высоким дозам облучения [22–28]. Для координации работ по изучению и оптимизации характеристик МПГК в ЦЕРНе была создана коллаборация RD-28 [29]. В результате исследований в рамках RD-28 были решены многие технологические проблемы и предложены варианты МПГК, способной достигать быстродействия на 2 порядка выше, чем МПК, и обладающей достаточной радиационной стойкостью.

К середине 1990-х гг. МПГК успешно работали в ряде небольших экспериментов [3] и планировались к установке в больших экспериментах HERA-B [30] в DESY и CMS [2; 4; 31–34] в ЦЕРНе. В 1996 г. во время испытаний прототипов МПГК для HERA-B на адронном пучке было обнаружено, что в камерах регистрируется большое количество пробоев, разрушающих полосковую структуру детекторов [35]. После первого свидетельства того, что адроны инициируют пробой в МПГК, были предприняты значительные усилия по исследованию этого явления [28; 34; 36; 37]. Кроме того, были предложены альтернативные варианты детекторов, позволяющие увеличить устойчивость к пробоям и понизить вероятность возникновения пробоев в адронном пучке, такие как MicroMegas [38] и газовый электронный умножитель (ГЭУ) [39], а также различные комбинации ГЭУ с МПГК и другими микроструктурами [40–44]. В дальнейшем весь класс газовых детекторов, имеющих электроды в виде микроструктуры (с элементами субмиллиметрового размера, находящимися друг от друга на субмиллиметровых расстояниях), был назван микроструктурными газовыми детекторами (micro-pattern gaseous detectors, MPGD).

Дальнейшие исследования показали, что из всего многообразия предложенных во второй половине 1990-х гг. микроструктур [40; 41] наилучшими характеристиками с точки зрения устойчивости к пробоям в адронном пучке обладают каскадные структуры из ГЭУ, а точнее, тройной каскад из ГЭУ [41; 43–47]. К началу 2000-х гг. координатная система из детекторов на основе каскадов из трех ГЭУ была установлена и работала в эксперименте COMPASS [48] в ЦЕРНе, а в 2008–2010 гг. были запущены системы из детекторов на основе каскадов из трех ГЭУ в эксперименте PHENIX [49] на коллайдере RHIC в Брукхэйвенской национальной лаборатории в США, в детекторе

КЕДР [50] на коллайдере ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН, а также в детекторах LHCb [51] и TOTEM [52] в ЦЕРНе. Успешная работа детекторов на основе микроструктурных газовых технологий привела к дальнейшему повышению интереса к этому типу устройств. В 2008 г. в ЦЕРНе была организована коллаборация RD-51 [53], целью которой является дальнейшее исследование и совершенствование микроструктурных газовых детекторов.

### Микрополосковые газовые камеры

Микрополосковая газовая камера представляет собой тонкие параллельные металлические полоски, нанесенные на изолирующую подложку и присоединенные через одну к положительному и отрицательному полюсам источника высокого напряжения. Схема МПГК в разрезе, а также силовые линии и эквипотенциали электрического поля, рассчитанные для потенциала задней плоскости (back plane), равного потенциалу анодов, представлены на рис. 1.

Точная, но достаточно простая технология фотолитографии может обеспечить изготовление структуры с расстоянием между полосками до 100 мкм, что на порядок меньше характерных расстояний в проволочных камерах. Из рис. 1 видно, что при правильном выборе потенциалов все силовые линии, выходящие из дрейфового электрода заканчиваются на узкой анодной полоске. Однако размер лавины превышает ширину области анода, на которую собираются электроны из дрейфового зазора, и большая часть положительных ионов уходит на соседние катодные полоски. Этот эффект снижает накопление объемного заряда и обеспечивает более высокое быстродействие МПГК по сравнению с проволочными камерами.

Высокий коэффициент газового усиления был продемонстрирован в МПГК для различных газовых смесей, геометрии электродов и типов подложки [54; 23; 55]. На рис. 2 показан пример зависимости коэффициента газового усиления от напряжения между анодом и катодом для различных смесей благородных газов и диметилэфира [13].

Самые первые наблюдения за стабильностью газового усиления в МПГК показали, что детекторы, изготовленные на подложках с относительно высоким удельным сопро-

тивлением, таких как различные виды стеклок с ионной проводимостью, а также различные типы пластиковых пленок, демонстрируют изменения коэффициента газового усиления при облучении их относительно умеренными или высокими потоками излучения [18; 19; 56; 57]. Более систематическое изучение этих явлений показало, что они могут быть разбиты на два класса: быстрые воспроизводимые изменения и долговременная необратимая деградация. Явления второго типа, как правило, сопровождаются видимыми изменениями на пластине в облученной области в форме налета и / или повреждений полосок.

Кратковременные эффекты выражаются в быстром (секунды, минуты) изменении коэффициента усиления после начала измерений и, в свою очередь, могут быть разделены на глобальные и локальные изменения [56; 57]. Сразу после подачи высокого напряжения на электроды детектора газовое усиление начинает изменяться независимо от наличия потока излучения. Изменение усиления обычно контролируется короткими измерениями сигнала при облучении низким потоком частиц. Дополнительное изменение коэффициента газового усиления происходит в облученном районе детектора. Этот эффект может быть воспроизведен много раз в одном и том же месте детектора или в различных местах, и он, по-видимому, связан с поступлением положительных ионов на подложку из лавин. Это предположение подтверждается значительным ослаблением изменения газового усиления при облучении МПГК в камерах на подложках из стекла с высокой электронной проводимостью [18–20; 56]. Пример изменения (падения) коэффициента газового усиления в МПГК на высокоомном стекле с ионной проводимостью при различных потоках рентгеновских фотонов, подаваемых на детектор, показан на рис. 3 [19].

Систематическое исследование влияния удельного сопротивления подложки на быстродействие МПГК было проделано в работе [21]. Для этого были изготовлено несколько микро-полосковых пластин с удельным сопротивлением подложки в диапазоне от  $0,9 \times 10^9$  до  $2 \times 10^{12}$  Ом·см. При облучении этих МПГК достаточно высоким потоком рентгеновского излучения можно было наблюдать быстрые изменения коэффициента газового усиления, которые

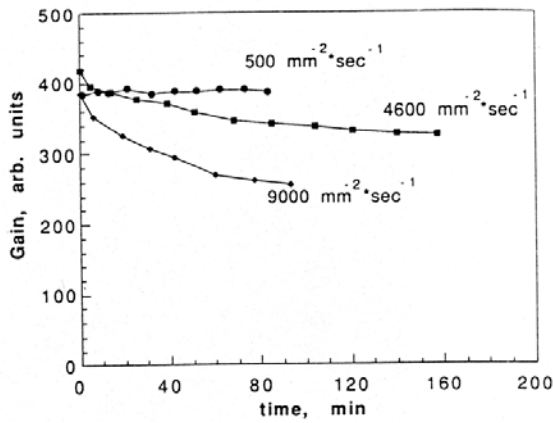


Рис. 3. Зависимости газового усиления от времени для различных потоков облучения МПГК на высокоомном стекле с ионной проводимостью

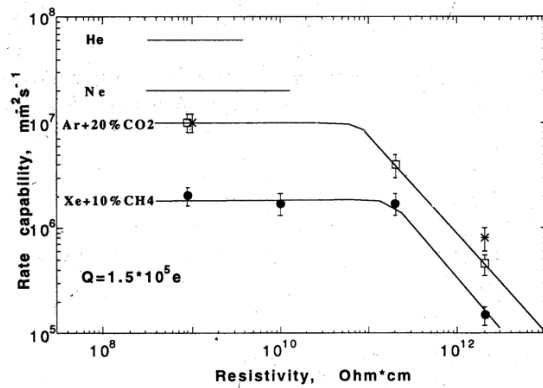


Рис. 4. Зависимость быстродействия (значения потока при падении коэффициента усиления на 10 %) от удельного сопротивления подложки для газовых смесей на основе Ar (пустые квадраты) и Xe (черные кружки). Точки в виде косых крестов взяты из работы [19]

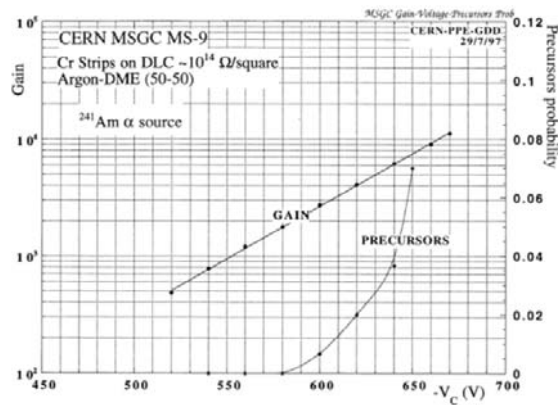


Рис. 5. Вероятность развития стриммеров (прекурсоров пробоя, правая шкала) и коэффициент усиления (левая шкала) при облучении альфа-частицами от  $^{241}\text{Am}$  МПГК с покрытием из алмазоподобного углерода

зависели, как от величины потока, так и от величины удельного сопротивления подложки.

Все результаты измерений быстродействия представлены на рис. 4. Показана зависимость быстродействия от удельного сопротивления подложки для газовых смесей на базе Ar и Xe. В качестве быстродействия берется поток, соответствующий падению коэффициента газового усиления 10 %. Из рис. 4 видно, что при более высоких значениях удельного сопротивления быстродействие ограничено изменением электрического поля из-за тока, протекающего вдоль резистивной поверхности, и быстродействие растет по мере уменьшения удельного сопротивления подложки.

Данные измерений для высокого удельного сопротивления подложки могут быть аппроксимированы прямой линией с отрицательным наклоном, которая соответствует обратно пропорциональной зависимости быстродействия от удельного сопротивления.

При приближении величины удельного сопротивления подложки к значению  $10^{11}$  Ом·см результаты измерений быстродействия выходят на плато в результате влияния объемного заряда в газе на электрическое поле. Значение быстродействия на плато зависит от газовой смеси, поскольку ионы Ar и Xe имеют различную подвижность. Данные о подвижности ионов можно найти в [58], и они приблизительно соответствуют соотношению значений быстродействия для соответствующих газовых смесей на плато (см. рис. 4). Также показаны горизонтальными линиями значения быстродействия на плато для смесей на основе Ne и Ne в предположении, что основными переносчиками положительного заряда в этих смесях будут именно ионы Ne и Ne. Значения подвижностей ионов Ar, Ne и Ne для этого расчета были взяты из [59].

Таким образом, измерения зависимости быстродействия от удельного сопротивления подложки в МПГК показали, что при низких удельных сопротивлениях основным фактором, определяющим быстродействие, является подвижность положительных ионов в газовой смеси. В том случае, если удельное сопротивление превосходит определенный порог, который примерно равен  $10^{11}$  Ом·см, быстродействие начинает снижаться при повышении сопротивления под-

ложки. Для смеси  $\text{Ar-CO}_2$  (80–20 %) и среднего заряда лавины  $1,5 \cdot 10^5 e$  было получено максимальное быстродействие  $10^7 \text{ мм}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

В середине 90-х гг. прошлого века МПГК предполагалось применить в двух больших экспериментах на адронных коллайдерах: в эксперименте HERA-B [60] на протонном накопителе HERA в DESY и в CMS [2] на БАК в ЦЕРНе. В HERA-B планировалось применить МПГК во внутреннем трекаре (Inner tracker, IT), где 184 камеры размером  $230 \times 250 \text{ мм}^2$  располагались около вакуумной камеры перпендикулярно оси пучка. МПГК в HERA-B должны были выдерживать поток частиц  $\sim 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , большую часть которого составляли адроны (пионы), а также дозу до 1 Мрад/год. Существовали определенные опасения, что адроны низких энергий, вызывающие большое энерговыделение в чувствительном газовом объеме, могут приводить к пробоям при высоких коэффициентах газового усиления, необходимых для получения высокой эффективности [36].

В 1996 г. во время испытаний прототипов МПГК для HERA-B на пучке пионов с импульсом 150 МэВ/с в Институте им. Поля Шерера (Paul Scherrer Institute (PSI), Швейцария) группа IT HERA-B обнаружила, что в детекторах непрерывно регистрируются пробои: уже в течение первого дня облучения потоком частиц  $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ мм}^{-2} \text{ с}^{-1}$  возникли множественные разрывы анодных и повреждения катодных полосок, а в некоторых случаях и выход из строя предусилителей, подключенных к полоскам [35]. После первого свидетельства того, что интенсивные потоки адронов инициируют пробои в МПГК и приводят к разрушению структуры детекторов и электроники, различными группами были проведены исследования природы возникновения и механизмов развития пробоев в МПГК [37; 61–65]. Прежде всего, стало понятно, что в любом случае, когда полный заряд в лавине превосходит определенный порог, значение которого находится между  $10^7$  и  $10^8$  электрон-ионных пар (предел Рейтера), поле объемного заряда приводит к тому, что из первичной лавины развивается неконтролируемый стриммер, в дальнейшем развивающийся в искровой разряд. В зависимости от условий разряда и от конкретной конструкции детектора разряд может приводить к разрушению полосок, короткому замыканию между анодной и катод-

ной полосками или разрыву анодных полосок.

Поведение детекторов под действием частиц с большими ионизационными потерями можно моделировать в лаборатории облучением альфа-частицами при помощи внешнего источника или добавкой в газ  $^{220}\text{Rn}$  продувкой через картридж, содержащий окись тория. Детальное исследование пробоев в МПГК, включающее в себя сравнение различных микроструктурных детекторов, предложенных как альтернатива МПГК, можно найти в [37]. Типичный результат измерения вероятности пробоя от напряжения для МПГК представлен на рис. 5 [37]. Показана зависимость коэффициента усиления (левая шкала) и вероятности развития стриммера (прекурсора пробоя, правая шкала) от напряжения между анодными и катодными полосками для МПГК с покрытием из алмазоподобного углерода, обеспечивающего поверхностную проводимость. Видно, что стриммеры возникают уже при усилении 2 000, что является недостаточным для эффективной регистрации релятивистских заряженных частиц в 3 мм слое газа.

При этом следует иметь в виду, что энерговыделение альфа-частиц от  $^{241}\text{Am}$  в МПГК в этих измерениях составляло не более 1 МэВ, что существенно меньше, чем возможное энерговыделение при облучении адронами с энергиями более 1 ГэВ, ожидаемыми в экспериментах на БАК [66].

Подробные исследования, описанные в работе [37], показали, что практически все микроструктурные детекторы, в которых усиление происходит в пределах одной ступени, как в МПГК, обладают близким пороговым значением усиления, при котором возникают пробои, составляющим для альфа-частиц от  $^{241}\text{Am}$  и  $^{220}\text{Rn}$  величину около 2 000. Это ограничение можно превзойти только в каскадных системах, где усиление происходит последовательно в нескольких усиливающих каскадах, разделенных между собой зонами умеренного электрического поля. Единственным элементом, который позволяет строить такие системы в газе, является ГЭУ [39].

Несмотря на проблему пробоев в условиях облучения адронами, МПГК остается детектором, обладающим высоким пространственным разрешением, быстродействием, и устойчиво работает при регистрации фото-

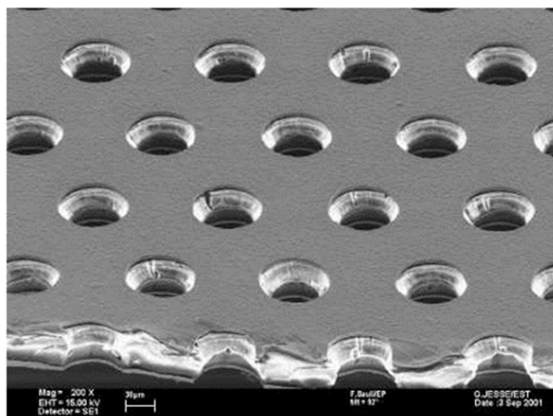


Рис. 6. Изображение ГЭУ на электронном микроскопе. Расстояние между центрами отверстий 140 мкм, диаметр отверстий в меди ~ 80 мкм

нов и электронов. Возможность применения МПГК в экспериментах с синхротронным излучением (СИ) была показана в [67; 68]. В дальнейшем эта идея была реализована английской группой в Rutherford Appleton Laboratory (RAL) [69].

### Газовый электронный умножитель

ГЭУ был изобретен Ф. Саули в 1996 г. в ЦЕРНе [39]. Он представляет собой тонкую изолирующую полимерную пленку, покрытую с обеих сторон слоями меди, в которой сделана регулярная структура из отверстий с очень высокой плотностью ~ 100 мм<sup>-2</sup> (рис. 6). Толщина изолирующей полимерной пленки, как правило, составляет 50 мкм, толщина меднения равна 5÷15 мкм. В качестве полимерной пленки в стандартном ГЭУ используется каптон<sup>1</sup>.

Если приложить разность потенциалов между верхним и нижним слоями меди в ГЭУ, то внутри отверстий образуются области высокого электрического поля, где может происходить газовое усиление. При правильном выборе полей над ГЭУ и под ГЭУ можно обеспечить полный сбор электронов из верхнего газового промежутка и передачу значительной части усиленного заряда в нижний газовый промежуток. Таким образом, ГЭУ представляет собой распределенный усилитель электронов в газе, который «транспортирует» первоначальное

распределение ионизации из газового промежутка над собой в газовый промежуток под собой с минимальными изменениями, обусловленными диффузией электронов. Если в ранних работах ГЭУ добавлялся как дополнительный усиливающий элемент к МПГК, для того чтобы добиться более высокого порога по усилению перед развитием пробоев [71–73], то вскоре стало понятно, что каскад из двух ГЭУ может обеспечить достаточное усиление для регистрации релятивистских заряженных частиц с помощью обычной печатной платы с нанесенными на нее электродами [74; 75].

При этом печатная плата могла обеспечить двухкоординатный съем сигнала при соответствующей конфигурации электродов. На рис. 7 представлена конфигурация платы детектора на основе каскадного ГЭУ [45] для эксперимента COMPASS [48] в ЦЕРНе. Электроды на плате расположены в два слоя. В каждом слое шаг полосок составляет 0,4 мм. При этом в верхнем слое полоски имеют ширину 80 мкм, а в нижнем слое – 350 мкм. Верхний слой изолирован от нижнего каптоновыми изолирующими полосками высотой 50 мкм, расположенными снизу вдоль полосок верхнего слоя.

COMPASS был первым большим экспериментом, в котором применены детекторы на основе каскадных ГЭУ со считыванием сигнала при помощи двухкоординатной полосковой структуры на печатной плате. В процессе подготовки к эксперименту были измерены основные характеристики детекторов, такие как пространственное и временное разрешение, а также быстродействие [76]. При этом с газовой смесью Ag + 30 % CO<sub>2</sub>, шагом полосок в считывающей структуре 0,4 мм в обоих направлениях и аналоговом способе съема сигнала были получены пространственное разрешение 46 мкм, временное разрешение 12,4 нс при облучении релятивистскими заряженными частицами и быстродействие более 10<sup>5</sup> мм<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> при облучении фотонами с энергией 8 кэВ.

В процессе оптимизации режимов работы детекторов для COMPASS и выбора количества каскадов ГЭУ было изучено поведение коэффициента газового усиления при различном количестве ГЭУ в каскаде в различных газовых смесях, сравнивались значения усиления перед развитием пробоя при облучении альфа-частицами в различных условиях, а также при облучении интенсив-

<sup>1</sup> Торговая марка компании «Дюпон», по химическому составу – полиимид.

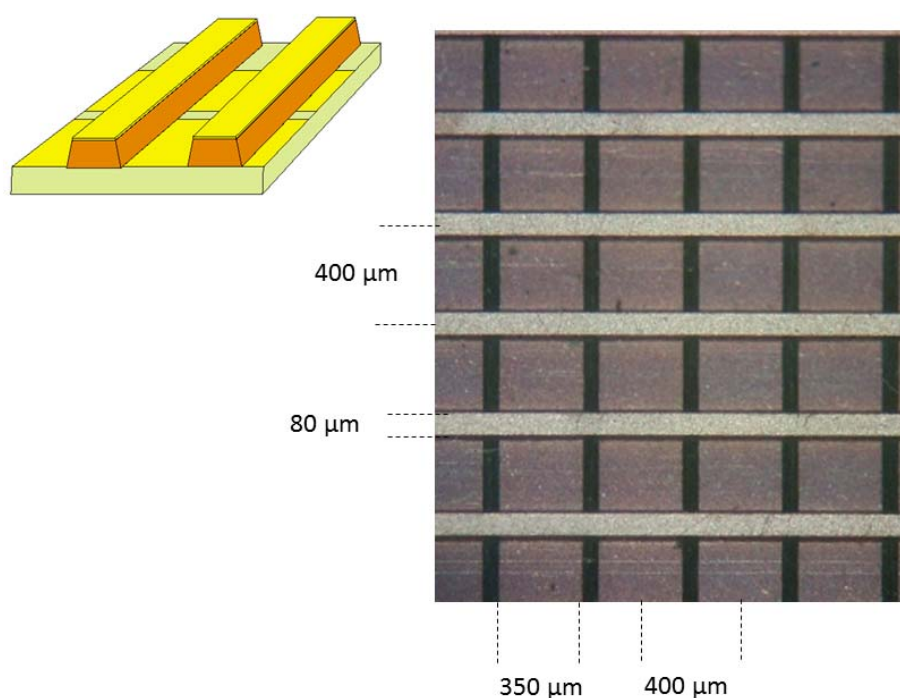


Рис. 7. Считывающая структура, использовавшаяся в детекторах с каскадными ГЭУ для эксперимента COMPASS в ЦЕРН. Показана схема расположения электродов в двух слоях (слева) и фотография структуры с размерами (справа)

ным потоком релятивистских пионов. Результаты этих работ подробно описаны в [46; 47] и представлены ниже.

Для контролируемой инициации пробоев детектор облучался  $\alpha$ -частицами. При этом можно было получить поток  $\alpha$ -частиц до нескольких сотен Герц, что позволяло измерять вероятность пробоя до величин близких к  $10^{-6}$  при сравнительно коротком времени экспозиции.

На рис. 8 показана зависимость эффективного коэффициента усиления от напряжения на ГЭУ в одиночном и каскадных ГЭУ. В каскадных детекторах напряжения на ГЭУ поддерживались равными, а значение напряженности электрического поля в переходных и индукционном промежутках было равно 3,5 кВ/см.

Последовательность событий, сопровождающих распространение пробоя в каскаде ГЭУ, начинается с высоковольтного разряда одного из ГЭУ (обычно самого последнего в каскаде). Вероятность такого разряда зависит от плотности первичной ионизации и от полного коэффициента усиления всего каскада. Уменьшение напряжения, при котором происходит пробой, с увеличением количе-

ства ГЭУ в детекторе отражает тот факт, что максимальный размер лавины увеличивается. Это можно увидеть на рис. 9, где вероятность пробоя в каскадных детекторах представлена в зависимости от эффективного коэффициента усиления.

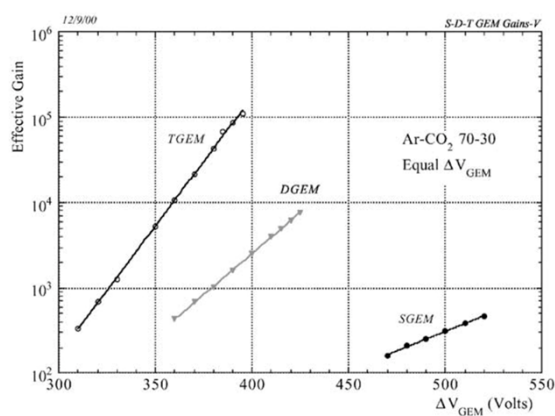


Рис. 8. Эффективный коэффициент усиления в одиночном ГЭУ (SGEM), каскаде из двух (DGEM) и трех (TGEM) ГЭУ в зависимости от напряжения на ГЭУ. Напряжения на всех ГЭУ в каскадных детекторах равны друг

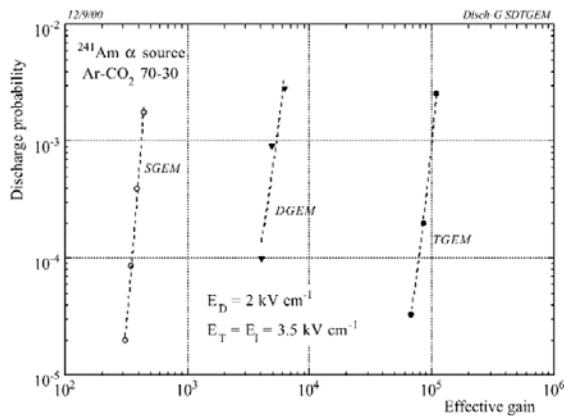


Рис. 9. Вероятность пробоя в зависимости от эффективного коэффициента усиления в одиночном ГЭУ и в каскаде из двух и трех ГЭУ

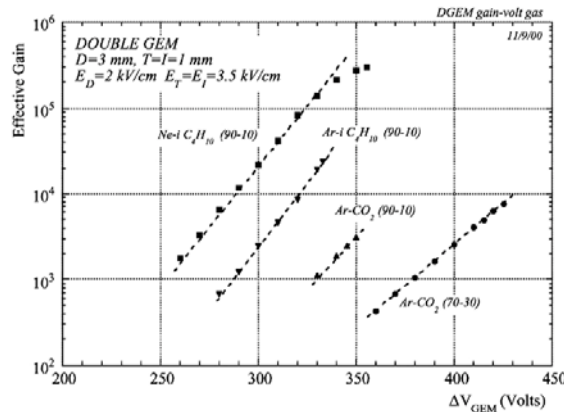


Рис. 10. Эффективный коэффициент усиления в каскаде из двух ГЭУ в различных газовых смесях

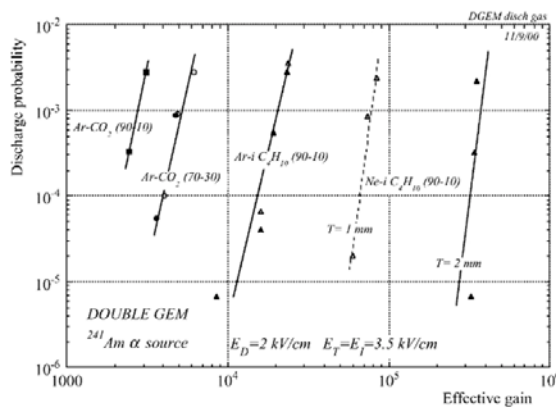


Рис. 11. Вероятность пробоя в каскаде из двух ГЭУ при облучении  $\alpha$ -частицами с различными газовыми смесями и различными переходными зазорами. Пустые маркеры соответствуют переходному зазору 1 мм, сплошные маркеры соответствуют переходному зазору 2 мм

В описываемых условиях добавление каждого следующего ГЭУ приводит к увеличению максимального коэффициента усиления примерно в 10 раз. При этом следует иметь в виду, что статистическая значимость нулевого значения вероятности соответствует отсутствию пробоев в течение 3 000 с, или вероятности менее  $6 \cdot 10^{-6}$  (средний поток  $\alpha$ -частиц в этих измерениях превышал 55 Гц).

Все измерения, представленные выше, были сделаны со смесью  $\text{Ag} + \text{CO}_2$  (70–30), являющейся удобным вариантом для детекторов, которые предполагается использовать в условиях высоких потоков частиц, поскольку она обеспечивает высокую скорость дрейфа и малую диффузию электронов, не имеет сложных компонент, способных к диссоциации и полимеризации, а также является негорючей и достаточно дешевой. Тем не менее, поскольку в более ранних работах сделаны наблюдения о возможности получения более высоких коэффициентов усиления с другими газовыми смесями [71], были проделаны систематические исследования газового усиления и пробойных пределов при облучении  $\alpha$ -частицами со смесями на основе  $\text{Ag}$ ,  $\text{Ne}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ , представленные ниже.

На рис. 10 показаны зависимости эффективного коэффициента усиления от напряжения на ГЭУ для детекторов с каскадом из двух ГЭУ для различных смесей. Измерения проводились с источником фотонов 5,9 кэВ низкой интенсивности, и коэффициент усиления определялся из величины сигнала с использованием электронной калибровки. Для всех измерений дрейфовый зазор составлял 3 мм с полем 2 кВ/см, а переходные и индукционные зазоры были равны 1 мм с полем 3,5 кВ/см. Напряжение на всех ГЭУ в каскадных детекторах поддерживалось одинаковым.

При облучении детектора внешним коллимированным источником  $\alpha$ -частиц была измерена вероятность пробоя в каскадах из двух ГЭУ с различными газовыми смесями (рис. 11).

Сравнение данных для смесей с  $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$  и с  $\text{CO}_2$  показывает, что даже малая добавка изобутана дает возможность получить существенно более высокий коэффициент усиления перед пробоем. В особенности это относится к смеси на основе  $\text{Ne}$ , которая позволяет даже в каскаде из двух ГЭУ по-



лучить максимальный коэффициент усиления, превышающий  $10^5$ . Сильная зависимость максимального коэффициента усиления перед пробоем от размера переходного промежутка наблюдается в смеси на основе неона в каскаде из двух ГЭУ (см. рис. 11). Для аргона данные для переходных зазоров 1 и 2 мм накладываются друг на друга. Можно предположить, что для неона механизм фотонной обратной связи между двумя ГЭУ выражен сильнее, чем для аргона, и хуже ослабляется при малом зазоре между ГЭУ.

Суммируя показанные результаты, следует отметить, что одиночный ГЭУ позволяет получить усиление в несколько тысяч, тогда как каскад из двух и трех ГЭУ дает возможность достичь усиления, превышающего соответственно  $10^4$  и  $10^5$ . Максимальный коэффициент усиления, достижимый перед развитием пробоя, резко уменьшается при облучении детектора сильно ионизирующими частицами. Наиболее вероятным объяснением этого эффекта является зависимость предела Рейтера от напряженности электрического поля. Иначе говоря, при меньшей напряженности электрического поля требуется больший заряд в лавине, чтобы произошел переход от пропорционального усиления к стриммеру, инициирующему пробой.

Следует отметить, что исследование предельных коэффициентов усиления и вероятностей пробоев при помощи облучения  $\alpha$ -частицами носит качественный характер, поскольку спектр энергосвечения в чувствительном объеме детектора при этом сильно отличается от реальной эксперименталь-

ной ситуации [66]. Поэтому окончательные выводы о возможности применения той или иной технологии в экспериментах на адронных коллайдерах можно делать только после соответствующих проверок с использованием адронных пучков высокой энергии.

### Детекторы на основе каскада из трех ГЭУ в системе регистрации рассеянных электронов эксперимента КЕДР

Детектор КЕДР на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М [77–79] обладает уникальной системой регистрации рассеянных электронов (СРЭ), предназначенной для изучения двухфотонных процессов [80; 81]. Кинематические параметры таких процессов определяются конечными электроном и позитроном, потерявшими часть энергии при двухфотонном взаимодействии, и которые в дальнейшем мы будем называть рассеянными электронами (РЭ). Регистрация обоих РЭ («double-tag» эксперимент) позволяет полностью определить параметры двухфотонной системы. Основные физические задачи, которые предполагается изучать с помощью СРЭ, это измерение полного сечения  $\gamma^* \gamma^* \rightarrow \text{hadrons}$  при малых  $Q^2$ , изучение  $C$ -четных резонансов, поиск  $C$ -четных экзотических состояний.

СРЭ использует магнитную систему накопителя в качестве спектрометра (рис. 12). Дипольные магниты позволяют регистрировать РЭ, покидающие точку взаимодействия под нулевым углом. РЭ, обладающие более низкой энергией, выводятся магнитным полем с равновесной орбиты и затем регист-

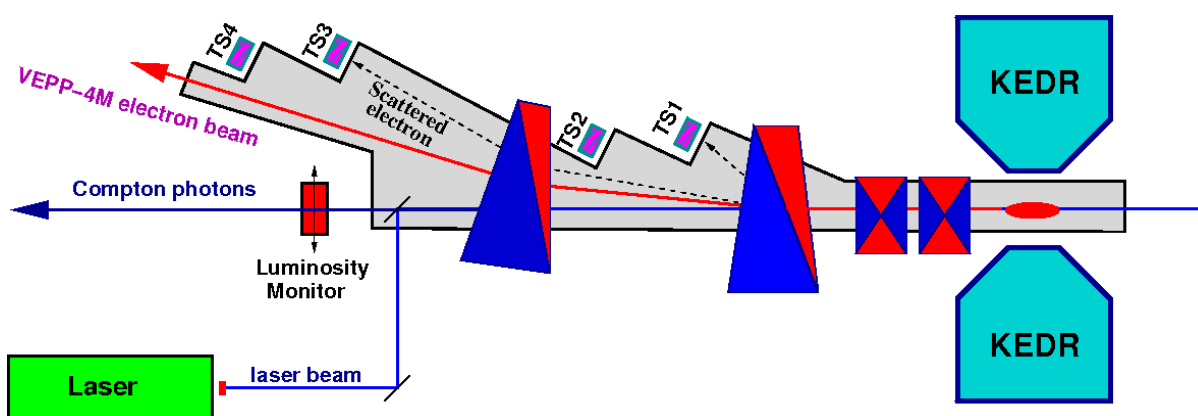


Рис. 12. Схема одного плеча системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР

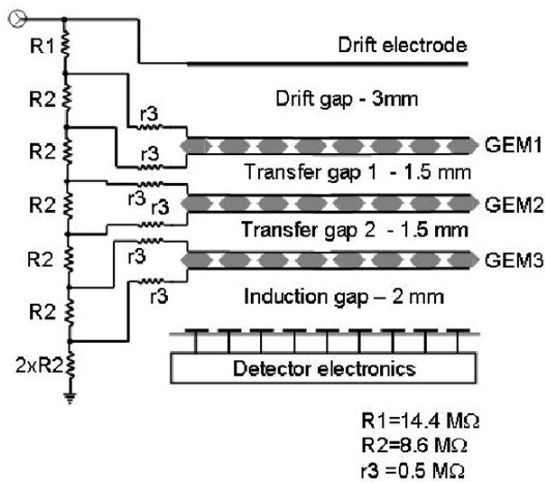


Рис. 13. Схема детектора на основе трехкаскадного ГЭУ для модернизации СРРЭ

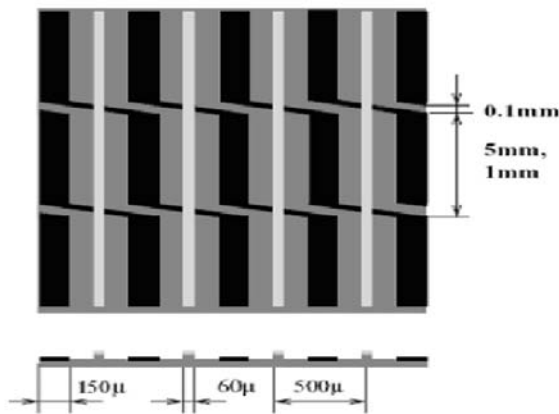


Рис. 14. Схема слоев считывающей структуры с малоугловым стерео считыванием. Верхний слой обозначен светло-серым цветом, нижний слой – черным

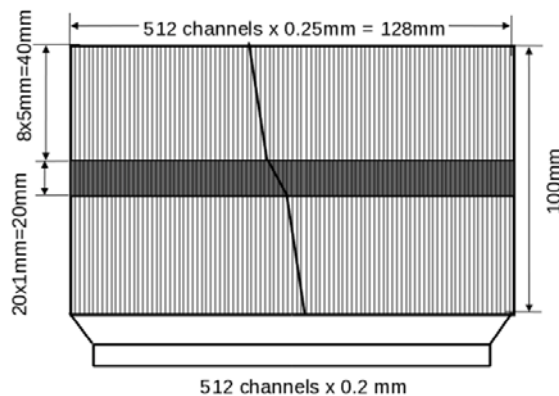


Рис. 15. Конфигурация считывающей структуры с переменным углом наклонных полосок стерео слоя

рируются в одной из 4-х координатных станций системы  $TS_1 - TS_4$ . Квадрупольные линзы фокусируют РЭ таким образом, что их поперечная координата в плоскости детекторов почти не зависит от угла вылета из точки взаимодействия. Таким образом, измеряя координату, можно однозначно определить энергию РЭ.

Исходная СРРЭ состояла из 8 станций на основе дрейфовых трубок, которые позволяли измерять координату трека РЭ в плоскости орбиты пучка со средней точностью  $\sim 300 \text{ мкм}$  [80; 81]. Для того чтобы улучшить пространственное разрешение и добавить возможность подавления фона от однократного тормозного излучения (ОТИ), было проведено усовершенствование системы [82; 83]. Каждая станция СРРЭ была дополнена двухкоординатным детектором высокого разрешения на основе каскада газовых электронных умножителей, расположенным перед годоскопом из дрейфовых трубок. Детекторы на основе ГЭУ должны были обеспечить следующие параметры:

- пространственное разрешение в плоскости орбиты не хуже  $100 \text{ мкм}$ ;
- двухкоординатный съем информации для подавления фона от ОТИ;
- надежную реконструкцию многотрековых событий;
- быстродействие станции не менее  $10^6 \text{ Гц}$  и локально не менее  $10^5 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;
- чувствительная область должна начинаться как можно ближе к вакуумной камере.

Для модернизации СРРЭ были выбраны детекторы на основе каскада из трех ГЭУ, поскольку они полностью удовлетворяют перечисленным условиям. Эти детекторы могут обеспечить пространственное разрешение для треков минимально ионизирующих частиц до  $\sim 50 \text{ мкм}$  и двухкоординатный съем сигнала [84]. Быстродействие таких детекторов превышает  $10^5 \text{ мм}^{-2}\text{с}^{-1}$  [76], и они демонстрируют стабильную работу без пробоев при высоком коэффициенте газового усиления [47]. В настоящее время модернизация системы закончена и все детекторы работают.

Детекторы для модернизации СРРЭ включают в себя каскад из трех ГЭУ, расположенных на расстоянии  $1,5 \text{ мм}$  друг от друга. Каждый ГЭУ имеет гексагональную структуру из отверстий диаметром  $80 \text{ мкм}$ , расположенных с шагом  $140 \text{ мкм}$ . Толщина

ГЭУ равна 50 мкм. Расстояние между нижним ГЭУ и считывающей полосковой структурой составляет 2 мм, зазор между верхним ГЭУ и дрейфовым электродом равен 3 мм (рис. 13).

Считывающая структура детектора является двухслойной (рис. 14). Верхний слой содержит прямые полоски шириной 60 мкм. Нижний слой (стереополоски) состоит из полосок шириной 150 мкм, разделенных вдоль на короткие прямые секции, и наклонных перемычек, соединяющих соседние прямые секции так, что в среднем образуются полоски, наклоненные под определенным углом к прямым полоскам верхнего слоя. Такая конфигурация нижнего слоя обеспечивает равномерное наведение заряда на наклонную полоску, не зависящее от координаты вдоль полоски. Отношение ширины прямых и наклонных полосок выбрано таким образом, чтобы обеспечить равное деление наведенного заряда между слоями.

Конфигурация считывающей полосковой структуры и ее размеры показаны на рис. 15. Наклон стереополосок переменный. Внутри зоны шириной 20 мм вокруг центральной оси детектора наклон полосок нижнего слоя равен  $30^\circ$ . Вне этой зоны наклон полосок нижнего слоя составляет примерно  $11^\circ$ . Такая структура обеспечивает более высокое пространственное разрешение в вертикальном направлении в центральной зоне, которая соответствует области вокруг плоскости орбиты пучка. Все ГЭУ и платы со считывающей структурой были произведены в мастерской ЦЕРН.

Всего изготовлено 12 детекторов: 3 детектора для станций TS4 имеют размер чувствительной области  $256 \times 100 \text{ мм}^2$ ; 9 – для станций TS1-TS3 с размером чувствительной области  $128 \times 100 \text{ мм}^2$ . Большие детекторы имеют по 512 каналов в слое с прямыми полосками и в стереослое, малые – по 256 каналов в слое. Восемь детекторов установлены в СРРЭ. Комплект из 4-х детекторов является запасным и использовался в тестах с космическими частицами.

Изучение основных параметров детекторов на основе ГЭУ проводилось в серии измерений с космическими частицами. Три детектора были закреплены один над другим на расстоянии около 3 см. Пластиковые сцинтилляционные счетчики были установлены сверху и снизу от детекторов на основе ГЭУ. Сигнал запуска формировался от

совпадения между сигналами от сцинтилляционных счетчиков. Детекторы работали со смесью  $\text{Ar} - 25\% \text{CO}_2$ . Эффективность центрального детектора определялась как отношение числа событий, в которых имелись сигналы от треков в наклонном и прямом слоях в центральном детекторе, к общему числу событий с треками, определенными по сигналам в верхнем и нижнем детекторах. Зависимость эффективности от газового усиления показана на рис. 16. Коэффициент газового усиления определялся как средняя величина суммы сигналов в наклонном и прямом слоях, умноженная на калибровочный коэффициент, измеренный при электронной калибровке.

Из рисунка видно, что плато эффективности начинается при усилении  $\sim 25\,000$

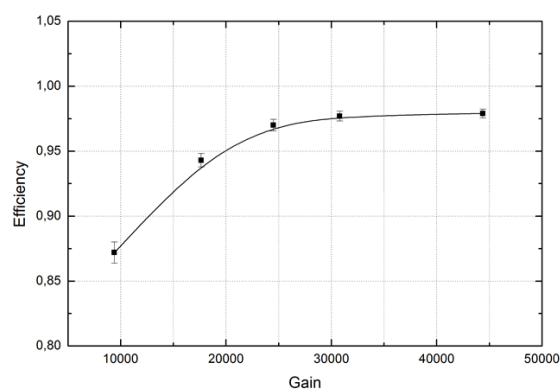


Рис. 16. Эффективность в зависимости от газового усиления, измеренная с помощью космических частиц

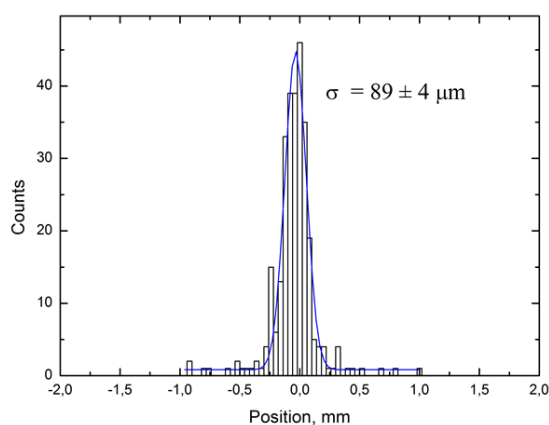


Рис. 17. Распределение разностей между вычисленной и измеренной координатами трека в направлении, перпендикулярном прямым полоскам. Пространственное разрешение детектора приблизительно равно 73 мкм

и величина эффективности на плато составляет около 98 %. Измерение пространственного разрешения проводилось при усилении  $\sim 30\,000$ . На рис. 17 показано распределение разностей между координатой точки пересечения треком плоскости детектора, вычисленной по данным из верхнего и нижнего детекторов, и измеренной координатой трека в центральном детекторе. Измеренная координата трека определялась по сигналам в детекторе методом центра тяжести (ЦТ).

Стандартное отклонение распределения Гаусса, подогнанного к распределению на рис. 17 составляет  $\sim 89$  мкм. Поскольку все детекторы, использованные в измерении, были одинаковыми, разрешение одного детектора может быть вычислено из результата измерения как

$$\sigma_{\text{det}} = \sigma_{\text{meas}} / \sqrt{3/2},$$

где  $\sigma_{\text{det}}$  – разрешение детектора, а  $\sigma_{\text{meas}}$  – измеренное стандартное отклонение. Пространственное разрешение детектора равно  $\sim 73$  мкм.

Система из 8 детекторов на основе ГЭУ работает в составе эксперимента КЕДР с начала сезона 2010–2011 гг. (ноябрь 2010). Первый опыт эксплуатации показал, что система достаточно надежна, и в детекторах не возникает пробоев, несмотря на то, что они расположены вплотную к вакуумной камере, и в них часто попадают интенсивные потоки частиц при потерях и сбросах пучка. После начальной подстройки высокого напряжения эффективность всех детекторов находится в диапазоне 95–98 % при газовом усилении в диапазоне 25 000–40 000.

### Заключение

Газовая микроструктурная технология успешно применяется в координатных детекторах для точного измерения положения треков заряженных частиц в экспериментах по физике элементарных частиц. Субмиллиметровые размеры усиливающих и регистрирующих элементов микроструктурных детекторов обеспечивают также высокое быстродействие этих устройств, т. е. способность эффективно работать в условиях высоких фоновых потоков частиц.

В настоящем обзоре представлены два типа газовых микроструктурных детекто-

ров: микрополосковые газовые камеры и детекторы на основе каскадов газовых электронных умножителей. МПГК обладают уникальным быстродействием, однако могут эффективно работать только в отсутствие адронов в потоке регистрируемых частиц. Каскад ГЭУ позволяет регистрировать треки частиц с пространственным разрешением лучше 100 мкм и в присутствии потока фоновых частиц до  $10^6$  мм<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. При этом каскады ГЭУ эффективно работают в потоке адронов, обеспечивая коэффициент газового усиления до  $10^5$ .

В настоящее время детекторы на основе каскадов ГЭУ работают в составе экспериментов COMPASS [48] в ЦЕРНе, PHENIX [49] на коллайдере RHIC в Брукхэйвенской национальной лаборатории в США, в детекторе КЕДР [50] на коллайдере ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН, а также в детекторах LHCb [51] и TOTEM [52] в ЦЕРНе.

### Список литературы

1. Grupen C., Shwartz B. Particle detectors. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2008.
2. Aarnio P., Acharya B. S., Aguraiuja R., Shekhtman L., et al. The Compact Muon Solenoid, Technical Proposal // CERN/LHCC 94-38. Geneva, 1994.
3. Shekhtman L. I. Tracking with Micro-Strip Gas Chambers // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. Vol. A379. P. 380–383.
4. Aarnio P.A., Abbaneo D., Adam W., Shekhtman L. I. et al. CMS. The Tracker Project. Technical Design Report // CERN/LHCC 98-6. Женева, 1998.
5. Charpak G., Bouclier R., Bressani T. et al. The Use of Multiwire Proportional Counters to Select and Localize Charged Particles // Nucl. Instrum. Methods. 1968. Vol. 62. P. 262.
6. Sauli F. Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers // Препринт CERN-77-09. Женева, 1977.
7. Sauli F. New Developments in Gaseous Detectors // Techniques and Concepts of High-Energy Physics / Ed. by T. Ferbel. N. Y.: Plenum, 1983.
8. Brianti G., Boussard D., Burnod L. et al. The Large Hadron Collider (LHC) in the LEP Tunnel // Part. World. 1990. Vol. 1. No. 4. P. 104–109.

9. The Feasibility of Experiments at High Luminosity at the Large Hadron Collider / Ed. by J. H. Mulvey // Препринт CERN-88-02. Женева, 1988.
10. Oed A. Position-Sensitive Detector with Microstrip Anode for Electron Multiplication with Gases // Nucl. Instrum. Methods. 1988. Vol. A263.
11. Bouclier R., Florent J. J., Gaudaen J., Sauli F., Shekhtman L. Development of Microstrip Gas Chambers on Thin Plastic Supports // Nucl. Instrum. and Methods. 1992. Vol. A315. P. 521.
12. Bouclier R., Florent J. J., Gaudaen J., Million G., Sauli F., Shekhtman L. Microstrip Gas Chambers on Thin Plastic Supports // Proc. Joint Inter. Lepton-Photon Symp. and Europhysics Conf. on High En. Physics. Geneva, 1991. Vol. 1. P. 242.
13. Beckers T., Bouclier R., Garabatos Ch., Shekhtman L. I. et al. Optimization of Microstrip Gas Chamber Design and Operating Conditions // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. Vol. A346. P. 95.
14. Allunni L., Bouclier R., Fara G., Shekhtman L. I. et al. Performance of MSGC on Electronically and Ionically Conductive Substrata in Various Operational Conditions // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. Vol. A348. P. 344.
15. Bouclier R., Capeans M., Garabatos C., Shekhtman L. et al. Micro-Strip Gas Chambers with thin Electron-Conducting Layers // Proc. Int. Workshop on MSGC. Legnaro, 1994. P. 39.
16. Bouclier R., Capeans M., Evans J., Shekhtman L. et al. Optimization of Design and Beam-Test of Micro-Strip Gas Chambers // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. Vol. A367. P. 163–167.
17. Bondar A., Buzulutskov A., Nagaslaev V., Shekhtman L. et al. A Semiconducting AlN Coating for Microstrip Gas Chambers // Nucl. Instrum. and Methods. 1997. Vol. A394. P. 265.
18. Bouclier R., Florent J. J., Gaudaen J., Shekhtman L. et al. High-Rate Performance of Microstrip Gas Chambers on Glass and Plastic Supports // Nucl. Instrum. and Methods. 1992. Vol. A323. P. 240.
19. Minakov G. D., Pestov Yu. N., Prokopenko V. S., Shekhtman L. Performance of Gas Microstrip Chambers on Glass Substrata with Ionic and Electronic Conductivity // Nucl. Instrum. and Methods. 1993. Vol. A326. P. 566.
20. Bouclier R., Million G., Ropelewski L., Sauli F., Pestov Yu. N., Shekhtman L. Performance of Gas Microstrip Chambers on Glass Substrata with Electronic Conductivity // Nucl. Instrum. and Methods. 1993. Vol. A332. P. 100.
21. Pestov Yu. N., Shekhtman L. I. Influence of the Bulk Resistivity of Glass with Electronic Conductivity on the Performance of Microstrip Gas Chamber // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. Vol. A338. P. 368.
22. Bohm J., Bouclier R., Capeans M., Shekhtman L. et al. High Rate Operation and Life-Time Studies with Micro-Strip Chambers // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. Vol. A360. P. 34–41.
23. Bouclier R., Garabatos C., Manzin G., Shekhtman L. et al. Ageing Studies with Micro-Strip Gas Chambers // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. Vol. A348. P. 109.
24. Bouclier R., Capeans M., Garabatos C., Shekhtman L. et al. Ageing Studies with Micro-Strip Gas Chambers // Proc. Int. Workshop on MSGC. Legnaro, 1994. P. 48.
25. Bateman J. E., Connolly J. F., Pestov Yu. N., Shekhtman L. I. et al. Some Lifetime Characteristics of Gas Microstrip Detectors Fabricated on Semiconductive Glass // Proc. Int. Workshop on MSGC. Legnaro, 1994. P. 22.
26. Bouclier R., Capeans M., Garabatos C., Shekhtman L. et al. Ageing Studies with Micro-Strip Gas Chambers // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1995. Vol. 44. P. 557–566.
27. Bouclier R., Capeans M., Garabatos C., Shekhtman L. et al. Ageing of Microstrip Gas Chambers: Problems and Solutions // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. Vol. A381. P. 289.
28. Boimska B., Bouclier R., Capeans M., Shekhtman L. et al. Study of Ageing and Gain Limits of Microstrip Gas Chambers at High Rates // Proc. Suppl. Nuclear Physics B. 1998. Vol. 61B. P. 498–503.
29. Bouclier R., Garabatos C., Gaudaen J. et al. Development of Gas Micro-Strip Chambers for High Rate Radiation Detection and Tracking // Препринт CERN-DRDC-92-30. Женева, 1992.
30. Lohse T., Hast C., Issever S. et al. An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA

Proton Ring // Препринт DESY-PRC 94/02. Гамбург, 1994.

31. *Adriani O., Angelini F., Bacchetta N., Shekhtman L. et al.* Performance of a Prototype of the CMS Central Detector // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. Vol. A367. P. 189–192.

32. *Naglaslaev V., Baiboussinov B., Bondar A., Shekhtman L., Sokolov A.* Performance of MSGC in High Longitudinal Magnetic Field // Proc. of the Int. Workshop on MSGC / Eds. D. Contardo, F. Sauli. Lyon, 1995. P. 115.

33. *Angelini F., Bacchetta N., Bellazzini R., Shekhtman L. et al.* Study of the bunch crossing identification at LHC using microstrip gas chambers // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. Vol. A368. P. 345.

34. *Ackermann M., Atz S., Aulchenko V., Shekhtman L. et al.* Large Scale Test of Wedge Shaped Micro Strip Gas Counters // Nucl. Instrum. and Methods. 1999. Vol. A436. P. 313–325.

35. *Bagaturia Y., Baruth O., Dreisc H. B. et al.* Studies of Aging and HV Break down Problems during Development and Operation of MSGC and GEM Detectors for the Inner Tracking System of HERA-B // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. Vol. A490. P. 223–242.

36. *Bouclier R., Capeans M., Garabatos C., Shekhtman L. et al.* On some Factors Affecting Discharge Conditions in Micro-Strip Gas Chambers // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. Vol. A365. P. 65–69.

37. *Bressan A., Hoch M., Pagano P. et al.* High Rate Behavior and Discharge Limits in Micro-Pattern Detectors // Nucl. Instrum. and Meth. 1999. Vol. A424. P. 321–342.

38. *Giomataris Y., Rebourgeard Ph., Robert J. P. et al.* MICROMEGAS: A High-Granularity Position-Sensitive Gaseous Detector for High Particle-Flux Environments // Nucl. Instrum. Methods. 1996. Vol. A376. P. 29.

39. *Sauli F.* A New Concept for Electron Amplification in Gas Detectors // Nucl. Instrum. Methods. 1997. Vol. A386. P. 531.

40. *Sauli F., Sharma A.* Micropattern Gaseous Detectors // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1999. Vol. 49. P. 341–88.

41. *Shekhtman L.* Micro-Pattern Gaseous Detectors // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. Vol. A494. P. 128–141.

42. *Bondar A., Buzulutskov A., Shekhtman L., Sokolov A., Tatarinov A.* Experience with

Wedge MSGC-GEM and Wedge Micro-Groove / GEM Structures in High Intensity Hadron Beam // International Workshop on Micro-Pattern Gas Detectors. Orsay, 1999. P. 65–68.

43. *Ageron M., Albert A., Barvich T., Shekhtman L. et al.* Robustness Test of a System of MSGC + GEM Detectors at the Cyclotron Facility of the Paul Scherrer Institute // Nucl. Instrum. and Methods. 2001. Vol. A471. P. 380.

44. *Ageron M., Albert A., Barvich T., Shekhtman L. et al.* Experimental and Simulation Study of the Behaviour and Operation Modes of MSGC + GEM Detectors // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. Vol. A489. P. 121–139.

45. *Ketzer B., Bachmann S., Capeans M., Shekhtman L. et al.* GEM Detectors for COMPASS // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2001. Vol. 48. No. 4. P. 1065.

46. *Bachmann S., Bressan A., Ketzer B., Shekhtman L. et al.* Performance of GEM Detectors in High Intensity Particle Beams // Nucl. Instrum. and Methods. 2001. Vol. A470. P. 548–561.

47. *Bachmann S., Bressan A., Capeans M., Shekhtman L. et al.* Discharge Studies and Prevention in the Gas Electron Multiplier (GEM) // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. Vol. A479. P. 294–308.

48. *Baum G., Куунярäinen J., Tripet A. et al.* COMPASS: A Proposal for a Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy // Препринт CERN/SPSLC 96-14. Женева, 1996.

49. *Fraenkel Z., Kozlov A., Naglis M., Ravinovich I., Shekhtman L. et al.* A Hadron Blind Detector for the PHENIX Experiment at RHIC // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. Vol. A546. P. 466–480.

50. *Aulchenko V. M., Beloborodova O. L., Bobrov A. V., Shekhtman L. I. et al.* Operation of the Triple-GEM Detectors in the Tagging System of the KEDR Experiment on the VEPP-4M Collider // J. of Instrum. 2011. Vol. 6. P07001.

51. *Alves A. A. Jr., Filho L. M. A., Barbosa A. F., Shekhtman L. I. et al.* The LHCb Detector at the LHC // J. of Instrum. 2008. Vol. 3. S08005.

52. *Antchev G., Aspell P., Atanassov I. et al.* The TOTEM Detector at LHC // Nucl. Instrum. and Methods. 2010. Vol. A617. P. 62–66.

53. Pinto S. D. RD51, an R&D Collaboration for Micropattern Gaseous Detectors // Препринт arXiv:0907.2673. 2009.
56. Bateman J. E., Connolly J. F. Substrate Induced Instability in Gas Microstrip Detectors // Препринт RAL-92-085. Chilton, 1992.
57. Bouclier R., Florent J. J., Gaudaen J., Ropelewski L., Sauli F. Microstrip Gas Chambers on Thin Plastic Supports // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1992. Vol. NS-39. P. 650.
58. Ye Z., Sood R. K., Sharma D. P., Manchanda R. K., Fenton K. B. Gas Amplification in High Pressure Proportional Counters // Nucl. Instrum. and Methods. 1993. Vol. A329. P. 140.
59. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976.
60. Lohse T., Hast C., Issever S. et al. HERA-B: An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring // Препринт DESY-PRC 94/02. Hamburg, 1994.
61. Peskov V., Ramsey B. D., Kolodziejczak J. J. et al. Feedback and Break-Downs in Microstrip Gas Counters // Nucl. Instrum. and Methods. 1997. Vol. A397. P. 243.
62. Peskov V., Ramsey B.D., Fonte P. Breakdown Features of Various Microstrip-Type Gas Counter Designs and their Improvements // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1998. Vol. NS-45. P. 244.
63. Schmidt B. Microstrip Gas Chambers: Recent Developments, Radiation Damage and Long-Term Behavior // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. Vol. A419 P. 230.
64. Keller S., Werthenbach U., Zech G. et al. Sparks in MSGCs // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. Vol. A419. P. 382.
65. Fonte P., Peskov V., Ramsey B. D. et al. Rate and Gain Limitations of MSGCs and MGCs Combined with GEM and other Preamplification Structures // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. Vol. A419. P. 405.
66. Huhtinen M. Factors to Scale Highly Ionizing Particle Rates in MSGC Irradiation Tests to the LHC Radiation Environment // CMS Note 1997/073. Geneva, 1997.
67. Baru S. E., Neustroev V. V., Papanestis A., Savinov G. A., Shekhtman L. I. One Dimensional X-ray MSGC Detector // Proc. of the Int. Workshop on MSGC / Eds. D. Contardo, F. Sauli. Lyon, 1995. P. 27.
68. Baru S. E., Neustroev V. V., Papanestis A., Shekhtman L. I. et al. One Dimensional X-ray MSGC Detector for Synchrotron Radiation Experiments and Medical Imaging // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. Vol. A405. P. 274–278.
69. Bateman J. E., Connolly J. F., Derbyshire G. E. et al. A Gas Microstrip Wide Angle X-ray Detector for Application in Synchrotron Radiation Experiments // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. Vol. A477. P. 340–346.
70. Bachmann S., Bressan A., Ropelewski L. et al. Charge Amplification and Transfer Processes in the Gas Electron Multiplier // Nucl. Instrum. and Methods. 1999. Vol. A438. P. 376.
71. Bouclier R., Dominik W., Hoch M. et al. New Observations with the Gas Electron Multiplier (GEM) // Nucl. Instrum. and Methods. 1997. Vol. A396. P. 50.
72. Beaumont W., Beckers T., De Troy J. et al. Studies of an MSGC Equipped with a GEM Grid as a Tracking Device // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. Vol. A419. P. 394.
73. Brom J. M., Lounis A., Ripp I. et al. Comparative Studies of MSGC and MSGC – GEM Detectors // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. Vol. A419. P. 400.
74. Buttner C., Capeáns M., Dominik W. et al. Progress with the Gas Electron Multiplier // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. Vol. A409. P.79.
75. Benlloch J., Bressan A., Capeáns M. et al. Further Developments and Beam Tests of the Gas Electron Multiplier (GEM) // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. Vol. A419. P. 410.
76. Bressan A., Labbé J. C., Pagano P. et al. Beam Tests of the Gas Electron Multiplier // Nucl. Instrum. and Methods. 1999. Vol. A425. P. 262.
77. Anashin V. V., Aulchenko V. M., Baibusinov B. O. et al. Status of the KEDR Detector // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. Vol. A478. P. 420–425.
78. Kiselev V., Anachin V., Anchugov O. et al. VEPP-4M Collider: Status and Plans // Proc. of EPAC'98. Stockholm, 1998. P. 400.
79. Smaluk V. Accelerator Physics Issues of the VEPP-4M at Low Energy // Proc. of EPAC'04. Luzern, 2004. P. 749.

80. *Aulchenko V. M., Baibusinov B. O., Baru S. E. et al.* Detector KEDR Tagging System for Two-Photon Physics // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. Vol. A355. P. 261.

81. *Aulchenko V. M., Baibusinov B. O., Baru S. E. et al.* Detector KEDR Tagging System for Two-Photon Physics // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. Vol. A379. P. 360.

82. *Aulchenko V. M., Bondar A. E., Buzulitskov A. F., Shekhtman L. I. et al.* Upgrade of the KEDR Tagging System // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. Vol. A494. P. 241–245.

83. *Aulchenko V. M., Bobrov A. V., Bondar A. ., Shekhtman L. I. et al.* Triple-GEM Detectors for KEDR Tagging System // Nucl. Instrum. and Methods. 2009. Vol. A598. P. 112–115.

84. *Ketzer B., Altunbas C., Dehmelt K. et al.* Triple-GEM Tracking Detector for COMPASS // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2002. Vol. NS-49. P. 2403.

*Материал поступил в редколлегию 20.05.2013*

**L. I. Shekhtman, A. D. Dolgov**

### **FAST HIGH RESOLUTION POSITION-SENSITIVE GASEOUS DETECTORS**

The present review describes a new coordinate detectors based on gas micro-pattern technology, which are applied in experiments in elementary particle physics and with SR beams. The micro-strip gas chambers (MSGC) on substrates with electronic conductivity are presented in the paper. Such detectors are shown to have spatial resolution better than 100 micron and to be able to effectively operate at particle rates up to  $10^6 \text{ s}^{-1}\text{mm}^{-2}$ , that at least by two orders of magnitude higher than rate capability of multiwire proportional chambers. Essential part of the review is devoted to studies of the cascades of gas electron multipliers (GEM). In particular, the dependence of gas amplification and conditions of a discharge occurrence on the number of GEMs in cascade, on the distribution of potentials between GEMs in cascade and on gas mixture in the presence of hadron flux are discussed. Gas micro-pattern technology is widely used for the development of coordinate detectors. In the present review we describe as an example the detectors with triple GEM cascades for the tagging system of the KEDR experiment at the VEPP-4M collider.

*Keywords:* Micro-strip gas chamber, Gas electron multiplier, Micro-pattern gas detectors