

**ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 539.107.422

**ТОЛСТЫЙ ГАЗОВЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ С
ПРОВОЛОЧНЫМИ ФОКУСИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ**

©2026 г. В. И. Разин

Институт ядерных исследований Российской академии наук

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

e-mail: razin@inr.ru

Поступила в редакцию 06.03.2025 г.

После доработки 27.06.2025 г.

Принята к публикации 27.08.2025 г.

Рассмотрены факторы, определяющие стабильность усиления в толстых газовых электронных умножителях. Представлена новая конструкция детектора подобного типа с проволочными фокусирующими электродами. Тестовые испытания в лабораторных условиях показали перспективность его применения в интенсивных пучках ускорителей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Толстый газовый электронный умножитель TGEM (Thick Gas Election Multiplayer) находит широкое применение в технике ядерно-физического эксперимента наряду со своим предшественником – газовым электронным умножителем GEM (Gas Election Multiplayer) в течение последних нескольких десятилетий [1, 2]. Являясь достойными представителями класса микроструктурных газовых детекторов MSGD (Microstructure Gas Detector), они обладают высоким пространственным и временным разрешениями, а также простотой и масштабом изготовления как в лабораторных условиях, так и в рамках промышленного производства. Вместе с тем следует отметить, что геометрические и физические особенности детектора TGEM находятся в тесной взаимосвязи с его рабочими характеристиками [3, 4].

2. ФАКТОРЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ СТАБИЛЬНОСТЬ ГАЗОВОГО УСИЛЕНИЯ В TGEM

2.1. Первый геометрический фактор

В работе [5] отмечается, что одним из основных геометрических факторов, ограничивающих применение TGEM в экспериментальных физических установках, является возникновение и развитие коронного разряда на острых краях отверстий в электродах TGEM. Явление такого рода было детально изучено в работе Пика [6].

Применительно к TGEM, в которых величина $E_{\text{порог}}$ в зависимости от ширины межэлектродного зазора в газовой смеси типа $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$ находится в диапазоне от 40 до 100 кВ /см, становится очевидным, что избежать коронный разряд можно в газовых детекторах с сеточными электродами из проволоки, имеющей радиус от 70 мкм и выше.

2.2. Второй геометрический фактор

Чаще всего действие второго геометрического фактора объясняется дрейфом электронов и положительных ионов, образовавшихся в результате лавинного процесса размножения электронов в отверстиях. При этом заряженные частицы могут быть захвачены диэлектрическим материалом типа Kapton, разделяющим верхний и нижний электроды. Сбор значительного числа зарядов на диэлектрической поверхности существенным образом влияет на величину электрического поля внутри отверстия, ограничивая при этом такие фундаментальные параметры, как электронная прозрачность и газовое усиление согласно данным работы [4]. При этом короткая составляющая изменения газового усиления относится к процессу внутри отверстия, а длительная составляющая – к наличию ободка (сверху и снизу отверстия).

2.3. Физический фактор

Действие физического фактора, влияющего на стабильность газового усиления в зависимости от времени в TGEM проявляется в виде свечения короны в районе анодного электрода, а также в присутствии колебаний импульсов большой амплитуды в конце плато характеристики (см. рис. 3). Предполагается, что это явление происходит благодаря диффузии объемного положительного заряда в зону анода вместо того, чтобы дрейфовать к катоду. Этот процесс особенно заметен при больших интенсивностях облучения детектора [4].

3. РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ TGEM С ПРОВОЛОЧНЫМИ ФОКУСИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Проблемы, связанные с влиянием геометрических и физических факторов в конструкциях газовых детекторов на стабильность их рабочих характеристик, всегда находились в центре внимания физиков-экспериментаторов. Например, катодные плоскости в многопроволочных пропорциональных камерах MWPC изготавливались из толстой бериллиево-бронзовой проволоки диаметром 50–100 мкм с последующей тренировкой с целью устранения острых выступов или "горячих" точек размером в несколько мкм.

Другой геометрический фактор, связанный с наличием катодных открытых диэлектрических поверхностей в трубках Яроччи, был преодолен нанесением специального резистивного слоя для удаления наведенного заряда [7].

Влияние физического фактора на стабильность газового усиления учтено на установке ALICE (ЦЕРН) в большой дрейфовой камере. В связи с этим была смонтирована многосеточная структура для обеспечения обратного дрейфа положительных ионов с последующей нейтрализацией согласно данным, опубликованным в работе [4].

В соответствии с этими фактами в новой конструкции проволочного фокусирующего толстого газового электронного умножителя WFTGEM (Wire Focus Thick Gas Electron Multiplier) был осуществлен полный отказ от дырочной системы электродов, принятой в TGEM, с переводом усилительного процесса в газовый промежуток между двумя намотанными проволочными фокусирующими электродами из бериллиевой бронзы диаметром 70 мкм во избежание возникновения и развития коронного разряда [5]. На рис. 1 показаны геометрические размеры кольца для намотки проволочного фокусирующего электрода, а на рис. 2 приведена его фотография. Намотка сетки толщиной 70 мкм осуществлялась в шахматном порядке. Шаг намотки составляет 1 мм в горизонтальном и вертикальном направлениях. С четырех сторон сетки имеют проволоки диаметром 100 мкм для выравнивания электрического поля во избежание краевого эффекта [5].

Рис . 1. Геометрия кольца для намотки проволочного фокусирующего электрода.

Рис. 2. Фото проволочного фокусирующего электрода.

На рис. 3 представлена схема размещения проволочных фокусирующих электродов в новой конструкции WFTGEM вдоль оси x . Она должна обеспечить сквозной дрейф заряженных частиц на всем пути от коллектора до дрейфового электрода.

Рис. 3. Схема расположение проволочных фокусирующих электродов вдоль горизонтальной оси x .

Для осуществления процесса фокусировки было необходимо выполнение следующих требований:

- точность намотки проволочной сетки в направлениях осей x , y должна быть не хуже 20 мкм;
- точность размещения четырех проволочных электродов в направлениях x , y – не хуже 20 мкм.

На рис. 4 показана фотография размещения сборки проволочных фокусирующих электродов WFTGEM на одном из двух фланцев газового детектора.

Рис. 4. Вольт-амперная характеристика испытаний WFTGEM на воздухе

На рис. 5 приведена вольт-амперная характеристика испытаний усилительной части WFTGEM на воздухе. Такая методика позволяет определить наличие острых граней, а также волосков и загрязнений на поверхности проволочных фокусирующих электродов и устранение их в случае необходимости.

Рис. 5. Фото расположения проволочных фокусирующих электродов на фланце детектора WFTGEM.

Из хода характеристики видно, что коронный разряд у данного образца WFTGEM не возникает при достаточно высоком напряжении величиной 6 кВ, что указывает на отсутствие острых краев у проволочных фокусирующих электродов, а также пыли и загрязнений на их поверхности.

На рис. 6 представлены результаты измерения газового усиления в двух типах WFTGEM, у которых дырочные электроды заменены на проволочные фокусирующие и отсутствуют открытые диэлектрические поверхности. Оба детектора продуваются обычной газовой смесью $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$ и облучаются одним и тем же радиоактивным α -источником Ra^{226} с небольшой интенсивностью, равной 10^3 частиц/с. Различие экспериментов заключается в том, что в случае 1 коллектор и дрейфовый электроды изготовлены в виде проволочных фокусирующих, как катод и анод, а в случае 2 они выполнены в виде плоских электродов и не участвуют в сквозном дрейфе заряженных частиц. Это может означать, что физический фактор в случае 2 существует и влияет на ход характеристики в сторону ее ухудшения.

Рис. 6. Зависимость усиления в WFTGEM от напряжения в газовой смеси $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 приведены результаты анализа взаимосвязи геометрических и физических факторов с параметрами наиболее распространенных в физических экспериментах микроструктурных газовых детекторов.

Таблица 1. Взаимосвязь геометрических и физических факторов с параметрами наиболее распространенных микроструктурных газовых детекторов

Геометрические и физические факторы	Тип детектора				
	PPAC*	MICROMEGAS**	TGEM	GEM	WFTGEM
Острые края электродов	нет	Нет	да	да	нет
Открытые диэлектрические поверхности	Нет	Нет	да	да	нет
Сквозной дрейф зарядов	Нет	Нет	нет	нет	да
Эволюция газового усиления	Нет	Да	да	да	нет
Максимальное газовое усиление	$5 \cdot 10^6$	10^5	10^4	10^3	$8 \cdot 10^4$
Пространственное разрешение, мкм	0.5	0.036	0.300	0.036	0.300
Загрузка, частиц/с \cdot мм ²	$5 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^6$	10^5	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$

Примечание: * PPAC (Parallel Plate Avalanche Counter) – плоскопараллельный счетчик.

** MICROMEGAS (Micro Mesh Gas Detector) – микросеточный газовый детектор.

Из табличных данных следует, что максимальное газовое усиление достигается в PPAC вплоть до величины $5 \cdot 10^6$ при достижении предела Рэтера [8], когда возникает самостоятельный разряд Гейгера, ограничивая предел загрузки облучения детектора до $5 \cdot 10^4$ частиц/с \cdot мм², что является серьезным недостатком PPAC.

В этом смысле MICROMEGAS является более совершенным детектором, имея катодный электрод из вольфрамовой сетки с толщиной проволоки равной 5 мкм. Но отсутствие сквозного дрейфа положительных ионов сказывается на уменьшении величины газового усиления примерно на 1.5 порядка по сравнению с PPAC.

Что касается TGEM и GEM, то они значительно уступают своим предшественникам по величине газового усиления и его стабильности во времени.

Новая разработка WFTGEM отличается от других газовых детекторов полным отсутствием геометрических факторов и наличием сквозного дрейфа положительных ионов и электронов от коллектора до дрейфового электрода. Газовое усиление в новой конструкции WFTGEM составляет величину $8 \cdot 10^4$, близкую к значениям данной величины для

MICROMEGAS и почти на порядок выше, чем для TGEM. Исследование загрузочных временных и пространственных разрешений предстоит осуществить на более интенсивных пучках ускорителей.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В новой конструкции WFTGEM сведено к минимуму действие факторов, ограничивающих стабильность газового усиления в TGEM. Дырочный способ усилительного процесса полностью заменен на лавинное размножение электронов между двумя проволочными фокусирующими электродами при отсутствии диэлектрической поверхности между ними. Принципиально новым решением можно считать осуществление сквозного дрейфа положительных ионов и электронов от коллектора до дрейфового электрода без накопления объемного положительного заряда у стенок проволочных электродов, уменьшая вероятность возникновения и развития коронного разряда.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Н.К. Жарких, Г.К. Матушко, С.В. Задорожному и А.П. Ивашкину за помощь в оформлении статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sauli F.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 1997. V. 386. P. 531. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)01172-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)01172-2)
2. *Chechik R., Breskin A., Shalem C., Mormann D.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2004. V. 535. P. 303. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.07.138>
3. *Alexeev M., Birsa R., Bradamante F. et al.* // J. Instrum. 2015. V. 10. P. P03026. <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/10/03/P03026>
4. *Francke T., Peskov V.* Innovative Applications and Developments of Micro-Pattern Gaseous Detectors. IGI global, 2014. <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-4666-6014-4>
5. *Разин В.И.* // ПТЭ. 2019. №1. С. 66. <https://doi.org/10.1134/S003281621901021X>
6. *Пук Ф.Ф.* Диэлектрические явления в технике высоких напряжений. Коронный разряд на проводах. / Пер. с англ. под ред. Г.А. Эпштейна. Москва: Госэнергоиздат, 1934.
7. *Battistoni G., Campana P., Chiarella V. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. V. 217. № 3. P. 429. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-5087\(83\)90751-2](http://dx.doi.org/10.1016/0167-5087(83)90751-2)
8. *Разин В.И.* // ПТЭ. 2023. № 2. С. 5. <https://elibrary.ru/item.asp?id=50501883>; <https://doi.org/10.31857/S0032816223020258>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Геометрия кольца для намотки проволочного фокусирующего электрода.
- Рис. 2.** Фото проволочного фокусирующего электрода.
- Рис. 3.** Схема расположения проволочных фокусирующих электродов вдоль горизонтальной оси x : 1 – дрейфовый электрод, 2 – катод, 3 – анод, 4 – коллектор.
- Рис. 4.** Вольт-амперная характеристика испытаний WFTGEM на воздухе.
- Рис. 5.** Фото расположения проволочных фокусирующих электродов на фланце детектора WFTGEM.
- Рис. 6.** Зависимость усиления в WFTGEM от напряжения в газовой смеси $\text{Ar}+20\% \text{CO}_2$. Кривая 1 – для сборки из четырех проволочных фокусирующих электродов; кривая 2 – для сборки из четырех электродов, когда второй и третий являются проволочными фокусирующими, а первый и четвертый – обычными плоскими.

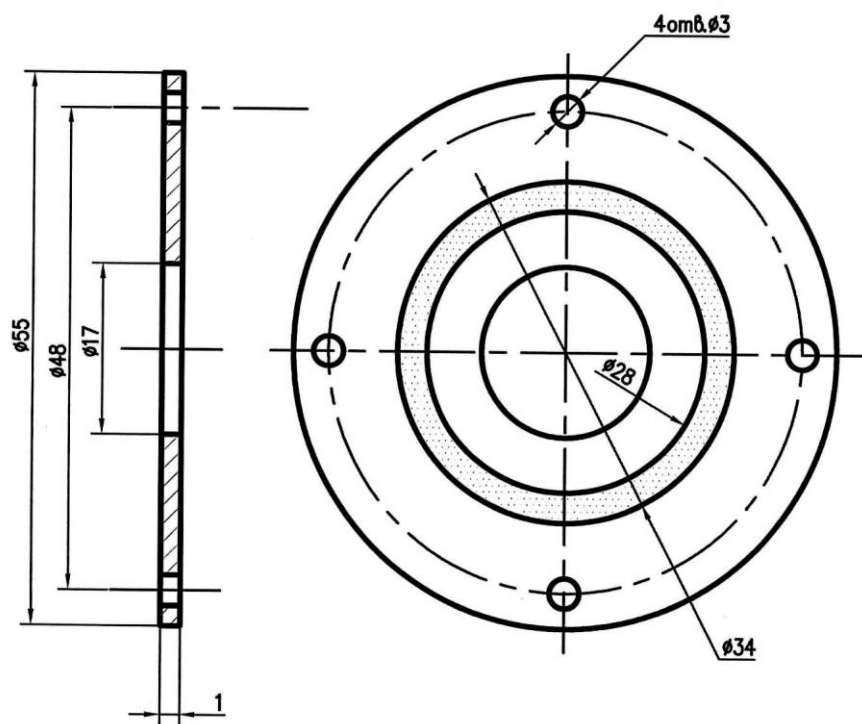


Рис. 1.

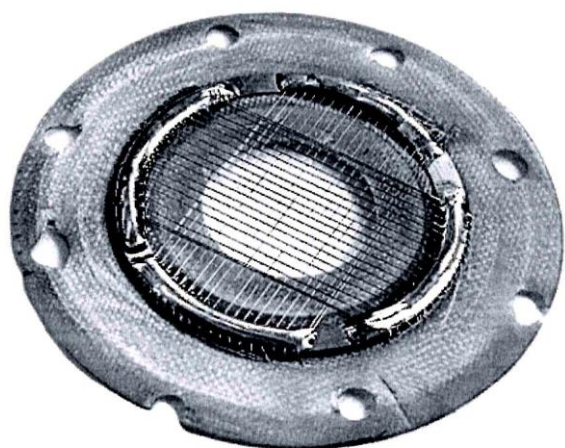


Рис. 2.

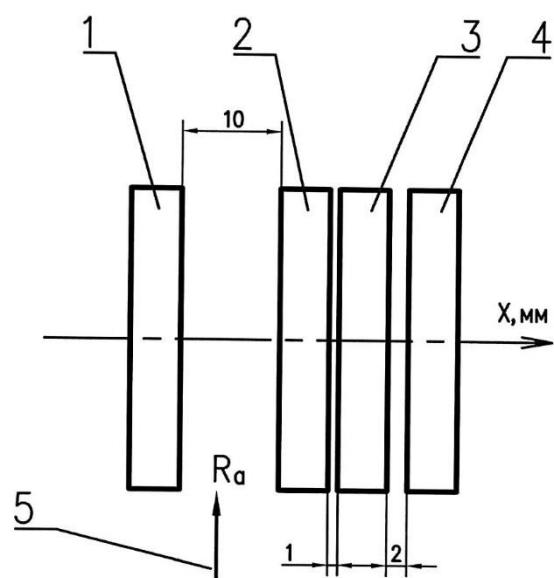


Рис. 3.

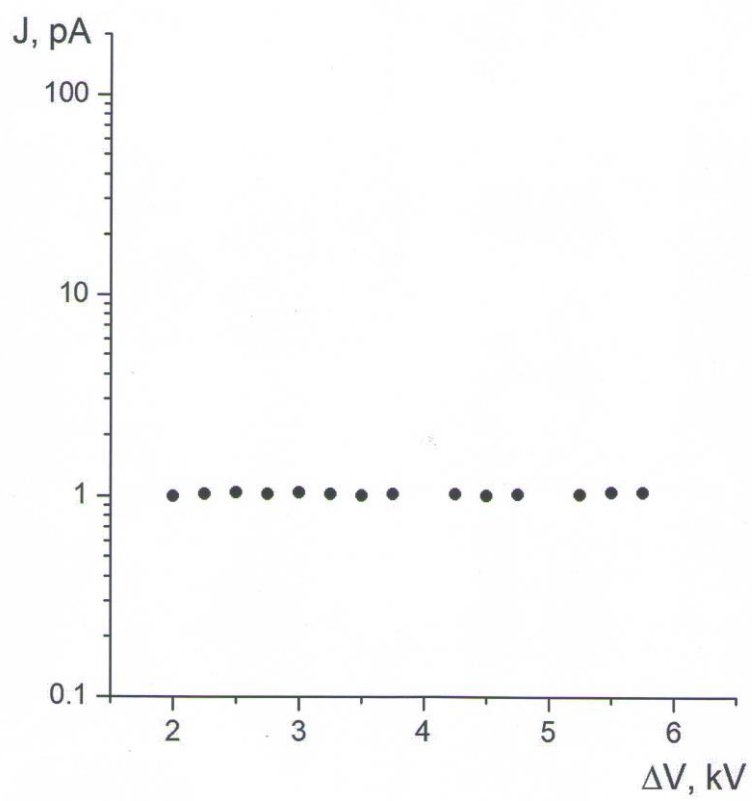


Рис.4

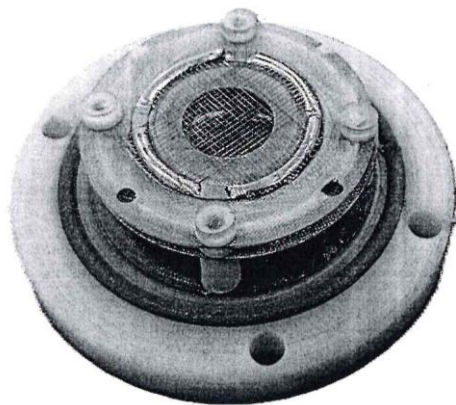


Рис. 5.

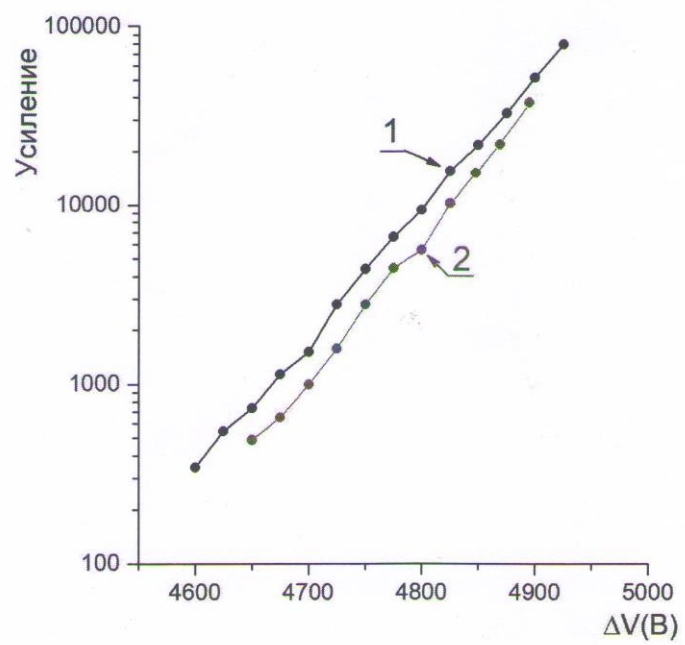


Рис. 6