

## ТОЛСТЫЙ GEM С РЕЗИСТИВНЫМ ПОКРЫТИЕМ

*И. Ванков, С. Е. Васильев, И. А. Голутвин, Ю. В. Ершов,  
В. Ю. Каржавин, А. М. Маканькин, В. В. Перельгин, В. А. Чеховский*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты тестирования детектора на основе толстого GEM. Оценено влияние диэлектрика внутри толстого GEM на его характеристики, и проведено сравнение результатов испытания и моделирования. Как дальнейшее развитие детектора предложен, изготовлен и испытан толстый GEM с резистивным покрытием. Приведены результаты тестирования и сравнение их со стандартным толстым GEM.

Test results of a thick GEM based detector are presented. Dielectric influence inside of a thick GEM is evaluated. Test results and simulation are compared. Thick GEM with resistive layers was proposed, manufactured, and tested. Test results of a thick GEM with resistive layers are presented and compared with an ordinary one.

PACS: 29.40.Cs

### ВВЕДЕНИЕ

Появление новых ускорителей с высокоинтенсивными пучками способствовало появлению принципиально новых газовых детекторов вместо пропорциональных и дрейфовых проволочных камер, имеющих ограниченные возможности при большой нагрузке ионизирующего излучения. Микростриповая газовая камера (MSGC) была первой попыткой создания таких детекторов, не нашедшая, однако, применения ввиду достаточно большой вероятности возникновения электрических разрядов даже при небольшом газовом усилении. Тонкий газовый электронный умножитель (GEM) [1], являющийся следующим шагом в этом направлении, имел те же недостатки, что и MSGC, но в отличие от последнего мог быть собран в многокаскадную структуру, поскольку представляет собой тонкую пленку. Распределение общего газового усиления по трем усилительным каскадам позволяет обеспечивать лучшие характеристики таких детекторов в сравнении с проволочными камерами и снижает вероятность развития в них разрядов. Сравнительно высокая стоимость детекторов на основе трехкаскадных GEM ограничивает их применение и стимулирует развитие новых модификаций микроструктурных детекторов. Таким образом, появление «толстого» GEM [2] (TGEM) стало логичным продолжением развития микроструктурных детекторов.

## 1. КОНСТРУКЦИЯ GEM

Конструктивно тонкий GEM представляет собой каптоновую пленку толщиной 50 мкм с нанесенными с обеих сторон медными слоями толщиной 5 мкм, являющими его электродами (рис. 1). В пленке протравлены отверстия диаметром 70 мкм с шагом 140 мкм, в сильном электрическом поле которых, при попадании электронов ионизации газа из дрейфового промежутка от пересекающихся детектор заряженных частиц, происходит размножение электронов с высоким газовым усилением.

Толстый GEM (рис. 2) представляет собой стеклотекстолитовую пластину толщиной 0,4–0,8 мм ( $t$ ), покрытую с обеих сторон слоем меди. В пластине просверлены отверстия диаметром 0,3–0,5 мм ( $d$ ) с шагом 0,7–0,9 мм ( $p$ ). С обеих сторон вокруг отверстий вытравлена медь, что образует диэлектрические ободки шириной 0,1 мм ( $r$ ).

Было изготовлено несколько образцов TGEM с рабочей площадью  $100 \times 100$  мм, отличающихся друг от друга толщиной (таблица). Диаметр отверстий, расстояние между ними и размер ободка были одинаковы в образцах и составляли 0,5, 0,9 и 0,1 мм соответственно. Результаты, приведенные ниже, получены на образце B08-1, на котором были получены лучшие результаты по сравнению с остальными.

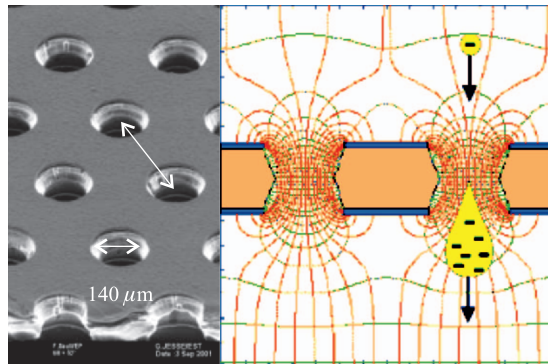


Рис. 1. Общий вид усилительной каптоновой пленки (слева). Дрейфовый и индукционный промежутки (справа) расположены над и под пленкой соответственно. Внешние электроды промежутков не показаны

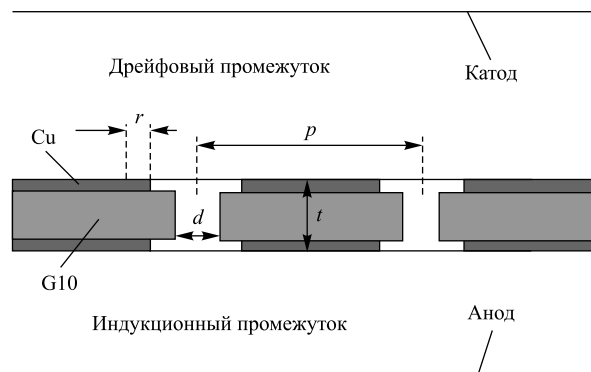


Рис. 2. Толстый GEM и детектор на его основе

### Размеры изготовленных образцов TGEM

Параметр	Образец		
	B08-1/ B08-2	B06-1/ B06-2	Bn05-1/ Bn05-2
Толщина, мм	0,8	0,6	0,5

Пленка алюминизированного майлара толщиной 100 мкм использовалась в качестве катода детектора на основе TGEM. Анод был выполнен в виде 64 медных стрипов ( $1 \times 100$  мм) с шагом 1,5 мм. Напряженность электрического поля в дрейфовом промежутке шириной 3 мм и индукционном промежутке шириной 1 мм составляла 1 и 6 кВ/см соответственно. Камера продувалась газовой смесью Ar/CO<sub>2</sub>(90/10) и облучалась через коллиматор с отверстием диаметром 1 см<sup>2</sup> гамма-квантами источника <sup>55</sup>Fe или рентгеновской трубки с медным анодом (энергия гамма-квантов 5,9 или 8 кэВ, а интенсивность излучения — не более  $3 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup> или  $1 \cdot 10^7$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> соответственно). Эффективное газовое усиление определялось при нагрузках менее  $10^5$  с<sup>-1</sup> по пику полного поглощения от источника <sup>55</sup>Fe, при этом 16 стрипов считывающего электрода объединялись и выводились на усилитель-формирователь и далее на АЦП. При более высоких нагрузках от рентгеновской трубки измерялся ток со всех объединенных стрипов пикоамперметром, и эффективное газовое усиление определялось отношением токов при пропорциональном и ионизационном режимах работы детектора.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ TGEM

TGEM, как и следовало ожидать, при одинаковой газовой смеси работает без пробоев с газовым усилением в  $\sim 10$  раз большем, чем однокаскадный тонкий GEM (рис. 3), поскольку расстояние, на котором происходит усиление, в несколько раз больше, а максимальная напряженность поля в канале в несколько раз меньше, чем у тонкого GEM. Однако дальнейшие исследования толстого GEM показали некоторые особенности его работы. На рис. 4 показано поведение газового усиления от времени, так называемая долговременная стабильность. Детектор на основе толстого GEM облучался источником <sup>55</sup>Fe. После подачи напряжений на детектор газовое усиление падает со временем от  $\sim 2 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^3$  и выходит на плато. Если источник излучения убрать и через некоторое время вернуть или снять напряжения с детектора, а затем подать снова, то

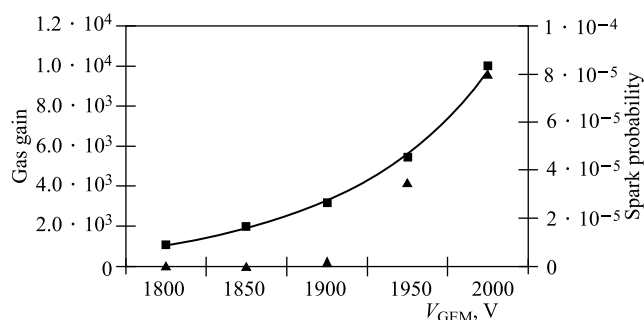


Рис. 3. Газовое усиление TGEM (B08-1) (■) и вероятность пробоя (▲) в зависимости от напряжения

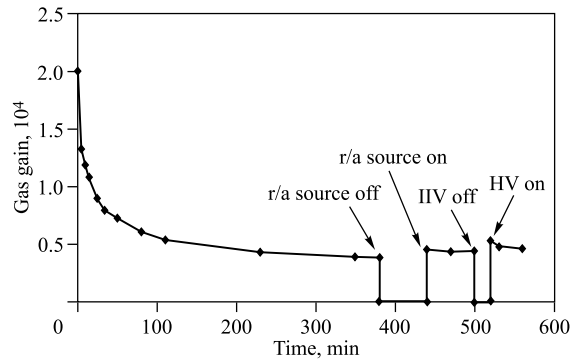


Рис. 4. Долговременная стабильность TGEM (B08-1)

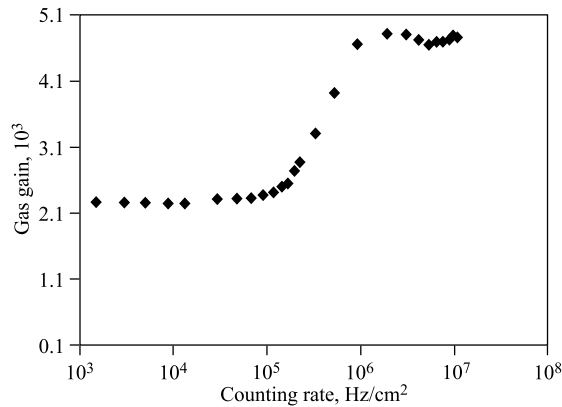


Рис. 5. Загрузочная способность TGEM (B08-1)

видно, что газовое усиление растет. Таким образом детектор возвращается к начальному значению газового усиления.

Другая особенность работы толстого GEM связана с большими нагрузками ионизирующего излучения. При больших нагрузках происходит некоторый рост усиления (рис. 5). Такое поведение детектора можно объяснить наличием большого количества диэлектрика в его рабочем объеме. Ионы, выходящие из рабочего канала за счет диффузии, могут оставаться на диэлектрическом ободке, тем самым искажая электрическое поле в отверстиях TGEM.

Таким образом, эффекты заряда/разряда диэлектрика в TGEM влияют на работу детектора и его характеристики, вызывая: нестабильность усиления, ухудшение энергетического разрешения и т. д. Чтобы избавиться от подобных эффектов, требуется снятие ионного заряда с ободка TGEM. Это можно обеспечить, если поверхность ободка будет иметь определенную резистивность.

### 3. TGEM С РЕЗИСТИВНЫМ ПОКРЫТИЕМ

**3.1. Моделирование.** Для TGEM с геометрическими параметрами образца B08 с помощью пакета MAXWELL [3] было рассчитано электрическое поле вдоль ширины детектора ( $z$ -координата) по линии, проходящей по центру элементарного усилитель-

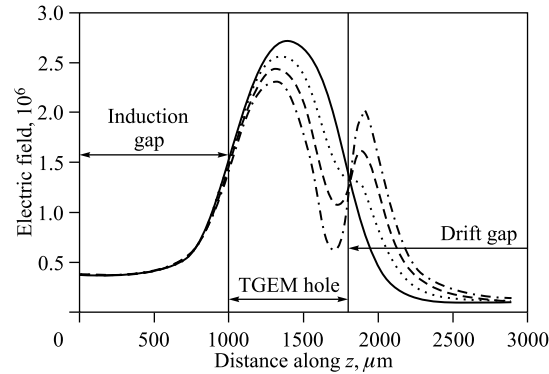


Рис. 6. Рассчитанное распределение электрического поля вдоль рабочего канала TGEM для различной плотности заряда на ободке. Сплошная кривая — 0 пК/мм<sup>2</sup>; пунктирная — 100 пК/мм<sup>2</sup>; штриховая — 200 пК/мм<sup>2</sup>; штрихпунктирная — 300 пК/мм<sup>2</sup>

ного канала (рис. 6). При этом рассматривалось наличие положительного заряда различной величины на диэлектрическом ободке каждого канала верхнего электрода и пакетом GARFIELD [4] вычислялось газовое усиление ( $G$ ) TGEM для газовой смеси  $\text{Ar}(90)/\text{CO}_2(10)$  (рис. 7).

На рис. 6 показано рассчитанное распределение электрического поля вдоль рабочего канала при значениях зарядов на поверхности его диэлектрического ободка от нулевой величины до 300 пК/см<sup>2</sup>. Видно, что с увеличением заряда уменьшается напряженность электрического поля в рабочем канале. Рис. 7 (сплошная кривая) показывает сильную зависимость  $G$  от этого заряда, так при его возрастании от 0 до 150 пК/мм<sup>2</sup> величина  $G$  уменьшается в несколько раз. При заряде, большем 150 пК/мм<sup>2</sup>, паразитное поле, обусловленное ионами, может стать сравнимым с полем, обеспеченным приложенным к TGEM напряжением, и даже больше него. Это приводит к росту газового усиления (рис. 7, штриховая кривая). На практике это означает, что при больших нагрузках ионизирующего излучения газовое усиление детектора должно расти. Действительно, в диапазоне загрузок от  $\sim 1 \cdot 10^5$  до  $\sim 1 \cdot 10^6$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> происходит увеличение газового усиления (см. рис. 5).

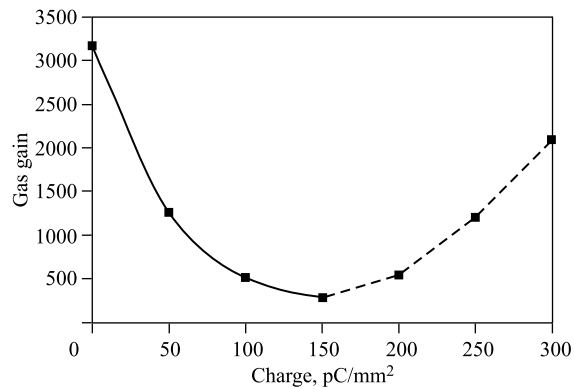


Рис. 7. Зависимость газового усиления индивидуального канала TGEM от величины заряда его диэлектрического ободка

Это увеличение происходит до тех пор, пока силовые линии поля, обусловленные возрастающим полем ионов на поверхности ободка, не сжимаются настолько сильно, что детектор теряет «прозрачность», т.е. не все электроны из области дрейфа попадают в рабочие каналы TGEM. Таким образом, результаты моделирования находятся в полном согласии с экспериментальными данными.

**3.2. Конструкция TGEM с резистивным покрытием.** Отличие TGEM с резистивным покрытием от стандартного заключается в наличии тонкого материала с определенной резистивностью между диэлектриком и медным электродом. Для обеспечения этого предварительно на обе стороны стеклотекстолитовой пластины (G-10) наклеиваются тонкие ( $\sim 100$  мкм) каптоновые резистивные пленки, после чего стороны покрываются слоем меди. Далее процесс изготовления TGEM с резистивным покрытием не отличается от стандартного TGEM. Для испытания были изготовлены образцы с резистивностью  $\sim 10^{11}$  и  $\sim 10^7$  Ом/□ (K11GEM и K07GEM) соответственно. Толщина пластины составляла 0,8 мм, отверстия с диаметром 1,0 мм были выполнены с шагом 0,5 мм, величина ободков была 0,1 мм и размер чувствительной области составлял  $100 \times 100$  мм. Дрейфовый и индукционный промежутки детекторов на основе TGEM с резистивным покрытием были величиной 3 и 1 мм соответственно. Напряженность поля в дрейфовой области была около 1 кВ/см и в индукционной — 6 кВ/см.

Кроме этих детекторов испытывался также RETGEM [5] с резистивностью проводящих слоев  $R \sim 1 \cdot 10^5$  Ом/□. Методика измерений характеристик детектора не отличалась от используемой ранее для TGEM.

**3.3. Результаты исследования TGEM с резистивным покрытием.** На рис. 8 и 9 представлены результаты измерений эффективного газового усиления испытываемых TGEM. Видно, что с ростом резистивности поверхностного слоя пластины растет максимально достижимое газовое усиление, определяемое значением напряженности поля в канале TGEM, начиная с которого резко растет вероятность пробоя детектора.

Результаты проверки стабильности работы детекторов во времени приведены на рис. 10. Так же как и в случае газового усиления, наилучшие результаты достигаются при большей резистивности. Образец K11GEM при низких нагрузках не меняет своих характеристик, т.е. эффект зарядки диэлектрика и искажения электрического поля в рабочем канале отсутствует полностью. Для K07GEM и RETGEM наблюдается падение усиления, хотя и в меньшей степени, чем в обычном TGEM.

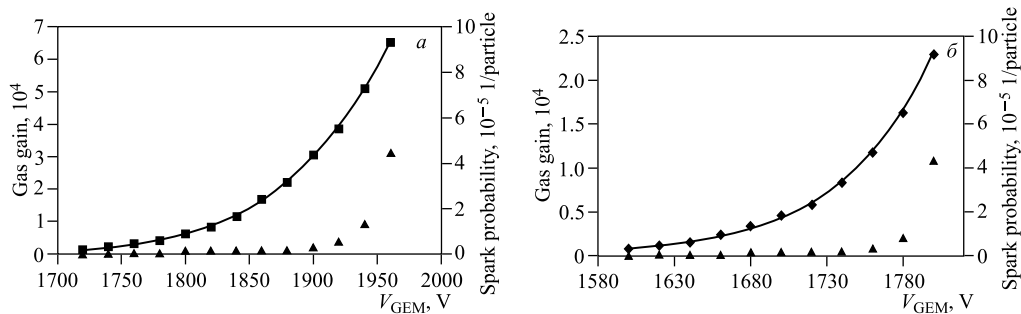


Рис. 8. Газовое усиление (■, ◆) и вероятность пробоя (▲) в зависимости от напряжения на резистивном TGEM: а) K11GEM; б) K07GEM

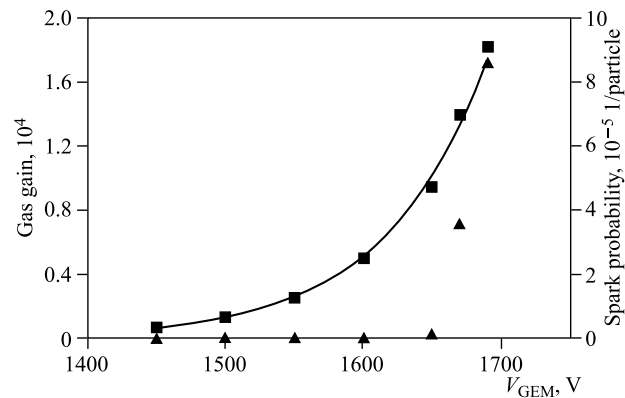


Рис. 9. Газовое усиление RETGEM (■) и вероятность пробоя (▲) в зависимости от напряжения

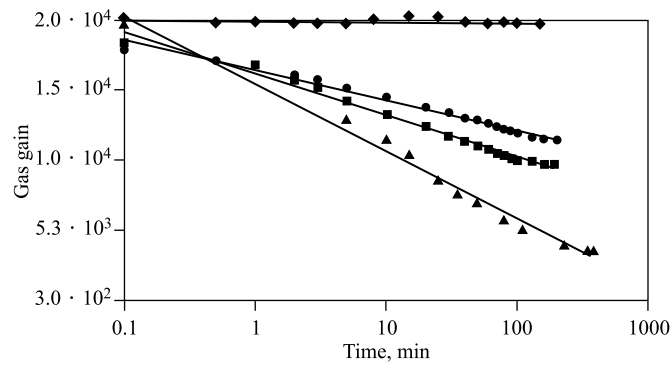


Рис. 10. Долговременная стабильность резистивных TGEM: ▲ — B08-1; ■ — RGEM; ● — K07GEM; ◆ — K11GEM

Казалось бы, что этот факт противоречит всем изложенным выше утверждениям: чем меньше резистивность слоя, тем быстрее должны нейтрализоваться ионы на ободке канала. Как видно из экспериментальных данных, этого не происходит. По всей видимости, мы сталкиваемся с тем, что происходит заряд диэлектрика внутри отверстия на границе с проводящим слоем. Т.е. чем меньше резистивность поверхностного слоя, тем больше вероятность прилипания ионов к диэлектрику внутри отверстия на границе с ободком. В предельном случае  $R = 0$  получается безободковый вариант TGEM, который, как известно [6], имеет худшие характеристики, чем толстый GEM. На рис. 11 представлены результаты измерения газового усиления в зависимости от плотности загрузки детектора ионизирующим излучением. Что касается обычного TGEM, то его поведение при больших загрузках полностью согласуется с приведенными выше результатами моделирования. Газовое усиление резистивных TGEM с увеличением плотности загрузки падает. Причем чем больше резистивность, тем оно больше и начинается с меньшей загрузки. Это объясняется тем, что ионы, попавшие на ободок, не успевают нейтрализоваться при больших загрузках детектора и таким образом искажают электрическое поле в рабочем канале TGEM, что и приводит к падению усиления. Естественно, чем больше резистивность, тем больше сказывается этот эффект на усилении TGEM при одной и той же плотности загрузки детектора ионизирующим излучением.

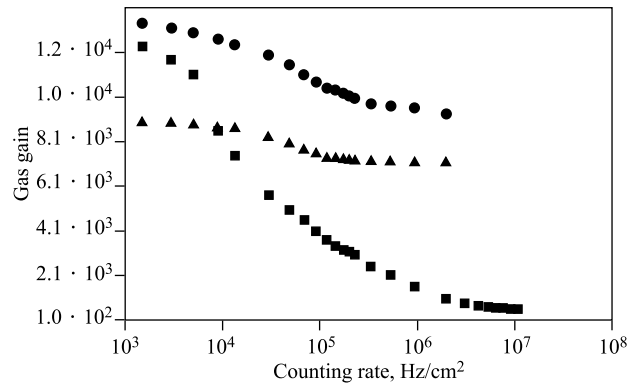


Рис. 11. Загрузочная способность резистивных TGEM: ▲ — RETGEM; ● — K07GEM; ■ — K11GEM

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданы и исследованы образцы детекторов на основе толстого GEM. Оценено влияние диэлектрика внутри толстого GEM на его характеристики, и проведено сравнение результатов исследований и моделирования. Основные результаты исследований ниже следующие:

— наличие диэлектрика внутри толстого GEM негативно влияет на его характеристики: газовое усиление, энергетическое разрешение и т. д.;

— введение резистивности слоев позволяет стабилизировать работу TGEM вплоть до загрузки  $1 \text{ кГц/см}^2$  для TGEM с резистивными слоями  $\sim 10^{11} \text{ Ом/□}$ , при низкой резистивности слоев ( $\sim 10^5 \text{ Ом/□}$ ) детекторы способны работать с незначительной потерей усиления (на  $\sim 25\%$ );

— результаты моделирования показывают, что существенное влияние на работу детекторов при высоких загрузках оказывает искажение электрического поля внутри каналов TGEM, вызываемое ионами на диэлектрической ободке рабочего канала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chechik R. et al.* Thick GEM-Like Hole Multiplier: Properties and Possible Applications // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 535. P. 303–308.
2. *Shalem C. et al.* Advances in Thick GEM-Like Gaseous Electron Multipliers. Part I: Atmospheric Pressure Operation // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 558. P. 475–489.
3. Maxwell 3D. PA, USA: ANSOFT Co. Pittsburg, 2006.
4. *Veenhof R.* GARFIELD — a Drift Chamber Simulation Program. CERN Program Library. W5050. 1984.
5. *Oliveira R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 576. P. 362–366.
6. *Shalem C. et al.* Advances in Thick GEM-Like Gaseous Electron Multipliers. Part II: Low-Pressure Operation // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 558. P. 468–474.

Получено 12 апреля 2013 г.