

УДК 539.107.422

## К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМАХ ПРОБОЯ В МИКРОСТРУКТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ДЕТЕКТОРАХ (обзор)

© 2021 г. В. И. Разин\*

Институт ядерных исследований РАН  
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

\*e-mail: razin@inr.ru

Поступила в редакцию 22.04.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 15.06.2021 г.

Представлены результаты исследования причин возникновения пробоев в микроструктурных газовых детекторах. Согласно экспериментальным данным, основу такого процесса составляют три независимых источника: коронный разряд, стримерный разряд и поляризация диэлектрика при протекании зарядов внутри детектора. Показаны несколько способов повышения стойкости приборов данного типа к разрушениям от действия искр.

DOI: 10.31857/S0032816221060057

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Микроструктурные газовые детекторы (Micro-Pattern Gas Detector – MPGD) широко применяются в технике ядерно-физического эксперимента и для решения других прикладных задач, что обусловлено целым рядом таких их привлекательных черт, как высокие пространственное и временное разрешения, способность работать в более интенсивных пучках по сравнению с проволочными устройствами, а также возможность промышленного воспроизводства на основе новейших достижений в области микроэлектроники [1–3].

Вместе с тем приборы данного типа имеют существенный недостаток, связанный с уменьшенным расстоянием между электродами, что приводит к увеличению вероятности искрового пробоя. Этот процесс достаточно подробно исследован в работе [4], где также показано, что одной из особенностей детекторов MPGD является возможность работать в каскадном режиме. Часть лавинного заряда из одного газового электронного умножителя (GEM – Gas Electron Multiplier) может быть перенаправлена в другой. Таким способом общий коэффициент размножения электронов  $A$  может быть доведен до значения  $5 \cdot 10^3$  в обычной газовой смеси без пробоя [5].

В некоторых устройствах с детектирующей поверхностью большой площади (порядка нескольких квадратных метров) электрические пробои происходят при освобождении энергии, запасен-

ной на этих плоскостях, как на конденсаторах большой емкости. Этот разряд может привести к деструктивному эффекту, распространяясь к аноду и разрушая элементы считывающей электроники [6]. Предложенный в работе [6] метод разделения чувствительной поверхности на ряд секторов, подключаемых через высокоомные резисторы к системе питания, позволяет значительно снизить энергию разряда. Таким способом можно достичь более равномерного сигнального отклика со всей площади MPGD, что обеспечит возможность применения этого метода в физических приложениях, где имеется высокая вероятность электрических пробоев при больших нагрузках.

Особое место в методике борьбы с пробоями в MPGD занимает микросеточный газовый детектор (MICROMEGAS – Micro-Mesh Gaseous Structure), описанный Ж. Шарпаком в 1996 г. в работе [7]. Практически этот прибор представляет собой плоскопараллельный лавинный счетчик с очень узким (50–100 мкм) зазором между катодной сеткой и анодной плоскостью в виде печатной платы. Благодаря такому решению из конструкции MICROMEGAS практически исключены (или сведены в ней к минимуму) диэлектрические элементы во избежание их поляризации и возникновения спонтанного искрового разряда. Точность ширины зазора выдерживается при помощи системы растяжек катодной сетки, изготовленной путем навивки резистивной проволоки круглого сечения без применения спейсера. Высокие пространственное, временное и энерге-

тическое разрешения (30 мкм, 70 пс, 20%) при регистрации минимально ионизирующих частиц делают этот прибор более предпочтительным при решении многих экспериментальных задач. Следует отметить также слабое звено в конструкции MICROMEGAS: вследствие малого зазора между катодом и анодом не удается получить коэффициент размножения электронов  $A$  выше  $5 \cdot 10^3$  из-за высокой вероятности выбивания вторичных электронов из катода ультрафиолетовыми фотонами и возникновения самостоятельного разряда, согласно правилу Рэтера [8].

## 2. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПРЕДПРОБОЙНЫХ И ПРОБОЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ В MPGD

### 2.1. Самостоятельный коронный разряд

В ИЯИ РАН накоплен существенный опыт в исследовании механизма предпробойных и пробойных явлений в газовых детекторах различных конструкций. В работе [9] предложена методика тренировки многопроволочных пропорциональных камер на воздухе. Она основана на опыте применения формулы Пика для определения предельной напряженности электрического поля в районе анодного электрода с малым радиусом кривизны при таундсендовском лавинном размножении электронов до возникновения коронного разряда [10]. Оказалось, что данная методика вполне применима при определении напряженности электрического поля в MPGD различных конструкций, например: в GEM, толстых газовых электронных умножителях (TGEM – Thick Gas Electron Multiplier), а также в MICROMEGAS, электроды которых имеют острые края с радиусом  $R \leq 5$  мкм. При этом коронный разряд в данных устройствах возникает гораздо раньше, чем они произведут сигнал от детектируемой частицы. В результате коронный разряд распространяется вдоль поверхности с острыми краями в виде светящегося слоя за счет фотоионизации молекул газа при соответствующей напряженности электрического поля.

### 2.2. Самостоятельный стримерный разряд

Другим инициатором пробойных явлений в газовых детекторах может быть самостоятельный стримерный разряд. Он происходит в результате электростатического взаимодействия между положительным зарядом ионов, движущихся от анодного электрода, и наведенным отрицательным зарядом на катодном электроде, что соответствует условиям пробоя, выведенным Рэтером в работе [8].

Процесс распространения ионизационной волны от такого взаимодействия внутри газового

объема имеет длительность порядка нескольких наносекунд. После его прохождения в газовом детекторе наблюдается светящийся столб или шнур благодаря фотонам с энергией порядка 1.5 эВ, возникающим в результате рекомбинации положительных и отрицательных ионов. Вероятность перехода стримерного газового разряда в искровую пробой можно существенно снизить при использовании газовой смеси с электроотрицательными добавками и резистивных электродов круглого сечения диаметром 30–50 мкм с  $\rho = 10^7$  Ом/см.

### 2.3. О влиянии диэлектрического материала на пробой в конструкциях MPGD

В конструкциях MPGD часто находят применение диэлектрические материалы или подложки в виде спейсеров, служащие в качестве изоляторов между электродами. Однако при длительном протекании разрядного тока и тока утечки они подвергаются нагреванию, что приводит к значительному изменению их структуры, а также к образованию поляризационных зон или доменов. Такие образования могут служить источниками взрывной ионизации, ухудшающими изоляционные свойства диэлектрика с переходом в искровой пробой. Пока этот процесс исследован мало по сравнению с действием коронного или стримерного разряда, но он также является источником негативных воздействий на MPGD при длительной эксплуатации приборов в условиях высоких пучковых нагрузок.

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК TGEM

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

а) в одноступенчатой конструкции TGEM с электродами из стеклотекстолита с отверстиями, изготовленными механическим сверлением, не удастся получить коэффициент размножения электронов  $A \geq 10^2$  из-за коронного разряда по поверхности отверстия;

б) коэффициент размножения электронов  $A \leq 10^4$  достигается в одноступенчатой конструкции TGEM с круглыми металлическими электродами, имеющими радиус  $R \geq 20$  мкм, без применения диэлектрических спейсеров [11];

в) в конструкции резистивного TGEM со стрипами из проводящей краски с  $\rho = 20$  кОм/см, нанесенной на поливинилхлоридную основу, был достигнут коэффициент  $A \leq 10^4$ , ограничение процесса размножения электронов было связано с развитием стримерного разряда [12];

г) хороший результат, с коэффициентом электронного размножения  $A \leq 5 \cdot 10^4$ , был получен в одноступенчатой конструкции TGEM с сеточны-

ми электродами из бериллиевой бронзы толщиной 50 мкм без диэлектрического спейсера, сетки были изготовлены методом химического травления во избежание появления острых кромок; более высокого значения  $A$  достичь не удалось из-за появления стримерных явлений [13].

#### 4. ВЫВОДЫ

Целесообразны следующие пути улучшения рабочих характеристик MPGD:

1) стойкость к пробоям и утечкам заряда в плоских микростриповых газовых детекторах типа MSGD можно значительно повысить при нанесении на края стрипов по всей их длине круглых подложек из нержавеющей стали или меди с радиусом  $R = 20\text{--}30$  мкм при изготовлении стрипов из этого материала;

2) вероятность коронного разряда в дырочных микроструктурных газовых детекторах типа GEM, TGEM, MICROMEGAS можно свести к минимуму, применяя металлические сеточные структуры круглой формы с  $R \geq 20$  мкм;

3) стримерную моду разряда, а также спонтанный всплеск разрядного тока из-за стекания заряда из доменов диэлектрика можно существенно ограничить, применяя резистивные круглые электроды с  $R \geq 20$  мкм и  $\rho \geq 50$  кОм/см;

4) применение диэлектрических материалов в газоразрядных промежутках в качестве спейсеров следует свести к минимуму.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sauli F.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. Sect. A. 1997. V. 386 (2). P. 531.
2. *Francke T., Peskov V.* Innovative Applications and Developments of Micro-Pattern Gaseous Detectors. IGI global, 2014. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-6014-4>
3. *Garcia F., Brunbauer F.M., Lisowska M., Muller H., Oliveri E., Pfeiffer D., Ropelewski L., Samarati J., Sauli F., Scharenberg L.* // Journal of Instrumentation. 2021. V. 16(1). T01001. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/01/T01001>
4. *Fonte P., Peskov V., Ramsey B.D.* // IEEE Trans. Nucl. Scie. 1999. V. 46. P. 321. doi . 775537 <https://doi.org/10.1109/23>
5. *Ketzer B., Weitzel Q., Paul S., Sauli F., Ropelewski L.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2004. V. 535. P. 314. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.07.146>
6. *Marques A.P., Brunbauer F.M., Miller H., de Oliveira R., Oliveri E., Pfeiffer D., Ropelewski L., Samarati J., Sauli F., Sharenberg L., Shang L., van Stenis M., Williams S., Zhou Y.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2020. V. 961. Article 163673. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163673>
7. *Giomataris Y., Reburgeard Ph., Robert J.P., Charpak G.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 1996. V. 376. P. 29.
8. *Raether H.* Electron Avalanches and Breakdown in Gases. London: Butterworths, 1964.
9. *Пантуев В.С., Разин В.И.* Препринт ИЯИ П-0571. Москва, 1987.
10. *Лик Ф.В.* Диэлектрические явления в технике высоких напряжений. Коронный разряд на проводах / Пер. с англ. Под общ. ред. Г.А. Эпштейна. М.: Госэнергоиздат, 1934.
11. *Ovchinnikov B.M., Razin V.I., Reshetin A.I., Filippov S.N.* // Presented at the RD51 Collaboration Meeting, CERN, November 2009. arXiv: 0911.4807 [physics.ins-det]. 2009.
12. *Разин В.И., Решетин А.И., Филиппов С.Н.* // ПТЭ. 2011. № 5. С. 115
13. *Разин В.И.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 66. <https://doi.org/10.1134/S003281621901021X>