

КООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ВЫСОКИХ ЗАГРУЗОК НА ОСНОВЕ МНОГОПРОВОЛОЧНОГО ГАЗОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО УМНОЖИТЕЛЯ

А. П. Кащук^{а, 1}, В. Г. Баев^б, О. В. Левицкая^а, С. А. Мовчан^в

^а Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Научно-исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

^б Институт энергетики НАН Белоруссии, Минск

^в Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты моделирования электрических полей и несколько вариантов новых координатных детекторов, выполненных на основе многопроволочного газонаполненного электронного умножителя (МПГЭУ), в котором лавинное умножение первичного заряда происходит между проволочками, обладающего, по сравнению с многопроволочной камерой (МПК), высокой загрузочной способностью и субмиллиметровым пространственным разрешением.

Results of electrical field simulation for various configurations of new 2D position-sensitive detectors based on the gas-filled multiwire electron multiplier (MWEM) are presented. In contrast to the multiwire proportional chambers (MWPC), an avalanche multiplication of the primary charge in MWEM occurs in between wires, high counting rates at submillimeter spatial resolution can be achieved in this case.

PACS: 07.07.Df

ВВЕДЕНИЕ

Микроструктурные детекторы (Micro Pattern Gaseous Detectors, MPGD), основу которых составляют GEM [1] и MicroMegas (μ -MEGAS, MM) [2], нашли широкое применение в экспериментальной физике. Особенно это заметно в мюонных детекторах новой генерации в экспериментах CMS [3] и ATLAS [4] на Большом адронном коллайдере с высокой светимостью HL-LHC [5].

К преимуществам детекторов, выполненных на GEM, относятся высокая загрузочная способность — до $10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, так как умножение электронов происходит в отверстиях GEM — независимых пропорциональных счетчиках, число которых на 1 мм^2 составляет ~ 50 шт. при шаге отверстий 140 мкм. Между катодом и анодом GEM находится полиимидная пленка (каптон) толщиной 50 мкм, выполняющая роль сплошного спейсера, обеспечивающего хорошую планарность электродов. С индукционным зазором, составляющим 1–2 мм, в выходном сигнале на считывающем электроде практически отсутствует ионный хвост.

¹E-mail: anatoli.kachtchouk@cern.ch

Недостатком GEM является большая электрическая емкость между электродами, что снижает надежность при пробоях в газе¹. Каптон с диэлектрической постоянной больше единицы увеличивает межэлектродную емкость. Для уменьшения емкости обязательной является сегментация электродов и каскадирование. Например, по этой причине в физике высоких энергий применяется трехкаскадная структура — Triple-GEM [6]. Другим недостатком конструкции является накопление положительных ионов на стенках отверстий, что приводит к нестабильному во времени коэффициенту газового усиления (КГУ), что не всегда допустимо. Этот эффект возникает при включении высоковольтного питания, но также каждый раз после электрического пробоя в газе.

Не менее популярный микроструктурный детектор MicroMegas (ММ) имеет относительно низкую стоимость основного элемента — металлической микросетки. Плетеная микросетка из нержавеющей стали, например, с диаметром проволок 20 мкм и размерами ячейки 50–100 мкм изготавливается на промышленном ткацком оборудовании, выпускается рулонами и стоит 10–20 долл. США за 1 м².

В длительности выходного импульса в ММ доминирует ионная компонента заряда, в отличие от GEM, но благодаря узкому зазору умножения ~ 100 мкм длительность импульса составляет ~ 100 нс, незначительно больше, чем в GEM.

За 20 лет развития технологии производства ММ улучшена планарность электродов введением поддерживающих элементов-спейсеров в виде точечных «опор» (pillars) диаметром ~ 200 мкм и высотой 128 мкм, выполненных фотолитографией из сухого фоторезиста² [7], что делает конструкцию монолитной. Другой вариант создания спейсеров — Thermal Bonding Method (ТВМ) — предложен в работе [8]. Преимуществом ТВМ является отсутствие операций травления, последующей мойки и сушки. В узком зазоре умножения не должно быть «грязи», метод ТВМ это гарантирует.

В ходе технологического совершенствования GEM и ММ увеличена надежность устройств введением тонкопленочного резистивного покрытия анода. Известна конструкция газонаполненного электронного умножителя колодезного типа μ -RWELL [9], в которой ликвидирован индукционный зазор. Одни авторы рассматривают этот прибор как разновидность GEM без индукционного зазора, названного WELL [10], другие — как разновидность ММ типа InGrid [5] с микросеткой, полученной травлением фольгированного диэлектрика.

В конструкции μ -RWELL в качестве анода на дне колодца создано резистивное тонкопленочное покрытие из алмазоподобного углерода (АПУ, англ. DLC — Diamond-like Carbon) толщиной 0,1 мкм с поверхностным сопротивлением ~ 20 МОм/квадрат. Это покрытие исключительно прочное, оно хорошо противостоит пробоям и устойчиво к воздействию радиации. Следует подчеркнуть, что без специальных мер в такой конструкции в длительности выходного импульса на считывающем электроде будет доминировать даже не время транзита положительных ионов через зазор умножения, как в ММ, а время стекания заряда электронов с резистивной поверхности анода

¹Спонтанные пробои в газе могут возникать в результате взаимодействия частиц высоких энергий или космического излучения с элементами конструкции при рождении сильно ионизирующих газ частиц и ядер.

²PC1025@Pyralux (64 micron per sheet) производства Dupont Company.

на землю [11] при снижении быстродействия. С целью повышения быстродействия конструкция μ -RWELL совершенствовалась многократно, пока не была достигнута загрузочная способность 10 МГц/см² [12], на два порядка выше, чем в МПК.

Еще большее быстродействие в структуре типа RWELL получено в работах [13, 14], где резистивная пленка из DLC нанесена на проводящую печатную решетку, выполненную с шагом 0,5–1,5 мм, окружающую каждое отверстие или группу отверстий. В работе [14] показано, что при достаточно высокой надежности работы прибора быстрая электронная компонента заряда практически без потерь проходит через такую густую решетку на считывающий электрод (стрипы), в то время как медленная компонента подавляется до уровня 1 % от амплитуды быстрой компоненты. Нетрудно видеть, что по загрузочной способности и мертвому времени устройство с такой конструкцией превосходит μ -RWELL.

1. МПГЭУ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПРОВОЛОЧКАМИ

Цель настоящей работы — развитие идеи многопроволочного газонаполненного электронного множителя (МПГЭУ, англ. MWEM — Multi-Wire Electron Multiplier) с параллельными проволочками, впервые выдвинутой в 2001 г. М. Д. Шафрановым и Т. П. Топуря [15], согласно которой умножение первичного заряда происходит между параллельными проволочками, размещенными в два ряда с одинаковым шагом. Электрическое поле в такой конструкции «щелевое», аналогично тому, что было получено в микроструктурном детекторе типа MGD [16], отличающееся по форме от «дипольного» в отверстиях GEM [1].

В предложенной конструкции МПГЭУ не возникает пространственного заряда вокруг проволочек, приводящего к уменьшению первоначального потенциала и усиления, а также экранирующего проволочки и снижающего быстродействие, как это происходит в МПК. Благодаря субмиллиметровому шагу проволочек в МПГЭУ достигается высокое пространственное разрешение, превосходящее разрешение МПК, у которых типовой шаг проволочек 2–3 мм.

Координатный детектор, выполненный на основе МПГЭУ с параллельными проволочками (PWEM — Parallel WEM), состоит из двух идентичных плоскопараллельных проволочных электродов, дополненных двумя другими электродами с образованием трех зазоров: рабочего (область конверсии, в которой возникает первичный заряд), зазора умножения и индукционного зазора. Рабочий зазор создается введением дрейфового электрода, выполняющего роль катода детектора, подключенного к отрицательному потенциалу и расположенного на расстоянии 3–5 мм от первого ряда проволочек. Первый проволочный электрод является катодом МПГЭУ, за ним следует второй проволочный электрод, выполняющий функцию анода МПГЭУ. Индукционный зазор образуется между анодом МПГЭУ и считывающим электродом, см. рис. 1.

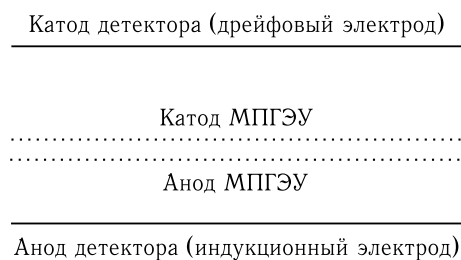


Рис. 1. Схематическое изображение детектора на основе МПГЭУ

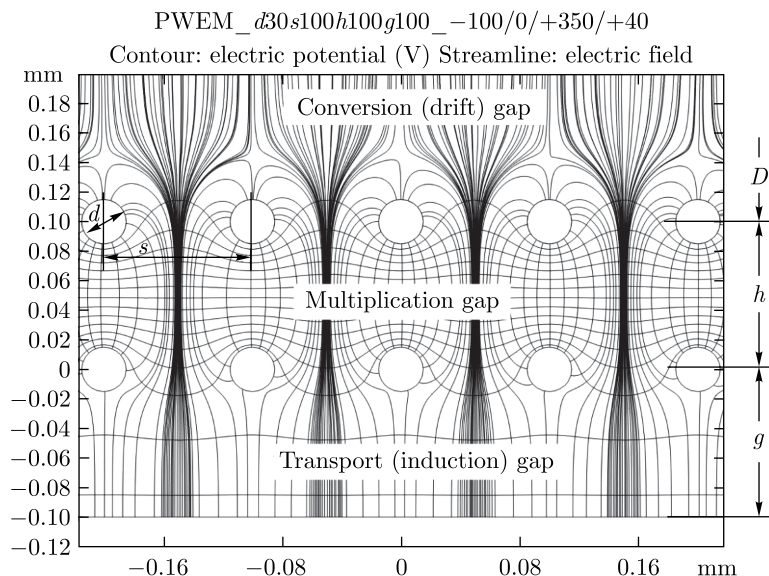


Рис. 2. Линии напряженности электрического поля и эквипотенциали в плоскости, перпендикулярной электродам МПГЭУ

Между проволочными электродами при соответствующей разности потенциалов, превышающей некоторый порог, происходит лавинное умножение первичного заряда с рождением вторичных пар электрон-ион. Отношение вторичного заряда к первичному есть коэффициент газового усиления (КГУ) прибора.

На рис. 2 показано электрическое поле с линиями напряженности и эквипотенциалами в плоскости, перпендикулярной проволочкам, полученное в настоящей работе для дрейфового зазора D и геометрии электродов $d30s100h100g100$, где d — диаметр проволочек, s — шаг, h — зазор умножения, g — индукционный зазор. При этом использовались следующие полярности и потенциалы на электродах: $-100/0/+350/+400$ В соответственно, на дрейфовом электроде — катоде детектора, на первом и втором проволочных электродах, на индукционном электроде — аноде детектора.

На рис. 3 приведена зависимость напряженности поля $E(z)$ вдоль оси z , проведенной посередине «щели» между параллельными проволочками в направлении от катода к аноду. На рисунке видны относительно низкие значения напряженности поля в дрейфовом зазоре (1 кВ/см), в индукционном зазоре (5 кВ/см) и существенное увеличение напряженности в зазоре умножения шириной $h = 100$ мкм.

При определенном значении $E_{\min} \sim 20$ кВ/см электроны достигают энергии, достаточной для ионизации атомов газа (подробнее об этом в разд. 3). Дальнейшее умножение заряда происходит лавинообразно, при этом зависимость КГУ от напряжения носит экспоненциальный характер.

Считывание координат усиленного (вторичного) заряда в приведенной геометрии может быть выполнено полосками или пэдами/пикселями, размещенными в конце индукционного зазора на дополнительной плате, как это реализовано в GEM или MM.

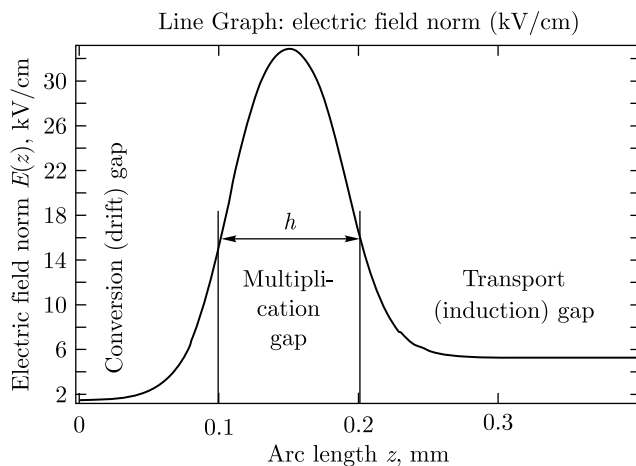


Рис. 3. Зависимость напряженности поля $E(z)$ вдоль оси z , проведенной посредине «щели» между проволочками перпендикулярно электродам

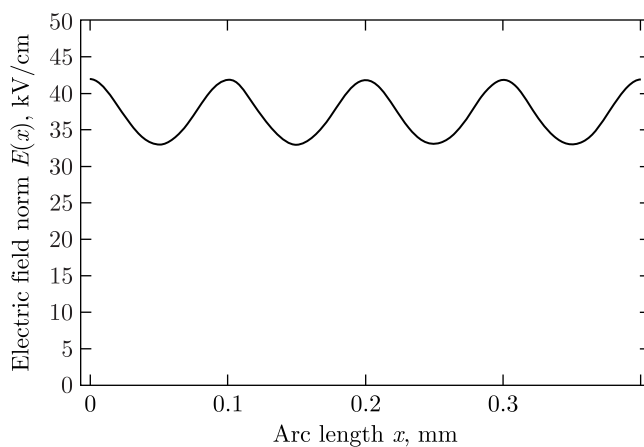


Рис. 4. Зависимость напряженности поля $E(x)$ вдоль оси x , проведенной посредине между первым и вторым электродами поперек проволочек

Из рис. 2 видно, что не все вторичные электроны пройдут в индукционный зазор из-за того, что часть линий поля замыкается между проволочками первого и второго ряда. Из рис. 4, на котором показана почти постоянная напряженность поля поперек проволочек $E(x)$, следует, что при равномерном распределении электронов в зазоре умножения почти равновероятно электрону оказаться в области линий поля, уходящих в индукционный зазор, и в области линий поля, замыкающихся на анод МПГЭУ и теряющихся. Аналогичные потери электронов происходят между электродами в GEM, и в индукционный зазор попадает не весь заряд, отсюда с учетом потерь при считывании координат с анода детектора правильно говорить об «эффективном» коэффициенте газового усиления [17].

Однако в GEM колодезного типа (WELL, μ -RWELL) и в ММ нет потерь, отмеченных выше, весь вторичный заряд участвует в формировании сигнала на считывающем электроде.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ

Для оценки электрической прозрачности или эффективности передачи первичного заряда из рабочего зазора в зазор умножения воспользуемся аналитическим выражением, полученным в работе [18] для импульсной ионизационной камеры с сеткой Фриша из параллельных проволочек:

$$\sigma = \frac{s}{2\pi h} \log\left(\frac{s}{\pi d}\right), \quad (1)$$

где σ — неэффективность; s — шаг; d — диаметр проволочек; h — ширина зазора умножения.

Как видно, $\sigma = 0$ при $s = \pi d$ независимо от h . Это значит, что зазор умножения можно уменьшать, не снижая эффективности, тем самым уменьшать рабочее напряжение. При этом, с одной стороны, повышается надежность, так как при пробое в газе рассеиваемая мощность пропорциональна квадрату напряжения, а с другой — при малом h легко ввести поддерживающие элементы-спейсеры для улучшения планарности электродов, как это сделано в ММ, что также увеличивает надежность. Кроме того, при малом h уменьшается длительность ионной компоненты в сигнале и повышается быстродействие.

Моделирование проводилось в основном для геометрии с диаметром проволочек $d = 30$ мкм, $s = 100$ мкм и $h = 100$ мкм, но выводы и полученные результаты легко перенести на другие геометрии.

3. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ГАЗОВОГО УСИЛЕНИЯ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ

На этапе моделирования электрических полей желательно знать, какое газовое усиление первичного заряда может быть достигнуто. Известно множество моделей, описывающих зависимость коэффициента газового усиления от напряжения [19–21]. В нашем случае удобно параметризовать искомую зависимость следующей формулой:

$$G(V) = 2^{(V-V_{\min})/\Delta V} = 2^{n(V)}, \quad (2)$$

где V_{\min} — напряжение, соответствующее минимальной напряженности поля E_{\min} , при которой начинается лавинное рождение пар электрон–ион в зазоре умножения; $\Delta V \approx 26$ В — разность потенциалов, соответствующая суммарной энергии, затрачиваемой электроном на ионизацию (~ 15 эВ) и возбуждение (~ 11 эВ) атома аргона, см. $Wi = 26$ эВ в приведенной таблице [22].

Программа COMSOL позволяет строить эквипотенциали с заданным шагом ΔV . Как показано на рис. 2, в зазоре умножения число эквипотенциалей при $V = 350$ В $n(V) = 13$, соответственно, $G(V) = 2^{13} \approx 8000$. Однако с учетом V_{\min} реальная зависимость $G(V)$ будет сдвинута на $V_{\min} = 188$ В, как показано на рис. 5, где V_{\min} найдено из фитированных данных, заимствованных из работы [23] для рабочей газовой смеси $\text{ArCO}_2(7\%)$ при атмосферном давлении.

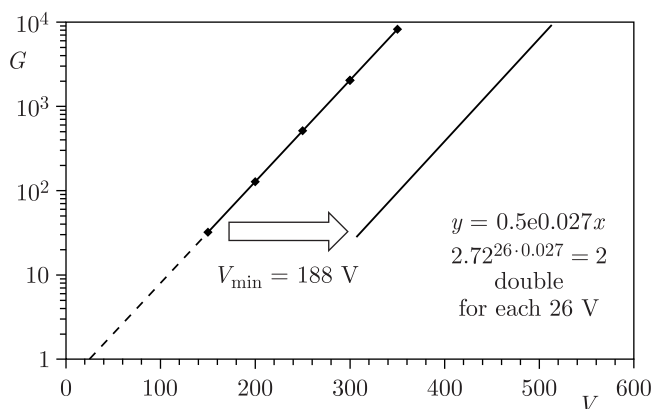


Рис. 5. Зависимость коэффициента газового усиления от напряжения, полученная по числу эквипотенциалей в зазоре умножения

Свойства некоторых газов, используемых в газонаполненных детекторах, при нормальном давлении и комнатной температуре

Газ	ρ , мг · см ⁻³	E_X , эВ	E_I , эВ	W_I , эВ	dE/dx_{\min} , кэВ · см ⁻¹	N_P , см ⁻¹	N_T , см ⁻¹
He	0,18	19,8	24,6	41	0,32	3,5	7,7
Ne	0,84	16,7	21,6	37	1,45	13	40
Ar	1,66	11,6	15,7	26	2,53	25	97
Xe	5,50	8,4	12,1	22	6,87	41	312
CO ₂	1,84	7,0	13,8	34	3,35	35	100
iC ₄ H ₁₀	2,49	6,5	10,6	26	5,67	90	220

4. МПГЭУ СО ВЗАИМНО ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ПРОВОЛОЧКАМИ

МПГЭУ со взаимно ортогональными проволочками — новое техническое решение. Картина электрического поля с линиями напряженности и эквипотенциалами, полученная в геометрии d30s100h100g1000 для такой конструкции МПГЭУ, представлена на рис. 6. При этом в рабочем зазоре (D) и в зазоре умножения (h) созданы такие же напряженности поля, как на рис. 2.

Как видно из рис. 6 и в согласии с формулой (1) даже при $s \approx \pi d$, все линии поля, начинающиеся на катоде детектора, проходят в зазор умножения, значит, первичный заряд из рабочего зазора (D) в зазор умножения (h) передается со 100%-й эффективностью.

5. МПГЭУ С ИНДУКЦИОННЫМ ЗАЗОРОМ БЕЗ УМНОЖЕНИЯ

Как показывает моделирование, для поля, представленного на рис. 6 при напряжениях $-100/0/+350/+400$ В, зависимость напряженности $E(z)$ вдоль оси z , проведенной перпендикулярно электродам, выглядит аналогично представленной на рис. 3 для МПГЭУ с параллельными проволочками, а зависимость $E(x)$ поперек проволочек — аналогично представленной на рис. 4. При напряженности поля в индукционном за-

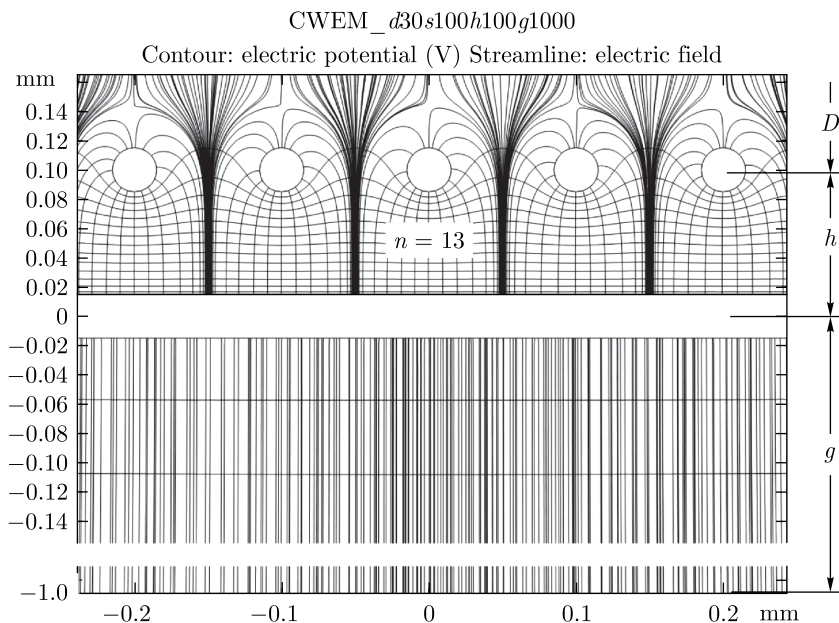


Рис. 6. Линии напряженности электрического поля и эквипотенциали в плоскости, перпендикулярной электродам МПГЭУ с широким индукционным зазором

зоре $E < E_{\min}$ нет умножения. Заряд электронов передается в индукционный зазор ($g = 1000$ мкм) с потерями, как в МПГЭУ с параллельными проволочками.

Однако заряд не теряется, если координаты X и Y снимать по номерам сработавших ортогонально ориентированных проволочек, при этом проволочки можно собрать в стрипы с нужным шагом. При напряжении на зазоре умножения 350 В без поправки на $V_{\min}G(V) = 2^{13} \approx 8000$.

Конструкция МПГЭУ со взаимно ортогональными проволочками интересна тем, что здесь мало вещества в единицах радиационной длины, вносимого в пучок частиц, по сравнению с конструкцией, где координаты X и Y получают при помощи дополнительной печатной платы, как в МПГЭУ с параллельными проволочками, а также в GEM и MM.

6. МПГЭУ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ УМНОЖЕНИЕМ В ИНДУКЦИОННОМ ЗАЗОРЕ

Если индукционный зазор выбрать достаточно узким, как на рис. 7, $g = 100$ мкм, и увеличить напряженность поля в зазоре до величины $E > E_{\min}$, то можно дополнительно умножить заряд перед тем, как он будет зарегистрирован считывающим электродом. На рис. 5 показано, что число эквипотенциалей, соответствующих условию $E > E_{\min}$, в индукционном зазоре (g) такое же, как в зазоре умножения (h). В этом случае получается двухкаскадный МПГЭУ: число эквипотенциалей необходимо сложить, $n(V) = 18$, а коэффициенты умножения перемножить, $G(V) = 2^{18} \approx 250$ тыс.

Считывание координат X и Y в схеме, приведенной на рис. 7, может быть выполнено стрипами или пэдами/пикселями, размещенными на дополнительной плате

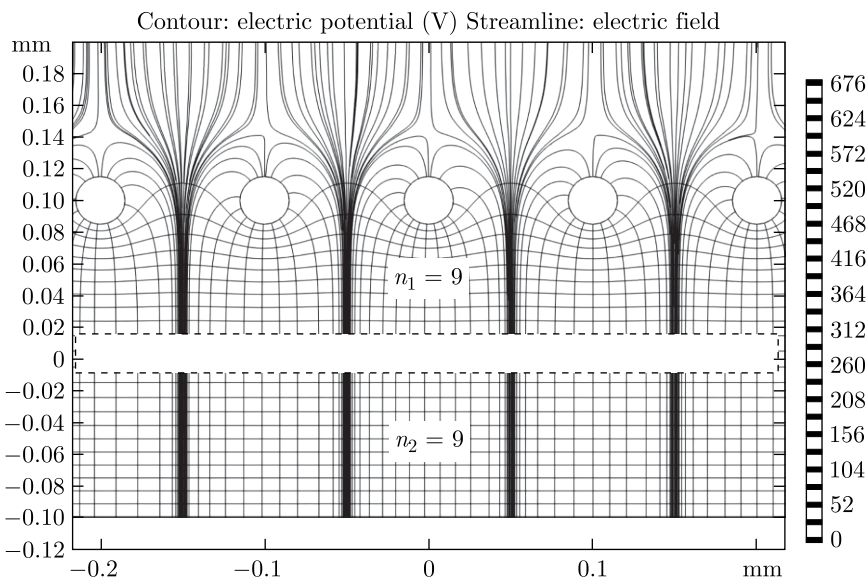


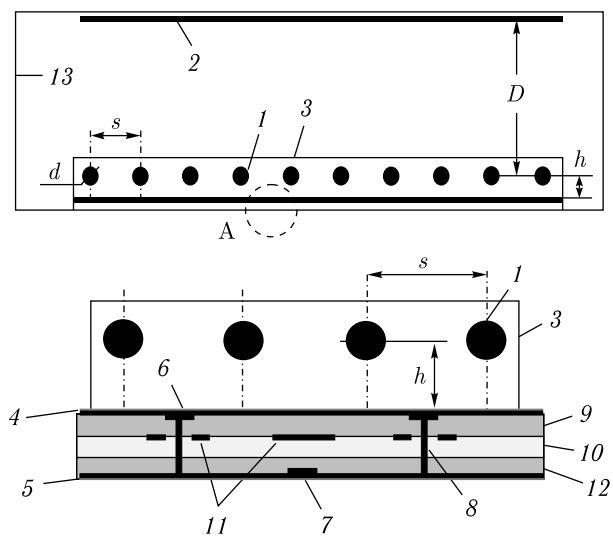
Рис. 7. Линии напряженности электрического поля и эквипотенциали в плоскости, перпендикулярной электродам МПГЭУ с узким индукционным зазором

в конце индукционного зазора. Уменьшив напряжения на зазорах, можно соответственно снизить КГУ в каждом зазоре и тем самым увеличить надежность прибора, а увеличив напряжения — регистрировать существенно меньший первичный заряд, например, как это требуется в однофотонных детекторах.

7. МПГЭУ КОЛОДЕЗНОГО ТИПА

Конструкция МПГЭУ колодезного типа одного из проектов авторов, приведенная на рис. 8, позволяет умножить первичный заряд с помощью одного ряда параллельных проволочек, а координаты X и Y получить с дополнительной считывающей платы подобно тому, как это делается в ММ или μ -RWELL. Детектор, основу которого составляет МПГЭУ этого типа, содержит четыре электрода: дрейфовый, расположенный на расстоянии D , и три электрода в составе МПГЭУ — первый из параллельных проволочек, второй и третий выполнены на многослойной печатной плате, как показано в сечении А. В этом проекте анод МПГЭУ выполнен резистивным из алмазоподобного углерода (АПУ) толщиной 120 нм (поз. 4 и 5 на рис. 7). Пленка АПУ напыляется в вакууме с равными пропорциями sp^2 и sp^3 гибридизации. Первая имеет графитоподобную, вторая — алмазоподобную структуру кристаллической решетки.

Особенность конструкции в том, что здесь пленка АПУ нанесена на печатные сетки (поз. 6 и 7), расположенные на противоположных сторонах платы, что исключает коробление платы, улучшая планарность. Эти сетки сдвинуты друг относительно друга на полшага и соединены металлизированными переходными отверстиями, как показано на рис. 9. Приведенная конструкция обеспечивает высокую надежность прибора при электрических пробоях в детекторе. Резистивный слой, выполненный из АПУ, отличается от других известных резистивных материалов тем, что хорошо противостоит как пробоям, так и радиационному воздействию в больших дозах.



- 1 — 1st electrode
- 4, 5, 6, 7, 8 — 2nd electrode
- 11 — 3rd electrode (readout, e.g. zig-zag strips)
- 3 — spacers

Рис. 8. Конструкция МПГЭУ колодезного типа с резистивным анодом

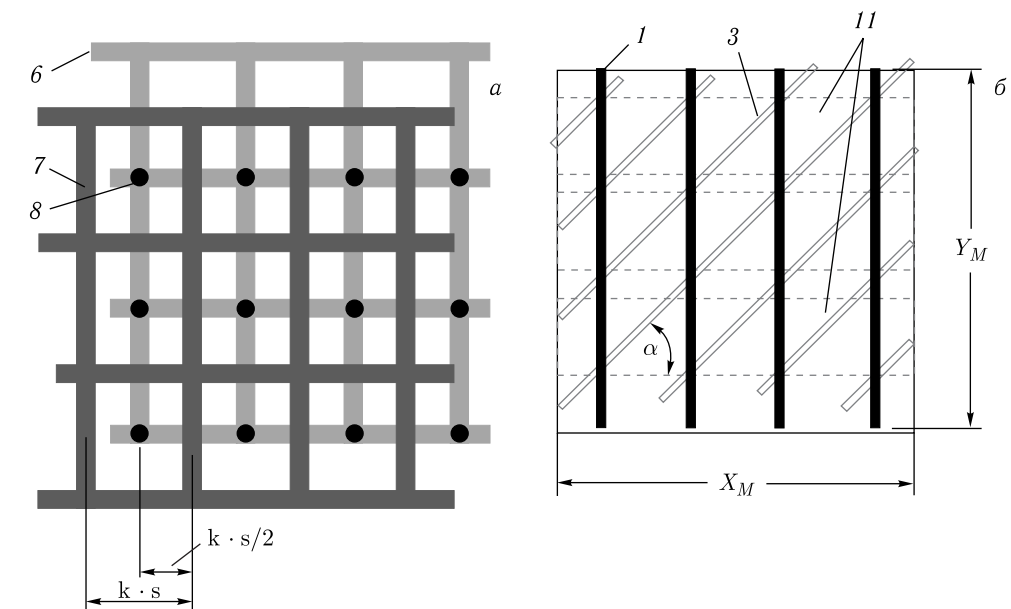


Рис. 9. Часть многослойной платы — печатные сетки, на которые напылен алмазоподобный углерод — анод МПГЭУ (а); спейсеры, выполненные фотолитографией и занимающие площадь 1–2% (б); X_M , Y_M — размеры МПГЭУ

На рис. 9 показано, что планарность электродов обеспечивается спейсерами, поддерживающими проволочки, которые выполнены фотолитографией в виде «гребней», ориентированы под углом 45° к проволочкам и занимают площадь 1–2% (б). Внутри платы размещены стрипы зигзагообразного типа, обеспечивающие двухкоординатное считывание с высоким пространственным разрешением [25].

Работа МПГЭУ колодезного типа и эквивалентная схема мало чем отличаются от описанных в публикациях [13, 14]. Ожидаются аналогичные по форме сигналы на электродах и нагрузочная способность ~ 10 МГц/см².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты моделирования электрических полей и варианты новых координатных детекторов, выполненных на основе многопроволочного газонаполненного электронного умножителя (МПГЭУ), в котором лавинное умножение первичного заряда происходит между проволочками, обладающего по сравнению с многопроволочной камерой (МПК) высокой нагрузочной способностью и субмиллиметровым пространственным разрешением. В этих детекторах по сравнению с ГЕМ и ММ можно получить две координаты X и Y непосредственно с проволочек с существенно меньшим количеством вещества на пути частиц, выраженном в единицах радиационной длины.

Благодарности. Авторы выражают благодарность ЛИТ ОИЯИ за предоставленную возможность использования ресурсов платформы HybridLIT для проведения расчетов с помощью пакета Comsol Multiphysics (v5.6). А. П. Кашук и О. В. Левицкая выполняли работу при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-10-2021-115 от 13.10.2021 г., внутренний номер 15.СИН.21.0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sauli F. GEM: A New Concept for Electron Amplification in Gas Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 386. P. 537.
2. Giomataris Y., Rebourgeard Ph., Robert J., Charpak G. MICROMEGAS: A High-Granularity Position-Sensitive Gaseous Detector for High Particle-Flux Environments // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 376. P. 29.
3. Ahmed W. et al. (CMS Collab.). The Triple GEM Detector Control System for CMS Forward Muon Spectrometer Upgrade // J. Instrum. 2017. V. 12. P. P02003.
4. Proto G. et al. (ATLAS Collab.). The ATLAS Muon Spectrometer Upgrade for High-Luminosity LHC // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1690. P. 012161.
5. Titov M. Perspectives of MPGD Technologies for Future Physics Projects. arXiv: 1308.3047.
6. Ketzer B., Altunbas M. C., Dehmelt K., Ehlers J., Friedrich J., Grube B., Kappler S., Konorov I., Paul S., Placci A., Ropelewski L., Sauli F., Schmitt L., Simon F. Triple GEM Tracking Detectors for COMPASS // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2002. V. 49, No. 5. P. 2403–2410.
7. Giomataris I., De Oliveira R., Andriamonje S., Aune S., Charpak G., Colas P., Fanourakis G., Ferrer E., Giganon A., Rebourgeard Ph., Salin P. Micromegas in a Bulk // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 560. P. 405–408.
8. Feng Jianxin, Zhang Zhiyong, Liua Jianbei, Qi Binbin, Wang Anqi, Shao Ming, Zhou Yi. A Thermal Bonding Method for Manufacturing Micromegas Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 2021. V. 989. P. 164958.

9. *Bencivenni G., De Oliveira R., Morello G., Poli Lener M.* The Micro-Resistive WELL Detector: A Compact Spark-Protected Single Amplification-Stage MPGD // *J. Instrum.* 2015. V. 5, No. 10. P. P02008.
10. *Bellazzini R., Bozzo M., Brez A., Gariano G., Latronico L., Lumb N., Papanestis A., Spandre G., Massai M. M., Raffo R., Spezziga M. A.* The WELL Detector // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1999. V. 423. P. 125.
11. *Riegler W.* Electric Fields, Weighting Fields, Signals and Charge Diffusion in Detectors Including Resistive Materials // *J. Instrum.* 2016. V. 11. P. P11002.
12. *Bencivenni G., De Oliveira R., Felici G., Gatta M., Giovannetti M., Morello G., Ochi A., Poli Lener M., Tskhadadze E.* The μ -RWELL Layouts for High Particle Rate // *J. Instrum.* 2019. V. 14. P. P05014.
13. *Kashchuk A., Akulich V., Afanaciev K., Bayev V., Kravchuk N., Kuchinskiy N., Levitskaya O., Solin A. V., Solin A. A., Movchan S., Tchekhovski V.* Signals in the Well Electron Multiplier with the DLC Anode // *J. Instrum.* 2020. V. 15. P. C09018.
14. *Kashchuk A., Akulich V., Afanaciev K., Bayev V., Churakov A., Kravchuk N., Kuchinskiy N., Levitskaya O., Solin A. V., Solin A. A., Movchan S., Tchekhovski V.* The Well (Micro-Well) Electron Multiplier with the DLC Anode — a Key Element of the Robust and Fast 2D-Position Sensitive MPGD // *Ibid.* P. C09041.
15. *Shafranov M., Topuria T.* The Position-Sensitive Detector of High Spatial Resolution on the Basis of a Multiwire Gas Electron Multiplier // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2001. No. 2. P. 105.
16. *Bellazzini R., Bozzo M., Brez A., Gariano G., Latronico L., Lumb N., Papanestis A., Spandre G., Massai M. M., Raffo R., Spezziga M. A.* The Micro-Groove Detector // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1999. V. 424. P. 444–458.
17. *Sauli F.* The Gas Electron Multiplier (GEM): Operating Principles and Applications // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 805. P. 2–24.
18. *Buneman O., Cranshaw T. E., Harvey J. A.* Design of Grid Ionization Chambers // *Can. J. Res. A.* 1949. V. 27. P. 191.
19. *Mazed D., Baaliouamer M.* A Semi-Microscopic Derivation of Gas Gain Formula for Proportional Counters // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1999. V. 437. P. 381–392.
20. *Dane E., Penso G., Pinci D., Sarti A.* Detailed Study of the Gain of the MWPCs for the LHCb Muon System // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2007. V. 572. P. 682–688.
21. *Thorpe T., Vahsen S.* Avalanche Gain and Its Effect on Energy Resolution in GEM-Based Detectors. arXiv:2106.15568v1.
22. *Sauli F.* Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers. CERN 77-09. 1977.
23. *Alexopoulos T., Burnens J., De Oliveira R., Glonti G., Pizzirusso O., Polychronakos V., Sekhniaidze G., Tsiopolitis G., Wotschack J.* A Spark-Resistant Bulk-Micromegas Chamber for High-Rate Applications // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 640. P. 110–118.
24. *Brunbauer F. M., Chatterjee C., Cicala G., Cicuttin A., Ciliberti P., Crespo M. L., D'Ago D., Dalla Torre S., Dasgupta S., Gregori M.* Nanodiamond Photocathodes for MPGD-Based Single Photon Detectors at Future EIC. arXiv:2006.02352v2. 2020; *J. Instrum.* V. 15. P. C09052.
25. *Azmoun B., Aune S., Dehmelt K., Deshpande A., Fan W., Garg P., Hemmick T. K., Kebbiri M., Kiselev A., Mandjavidze I., Pereira-Da-Costa H., Perez-Lara C. E., Purschke M. L., Revolte M. V.* Design Studies of High Resolution Readout Planes Using Zigzags with GEM Detectors // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2020. V. 67, Iss. 8.