

P13-2012-93

К. И. Давков, И. А. Жуков, В. В. Мясковский,
В. Д. Пешехонов, Н. А. Русакович

КОординатная мюонная камера на основе
тонкостенных дрейфовых трубок (СТРОУ)

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Давков К. И. и др.

P13-2012-93

Координатная мюонная камера
на основе тонкостенных дрейфовых трубок (строу)

Рассматривается прототип модуля с чувствительными размерами $2 \times 0,5$ м на основе ТДТ длиной 2 м, геометрические размеры трубок модуля сохраняются при давлении до 4 бар и не зависят от окружающей температуры и влажности. Предложенная методика дает возможность изготовления относительно недорогих планарных модулей с использованием строу-трубок в количестве, необходимом для создания детекторов больших площадей на коллайдерах или в других экспериментах, объединения их в единую координатную детектирующую систему требуемой конфигурации. Отличительной особенностью детектора является его хорошая радиационная стойкость, низкая радиационная толщина и возможности оптимизации режима работы детектора в широком диапазоне давления рабочего газа.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2012

Davkov K. I. et al.

P13-2012-93

Straw-Based Coordinate Muon Chambers

The article considers a prototype module with sensitive dimensions of 2×0.5 m based on 2 m long straw tubes which preserves its geometrical dimensions up to the pressure of 4 bar independently of the ambient temperature and humidity. The suggested technique provides a possibility of constructing relatively low-cost planar modules by using straw tubes as long as needed for constructing large area detectors at colliders or other field experiments by assembling them in a common coordinate detector with a user-specified acceptance. The distinguishing feature of a detector is its good radiation hardness, low radiation thickness and a possibility of optimizing the detector operation mode in a large range of gas pressure.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Газонаполненные детекторы широко применяются в экспериментах на ускорителях. Дрейфовые камеры (ДК) с катодным считыванием, резистивные плоскопараллельные (РПК) и тонкоззорные (ТЗК) камеры, а также координатные детекторы на основе трубок большого диаметра успешно работают в составе мюонных детекторов установок SMC и ATLAS LHC и др. [1–3]. Алюминиевые дрейфовые трубки способны работать в широком диапазоне давления их газового наполнения, но обладают большим временем сбора электронов ионизации и пониженной нагрузочной способностью из-за искажающего электрическое поле объемного заряда медленно дрейфующих положительных ионов. Трубки позволяют перекрывать большие площади детектирования, что вызывает интерес к применению их для радиографических и томографических исследований крупномасштабных объектов мюонными детекторами с высоким угловым разрешением [4, 5]. Однако возможность повышения нагрузочной способности координатных детекторов на основе алюминиевых трубок уменьшением их диаметра ограничено возможным ухудшением собственных точностных параметров, таких как однородность диаметров и прямолинейность длинных трубок.

Однотипные координатные детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок (ТДТ) диаметром от 4 до 15 мм, обладающие хорошей прямолинейностью и высокой однородностью внутреннего и внешнего диаметров вне зависимости от их длины, хорошо известны [6, 7]. ТДТ обладают низкой радиационной толщиной и более высокой гранулярностью за счет уменьшения их диаметра и возможности использования сегментированных анодов [8, 9]. Отношение радиационных толщин Al-трубки с типичной толщиной стенки 0,4 мм и ТДТ более 18, что указывает на некоторую возможность конструктивного увеличения радиационной толщины детекторов на основе ТДТ.

В работе рассматривается однослойный модуль с чувствительным размером $2 \times 0,5$ м на основе ТДТ длиной 2 м. Геометрические размеры трубок модуля сохраняются при давлении до 4 бар и не зависят от параметров окружающей среды.

КОНСТРУКЦИЯ

При разработке прототипа рассматривалась возможность создания типовых модулей, удобных для объединения их в детектирующие системы большой площади и способных работать при повышенном давлении их газового наполнения.

Разработанный однослойный прототип представляет собой жесткую планарную структуру, содержащую N (число кратное восьми) ТДТ, залитых эпоксидным компаундом. Толщина структуры равна $2(r + 0,1)$ мм, где r — радиус трубок. При ее создании сохраняется прямолинейность и постоянство диаметра ТДТ, а также постоянство зазора между стенками соседних трубок, при этом частично применяется разработанная ранее в ОИЯИ технология создания трека спектрометра COMPASS [10, 11].

Прототип содержит 48 трубок, идентичных трубкам трека COMPASS, с внутренним диаметром 9,56 мм и длиной 2 м, намотанных двумя полиимидными лентами, из которых внутренняя лента — проводящая и является катодом. Толщина стенки трубок ~ 60 мкм. По бокам жесткой структуры параллельно ТДТ наклеен алюминиевый тонкостенный профиль, высота которого больше толщины структуры на величину d , где d — диаметр металлических трубок, используемых в качестве газовых коллекторов (рис. 1). После изготовления структуры в трубки устанавливаются аноды из золоченой вольфрамовой проволоки диаметром 30 мкм с натяжением 70 г и с одним центральным по их длине поддерживающим спейсером [11]. Аноды фиксируются в медных капиллярных трубках концевых втулок. Затем контролируется однородность величин сигналов каждой трубки при ее индивидуальном продуве газовой смесью и облучении источником Fe^{55} . После тестирования на одной поверхности структуры вблизи концов ТДТ устанавливаются два трубочных газовых коллектора для входа и выхода рабочей газовой смеси, объединяемые с боковыми профилями в общую раму модуля и в дальнейшем заливаемые эпоксидным компаундом. На рис. 1 показана схема установки газового коллектора, соединенного с внутренним объемом каждой трубки через отверстия в их стенках и в их концевых втулках металлическими трубками, устанавливаемыми ортогонально к плоскости модуля. Поверхность ламинируется металлизированной пленкой, используемой в качестве электромагнитного экрана и для защиты от повышенной влажности окружающей среды, а также устанавливаются углеродистые стеклопластиковые поддерживающие ленты высотой h с шагом, величина которого может меняться в зависимости от длины модуля (рис. 2). На прототипе установлены три равноудаленных стеклопластиковых стрипа толщиной 0,2 мм и высотой 8 мм на каждой поверхности модуля, так как не предполагалось объединение его в двухслойную камеру. Платы считывания сигналов с анодов трубок и их согласования устанавливаются с двух концов ТДТ в непосредственной близости к концевым втулкам, аноды гальванически соеди-

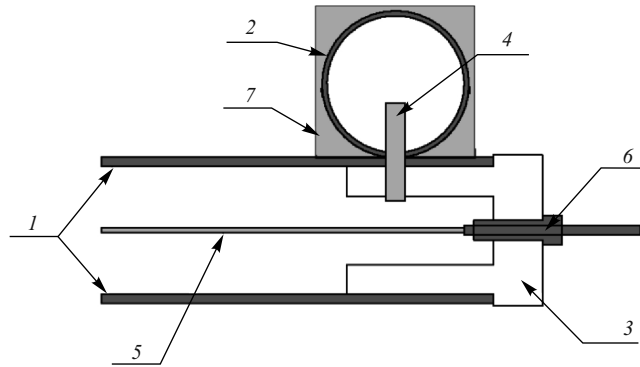


Рис. 1. Схема установки газового коллектора на плоскость модуля: 1 — стенки ТДТ; 2 — Al-трубка диаметром 8 мм и толщиной стенки 0,4 мм; 3 — пластиковая концевая втулка; 4 — металлическая трубка; 5 — анод; 6 — фиксирующая анод втулка; 7 — заливка эпоксидным компаундом

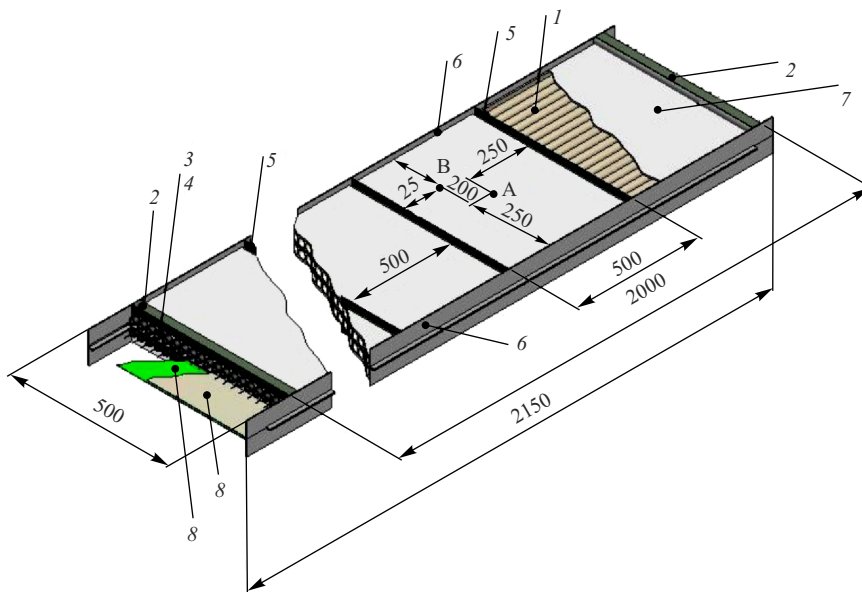


Рис. 2. Схематичное изображение двухслойного детектора: 1 — стру; 2 — залитые компаундом трубчатые газораспределительные коллекторы; 3 и 4 — концевые втулки; 5 — поддерживающие стрипы; 6 — тонкостенные профили; 7 — металлизированная пленка; 8 — платы считывания. Платы согласования устанавливаются у противоположных концов стру и не видны из-за их малой ширины

няются с соответствующими шинами плат, после чего торцевые части трубок и втулок герметизируются компаундом. Таким образом, типовой модуль имеет два трубчатых газовых коллектора на его внешней стороне, являющихся также элементами его рамы. При этом газовые коллекторы не содержат способного к адгезии внутреннего вещества, а платы считывания и согласования соединяются с анодами, минуя герметичные газовые объемы.

Противоположная газовым коллекторам поверхность типовых модулей служит для склеивания двух идентичных модулей в единый конструктивный узел с распределительными трубчатыми газовыми коллекторами, элементами высоковольтного питания ТДТ и платами передачи регистрируемых сигналов на внешнюю электронику считывания. При склеивании модули сдвигаются друг относительно друга на величину радиуса трубок. Общая рама такого двухслойного детектора может иметь установочные отверстия для его объединения с аналогичными в единую детектирующую систему. На рис. 2 схематично показан общий вид и некоторые геометрические размеры двухслойного детектора, состоящего из двух модулей.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯ

При повышении давления газового наполнения отдельной ТДТ происходит удлинение ее пленочной стенки, что приводит к изгибу закрепленной в концах строу [12]. Отклонения поверхности плоскости модуля в ортогональном к ней направлении в зависимости от давления газового наполнения были измерены в показанных на рис. 2 точках А и В, результаты приведены на рис. 3. Точка А находится в центре ограниченной двумя поддерживающими лентами части плоскости и точка В — вблизи поддержки. Видно, что при повышении давления газа происходит быстрое увеличение толщины структуры. Величина быстрого отклонения поверхности плоскости в точке А при давлении 4 бар составляет 260 мкм. В течение следующих $\sim 2,5$ ч происходит медленное увеличение этой величины до ~ 350 мкм, что составляет около 7% радиуса ТДТ. После сброса давления расширение плоскости быстро уменьшается до ~ 100 мкм в этой точке и восстанавливается полностью через $\sim 2,5$ ч. Аналогичные изменения в точке В при давлениях 4 и 3 бар меньше в 1,6 и 1,8 раз соответственно. Эти изменения приводят к незначительному нарушению цилиндричности трубок, например, допускаемая анод-катодная несоосность ТДТ детектора переходного излучения — трекера установки АТЛАС, составляла 10% [13]. Величина максимального отклонения поверхности плоскости структуры может быть снижена уменьшением шага установки поддержек или увеличением толщины модуля.

Проверка герметичности прототипа показала наличие газовой течи около 2,4 мбар/ч при давлении 4 бар ($< 0,05$ мбар/ч на трубку), причиной кото-

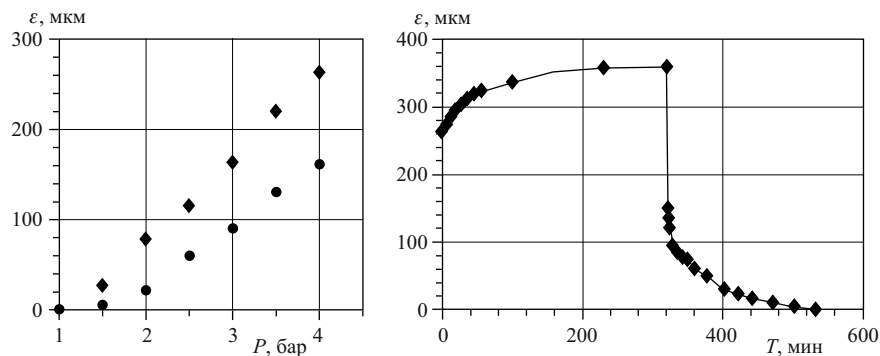


Рис. 3. Смещение поверхности модуля ε при изменении давления газового наполнения до 4 бар. Слева — быстрое изменение при повышении давления, справа — последующее медленное изменение и затем релаксация после сброса давления

рой являлась недостаточная герметичность соединения медной капиллярной трубки с пластиковым покрытием элементов фиксации анодов. Дополнительная герметизация их торцов эпоксидом устранила эти течи.

Радиационная толщина типичных ТДТ менее $0,05\% X_0$. На рис. 4 показано соотношение между алюминиевыми трубками с различной толщиной их стенок и модулями, аналогичными представленному на основе ТДТ различных диаметров, при которых радиационные толщины их одинаковы. Видно, что для строу диаметром 4–6 мм увеличение радиационной толщины может быть пренебрежимо.

Детекторы на основе ТДТ малого диаметра имеют высокое быстродействие, близкое к единице отношение их габаритных размеров к чувствительным, а используемые высокоточные и достаточно дешевые трубки большой длины при необходимости могут быть гранулированными [9].

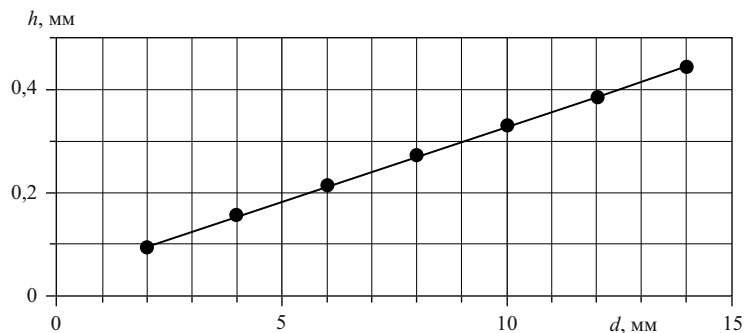


Рис. 4. Соотношение между толщиной стенок Al-трубок (ось ординат) и диаметром строу (ось абсцисс), обеспечивающих равную радиационную толщину детекторов на их основе

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОТОТИПА В РАБОЧЕМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЯ

Тестирование прототипа проводилось при давлении газовой смеси ArCO_2 (80/20) от 1 до 3 бар при облучении источником Fe^{55} . Также изучался сильноточковый режим работы ТДТ при давлении 3 бар, в котором ранее было получено пространственное разрешение лучше 50 мкм при эффективности детектирования 99 % [14].

Величины сигналов в относительных единицах и энергетическое разрешение строу в зависимости от анодного напряжения для давления газовой смеси от 1 до 3 бар приведены на рис. 5. Видно ухудшение энергетического разрешения с увеличением давления. Пунктирная кривая показывает амплитуды сигналов на уровне энергетического разрешения 40 %. При этом уровне энергетического разрешения для трубок с анодами диаметром 30 мкм и выбранной газовой смесью при повышении давления от 1 до 1,5 и 3 бар величины сигналов уменьшаются более чем в 2 и 5 раз соответственно. Полное время сбора электронов ионизации при изменении давления от 1 до 3 бар увеличивается от ~ 100 до ~ 200 нс [12].

Типичные сигналы ТДТ при давлении газовой смеси 1 бар для анодного напряжения 1,79 и 1,87 кВ приведены на рис. 6. При газовом уси-

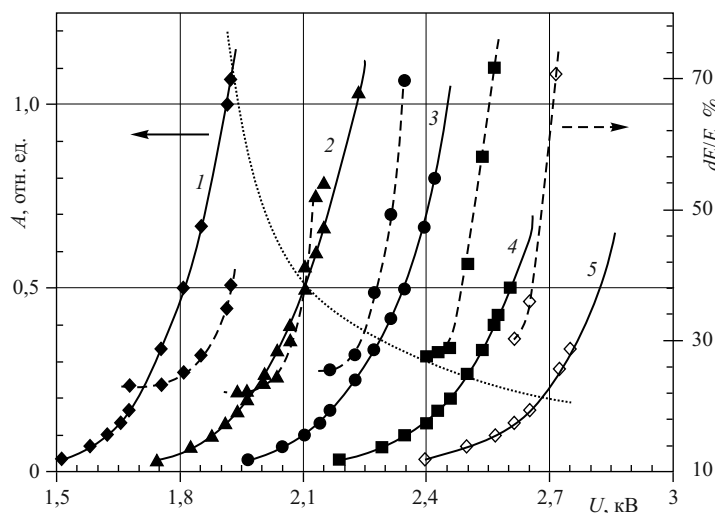


Рис. 5. Величины сигналов от гамма-квантов с энергией 5,9 кэВ (сплошные кривые) и энергетическое разрешение (штриховые кривые) в зависимости от анодного напряжения. Пары кривых под номерами от 1 до 5 соответствуют давлению газовой смеси 1; 1,5; 2; 2,5 и 3 бар. Пунктирная кривая ограничивает величины сигналов, ниже которых энергетическое разрешение лучше 40 %

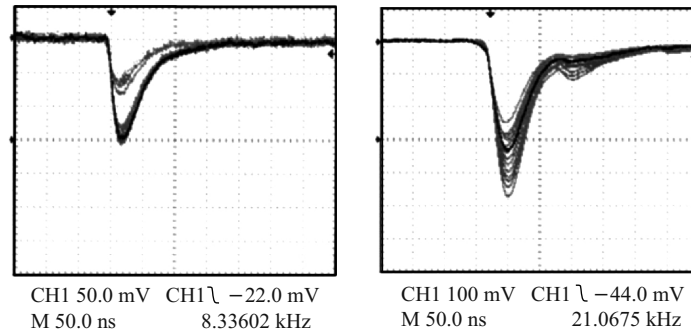


Рис. 6. Осциллограммы с трубок при анодном напряжении 1,79 (слева) и 1,97 кВ (справа), на которых видны послеимпульсы, появляющиеся с увеличением анодного напряжения. Давление газовой смеси 1 бар

лении около $3 \cdot 10^4$ видно хорошее разделение основного энергетического пика и пика вылета, с увеличением напряжения ухудшается энергетическое разрешение и появляются послеимпульсы, способные вызывать срабатывание регистрирующей электроники при газовом усилении $\sim 7 \cdot 10^4$.

С повышением давления ухудшается энергетическое разрешение и уменьшается рабочий диапазон в режиме пропорционального усиления. На рис. 7 приведены сигналы от γ -квантов с энергией 5,9 кэВ при давлении газового наполнения 3 бар. Отношение максимальных сигналов к минимальным составляет ~ 3 при анодном напряжении 2,75 кВ. При дальнейшем увеличении напряжения наблюдаются сигналы во всем представленном диапазоне амплитуд и появляются сильноточные сигналы, количество которых при напряжении $\sim 2,85$ кВ достигает $\sim 20\%$. С увеличением напряжения до 2,95; 3,05 и 3,1 кВ количество их увеличивается до ~ 45 ; 70 и 75 % соответственно. Наличие большого динамического диапазона сигналов указывает на переходный режим работы детектора.

Измерения наводимых на соседние каналы сигналов с облучаемой строу показали, что при давлении 1 бар величина кросс-тока $\sim 0,6\%$. На рис. 8 приведены типичные сигналы с облучаемой (верхний сигнал) и соседней с ней трубок (нижний сигнал) для давления 3 бар при анодном напряжении 2,9 кВ, слева — нормальное событие, справа — сильноточное событие. Видно, что отношения однополярных сигналов не превышают эту же величину.

Счетные характеристики для давления газового наполнения 1 и 3 бар при порогах регистрации ~ 3 ; 4,5 и 8 фКл показаны на рис. 9. С увеличением давления газового наполнения до 3 бар эффективность регистрации γ -квантов увеличилась с коэффициентом $k_p \approx 2,4$. При давлении 1 бар наблюдается слабая зависимость уровня шумов от порога дискриминации до анодного напряжения 1,95 кВ. При давлении 3 бар детектор может работать

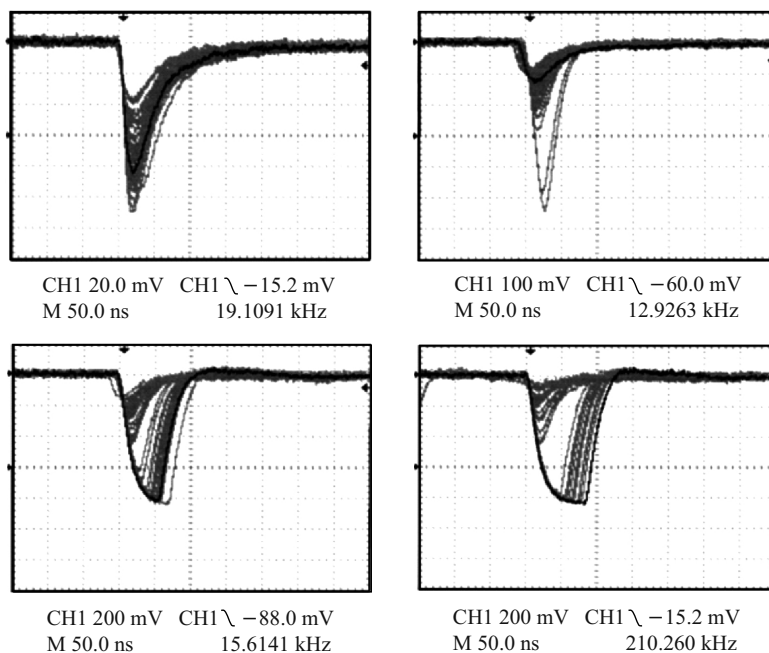


Рис. 7. Сигналы от γ -квантов с энергией 5,9 кэВ при давлении газового наполнения 3 бар. Верхний ряд: слева — анодное напряжение 2,75 кВ, справа — 2,85 кВ. Нижний ряд: слева — напряжение 3,05 кВ, справа — 3,1 кВ

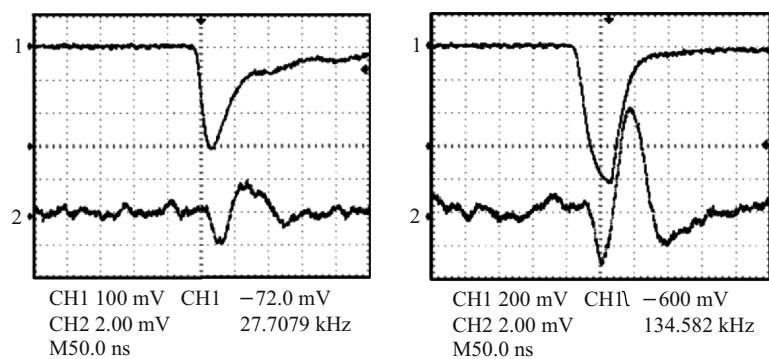


Рис. 8. Величина кросс-тока для ТДТ при анодном напряжении 2,9 кВ. Слева — событие нормальной амплитуды, справа — сильноточное событие. Вверху — сигнал с облучаемой трубки, внизу — наведенный сигнал канала считывания соседней трубки в режиме ограниченной пропорциональности с возможностью образования сильноточных событий. Видна возможность низкопороговой регистрации событий при низком уровне шумовых сигналов и кросс-токов. При высоких

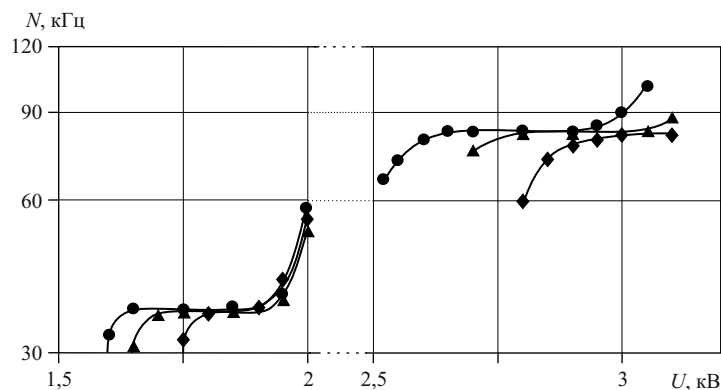


Рис. 9. Счетные характеристики при трех значениях порога регистрации для газового наполнения 1 и 3 бар. Слева — счетные характеристики при давлении 1 бар, справа — 3 бар. Порог дискриминации составляет: ● — ~ 3 фКл, ▲ — $\sim 4,5$ фКл и ◆ — $\sim 8,5$ фКл

порогах дискриминаторов $\sim 8,5$ и ~ 12 фКл наблюдается потеря эффективности около 3 и 9% соответственно, что говорит о наличии сигналов малой величины.

Дрейфовые трубки при работе в пропорциональном и ограниченно-пропорциональном режимах обладают хорошей радиационной стойкостью [6, 15–17]. Предварительное тестирование ТДТ в сильно токовом режиме при давлении газовой смеси 3 бар и напряжении 3,05 кВ, при котором было получено высокое пространственное разрешение, показало отсутствие старения трубок при регистрации $\sim 2 \cdot 10^{11}$ гамма-квантов с энергией 8 кэВ на 1 см длины анода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология модуля позволяет создавать относительно дешевые планарные детекторы со строу необходимой длины с возможностью объединения их в единый координатный детектор с требуемым аксептансом. Использование строу малого радиуса повышает быстродействие детектора, а возможность их грануляции увеличивает применимость в условиях больших загрузок. Хорошая радиационная стойкость, низкая радиационная толщина и возможность работы детекторов большой площади при их газовом наполнении до 4 бар позволяет оптимизировать рабочий режим детекторов, например, работать в пропорциональном режиме или режиме ограниченной пропорциональности при давлении до 3 бар. Кроме того, представляет интерес возможность регистрации МПР с высоким пространственным разрешением в сильно токовом режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aad G. *et al.* // JINST. 2008. V. 3. P. S08003.
2. Adorisio C. *et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 400–415.
3. Engl A. *et al.* arXiv: 0908. 2507.
4. Anghel V. // Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec. (NSS/MIC). IEEE. 2010. V. 6. P. 547.
5. Morris C. L. *et al.* // Science and Global Security. 2008. V. 16. P. 37–53.
6. Abbon P. *et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 577. P. 455–518.
7. Abat E. *et al.* // JINST. 2008. V. 3. P. 10003.
8. Davkov K. *et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 584. P. 285–290.
9. Bazylev S. N. *et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 632. P. 75–80.
10. Bychkov V. N. *et al.* // Part. Nucl. Lett. 2002. No. 2(111). P. 64–73.
11. Bychkov V. N. *et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 556. P. 66–79.
12. Davkov V. I. *et al.* // Instr. Exp. Techn. 2008. V. 51, No. 6. P. 787–791.
13. Gusakov Yu. V. *et al.* // Phys. Part. Nucl. 2010. V. 41. P. 1–26.
14. Davkov V. I. *et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 634. P. 5–7.
15. Akesson T. *et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 515. P. 166–179.
16. Deile M. *et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 518. P. 65–68.
17. Bittner B. *et al.* // Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.). 2011. V. 215. P. 143–146.

Получено 16 августа 2012 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 06.12.2012.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 1,02. Тираж 245 экз. Заказ № 57854.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/