

## КООРДИНАТНАЯ МЮОННАЯ КАМЕРА НА ОСНОВЕ ТОНКОСТЕННЫХ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК

© 2013 г. К. И. Давков, И. А. Жуков, В. В. Мялковский,  
В. Д. Пешехонов, Н. А. Русакович

*Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория физики высоких энергий  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6*

*E-mail: pyd@sunse.jinr.ru*

Поступила в редакцию 30.08.2012 г.

Описаны конструкция и технология изготовления модуля прототипа координатного детектора размером  $2 \times 0.5 \text{ м}^2$  на основе дрейфовых строу-трубок длиной 2 м. Выбор конструкции и технологии предусматривает возможность создания на основе таких модулей детекторов большой площади. Приведены результаты тестирования модуля при давлении газа от 1 до 4 бар. Характерными особенностями модуля являются низкая радиационная толщина, хорошая радиационная стойкость, высокая эффективность регистрации заряженных частиц, а также возможность высокого гранулирования (строу-трубки малого диаметра) и сегментирования по длине трубок. Отмечается возможность оптимизации режима работы модуля в широком диапазоне давлений рабочего газа.

DOI: 10.7868/S0032816213040198

### ВВЕДЕНИЕ

Газонаполненные детекторы широко применяются в экспериментах на ускорителях. Дрейфовые камеры с катодным считыванием, резистивные плоскопараллельные и тонкоззорные камеры, а также координатные детекторы на основе трубок большого диаметра успешно работают в составе мюонных детекторов установок SMC и ATLAS LHC и других [1–3].

Детекторы на основе дрейфовых трубок позволяют перекрывать большие площади детектирования, что вызывает интерес к применению их для радиографических и томографических исследований крупномасштабных объектов с помощью мюонных детекторов с высоким угловым разрешением [4, 5]. В качестве базовых элементов используются либо алюминиевые дрейфовые трубки, либо строу-трубки – тонкостенные тонкопленочные дрейфовые трубки.

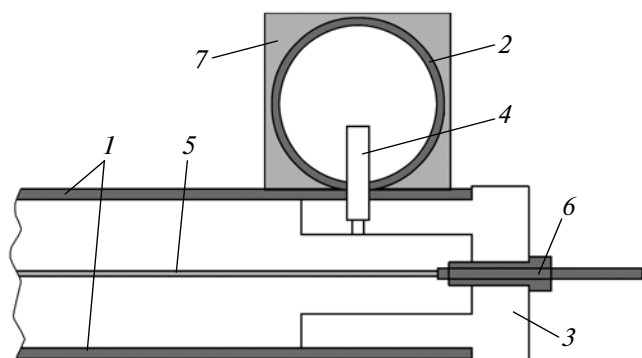
Алюминиевые дрейфовые трубки способны работать в широком диапазоне давлений газового наполнения, но обладают большим временем сбора электронов ионизации и пониженной нагрузочной способностью из-за искажающего электрическое поле объемного заряда медленно дрейфующих положительных ионов. Возможность повышения нагрузочной способности координатных детекторов на основе алюминиевых трубок путем уменьшения их диаметра ограничена вероятным ухудшением собственных точностных параметров, таких как однородность диаметров и прямолинейность длинных трубок.

Хорошо известны [6, 7] однотипные координатные детекторы на основе тонкопленочных дрейфовых трубок (т.д.т.) диаметром от 4 до 15 мм с хорошей прямолинейностью и высокой однородностью внутреннего и внешнего диаметров вне зависимости от их длины. Детекторам на основе таких т.д.т. доступны более высокая гранулярность за счет уменьшения диаметра т.д.т. и возможности использования сегментированных анодов [8, 9]. Для т.д.т. характерна низкая радиационная толщина: отношение радиационных толщин Al-трубки с типичной толщиной стенки 0.4 мм и т.д.т. составляет  $>18$ , что допускает возможность некоторого увеличения радиационной толщины детекторов на основе т.д.т.

### КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА

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

Разработанный однослойный прототип детектора представляет собой жесткую планарную структуру, содержащую  $N$  (число, кратное восьми) т.д.т., залитых эпоксидным компаундом. Толщина структуры равна  $2(r + 0.1)$  мм, где  $r$  – радиус трубок. При такой конструкции сохраняется прямолинейность и постоянство диаметра т.д.т., а также постоянство зазора между стенками соседних



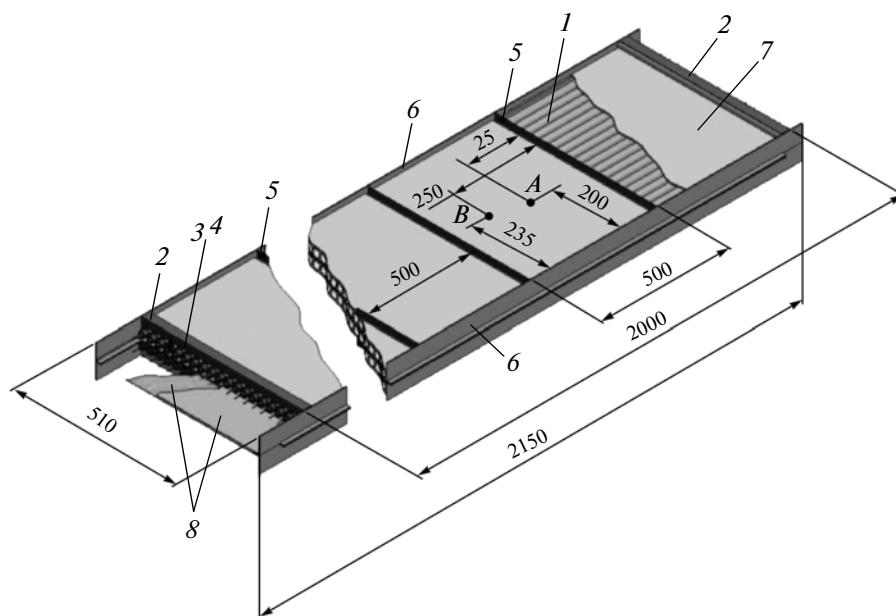
**Рис. 1.** Схема установки газового коллектора на плоскость модуля. 1 – стенки т.д.т.; 2 – Al-трубка диаметром 8 мм с толщиной стенки 0.4 мм; 3 – пластиковая концевая втулка; 4 – металлическая трубка; 5 – анод; 6 – фиксирующая анод втулка; 7 – заливка эпоксидным компаундом.

трубок. При изготовлении прототипа частично применяется разработанная ранее в ОИЯИ технология создания трека спектрометра COMPASS [10, 11].

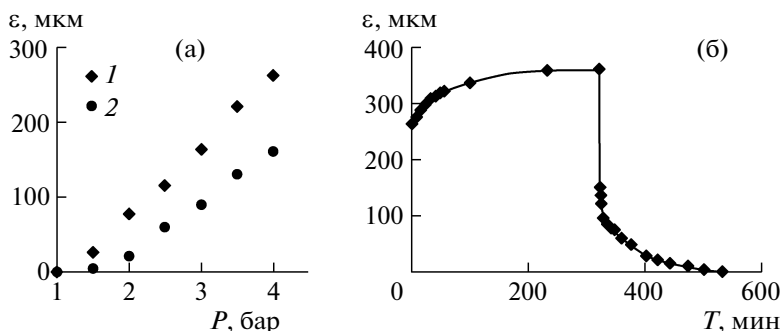
Прототип детектора содержит 48 трубок, идентичных трубкам трека COMPASS. Трубки имеют внутренний диаметр 9.56 мм, длину 2 м и намотаны двумя полиимидными лентами, из которых внутренняя лента – проводящая и является катодом. Толщина стенок трубок ~60 мкм. По бокам

жесткой структуры параллельно т.д.т. наклеен тонкостенный Al-профиль, высота которого больше толщины структуры на величину диаметра  $d$  металлических трубок, используемых в качестве газовых коллекторов (рис. 1). После изготовления структуры в трубки устанавливают аноды из золоченой вольфрамовой проволоки  $\varnothing 30$  мкм с натяжением 70 г и с одним центральным по длине поддерживающим спейсером [11]. Аноды фиксируют в медных капиллярных трубках 3, установленных в концевые втулки 4 (рис. 2), после чего контролируется однородность сигналов каждой трубки при ее индивидуальном продуве газовой смесью и облучении источником  $^{55}\text{Fe}$ .

После тестирования на одной поверхности структуры вблизи концов т.д.т. 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, расположенными ортогонально к плоскости модуля. Поверхность структуры ламинируется металлизированной пленкой, используемой в качестве электромагнитного экрана и для защиты от повышенной влажности окружающей среды. На поверхности также установлены угле- или стек-



**Рис. 2.** Схематичное изображение двухслойного детектора. 1 – строу-трубки; 2 – залитые компаундом трубочные газораспределительные коллекторы; 3 – медные капиллярные трубки, установленные в концевые втулки 4; 5 – поддерживающие стрипы; 6 – тонкостенные профили; 7 – металлизированная пленка; 8 – платы считывания. Платы согласования устанавливаются у противоположных концов строу-трубок и не видны из-за их малой ширины. А, В – точки измерения.



**Рис. 3.** Прогиб  $\varepsilon$  поверхности модуля в зависимости от давления газа: **а** – быстрое отклонение поверхности в точках *A* (1) и *B* (2) (см. рис. 2) при повышении давления до 4 бар; **б** – последующее медленное изменение и затем релаксация после сброса давления в точке *A*.

лопластиковые поддерживающие ленты высотой  $h$  с шагом, величина которого может меняться в зависимости от длины модуля (см. рис. 2). Прототип имеет 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 т.д.т. в непосредственной близости к концевым втулкам, аноды гальванически соединяются с соответствующими шинами плат, после чего торцевые части трубок и втулок герметизируются компаундом. Таким образом, типовой модуль имеет два трубочных газовых коллектора на его внешней стороне, являющиеся также элементами его рамы. При этом газовые коллекторы не содержат способного к адгезии внутреннего вещества, а платы считывания и согласования соединены с анодами вне герметичного газового объема.

По противоположной газовым коллекторам поверхности типовые модули склеиваются в единый конструктивный узел с распределительными трубочными газовыми коллекторами, элементами высоковольтного питания т.д.т. 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 объединения с аналогичными модулями 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 газа отдельной т.д.т. происходит удлинение ее пленочной стенки, что

приводит к изгибу строу-трубки с закрепленными концами [12]. Был измерен прогиб поверхности плоскости модуля в зависимости от давления газа в показанных на рис. 2 точках *A* и *B*, результаты измерения приведены на рис. 3. Точка *A* находится в центре ограниченной двумя поддерживающими лентами части плоскости, а точка *B* – вблизи поддержки. Видно, что при повышении давления газа толщина структуры быстро увеличивается. Величина быстрого отклонения поверхности в точке *A* при давлении 4 бар составляет 260  $\mu\text{m}$ . В течение следующих  $\sim 2.5$  ч отклонение медленно возрастает до  $\sim 350$   $\mu\text{m}$ , что составляет  $\sim 7\%$  величины радиуса т.д.т. После сброса давления расширение плоскости быстро уменьшается до  $\sim 100$   $\mu\text{m}$  в этой точке и восстанавливается полностью через  $\sim 2.5$  ч. Аналогичные изменения в точке *B* при давлениях 4 и 3 бар показали меньшие соответственно в 1.6 и 1.8 раз отклонения.

Наблюдаемые отклонения приводят к незначительному нарушению цилиндричности трубок: например, допускаемая анод-катодная несоосность т.д.т. детектора переходного излучения и трекера одновременно установки АТЛАС составила 10% [13]. Величина максимального отклонения поверхности плоскости структуры может быть снижена уменьшением шага установки подложек или увеличением толщины модуля.

Проверка герметичности прототипа показала наличие газовой течи  $\sim 2.4$  мбар/ч при давлении 4 бар ( $< 0.05$  мбар/ч на трубку), причиной которой являлась недостаточная герметичность соединения медной капиллярной трубки с пластиковым покрытием элементов фиксации анодов. Дополнительная герметизация их торцов эпоксидом устранила эти течи.

Радиационная толщина типичных т.д.т. не превышает  $0.05\% X_0$ . На рис. 4. показано соотношение между толщинами стенок алюминиевых трубок и диаметрами строу-трубок, при которых детекторы на их основе имеют одинаковые радиационные

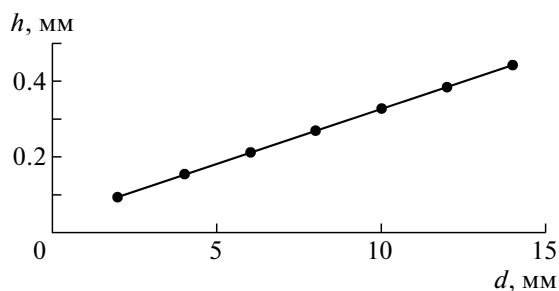


Рис. 4. Соотношение между толщиной  $h$  стенок Al-трубок и диаметром  $d$  строу-трубок, при которых обеспечивается равная радиационная толщина детекторов на их основе.

толщины. Видно, что для строу-трубок  $\varnothing 4$ –6 мм увеличение радиационной толщины модуля может быть пренебрежимо малым.

Детекторы на основе т.д.т. малого диаметра имеют высокое быстродействие, близкое к единице соотношение габаритных размеров и чувствительного объема, а используемые высокоточные и достаточно дешевые трубки большой длины при необходимости могут быть сегментированы [9].

#### СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА В РАБОЧЕМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЯ

Тестирование прототипа детектора проводилось при давлении газовой смеси Ar/CO<sub>2</sub> (80/20) от 1 до 3 бар при облучении источником <sup>55</sup>Fe. Также изучался сильнотоковый режим работы т.д.т. 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-трубок в зависимости от анодного напряжения при давлении газовой смеси от 1 до 3 бар приведены на рис. 5. Анализ рисунка показывает, что с увеличением давления энергетическое разрешение ухудшается. Пунктирная кривая соответствует амплитудам сигналов на уровне энергетического разрешения 40%. При этом уровне энергетического разрешения для трубок с анодами  $\varnothing 30$  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 с т.д.т. при давлении газовой смеси 1 бар для анодных напряжений 1.79 и 1.87 кВ приведены на рис. 6. При газовом усилении  $\sim 3 \cdot 10^4$  (1.79 кВ) видно хорошее разделение основного энергетического пика и пика вылета, однако с увеличением напряжения энергетиче-

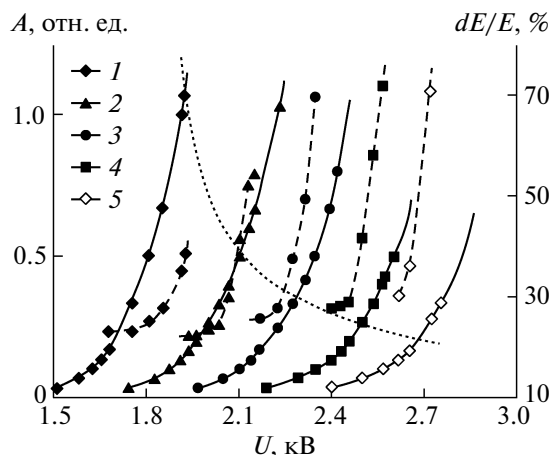


Рис. 5. Величины сигналов от  $\gamma$ -квантов с энергией 5.9 кэВ (сплошные кривые) и энергетическое разрешение (штриховые кривые) в зависимости от анодного напряжения при давлении газовой смеси: 1 (1), 1.5 (2), 2 (3), 2.5 (4), 3 бар (5). Пунктирная кривая соответствует амплитудам сигналов, ниже которых энергетическое разрешение лучше 40%.

ское разрешение ухудшается и появляются послелимпульсы, способные вызывать срабатывание регистрирующей электроники при газовом усилении  $\sim 7 \cdot 10^4$  (1.87 кВ).

С повышением давления ухудшается энергетическое разрешение и уменьшается рабочий диапазон в режиме пропорционального усиления. На рис. 7 приведены сигналы от  $\gamma$ -квантов с энергией 5.9 кэВ при давлении газа 3 бар. Отношение максимальных сигналов к минимальным составляет  $\sim 3$  при анодном напряжении 2.75 кВ. При дальнейшем увеличении напряжения наблюдаются сигналы во всем представленном диапазоне амплитуд и появляются сильнотоковые 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 сильнотоковых сигналов увеличивается до  $\sim 45$ , 70 и 75% соответственно. Наличие большого динамического диапазона сигналов указывает на переходной режим работы детектора.

Измерения величины кросс-наводок показали, что при давлении 1 бар величина кросс-тока достигает  $\sim 0.6\%$ . На рис. 8 приведены типичные сигналы с облучаемой (верхняя кривая) и соседней с ней (нижняя кривая) трубок при давлении 3 бар и анодном напряжении 2.9 кВ для нормального (слева) и сильнотокового (справа) событий. Видно, что отношения однополярных сигналов также не превышают  $\sim 0.6\%$ .

Счетные характеристики для давлений газа 1 и 3 бар при порогах регистрации  $\sim 3$ , 4.5 и 8 фКл показаны на рис. 9. Согласно рисунку, с увеличени-

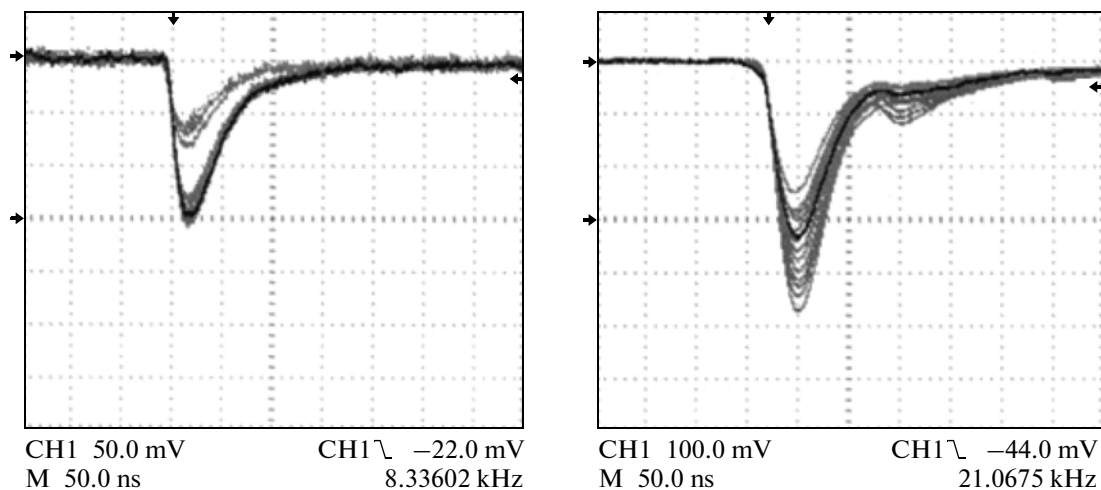


Рис. 6. Сигналы с трубок при анодном напряжении 1.79 кВ (слева) и 1.97 кВ (справа); на рисунке справа видны последипульсы, появляющиеся с увеличением анодного напряжения. Давление газовой смеси 1 бар.

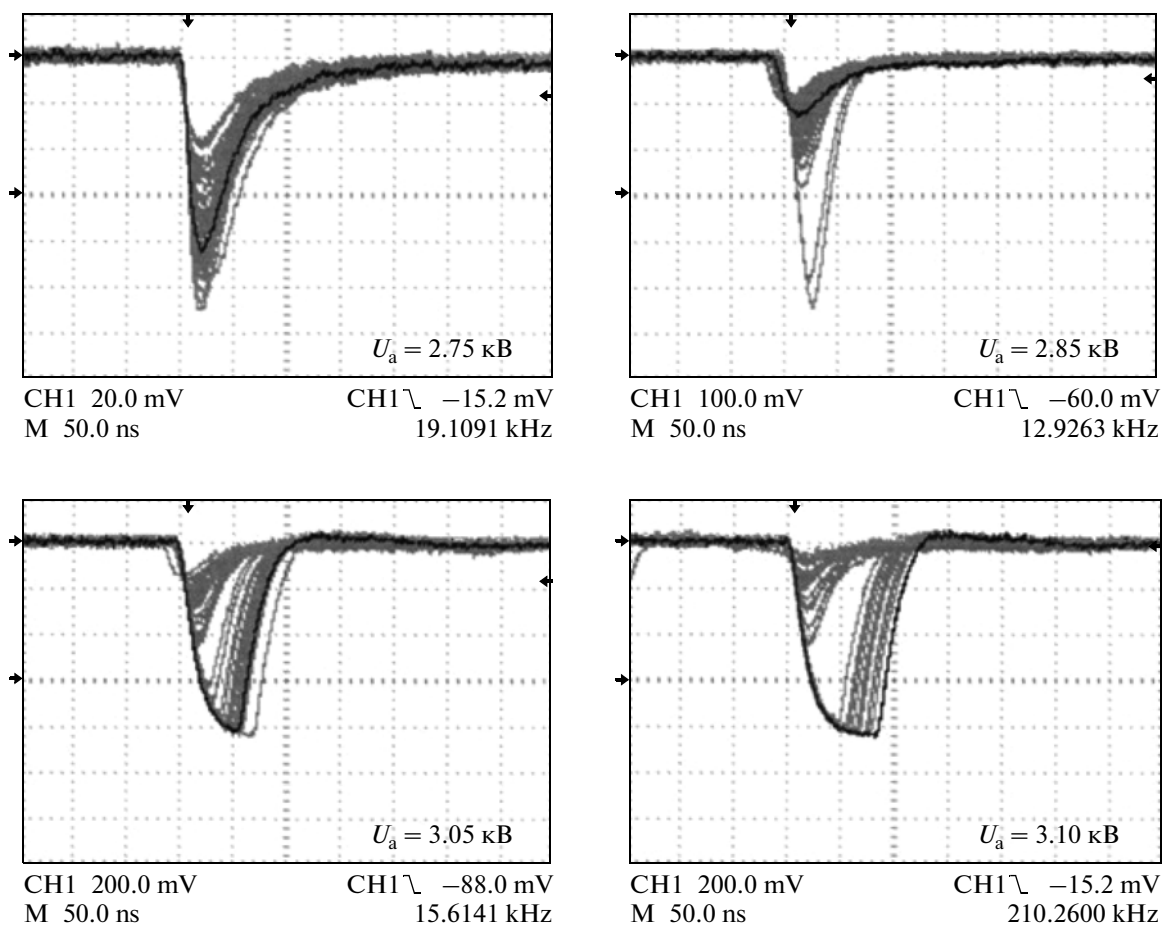


Рис. 7. Сигналы от  $\gamma$ -квантов с энергией 5.9 кэВ при давлении газа 3 бар для различных значений анодного напряжения  $U_a$ .

ем давления газа до 3 бар эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов возрастает 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 в режиме

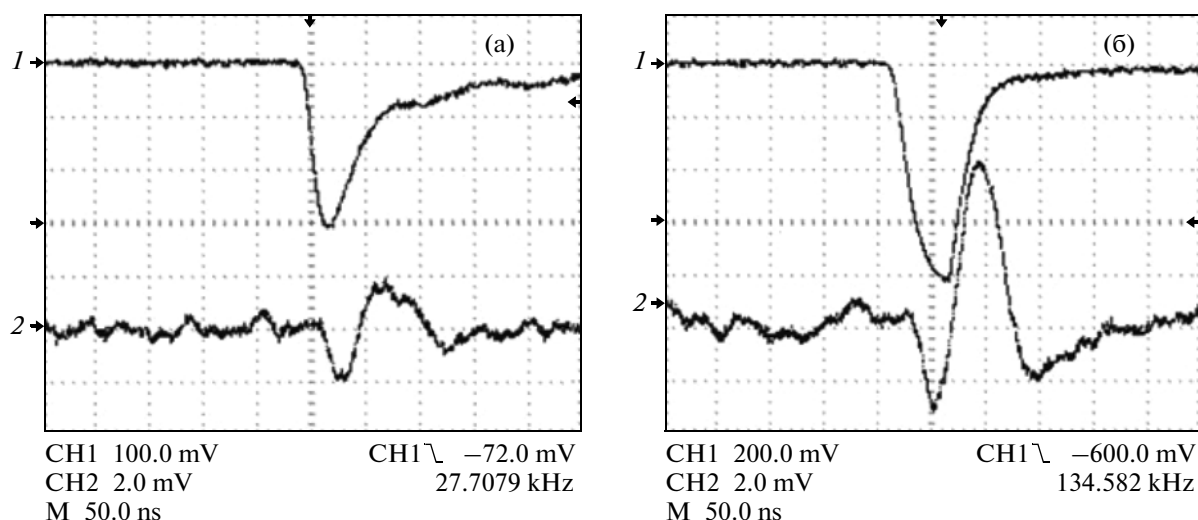


Рис. 8. Величина кросс-тока для т.д.т. при анодном напряжении 2.9 кВ: а – событие нормальной амплитуды; б – сильноточное событие. Верхняя кривая – сигнал с облучаемой трубки, нижняя – наведенный сигнал канала считывания соседней трубки.

ограниченной пропорциональности с возможностью образования сильноточковых событий. Видна возможность низкороговой регистрации событий при низком уровне шумовых сигналов и кросс-токов. При высоких порогах дискриминаторов,  $\sim 8.5$  и  $\sim 12$  фКл, наблюдается снижение эффективности на  $\sim 3$  и  $\sim 9\%$  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 т.д.т. в сильноточном токовом режиме показало, что при давлении газовой смеси 3 бар и напряжении 3.05 кВ (при которых ранее было получено высокое пространственное разрешение) отсутствуют признаки старения трубок при аккумуляции заряда от  $\sim 2 \cdot 10^{11}$   $\gamma$ -квантов с энергией 8 кэВ на 1 см длины анода.

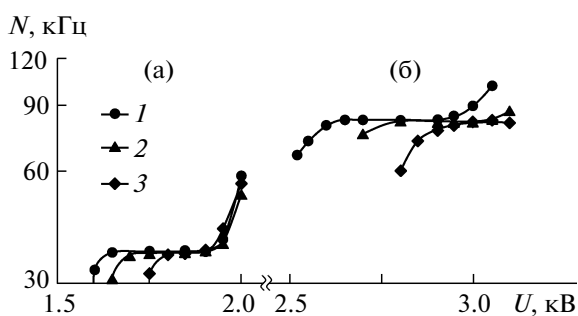


Рис. 9. Счетные характеристики при трех значениях порога регистрации: 3 (1), 4.5 (2), 8.5 фКл (3) – для давления газа 1 (а) и 3 бар (б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная выше технология изготовления модуля позволяет создавать относительно дешевые планарные детекторы на основе строу-трубок необходимой длины с возможностью объединения их в единый координатный детектор с требуемым акцептансом. Использование строу-трубок малого радиуса повышает быстродействие детектора, а возможность их сегментирования по длине обеспечивает применение в условиях больших нагрузок. Хорошая радиационная стойкость, низкая радиационная толщина и возможность организации детекторов большой площади при газовом давлении до 4 бар позволяют оптимизировать рабочий режим детекторов, например работать в пропорциональном или с ограниченной пропорциональностью режимах при давлении до 3 бар. Кроме того, представляет интерес возможность регистрации минимально ионизирующих частиц с высоким пространственным разрешением в сильноточковом режиме.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aad G., Bentvelsen S., Bobbink G.J. et al. // JINST. 2008. V. 3. P. S08003.
2. Adorisio C., Aielli G., Alexopoulos Th. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. 2009. V. A598. P. 400.
3. Engl A., Biebel O., Hertenberger R. 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., Alexander C.C., Bacon J.D. et al. // Science and Global Security. 2008. V. 16. P. 37

6. *Abbon P., Albrecht E., Alexakhin V.Yu. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. 2007. V. A577. P. 455.
7. *Abat E., Arik E., Arik M. et al.* // JINST. 2008. V. 3. P. P10003.
8. *Davkov K., Davkov V., Gusakov Y.V. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. 2008. V. A584. P. 285.
9. *Bazylev S.N., Davkov K.I., Gregor I. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. 2011. V. A632. P. 75.
10. *Bychkov V.N., Faessler M., Geyer R. et al.* // Particles and Nuclei Letters. 2002. № 2. P. 64.
11. *Bychkov V.N., Dedek N., Dunnweber W. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. 2006. V. A556. P. 66.
12. *Давков В.И., Давков К.И., Мялковский В.В., Пешехонов В.Д.* // ПТЭ. 2008. № 6. С. 11; *Gusakov Yu.V., Grigalashvili N., Dittus F. et al.* // Phys. Part. Nucl. 2010. V. 41. P. 1.
14. *Davkov V.I., Gregor I., Haas D. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. 2011. V. A634. P. 5.
15. *Akesson T., Barberio E., Bondarenko V. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. 2003. V. A515. P. 166.
16. *Deile M., Dietl H., Dubbert J. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. 2004. V. A518. P. 65.
17. *Bittner B., Dubbert J., Horvat S. et al.* // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 2011. V. 215 . P. 143.