

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ПРОТОТИП НА ОСНОВЕ СЕГМЕНТНЫХ СТРОУ

*Ю. В. Гусаков, В. И. Давков, К. И. Давков, И. А. Жуков, В. М. Луценко,
В. В. Мялковский, В. Д. Пешехонов, А. А. Савенков*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматриваются конструкция и технология сборки прототипа на основе сегментных строу, обладающего гранулированностью 4 см^2 . Прототип с чувствительным размером $400 \times 200 \text{ мм}$ содержит две плоскости строу диаметром 4 мм, сдвинутые между собой на величину радиуса строу. Общее число каналов регистрации 360. Приводятся результаты стендовой проверки прототипа.

The design and assembly technology of a detector prototype based on segmented straws is considered. The granularity of the prototype is 4 cm^2 . The prototype has a sensitive area of $400 \times 200 \text{ mm}$, and contains two straw planes displaced against each other by 2 mm. The number of registration channels is 360. Preliminary results of the bench study of the prototype are presented.

PACS: 07.77.Ka, 29.40.Gx

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость обеспечения высокой эффективности реконструкции треков в процессах с большой множественностью требует использования высокогранулированных трековых детекторов, обеспечивающих низкую величину загрузки их локальных детектирующих элементов. Развитие методики MPPS [1], таких как GEM, Micromegas и их разновидностей, ограничивается в некоторой степени технологическими проблемами при создании больших детекторов и их стоимостью.

Детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок обладают рядом преимуществ — это минимальное количество собственного вещества в сравнении с любым иным типом детекторов, хорошие пространственно-временные параметры, гибкость конструкторских решений при создании детекторов, сравнительно низкая стоимость. Одним из основных недостатков является их низкая гранулированность, так как размер элементарного детектирующего элемента определяется произведением длины строу на его диаметр. С учетом опыта по разработке и созданию высокотехнологичного детектора переходного излучения — трекера установки ATLAS [2] и трекера установки COMPASS [3] — с целью повышения гранулированности трековых детекторов на основе строу был разработан метод создания сегментных строу [4] с минимальной величиной площади сегмента от 1 см^2 . Кроме того, был разработан метод считывания сигналов с сегментов передаточными линиями (низкомассовым специализированным плоским кабелем), позволяющими передавать сигналы без потерь на расстояние до 2 м и незначительно увеличивающими материальный бюджет детектора. Это позволяет создавать детекторы с чувствительным размером более $4 \times 4 \text{ м}$.

С целью проверки возможности создания подобных детекторов в режиме массового производства был создан и подготовлен к исследованиям на пучке ускорителя прототип с 360 регистрационными каналами.

1. КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА

1.1. Принципиальная схема детектора. Прототип представляет собой двухслойную планарную камеру, каждый слой которой содержит 48 строу диаметром 4 мм и длиной 42 см. Слои сдвинуты между собой на величину радиуса строу. Аноды строу разделены на четыре сегмента, на каждый из которых по индивидуальной шине передаточных линий подается анодное напряжение, и по ней же передаются токовые сигналы на расположенные вблизи концов строу аналоговые усилители и формирователи. Электроника размещена на одной стороне камеры. Схема камеры представлена на рис. 1, *а*, и общий вид прототипа показан на рис. 1, *б*.

1.2. Плоскости строу. Строу каждой плоскости склеены между собой и вклеены в субраму. В дальнейшем субрамы двух строу-плоскостей объединяются в общую раму прототипа, при этом для устранения лево-правой неопределенности обеспечивается взаимный сдвиг плоскостей на 2 мм в ортогональном к строу направлении. Использование независимых субрам позволяет проводить сборку и оперативное пооперационное тестирование строу-плоскостей параллельно и независимо.

Строу намотаны двумя каптоновыми стрипами, внутренний диаметр их составляет $4_{-0,02}^{+0,00}$ мм. Каптоновая пленка толщиной 25 мкм с одной стороны покрыта Al толщиной $\sim 0,2$ мкм и слоем полиуретана ~ 6 мкм, являющимся термоклеем. На другой поверхности пленки нанесен проводящий графитосодержащий слой толщиной (6 ± 2) мкм с резистивностью ~ 10 Ом/кВ площади.

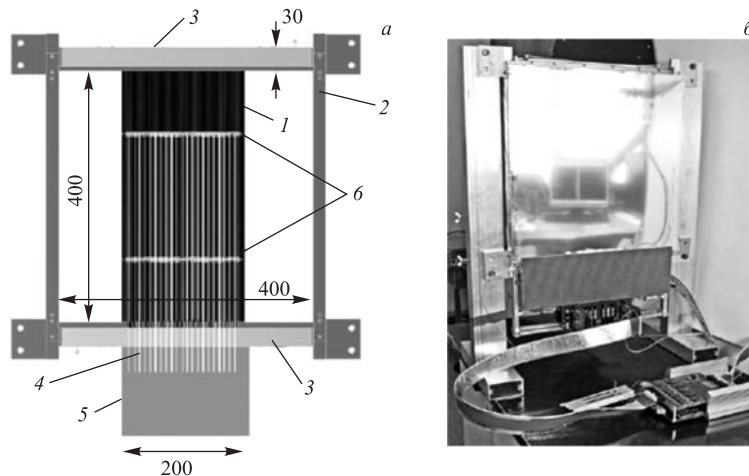


Рис. 1. *а*) Схематическое изображение камеры: 1 — плоскость строу; 2 — субрама прототипа; 3 — газовый объем; 4 — линии передачи сигналов; 5 — место расположения электроники считывания; 6 — линия выхода анодов сегментов. *б*) Общий вид прототипа во время стендовых исследований

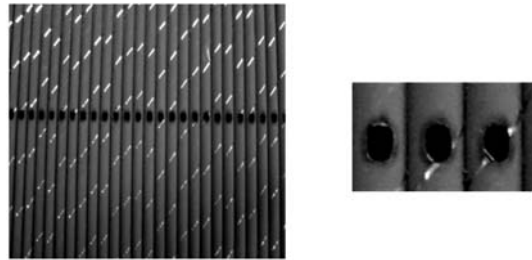


Рис. 2. Фрагмент плоскости строу с рядом отверстий (слева), отверстия в увеличенном масштабе (справа)

По два боковых строу с каждой стороны плоскостей используются для мониторинга и содержат несегментированные аноды. Все остальные строу содержат четырехсегментные аноды, для обеспечения контакта извне с которыми в стенках этих строу СО₂-лазером мощностью 12 Вт вырезаны два ряда отверстий размером 2,5 × 1,5 мм. Фрагмент плоскости строу с одним рядом отверстий представлен на рис. 2.

Аналоговая электроника считывания расположена вдоль одного из концов строу, плотность ее составляет один канал считывания на 1 мм в ортогональном к ориентации строу направлению. Токовые сигналы с каждого сегмента и напряжение на него подаются по индивидуальной шине линий передач.

1.3. Сегментные аноды строу. 1.3.1. *Элементы сегментных анодов.* Сегментные аноды состоят из электрически разделенных кусков золоченой вольфрамовой проволоки диаметром 30 мкм, механически соединенных в единый элемент стеклянными капиллярными трубками [5, 6]. Используются трубки из боросиликатного стекла длиной от 4 до 7 мм с наружным и внутренним диаметрами 0,25 и 0,1 мм соответственно. Вес их составляет 0,094 мг на 1 мм длины. В трубку с двух ее концов впаяются проволоки, отделяемые одна от другой расплавленной перемычкой (рис. 3, а, в). На рис. 3, б, г показан общий вид трубки длиной 5 мм с впаянными проволоками, ширина центральной изоляционной перемычки составляет ~ 0,5 мм, сохраняется прямолинейность капиллярных трубок, и обеспечивается хорошая соосность трубок и впаянных в них проволок.

Проверка прочностных свойств контрольной партии двухпроволочных анодов показала отсутствие выхода проволок из места впаявания при натяжении до 120 г. Высоковольтное тестирование анодов при разности потенциалов на проволоках в 2,5 кВ показало отсутствие тока стекания через центральную изолирующую перемычку.

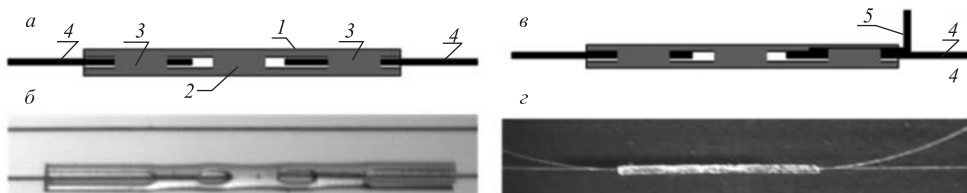


Рис. 3. а) Стеклянная капиллярная трубка (1) для негальванического соединения двух анодных проволок (4); 2 — центральная изоляционная перемычка; 3 — место впаявания проволоки; б) общий вид соединительной трубки длиной 6 мм, расположенная выше натянутая проволока иллюстрирует прямолинейность трубки; в) совместное впаявание двух проволок (справа); г) общий вид соединительной трубки с двумя контактными проволоками

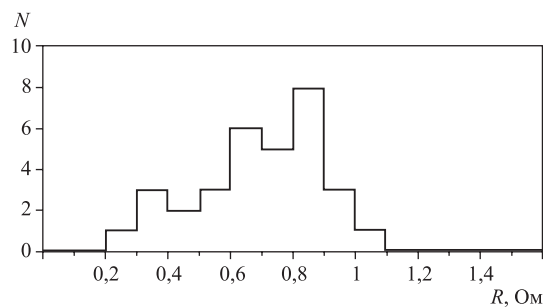


Рис. 4. Распределение величины сопротивления между впаиваемыми совместно анодной и контактной проволоками для тестовых образцов

Возможно впаивание в капиллярную трубку одновременно двух проволок (рис. 3, в) с обеспечением между ними гальванического контакта. На рис. 4 приведено распределение резистивности между двумя одновременно впаиваемыми идентичными проволоками диаметром 30 мкм. Видно, что величина сопротивления между ними менее 1 Ом, что позволяет считывать токовые сигналы с анодного сегмента через эту контактную проволоку [7].

Вывод контактных проволок возможен с помощью установленного спейсера на капиллярную трубку сегментного анода, конструкция которого приведена на рис. 5, а. Спейсер длиной 8 мм и максимальным наружным диаметром $3,98_{-0,02}^{+0}$ изготовлен из поликарбоната, толщина стенки и внутренней перемычки $\sim 0,2$ мм. Левая и правая контактные проволоки капилляра через отверстия в центральной перемычке, стенке спейсера и отверстия в стенке строу выводятся из внутреннего объема строу. Гальванический контакт между контактными проволоками отсутствует. На рис. 3, г можно видеть общий вид капиллярной трубки с двумя контактными проволоками, и на рис. 5, б показан общий вид спейсера с вставленной в его центральное отверстие капиллярной трубкой и с выведенными из спейсера контактными проволоками. На рис. 6 показана схема четырех-сегментных анодов. В центре анода установлена трубка, объединяющая второй и третий анодные сегменты, слева и справа расположены два спейсера с вставленными в них трубками, объединяющими 1–4-й анодные сегменты соответственно. Показаны также выходы контактных проволок из спейсеров.

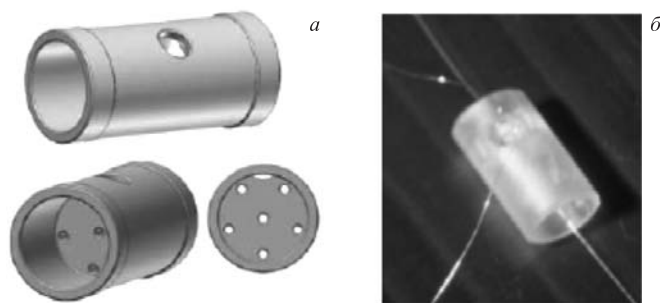


Рис. 5. Конструкция спейсера (а) и его общий вид (б) после сборки



Рис. 6. Схема четырехсегментных анодов, длина каждого сегмента 10 см

1.3.2. Окончательная сборка четырехсегментных анодов. Последовательность окончательной сборки сегментных анодов следующая. В соединительную трубку вплавлялись по две сегментные анодные и контактные проволоки диаметром 30 мкм (см. рис. 3, з), длина их составляла 50 и 15 см соответственно. Рабочее место содержит прецизионное механическое оборудование для установки капиллярной трубки, анодных и контактных проволок и их фиксирования, передвижную газовую горелку с элементами теплоотвода, а также микроскоп, видеокамеру и персональный компьютер. Микроскоп обеспечивает оператору оперативный контроль в процессе настройки оборудования, а видеокамера и персональный компьютер — оперативный контроль в процессе изготовления серии однотипных элементов.

После визуального контроля и проверки под натяжением изготовленные анодные элементы поступают на участок установки спейсера на капиллярную трубку и их склеивания. Оборудование обеспечивает соосность трубки и спейсера и исключает возможность их углового смещения. После тестирования два готовых анодных элемента поступают на аналогичный первому участок для объединения их с помощью дополнительной капиллярной трубки в четырехсегментный анод и далее на участок тестирования. Спейсеры устанавливаются по центру трубок, а длины анодных проволок при финальном объединении обеспечивают правильное позиционирование спейсеров относительно центра отверстий в строу при установке анодов в строу.

1.4. Концевые втулки. При установке анода в строу проволока проходит через пластиковую втулку и элемент с концевой медной трубкой с внутренним диаметром 0,1 мм, используемый для фиксации в ней анодной проволоки (рис. 7).



Рис. 7. Общий вид элементов фиксации анода в строу: металлическое кольцо «заземления» общего (независимо от количества сегментов) катода строу, литая пластиковая втулка, литая пластиковая втулка с медной трубкой

2. ПЛОСКИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ЛИНИИ

Метод независимого считывания информации с анодных сегментов высокогранулированных строу [10, 11] был разработан и используется для прототипа. Основные требования к разработанному методу были следующие: передача токовых сигналов величиной от 1 мкА и с временем нарастания 3–5 нс на расстояние до 1 м и более без искажений и потерь, передача по этим же шинам линий анодного напряжения величиной до 2,0 кВ при токах стекания $\leq 0,1$ нА/шина (при нулевом потенциале на соседних двух шинах), а также сохранение минимальной радиационной толщины детектора.

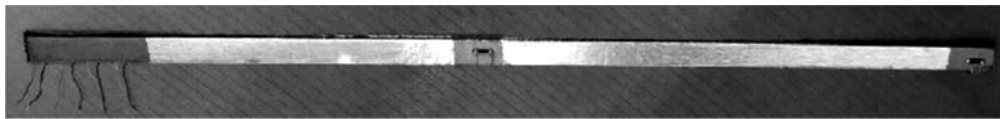


Рис. 8. Общий вид ПЛ с восемью шинами. Левые выводы шин соединяются с материнской платой, центральные четыре — с сегментами 1 и 2 двух соседних строу, выводы четырех правых концов шин — сегментами 3 и 4 (см. рис. 5)

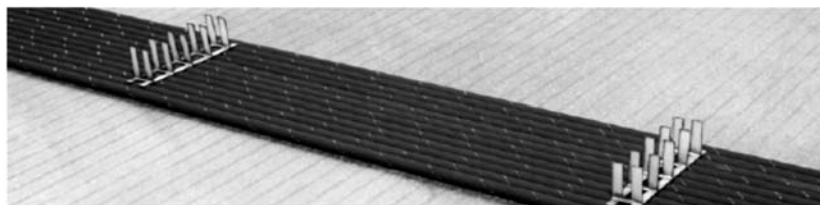


Рис. 9. Макет поддержек передаточных линий на плоскости строу

Для прототипа были изготовлены более 60 специальных плоских кабелей (передаточных линий, или ПЛ) длиной 40,5 см, шириной 11 мм и толщиной 0,85 мм. Каждая ПЛ содержит восемь шин из медной проволоки диаметром 20 мкм с шагом $\sim 0,8$ мм, расположенных между двумя каптоновыми лентами с нанесенным на них силиконовым клеевым слоем. ПЛ экранированы Al-фольгой толщиной 10 мкм, разделены с каптоновыми пленками воздушным зазором около 0,3 мм. Общий вид ПЛ показан на рис. 8. Все восемь шин ПЛ (справа) соединяются с соответствующими шинами «материнской» платы, расположенной вне чувствительной площади детектора. Четыре коротких шины соединяются с контактными проволоками сегментов 1 и 2, четыре длинных — с сегментами 3 и 4 (см. рис. 6). Один плоский кабель подает высокое напряжение на аноды четырех сегментов двух соседних строу и передает с них сигналы на усилители. На каждую плоскость строу с расстоянием в 200 мм устанавливаются ортогонально ориентации строу две структуры из стеклотекстолита толщиной 0,2 мм, поддерживающие ПЛ, макет которых показан на рис. 9. На основании структуры шириной 8 мм между двумя строу с шагом 8 мм расположены U-образные элементы высотой ~ 10 мм. Обеспечивающая работоспособность этих строу ПЛ вставляется между левой и правой частями U-образных элементов и приклеивается к ним. Через пазы в субраме ПЛ выходят из чувствительной области прототипа и распаиваются на соответствующие шины электронных плат.

3. СБОРКА ПРОТОТИПА

При сборке прототипа параллельно проводятся работы по подготовке строу-плоскостей, сегментных анодов и передаточных линий.

Обрезанные в размер строу заполняются прецизионными элементами, в нашем случае металлическими шариками диаметром $(3,969 \pm 0,003)$ мм, выкладываются на стол и склеиваются с одной стороны между собой с помощью диспенсера. Для склейки используется эпоксидный клей типа ЭЛК-5 [9], скорость перемещения диспенсера определяет количество наносимого клея. В нашем случае вес строу равен $\sim 1,1$ г/м и увеличение количества вещества после склейки плоскости — менее 10 %.

После вклейки плоскости в субраму камеры и подготовки сегментных анодов производится их установка в строу при натяжении 5 г, при этом контролируется установка центра спейсеров по центру отверстий в строу с точностью $\sim 0,5$ мм. Затем в строу устанавливаются два набора концевых элементов (см. рис. 6), увеличивается натяжение анода до 60 г, и проволока фиксируется в медных втулках. После вывода из строу контактных проволок сегментов на них устанавливаются изоляционные кембрики длиной 3 мм, с внутренним и наружным диаметрами $\sim 0,3$ и $\sim 0,8$ мм соответственно, и проводится высоковольтное тестирование на отсутствие обрывов, перемычек и токов стекания. Изоляционные кембрики выступают над уровнем поверхности строу-плоскости на 2 мм, устраняют возможность замыкания двух 30-мкм контактных проволок между собой и с проводящей стенкой отверстия в строу. После приклеивания кембриков к спейсеру, для устранения возможности газовой течи по контактным проволокам, создаются закрытые газовые объемы с обеих сторон строу-плоскости и проводится газовое тестирование.

На строу устанавливаются две поддерживающие структуры ПЛ, проводится контроль натяжения анодов [12], устанавливаются ПЛ и осуществляется соединение контактных проволок сегментов с их шинами. Герметичное закрытие отверстий в строу проводится после окончательного тестирования всех сегментов прототипа тестовой электроникой с использованием источника ^{55}Fe .

Установка полного комплекта электроники, включающего материнские платы, усилители и формирователи, осуществляется после объединения submodule в единый прототип.

4. СТЕНДОВОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ

Проверка прототипа в стендовых условиях проводилась при продуве его газовой смесью Ag/CO_2 (70/30) с использованием гамма-источника ^{55}Fe . Типичная зависимость величины регистрируемого сигнала от анодного напряжения на сегментах приведена на рис. 10, там же показана типичная счетная характеристика при регистрации излучения источника ^{55}Fe . Зависимости указывают на работоспособность прототипа до газового усиления 10^5 при отсутствии собственных шумовых сигналов детектора. Порог форми-

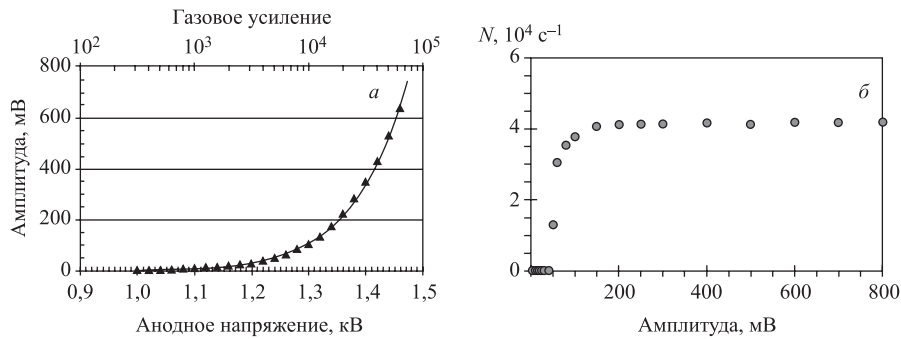


Рис. 10. Типичные зависимости средней величины сигналов от анодного напряжения (а) и счетной характеристики (б). Регистрировались гамма-кванты источника ^{55}Fe

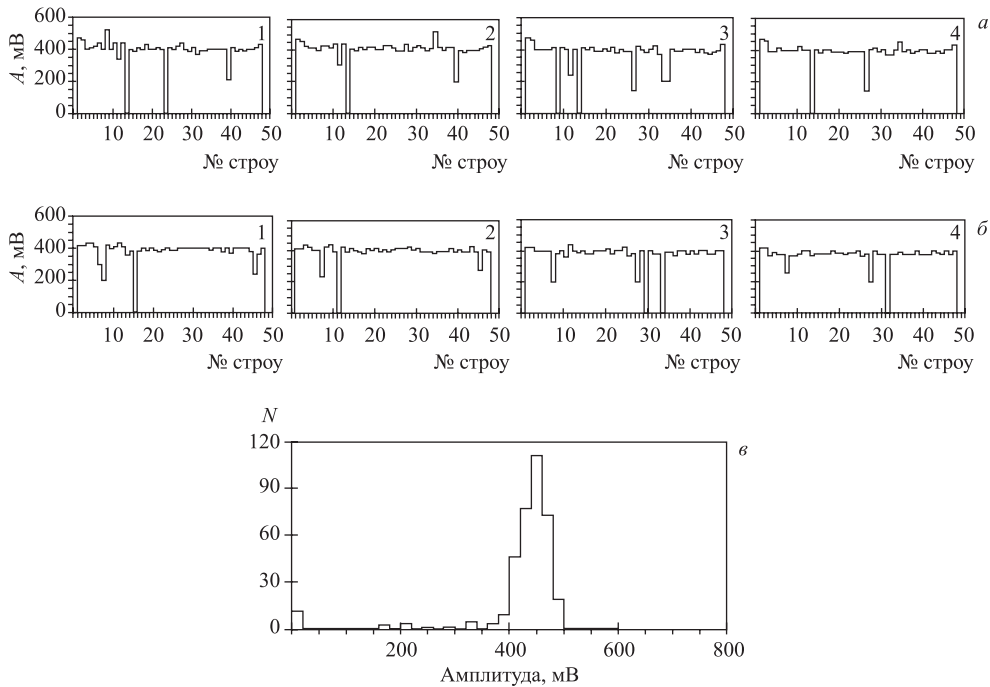


Рис. 11. Результаты измерений величин сигналов с сегментов прототипа единым тестовым усилителем при фиксированном анодном напряжении. *а)* Первая плоскость строу; *б)* вторая плоскость строу, номерами обозначены, соответственно, ряды сегментов плоскостей. Итоговый результат представлен гистограммой (*в*)

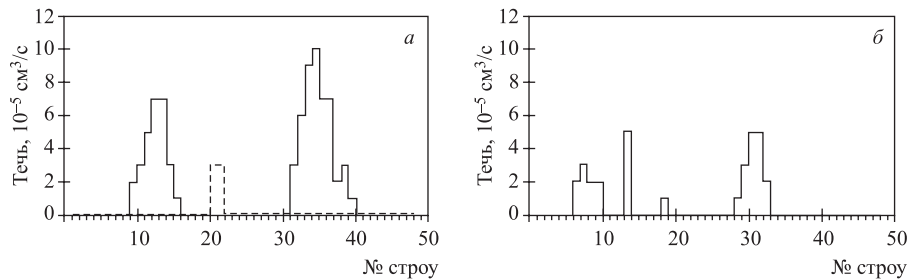


Рис. 12. Газовые течи в области «линий» установки спейсерных узлов и последующей герметизации отверстий в стенах строу первой (*а*) и второй (*б*) плоскостей строу. По оси абсцисс показаны номера первого (сплошная линия) и второго (штриховая) рядов отверстий

рователя составлял 50 мВ. Измерения выполнены с усилителями и формирователями, подготовленными для исследования прототипа на пучке ускорителя.

Результаты проверки всех 360 каналов детектора, выполненной с помощью одного тестового усилителя и при анодных напряжениях 1400 В, приведены на рис. 11. Число неработающих каналов — 11, число каналов с меньшей величиной сигналов — 11, что

составляет в сумме 6,1 % от полного числа каналов. Причиной дефектов могут являться ошибки при трассировке сигналов от сегментов до регистрирующей электроники.

Газовые течи прототипа проверялись с помощью чувствительного течеискателя. Измерялись уровни течей для каждой линии вывода контактных проволок из строу с целью последующей герметизации отверстий в стенках строу для обеих строу-плоскостей. Результаты измерений, приведенные на рис. 12, показывают, что суммарная течь в областях выводов контактных проволок около $115 \cdot 10^{-5}$ см³/с, т. е. не более 4,2 см³/ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный на основе сегментных строу прототип содержит 352 сегмента и восемь несегментированных строу, используемых для целей мониторинга. Результаты стендового тестирования показали типичные для строу-детекторов параметры. Достаточно высокий уровень работоспособности каналов прототипа (94 %) указывает на правильный подход к организации его сборки и на возможности создания подобных детекторов в режимах их массового производства, что требует разработки и оптимизации сборочного оборудования и тестовых процедур. В прототипе реализована высокая плотность каналов регистрации и считывания, равная 1 канал/0,5 мм в ортогональном к ориентации строу направлении (при считывании с двух сторон строу).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R&D Proposal Development of Micro-Pattern Gas Detector Technologies. CERN-LHCC-2008-011/LHCC-P-001. 2008.
2. Гусаков Ю. В. и др. Препринт ОИЯИ P13-2008-85. Дубна, 2008.
3. Bychkov V. N. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2006. V. 556. P. 66–79.
4. Davkov V. et al. // Part. Nucl., Lett. 2007. V. 4, No. 4(140). P. 545–551.
5. Oh S. H., Wang C. H., Ebenstein W. L. // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 425. P. 75.
6. Virasov K. S. et al. JINR Commun. E13-2005-127. Dubna, 2005.
7. Davkov K. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 584. P. 285–290.
8. Vasilyev S. E. et al. // Instr. Exp. Tech. 2008. V. 51, No. 6. P. 820–825.
9. Гладких С. Н. и др. Препринт ОИЯИ P13-2001-275. Дубна, 2001.
10. Богуславский И. В. и др. Препринт ОИЯИ P13-2007-120. Дубна, 2007.

Получено 3 апреля 2009 г.