

УДК 539.14

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — ТРЕКЕРОВ ТИПА «В» В ОИЯИ ДЛЯ ВНУТРЕННЕГО ДЕТЕКТОРА УСТАНОВКИ ATLAS LHC

*И. В. Богуславский, В. Н. Бычков, К. С. Вирясов, Н. Григалашвили,  
Ю. В. Гусаков, Г. Д. Кекелидзе, В. Н. Круглов, К. А. Левтеров,  
В. М. Луценко, В. М. Лысан, С. В. Мишин, В. В. Мялковский,  
В. Д. Пешехонов, А. А. Савенков, Е. М. Хабарова*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты создания детектора переходного излучения — трекера типа «В» на основе тонкостенных дрейфовых трубок (строу) для внутреннего детектора установки ATLAS LHC. Приведены результаты предварительного тестирования детектора. Описаны основные компоненты и процедуры сборки семнадцати восьмислойных модулей TRT, изготавливаемых в ОИЯИ.

We reported the construction and preliminary testing of wheels «В» of ATLAS LHC transition radiation trackers. The basic components and procedures of assembly of seventeen eight-layer modules TRT made in JINR are described.

### ВВЕДЕНИЕ

Предназначенная для экспериментов на ускорителе LHC установка ATLAS содержит несколько крупных детектирующих систем, в том числе внутренний детектор (ВД), работающий в условиях экстремально высокой загрузки, при которой поток заряженных частиц может достигать  $1,25 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [1]. В состав ВД входит трекер на основе кремниевых детекторов и детектор переходного излучения — трекер (TRT) на основе тонкостенных дрейфовых трубок (строу). Баррельная часть TRT изготавливалась в США, модули TRT прямого направления (end-cup) — изготавливались в ЛФЧ ОИЯИ (тип «В») и ПИЯФ (тип «А»). Число каналов регистрации TRT ATLAS составляет 298 304.

Требования высокой эффективности восстановления треков заряженных частиц и отделения электронов от пионов с фактором режекции около 100 в условиях больших нагрузок определили основные требования к TRT:

- точность позиционирования каждого строу в пространстве не хуже 50 мкм;
- собственное пространственное разрешение строу не хуже 150 мкм;
- однородность параметров всех детектирующих каналов не хуже  $\pm 5\%$ ;
- минимальная величина потерь рабочего газа на основе Хе.

В процессе экспериментов R@D-коллаборацией были исследованы свойства как самих строу, так и используемых для изготовления отдельных элементов детектора материалов [2, 3]. На созданных прототипах были изучены и выработаны требования к детектору

с учетом радиационных условий эксперимента [4]. Разработанная конструкция и технология создания детектора были применены в ОИЯИ (Дубна) и в ПИЯФ (г. Гатчина) при изготовлении TRT-модулей типа «В» и «А» соответственно. В данной работе представлен опыт создания 17 TRT-модулей типа «В» в ОИЯИ с полным количеством каналов регистрации (строу) — 104448.

## 1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОДУЛЯ «В»

**1.1. Модуль.** Кольцевые модули типа «В» с внешним диаметром 2088 мм, внутренним —  $1247,5_{+0,00}$  мм и толщиной 114 мм состоят из внешних и внутренних углепластиковых колец, скрепленных вклеенными в них в радиальном направлении строу диаметром 4 мм. Каждый модуль содержит восемь слоев строу, девять слоев радиаторов переходного излучения из наборов полипропиленовой пленки и состоит из двух субмодулей. Всего в модуль устанавливаются 6144 строу (рис. 1). На модуль устанавливаются экраны от электромагнитного излучения, а также элементы для газообеспечения и охлаждения детектора.

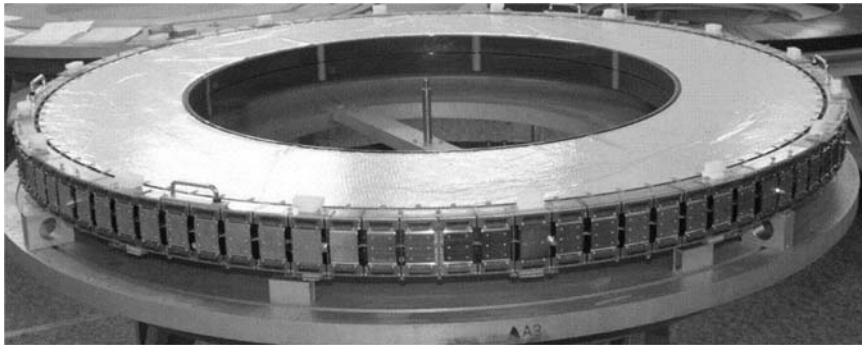


Рис. 1. Внешний вид восьмислойного модуля

В процессе изготовления отдельных элементов и/или систем элементов проводятся необходимые их тестирования с целью обеспечения в дальнейшем требуемых параметров детектора.

**1.2. Строу.** Полиимидная (каптоновая) пленка толщиной 25 мкм подвергается специальной обработке, заключающейся в нанесении на одну ее сторону алюминиевого покрытия толщиной около 0,2 мкм, а затем графитового покрытия толщиной 6 мкм. На обратную сторону пленки наносится в качестве термокля полиуретан толщиной около 5 мкм. Окончательная толщина пленки —  $(36 \pm 6)$  мкм, резистивность около 10 Ом/квадрат. Строу с внутренним диаметром  $(4,00 + 0,02)$  мм наматываются из двух, нарезанных из этой пленки, лент (рис. 2). Проводящее графитовое покрытие находится на внутренней и наружной поверхностях строу. Намотка строу выполнялась фирмой Lamina Dielectrics Ltd (Англия) /[www.laminadielectrics.com/](http://www.laminadielectrics.com/).

Для сохранения прямолинейности и хорошей цилиндричности на наружную поверхность строу длиной 1,65 м наклеивались в продольном направлении четыре углеродных

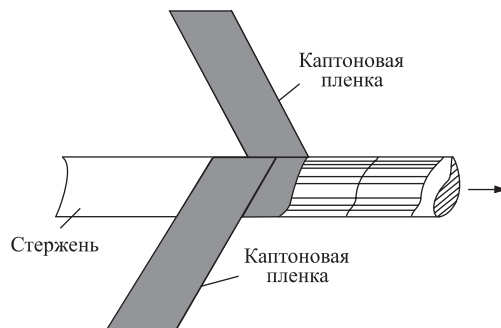


Рис. 2. Схематическое изображение процесса намотки строу

стрипа. Каждый стрип содержит 1000 нитей диаметром 8 мкм и приклеивается эпоксидным клеем. Вес наклеенных стрипов составляет  $4 \times 0,266$  г на один метр строу.

Разработанное коллаборацией устройство для автоматизированного выполнения этой процедуры использовалось в ОИЯИ более двух лет для рейфорсирования 91993 строу. После укрепления строу проверялся с помощью калибра наружный диаметр каждого рейфорсированного строу, резистивность углеродного покрытия и прямолинейность строу. Для этого последнего теста верхний конец строу закреплялся на вертикальном вращающемся стержне и измерялась величина отклонения от оси стержня нижней части строу во время вращения. Величина этого отклонения была менее 3 мм для 52,2 % строу, в диапазонах 3–4 и 4–8 мм для 23,7 и 22,3 % соответственно. Отбраковывались строу с отклонением более 8 мм. Полные потери строу составили 2,7 % от первоначального их количества.

**1.3. Внутренние элементы строу и их сборка.** Для вклеивания строу в детектор, а также для установки в строу анодной проволоки диаметром 30 мкм используются отлитые из поликарбоната с точностью лучше 30 мкм внешние и внутренние втулки, различные для двух концов строу. Для фиксирования анодной проволоки применяются специальные тонкостенные Си-пины с изоляционным пластиковым покрытием для одного конца строу и цельнометаллические для другого [5, 6].

Прошедшие контроль на прямолинейность строу поступали на участок предварительной сборки, где проходили через следующие процедуры:

- предварительная обрезка строу в требуемый размер;
- создание гальванического контакта между внутренней и внешней поверхностями строу;
- вклеивание внешних и внутренних втулок;
- обрезка собранного строу по его концевым элементам с точностью 0,1 мм.

Кроме того, в процессе и по завершении этих сборочных процедур для каждого строу проверялись:

- резистивность поверхностей и их гальванического соединения;
- длина с точностью 0,2 мм и прямолинейность строу;
- величина газовой течи.

На рис. 3 показано подготовленное к установке в детектор строу.

Непрямолинейность строу определялась с помощью автоматизированного устройства,

измеряющего изменение диаметра строу при его вращении вокруг центральной оси в трех сечениях по его длине. Обработанные on-line результаты измерений определяли категорию строу по прямолинейности как категорию *a* при величине изменений диаметра менее 0,1 мм; *b* — в диапазоне 0,1–0,2 мм и *в* — в диапазоне 0,2–0,3 мм.

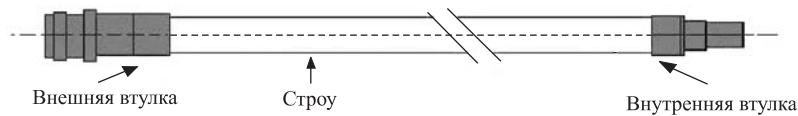


Рис. 3. Общий вид подготовленного к установке в детектор строу

Для измерения величины газовой течи строу помещались внутрь герметичного бокса и заполнялись аргоном до избыточного давления в 1 бар относительно давления в боксе. Величина течи определялась по изменению давления в боксе. Отбраковывались строу с величиной течи более 0,1 мбар/мин · бар.

Всего в течение 3,5 лет было подготовлено годных к установке в детектор 110127 строу длиной 37,0 см и 45062 строу длиной 49,7 см. При этом потери составляли 12 и 8,8 % для строу с первой и второй длиной соответственно. Следует заметить, что для длины 37,0 см соотношения строу по категориям *a*, *b* и *в* составляли 59, 36 и 5 % соответственно. Для строу длиной 49,7 см это соотношение было 40, 50 и 10 %, что указывает на проблемность использования подобной технологии для обеспечения высокой прямолинейности строу больших длин.

**1.4. Углепластиковые кольца.** Для детекторов TRT типа «В» изготавливались на предприятии «Машиностроитель» (Пермь) вакуумно-плотные прецизионные углепластиковые кольца трех типов В1, В2 и В3, используемые для сборки четырехслойных submodule. Кольца В1 и В2 высотой 54,9<sub>-0,2</sub> мм с диаметрами 1268,2<sub>-0,6</sub> мм и 2006,3<sub>-0,6</sub> мм и толщинами 1,2<sub>±0,1</sub> мм и 4<sub>±0,2</sub> мм, соответственно, выполняют роль рам кольцевого детектора. Механическое соединение их между собой осуществляется склеиванием в них строу. С этой целью в них выполнены четыре ряда прецизионных отверстий с угловой точностью позиционирования каждого из 3072 отверстий 20 мкм. На базе этих колец монтируются в дальнейшем внутренний и, с использованием кольца В3 с диаметром 2058,3<sub>-0,6</sub>, наружный газовые объемы, общие для всех четырех слоев вклеенных строу. На наружном кольце устанавливаются также платы для передачи анодных сигналов с



Рис. 4. Кольца внутреннее (В1) и внешнее (В2), подготовленные к установке в них строу

анодов строу на считывающую электронику, подачи на строу высоковольтного напряжения и выполнения других необходимых электрических соединений. На рис. 4 показаны подготовленные к сборке на специализированном столе кольца В1 и В2 субмодуля.

При предсборочном тестировании колец контролируется их высота и толщина через каждый тридцатиградусный угловой интервал. Измеряется также деформация колец под собственным весом и при заданной нагрузке, калибрами выборочно проверяются диаметры отверстий в кольцах, проводится визуальная проверка на наличие трещин и других дефектов.

**1.5. Радиаторы переходного излучения.** Радиаторы переходного излучения состоят из 34 или 17 слоев полипропиленовой пленки толщиной 15 мкм, между которыми расположена сетка из полипропиленовых нитей с ячейками около  $8 \times 8$  мм. Диаметр нитей — 100 мкм. Слои радиатора завариваются по его внешней окружности, расположенные по внешнему периметру 96 отверстий используются для фиксации радиаторов при установке в субмодуль. Проверяется отсутствие деформации строу, расположенных в непосредственной близости от радиаторов.

**1.6. Платы передачи сигналов.** Для соединения анодов строу со считывающей электроникой субмодуля используются тридцать две 32-канальные многослойные печатные платы, состоящие из жесткой стеклотекстолитовой части и гибкой части, изготовленной из полиимидной пленки. Стеклотекстолитовая часть плат приклеивается к торцам колец В2 и В3 и служит одной из стенок герметичного в дальнейшем внешнего газового объема субмодуля. Гибкая часть предназначена для гальванического подключения к катодам и анодам строу печатных плат с помощью имеющихся на них металлизированных лепест-

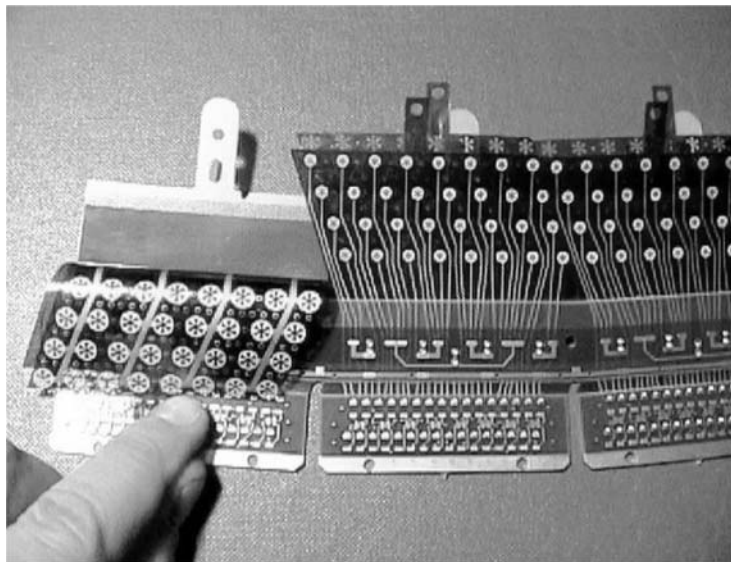


Рис. 5. Плата соединения строу со считывающей электроникой. Видны три ячейки, каждая из которых содержит четыре группы вывода информации. Сигналы передаются на Front-End-электронику многоконтактным разъемом фирмы FUJITSU, установленным на стеклотекстолитовой части платы

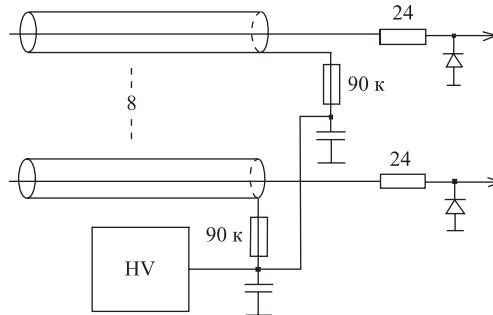


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема считывания информации

ков для подачи на катод высокого напряжения и считывания с анода информация (рис. 5). Принципиальная схема считывания представлена на рис. 6, она показывает монтируемые на платах элементы.

## 2. СБОРКА СУБМОДУЛЯ

Сборка субмодулей и модуля производится на специализированных прецизионных металлических столах четырех типов, предназначенных для определенных сборочных или тестовых процедур. Плоскостность столов не хуже 100 мкм. Основные процедуры перечислены ниже.

1. Позиционирование и фиксация на сборочном столе углепластиковых колец, установка и вклеивание последовательно строу каждого ряда из четырех (рис. 4). Установка промежуточных радиаторов. Автоматизированная проверка каждого строу на прямолинейность и отсутствие гальванических соединений между соседними строу с заменой некачественных [7].

2. Измерение «газовой прочности» собранного таким образом фрагмента субмодуля, содержащего четыре слоя строу и расположенные между ними радиаторы. Для этого субмодуль устанавливается на специальный стол, внутренний объем между углепластиковыми кольцами и строу заполняется аргоном при избыточном давлении в 20 мбар. Наличие микроотверстий в углепластиковых кольцах, строу или в местах их вклеивания влияет на изменение избыточного давления в контролируемом объеме. При измерении скорости изменения этой величины контролируется температура и атмосферное давление для введения программным образом поправок на плотность газа в объеме. По результатам тестирования 30 фрагментов субмодулей ( $N$ ) средняя величина течи ( $T_f$ ), определяемая как  $T_f = \sum N_i T_i / N$ , составляет величину 0,275 мбар/мин · бар.

3. Укладка на специализированном сборочном столе 32 плат считывания информации в виде кольца с последующей установкой на нем фрагмента субмодуля для осуществления следующих процедур:

- приклейки торца кольца В2 фрагмента субмодуля к кольцу плат считывания информации;
- выполнения гальванических соединений с катодами строу;

- пневматического ввода анодной проволоки диаметром 30 мкм внутрь строу и крепления ее в конечных элементах строу при натяжении  $(70 \pm 15)$  г;
- проверки натяжения и измерения токов стекания для каждой анодной проволоки при заполнении строу воздухом с заменой анодов при неспецифицированном их натяжении и при величине токов стекания более 50 нА;
- приклейки кольца ВЗ и элементов, герметизирующих газовый объем по внешнему периметру субмодуля;
- герметизации внутреннего для строу газового объема;
- проверки собранного субмодуля на герметичность с устранением при необходимости течи до величины менее 1мбар/мин · бар;
- измерения токов стекания при заполнении строу субмодуля  $\text{CO}_2$  и ремонта плохих каналов;
- объединения двух субмодулей в восьмислойный модуль.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СБОРКИ ДЕТЕКТОРОВ ТИПА «В»

Собранный модуль поступает на станцию тестирования для проверки каждого канала регистрации [8]. В случае отклонения параметров от спецификации данный регистрационный канал отключается от высокого напряжения. По итогам проверки 13 собранных восьмислойных модулей (86016 каналов) по различным причинам было отключено 129 каналов, что составляет 0,15 % от общего числа каналов.

Распределение величины  $D$ , характеризующей однородность газового усиления строу вдоль его длины для этих модулей, показано на рис. 7. Величина  $D$  определяется как

$$D = 2(A_{\max} - A_{\min}) / (A_{\text{in}} + A_{\text{out}}),$$

где  $A_{\max}$ ,  $A_{\min}$  — максимальное и минимальное значения измеренных амплитуд сигналов;  $A_{\text{in}}$  и  $A_{\text{out}}$  — амплитуды сигнала, измеренные в разных концах строу. Видно, что отклонение величин сигналов от среднего значения около 3 % и практически не более 8 %.

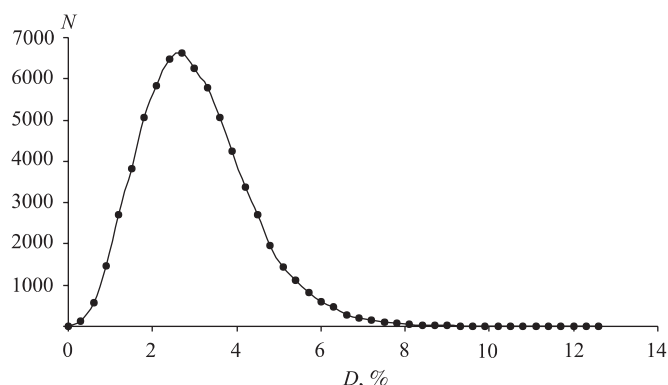


Рис. 7. Распределение величины  $D$ , характеризующей однородность газового усиления в строу

Собранный передний детектор типа «В» показан на рис. 8. Детектор содержит 8 восьмислойных модулей с установленной на нем электроникой считывания. Проверка газовой течи детектора показала, что потери рабочей газовой смеси не превышают 2,6 л в сутки.

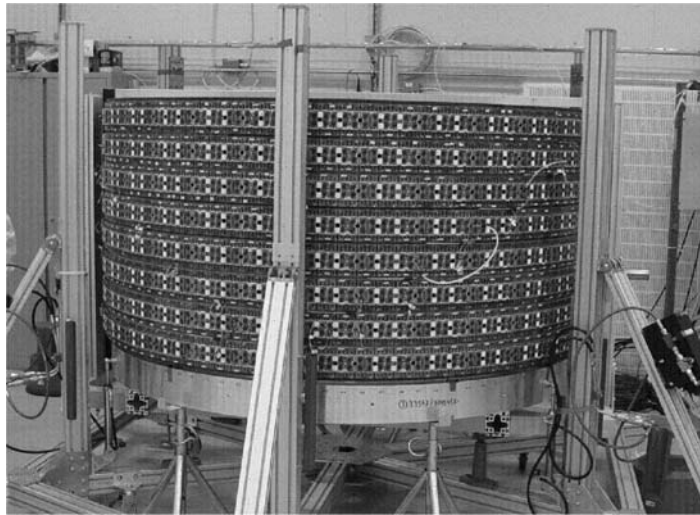


Рис. 8. Общий вид собранного детектора переднего направления (тип «В»)

**Благодарности.** В заключение авторы выражают благодарность всем членам коллаборации TRT ATLAS, а также дирекции Лаборатории физики частиц и дирекции ОИЯИ за поддержку работы. Выполнение работы поддерживается также ИНТАС (№ 03-42-5052).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ATLAS Collaboration.* ATLAS Inner Detector Technical Design Report. CERN/CHCC/97-17. 1997. V. 2.
2. *Akesson T. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 361. P. 440.
3. *Hauviller C. et al.* JINR Commun. E14-98-245. Dubna, 1998.
4. *Астабатьян Р. и др.* Сообщение ОИЯИ P13-96-472. Дубна, 1996.
5. *Howell B., Koltick D., Kobayashi M.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1990. V. 289. P. 85.
6. *Avery R. E. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-40. 1993. V. 578.
7. *Голунов А. О. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2003. № 2[117]. С. 46.
8. *Гусаков Ю. В. и др.* Автоматизированная стендовая проверка кольцевых строу-детекторов типа «В» TRT ATLAS. Препринт ОИЯИ P13-2005-125. Дубна, 2005; Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 3(132). С. 111.

Получено 25 августа 2005 г.