

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.23

ТОНКОСТЕННЫЕ ДРЕЙФОВЫЕ ТРУБКИ С РЕЗИСТИВНЫМ КАТОДОМ ИЗ DLC И ВНЕШНИМ СТРИПОВЫМ СЧИТЫВАНИЕМ СИГНАЛА

© 2023 г. В. В. Акулич^a, К. Г. Афанасьев^{b,c,*}, В. Г. Баев^c, А. О. Колесников^b,
Н. П. Кравчук^b, Н. А. Кучинский^b, В. Л. Малышев^b, С. А. Мовчан^d

^aФизико-технический институт НАН Беларуси
Беларусь, 220141, Минск, ул. Академика Купревича, 10

^bОбъединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Джелепова
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^cИнститут энергетики НАН Беларуси
Беларусь, 220072, Минск, ул. Академическая, 15

^dОбъединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: k.afanaciev@gmail.com

Поступила в редакцию 11.12.2022 г.

После доработки 26.02.2023 г.

Принята к публикации 11.03.2023 г.

Разработаны, изготовлены и испытаны образцы тонкостенных дрейфовых трубок (строу) с резистивным катодом и внешним стриповым считыванием. Катодный цилиндр строу изготовлен по технологии ультразвуковой сварки из лавсановой пленки. В качестве катода используется резистивное покрытие из алмазоподобного углерода (Diamond Like Carbon – DLC). Показана возможность считывания наведенного катодного сигнала с кольцевых электродов (стрипов), расположенных на внешней стороне катодного цилиндра строу. Использование метода центра тяжести для сигналов со стрипов позволяет с хорошей точностью определить координату события вдоль анодной проволоочки.

DOI: 10.31857/S0032816223050166, EDN: ZUUTIF

1. ВВЕДЕНИЕ

Детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок (строу) нашли широкое применение в современных физических экспериментах. Координатные детекторы (трекеры) на основе строу работают во многих крупных экспериментах: ATLAS [1], LHCb [2], COMPASS [3], NA62 [4] и других. В частности, в детекторе TRT эксперимента ATLAS используется 300 000 строу. Планируется их использование и в экспериментах COMET [5], PANDA [6], Mu2e [7].

К основным достоинствам строу можно отнести их высокое координатное разрешение (порядка 100 мкм по времени дрейфа), близкую к 100% эффективность, малое количество вещества и технологичность изготовления. Поскольку современные эксперименты в области физики частиц проводятся со все более высокой светимостью, требования к нагрузочной способности детекторов и точности определения координат треков неуклонно повышаются. Высокая нагрузочная способность детектора обычно достигается как сокращением времени радиального дрейфа за счет

уменьшения диаметра строу [2, 3, 6], так и увеличением быстродействия регистрирующей электроники. Но оба варианта имеют принципиальные ограничения по диаметру трубок и по возможностям электроники.

Одним из альтернативных способов повышения нагрузочной способности является сегментирование анодной проволоочки строу. В этом случае фактически строу разбивается на независимые сегменты, что позволяет увеличить общую нагрузочную способность детектора. Подобное решение – двуханодные строу (two-anode straws) – было использовано ранее в детекторе TRT эксперимента ATLAS [8]. Разделение анодной проволоочки на два независимых сегмента позволило реализовать два независимых детектирующих элемента в объеме одной строу и увеличить таким образом нагрузочную способность. Однако сегментирование анодной проволоочки на большее число отрезков приводит к значительному усложнению конструкции и увеличению количества вносимого вещества [9].

Возможен вариант строу со считыванием наведенных сигналов с внутреннего сегментированного



Рис. 1. Внешний вид устройства для ультразвуковой сварки трубок из лавсана с резистивным DLC-покрытием.

катода [10]. Однако при реализации такого устройства возникают технические проблемы вывода электрических сигналов наружу.

Известно решение, когда наведенный сигнал регистрируется на дополнительных внешних электродах. В этом случае экранирования наведенного от лавины сигнала катодной металлизацией можно избежать за счет окна на внутреннем катоде [11] или за счет использования резистивного катода [12]. При достаточно большом сопротивлении катодного покрытия степень экранирования наведенного на считывающие электроды сигнала будет небольшой.

В данной работе представлены результаты разработки, изготовления и тестирования строу, внутренняя поверхность которой покрыта резистивным слоем из DLC и является катодом. На внешней поверхности трубки расположен сегментированный электрод для считывания сигналов, индуцированных лавиной на анодной проволочке. Сегментирование считывающего электрода выполнено в виде поперечных полос (стрипов). Такая геометрия считывающего электрода позволяет наиболее эффективно регистрировать наводимый на катоде сигнал от лавины и определять координату события вдоль проволоочки с точностью порядка сотен микрометров [13].

Определение координаты, перпендикулярной проволочке, осуществляется стандартным для строу методом (по времени дрейфа) и может достигать точности ~ 100 мкм [14]. Таким образом, можно с высокой точностью регистрировать обе координаты события в одной строу.

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ СТРОУ С РЕЗИСТИВНЫМ DLC-КАТОДОМ

Резистивный катод строу может быть изготовлен с использованием покрытия из алмазоподобного углерода DLC. DLC представляет собой аморфный материал, который обладает исключительной механической прочностью [15] и радиационной стойкостью [16], а также хорошей адгезией к полимерным материалам и может обеспечивать заданное значение сопротивления в широких пределах – от единиц килоом на квадрат до десятков гигаом на квадрат – в зависимости от толщины покрытия и метода осаждения. Такое покрытие уже нашло применение в качестве резистивного материала для анода в газоразрядных детекторах MicroMegas [17–20], а также в “колодезных” детекторах WEM (Well Electron Multiplier) [21, 22].

Для изготовления строу с резистивным катодом покрытие DLC наносилось на лавсановую пленку методом вакуумного катодно-дугового осаждения [23]. Электрические свойства таких резистивных пленок характеризуются величиной поверхностного сопротивления, измеряемого в единицах ом на квадрат. В данной работе толщина нанесенного покрытия составляла порядка 100 нм с поверхностным сопротивлением порядка 10 МОм/квadrat. Такое покрытие обладает исключительной устойчивостью к множественным (до 10^6) электрическим газовым пробоям [21, 22].

В ОИЯИ разработана технология изготовления строу с помощью ультразвука [24]. Поскольку опытные образцы пленки с DLC-покрытием были небольших размеров, то для методических исследований было разработано устройство для сварки ультразвуком трубок длиной менее 150 мм (рис. 1).

Сварка осуществлялась на специально подготовленном стержне с отверстиями, необходимыми для удержания пленки с помощью вакуума и формирования нахлеста для сварки. Процесс сварки происходил за счет акустических колебаний головки – сонотрода. Колебания головки воздействовали на свариваемые пленки, собранные внахлест с перекрытием порядка 1 мм, что обеспечивало практически однослойность трубки.

После сваривания трубки вакуум отключался, и в стержень, на котором происходила сварка, подавалось избыточное давление. За счет попадания воздуха между стержнем и трубкой изготовленная трубка легко снималась. Фото такой трубки представлено на рис. 2.

Было изготовлено три образца строу диаметром 10 мм с резистивным катодом и анодной проволочкой диаметром 30 мкм. Строу № 1 и № 3 были изготовлены из лавсановой пленки толщиной 20 мкм. На внутренней поверхности трубки пред-

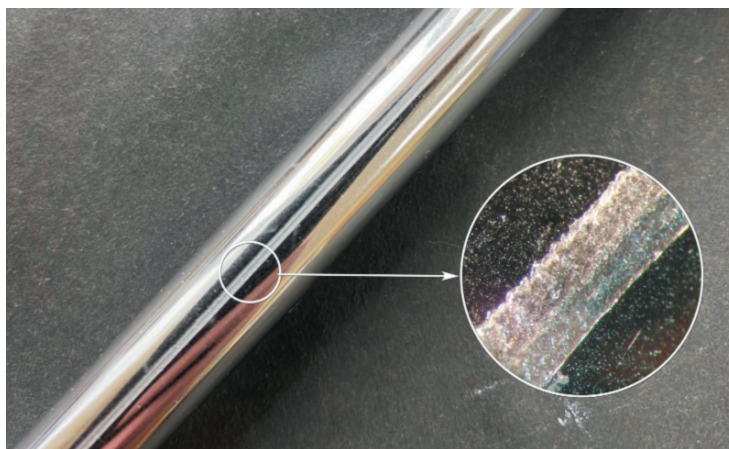


Рис. 2. Сварной шов трубки из лавсана с резистивным DLC-покрытием на внутренней стороне цилиндра.

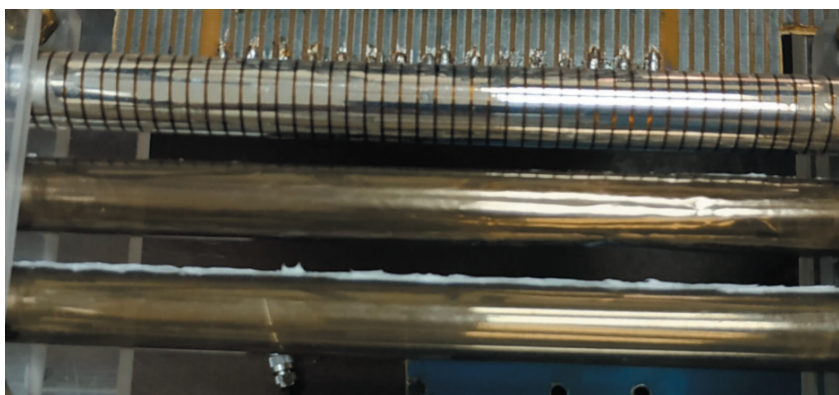


Рис. 3. Образцы строу (снизу вверх) № 1, № 2 и № 3.

варительно был нанесен слой DLC с поверхностным сопротивлением 10 МОм/квадрат. Строу № 2 изготовлена аналогично строу № 1, но из лавсана толщиной 100 мкм.

Для изучения координатных характеристик была подготовлена строу № 3, конструктивно представляющая собой строу № 1, поверх которой была наклеена каптоновая пленка толщиной 35 мкм с цилиндрическими металлизированными полосами. Эта строу использовалась для исследования формы наведенного сигнала и оценки величины пространственного разрешения вдоль трубки. Шаг стрипов считывания составлял 4.44 мм (ширина стрипов 1.87 мм, зазор между ними 0.35 мм, стрипы были объединены попарно). Фотография образцов строу приведена на рис. 3.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования параметров образцов строу был создан измерительный стенд (рис. 4).

При измерениях анодных сигналов использовался токовый усилитель на основе операционного усилителя LMH6626 (Texas Instruments) с коэффициентом преобразования 12 мВ/мкА, формирователь CAEN N844 и счетчик CAEN N1145. Сигнал снимался через проходную емкость величиной $C = 1000$ пФ (6.3 кВ). Высокое напряжение на анодную проволочку каждой трубки подавалось через резистор $R = 1$ МОм с помощью блока высоковольтного питания CAEN N1470. Считывание сигналов со стрипов осуществлялось с помощью зарядочувствительных усилителей КАТОД-1 с временем формирования 200 нс [25], а оцифровка формы сигналов – посредством модуля АЦП CAEN V1730.

Измерения осуществлялись с помощью β -источника ^{90}Sr . Коллимация пучка осуществлялась с помощью алюминиевой пластины толщиной 20 мм и свинцовой пластины толщиной 1 мм. Диаметр отверстия коллиматора $D = 2$ мм. При измерениях использовался расположенный под трубкой сцинтилляционный счетчик на основе

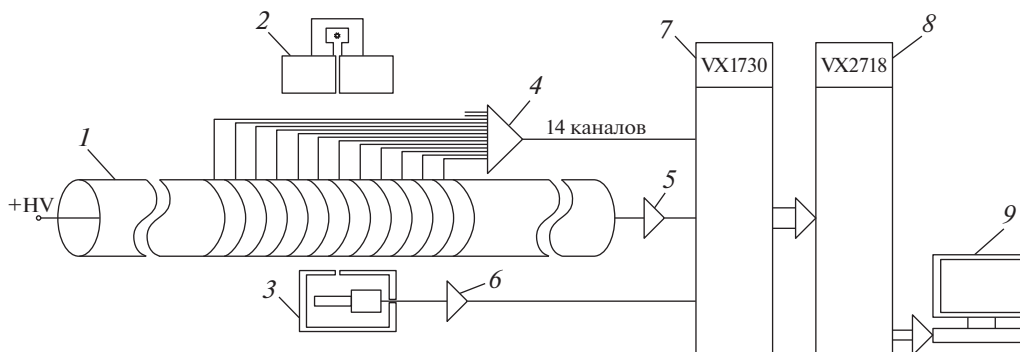


Рис. 4. Схема измерительного стенда для исследования параметров образцов строу с резистивным катодом. 1 – образец строу; 2 – β -источник с коллиматором; 3 – сцинтилляционный счетчик в корпусе; 4 – усилитель стриповых сигналов; 5 – усилитель анодного сигнала; 6 – усилитель сигнала сцинтилляционного счетчика; 7 – дигитайзер CAEN VX1730; 8 – VME-контроллер CAEN VX2718; 9 – персональный компьютер.

сцинтиллятора BICRON с чувствительной площадью $2 \times 2 \text{ мм}^2$ и кремниевым фотоумножителем Sensl FB 30035. Строу продувались газовой смесью $\text{Ar} : \text{CO}_2$ в соотношении 70 : 30. На рис. 5 приведена фотография исследуемых образцов строу на измерительном стенде.

В случае катодного считывания сигналов со стрипов строу № 3 к дигитайзеру CAEN V1730 через усилитель KATOD-1 было присоединено 12 стрипов, расположенных в середине трубки (число стрипов ограничено числом каналов дигитайзера), а также анодный сигнал и триггерный сигнал от сцинтилляционного счетчика. Кроме того, к двум каналам дигитайзера были присоеди-

нены усилители KATOD-1 без подключения стрипов на входе. Это позволило дополнительно оценить уровень наводок во время измерения. Запуск дигитайзера осуществлялся триггерным сигналом от сцинтилляционного счетчика.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

На рис. 6 представлены счетные характеристики и эффективность в зависимости от напряжения питания для образцов строу № 1 и № 2. Характеристики строу № 3 идентичны строу № 1. Рабочий диапазон напряжений (плато) для всех образцов составил $\sim 150 \text{ В}$. Значение эффективности ниже 100% связано с геометрией расположения радиоактивного источника и мониторинжных сцинтилляционных счетчиков.

Для строу № 3 было установлено рабочее напряжение $U_a = +2000 \text{ В}$ (во избежание насыщения сигналов считывающей электроники). Эффективность строу № 3 в поперечном сечении приведена на рис. 7. Спад эффективности у стенок трубки объясняется конечным размером пятна засветки от коллимированного источника ^{90}Sr .

Форма распределения заряда по стрипам приведена на рис. 8. Для определения ширины наведенного на стрипах заряда суммарная гистограмма среднего по 10000 событий заряда на стрипах аппроксимировались нормальным распределением. Видно, что 95% заряда соответствует наведенному сигналу на 5 стрипах.

Была исследована линейность измеряемой координаты вдоль строу № 3. Коллимированный β -источник перемещался вдоль оси трубки с помощью прецизионного механического устройства с точностью 50 мкм. Координата вдоль анодной проволоочки рассчитывалась методом центра тяжести по сигналам со стрипов [26]. В каждой точ-

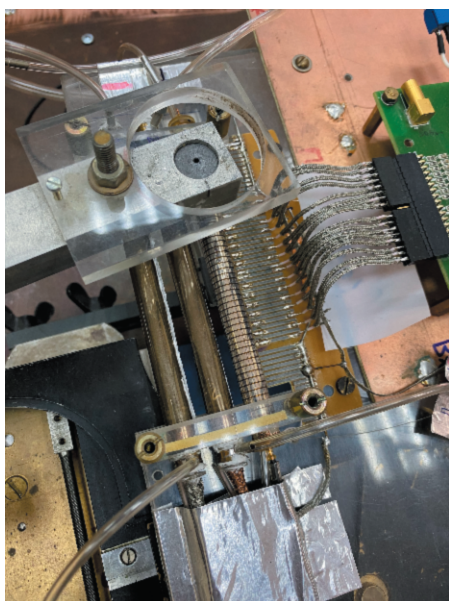


Рис. 5. Фотография образцов строу на измерительном стенде.

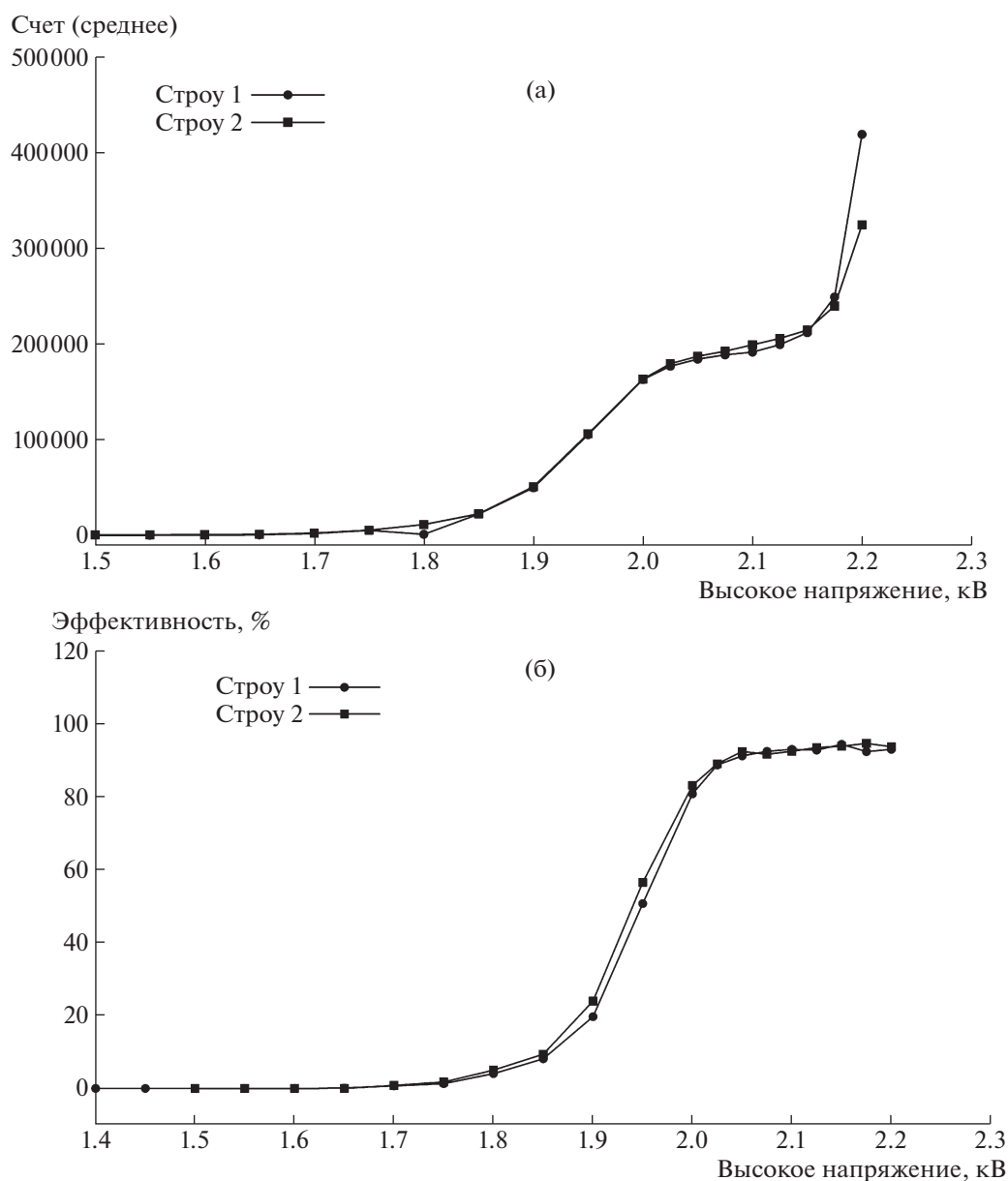


Рис. 6. Счетные характеристики (а) и эффективность (б) строу № 1 и № 2.

ке было набрано 10000 событий. При вычислении координаты вначале находился стрип с максимальным зарядом, затем вычислялась координата с использованием заряда в этом стрипе и зарядов на двух соседних стрипах слева и справа. Зависимость между реальным положением радиоактивного источника и его восстановленной координатой приведена на рис. 9.

На рис. 10 показана корреляция между амплитудой сигнала на анодной проволоке и катодных стрипах. Линейная зависимость между зарядами начинает искажаться при заряде на аноде ~ 1500 фК ($U_a = +2000$ В) из-за насыщения в усилителях, подключенных к катодным стрипам.

Корреляция зарядов на аноде и стрипах может быть использована в детекторах с большим количеством трубок для регистрации многочастичных событий.

5. ВЫВОДЫ

Впервые в качестве резистивного покрытия катода для строу был использован алмазоподобный углерод (DLC). Толщина покрытия из DLC составила порядка 100 нм, поверхностное сопротивление ~ 10 МОм/квадрат. Резистивные свойства этого покрытия, с одной стороны, позволяют минимизировать эффект экранирования наводимых на внешние считывающие электроды (стрипы)

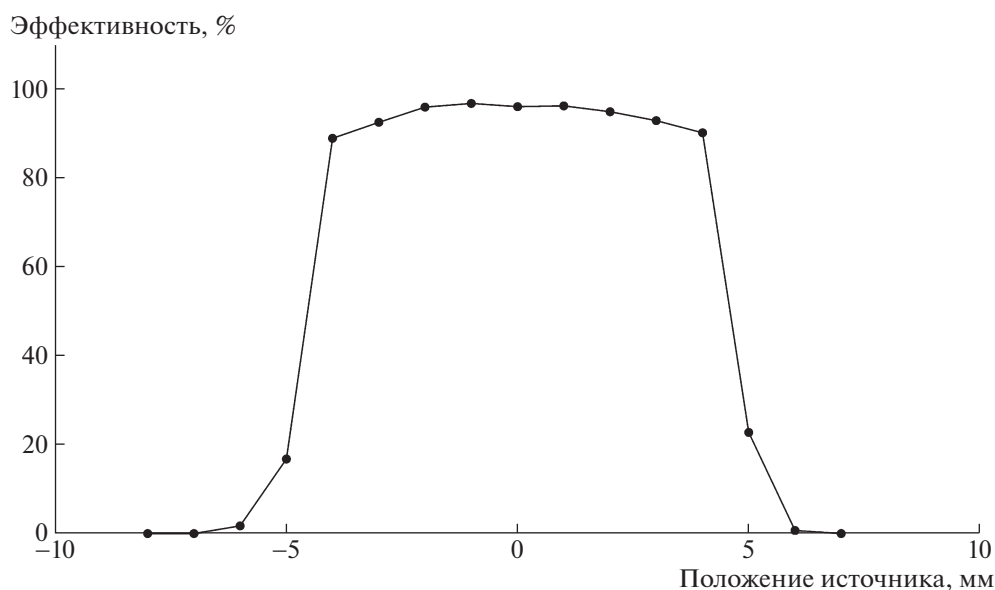


Рис. 7. Эффективность строу № 3 в поперечном направлении.

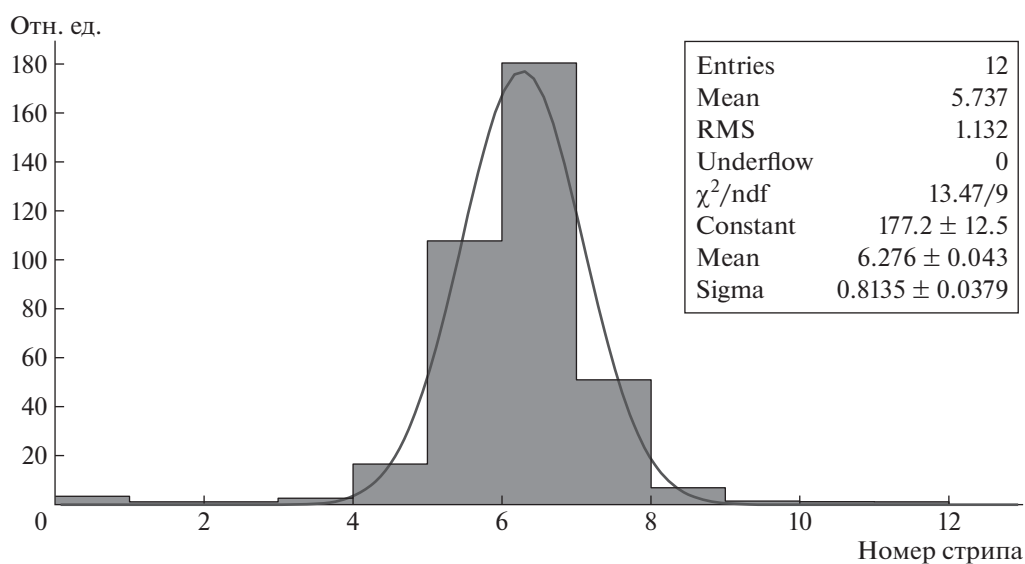


Рис. 8. Форма распределения заряда по стрипам. По горизонтальной оси — номер стрипа, по вертикальной — амплитуда усредненного сигнала на стрипе в условных единицах.

сигналов, а с другой — обеспечивают устойчивость строу к электрическим разрядам между анодной проволокой и катодом. Продемонстрирована возможность изготовления строу с резистивным катодом по технологии ультразвуковой сварки.

В ходе тестирования образцов строу с катодом из резистивного DLC-покрытия была продемонстрирована принципиальная возможность их работы.

Изготовлены и испытаны образцы строу с резистивным катодом на основе DLC и считыванием сигналов с кольцевых электродов на внешней поверхности катодного цилиндра. Такая конструкция строу обеспечивает двумерную координатную регистрацию событий: одна координата измеряется по сигналу с анодной проволоочки (по времени дрейфа), а вторая — по центру тяжести наведенного на стрипы катодного сигнала.

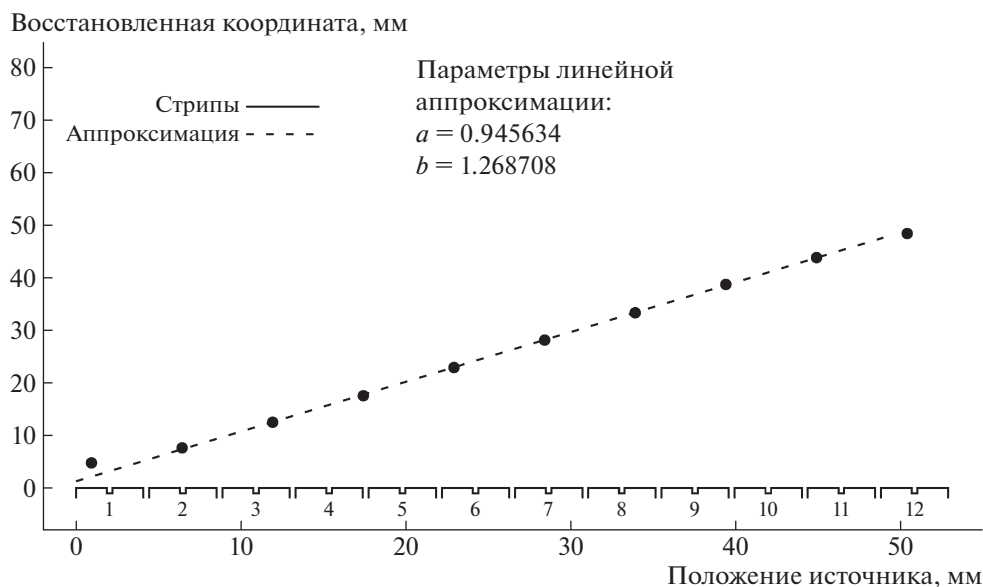


Рис. 9. Корреляция между реальным положением β -источника и его восстановленной координатой для стрипа № 3. Вдоль оси абсцисс показаны положения и номера считывающих стрипов.

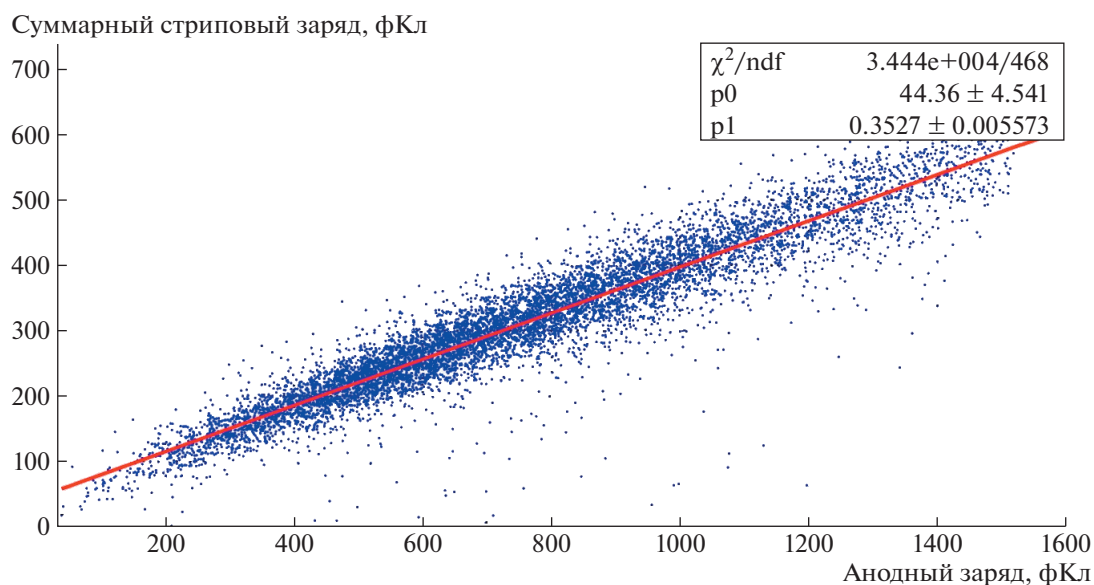


Рис. 10. Корреляционное распределение между зарядом на аноде и суммарным зарядом на стрипах для стрипа № 3.

Таким образом, в работе показана возможность создания стрипа с двухкоординатным считыванием и пространственным разрешением на уровне сотен микрометров. Такие трубки будут обладать повышенной загрузочной способностью и защитой от возможных пробоев. Технологичность производства обеспечивается за счет использования метода ультразвуковой сварки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The ATLAS TRT Collaboration // Journal of Instrumentation. 2008. V. 3. P. P02013. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/02/P02013>
2. The LHCb Collaboration // Journal of Instrumentation. 2008. V. 3. P. S08005. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08005>
3. Bychkov V.N., Dedek N., Dünnweber W., Faessler M., Fischer H., Franz J., Geyer R., Gousakov Yu.V., Grüne-

- maier A., Heinsius F.H., Ilgner C., Ivanchenko I.M., Kekelidze G.D., Königsmann K., Livinski V.V. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Acceler., Spectrom., Detect. Assoc. Equip. 2006. V. 556. P. 66. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.10.026>
4. *Азорский Н.И., Базылев С.Н., Глонти Л.Н., Daniels-son H., Зинченко А.И., Злобин Ю.Л., Кекелидзе В.Д., Кучинский Н.А., Мадигожин Д.Т., Мовчан С.А., Потребеников Ю.К., Самсонов В.А., Слепнев В.М., Слепнев И.В., Фрабетти П.Л., Швецов В.С., Шкаровский С.Н.* // ПТЭ. 2015. № 5. С. 11. <https://doi.org/10.7868/S003281621504028X>
 5. *Nishiguchi H., Evtoukhovitch P., Fujii Y., Hamada E., Mihara S., Moiseenko A., Noguchi K., Oishi K., Tanaka S., Tojo J., Tsamalaidze Z., Tsverava N., Ueno K., Volkov A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Acceler., Spectrom., Detect. Assoc. Equip. 2017. V. 845. P. 269. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.082>
 6. *Erni W., Keshelashvili I., Krusche B., Steinacher M., Heng Y., Liu Z., Liu H., Shen X., Wang Q., Xu H., Aab A., Albrecht M., Becker J., Csapó A., Feldbauer F. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2013. V. 49. P. 1. <https://doi.org/10.1140/epja/i2013-13025-8>
 7. *Myeong Jae Lee* // Nuclear and Particle Physics Proceedings. 2016. V. 273–275. P. 2530. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.448>
 8. *Bazylev S.N., Davkov K.I., Gregor I., Haas D., Mouraviev S.V., Myalkovskiy V.V., Naumann L., Peshekhonov V.D., Rembser C., Rufanov I.A., Russakovich N.A., Senger P., Shutov A.V., Slepnev I.V., Smirnov S.Yu., Tikhomirov V.O., Zhukov I.A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Acceler., Spectrom., Detect. Assoc. Equip. 2011. V. 632. P. 75. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.09.073>
 9. *Davkov K., Davkov V., Geyer R., Gusakov Y.V., Kekelidze G.D., Myalkovskiy V.V., Naumann L., Peshekhonov D.V., Peshekhonov V.D., Savenkov A.A., Tikhomirov V.O., Viryasov K.S.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Acceler., Spectrom., Detect. Assoc. Equip. 2008. V. 584. P. 285. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.10.010>
 10. *Kuchinskiy N.A., Baranov V.A., Duginov V.N., Koronchenko A.S., Kolesnikov A.O., Kravchuk N.P., Lobko A.S., Misevich O.V., Movchan S.A., Rudenko A.I., Smirnov V.S., Khomutov N.V., Zyzulya F.E., Chekhovsky V.A.* // Phys. Part. Nuclei Lett. 2017. V. 14. P. 493. <https://doi.org/10.1134/S1547477117030116>
 11. *Bychkov V.N., Golutvin I.A., Ershov Yu.V., Zubarev E.V., Ivanov A.B., Lysiakov V.N., Makhankov A.V., Movchan S.A., Peshekhonov V.D.* // T. Preda. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Acceler., Spectrom., Detect. Assoc. Equip. 1993. V. 325. P. 158. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)91016-G](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)91016-G)
 12. *Majewski S., Gerbi J., Kross B., Weisenberger A., Baker K.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Acceler., Spectrom., Detect. Assoc. Equip. 1994. V. 348. P. 307. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90752-8](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90752-8)
 13. *Пешехонов В.Д.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. С. 165.
 14. *Dikumar N.D., Myalkovskiy V.V., Nazieva E.A., Peshekhonov V.D.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2012 V. 9. P. 54. <https://doi.org/10.1134/S1547477112010086>
 15. *Robertson J.* // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2002. V. 37. P. 129. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0)
 16. *Prawer S., Ran B., Kalish R., Johnston C., Chalker P., Bull S.J., McCabe A., Jones A.M.* // Diamond and Related Materials. 1996. V. 5 P. 405. [https://doi.org/10.1016/0925-9635\(95\)00478-5](https://doi.org/10.1016/0925-9635(95)00478-5)
 17. *Kuger F.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Acceler., Spectrom., Detect. Assoc. Equip. 2017. V. 845. P. 248. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.006>
 18. *Bayev V.G., Afanaciev K.G., Movchan S.A., Gongadze A., Akulich V.V., Kolesnikov A.O., Koviagina N., Gongadze L., Sotenskii R., Minashvili I., Chubinidze Z., Svito I.A., Orelovich O.L.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Acceler., Spectrom., Detect. Assoc. Equip. 2022. V. 1031. P. 166528. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166528>
 19. *Iodice M., Alviggi M., Camerlingo M.T., Canale V., Della Pietra M., Di Donato C., Iengo P., Petrucci F., Sekhni-aidze G.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1498. P. 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1498/1/012028>
 20. *Attíe D., Batkiewicz-Kwasniak M., Billoir P., Blanchet A., Blondel A., Bolognesi S., Calvet D., Catanesi M.G., Cicerchia M., Cogo G., Colas P., Collazuol G., Delbart A., Dumarchez J., Emery-Schrenk S. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Acceler., Spectrom., Detect. Assoc. Equip. 2022. V. 1025. P. 166109. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.166109>
 21. *Bencivenni G., de Oliveira R., Felici G., Gatta M., Giovannetti M., Morello G., Ochi A., Poli Lener M., Tskhadadze E.* // Journal of Instrumentation. 2019. V. 14. P. 05014. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/05/P05014>
 22. *Kashchuk A., Akulich V., Afanaciev K., Bayev V., Churakov A., Kravchuk N., Kuchinskiy N., Levitskaya O., Solin A.V., Solin A.A.* // Journal of Instrumentation. 2020. V. 15. № 9. P. C09041. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/C09041>
 23. *Tochitsky E.I., Stanishevskii A.V., Kapustin I.A., Akulich V.V., Selifanov O.V.* // Surface and Coatings Technology. 1991. V. 47. P. 292. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(91\)90294-7](https://doi.org/10.1016/0257-8972(91)90294-7)
 24. *Azorskii N.I., Gusakov Yu.V., Elsha V.V., Enik T.L., Ershov Yu.V., Kekelidze V.D., Kislov E.M., Kolesnikov A.O., Madigozhin D.T., Movchan S.A., Polenkevich I. A., Potrebenedikov Yu.K., Samsonov V.A., Shkarovskiy S.N., Sotnikov A.N., Volkov A.D., Zinchenko A.I.* // Phys. Part. Nuclei Lett. 2017. V. 14. P. 144. <https://doi.org/10.1134/S1547477117010071>
 25. *Golutvin I.A., Gorbunov N.V., Karjavin V.Yu., Khabarov V.S., Movchan S.A., Smolin D.A., Dvornikov O.V., Shumeiko N.M., Tchekhovskii V.A.* Preprint JINR E13-2001-151. Dubna, 2001.
 26. *Khovansky N., Malyshev V., Tokmenin V., Sedykh Yu., Korytov A., Osborne L.S., Ross G.D., Verdier R., Bonushkin Yu., Mitselmakher G.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Acceler., Spectrom., Detect. Assoc. Equip. 1994. V. 351. P. 317. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)91359-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91359-5)