

## РАЗРАБОТКА FARICH ДЕТЕКТОРА ДЛЯ СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ НА УСКОРИТЕЛЯХ

*Д. А. Финогеев*<sup>1,\*</sup>, *А. Б. Курепин*<sup>1</sup>, *В. И. Разин*<sup>1</sup>, *А. И. Решетин*<sup>1</sup>,  
*Е. А. Усенко*<sup>1</sup>, *А. Ю. Барняков*<sup>2,3</sup>, *М. Ю. Барняков*<sup>2,3</sup>,  
*В. С. Бобровников*<sup>2,3</sup>, *А. Р. Бузукаев*<sup>2,3</sup>, *П. В. Касьяненко*<sup>2,3</sup>,  
*С. А. Кононов*<sup>2,3</sup>, *Е. А. Кравченко*<sup>2,3</sup>, *И. А. Куянов*<sup>2,3</sup>,  
*А. П. Онучин*<sup>2,3</sup>, *И. В. Овтин*<sup>2,3</sup>, *Н. А. Подгорнов*<sup>2,3</sup>,  
*А. А. Тальшев*<sup>2,3</sup>, *А. Ф. Данилюк*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва

<sup>2</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

Аэрогель успешно используется в качестве радиатора в черенковских детекторах. В 2004 г. был предложен и изготовлен многослойный аэрогель, позволяющий фокусировать черенковское кольцо. На основе такого аэрогеля разрабатываются детекторы FARICH (Focusing Aerogel Rich Imaging Cherenkov), такие как ARICH для эксперимента Belle-II (КЕК, Япония), Forward RICH для эксперимента PANDA (FAIR, Германия), а также FARICH для проекта фабрики Супер Чарм-Тау (ИЯФ, Новосибирск). В ходе данной разработки созданы и испытаны прототипы детектора FARICH на основе лавинных фотодиодов MRS APD и Philips DPC. Достигнуто угловое разрешение регистрации черенковского кольца 3,6 мрад.

Aerogel has been successfully used as a radiator in Cherenkov detectors. In 2004, a multilayer aerogel was proposed and produced which allows one to focus Cherenkov ring. FARICH (Focusing Aerogel Rich Imaging Cherenkov) detectors such as ARICH for Belle-II (KEK, Japan), Forward RICH for PANDA (FAIR, Germany), and FARICH for the Super Charm-Tau factory project (BINP, Novosibirsk) are developed on the basis of this aerogel. In the course of this development, prototypes of FARICH detector based on photosensors MRS APD and Philips DPC have been created and tested. Angular resolution of Cherenkov rings 3.6 mrad was obtained.

PACS: 29.40.Ka

---

\*E-mail: Dmitry.Finogeev@cern.ch, dmitry-finogeev@yandex.ru

### КОНЦЕПЦИЯ ДЕТЕКТОРА FARICH

В основе детектора FARICH лежит аэрогелевый радиатор, располагающийся перед фоточувствительной матрицей. Матрица служит для регистрации черенковского кольца, по радиусу которого определяется скорость пролетающей частицы. Фокусирующие аэрогелевые радиаторы позволяют зарегистрировать большее число фотонов за счет увеличения толщины радиатора без увеличения ширины черенковского кольца. Фокусирующий аэрогелевый радиатор состоит из нескольких слоев, коэффициенты преломления которых подобраны так, что черенковские кольца от каждого слоя накладываются одно на другое (рис. 1). Особенность изготовления многослойных аэрогелевых радиаторов заключается в отсутствии воздушной прослойки между слоями, что исключает внутреннее отражение и потерю света. В настоящее время в Институте катализа СО РАН уже получены экспериментальные образцы «градиентных» аэрогелей, в которых коэффициент преломления плавно меняется по глубине радиатора, что позволяет получить еще более узкие черенковские кольца.

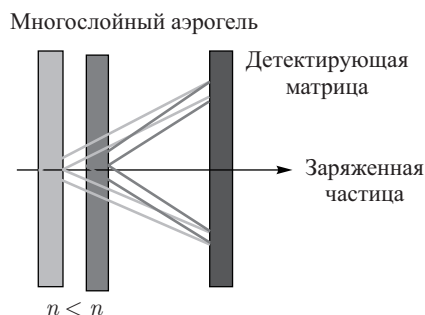


Рис. 1. Схема фокусировки многослойного аэрогеля

Фоточувствительная матрица в детекторе FARICH должна обладать хорошим пространственным разрешением, а также иметь малый темновой ток для хорошего выделения полезного сигнала и возможности регистрировать свет в однофотонном режиме.

### ПРОТОТИП ДЕТЕКТОРА FARICH НА ОСНОВЕ MRS APD

В 2009 г. был собран один из первых прототипов детектора FARICH с фоточувствительной матрицей на основе лавинных фотодиодов MRS APD. MRS APD нечувствительны к магнитному полю, что расширяет сферу применимости этого детектора. Пик фоточувствительности MRS APD находится в районе длины волны 650 нм и составляет 33%. Для регистрации черенковского света MRS APD использовалась специальная краска для сдвига длины волны черенковского света в область высокой квантовой эффективности APD. При этом при длине волны в 410 нм полная квантовая эффективность PDE составляет 11%. Зависимость PDE MRS APD от длины волны света приведена на рис. 2. Коэффициент усиления фотодиодов составляет  $5 \cdot 10^5$

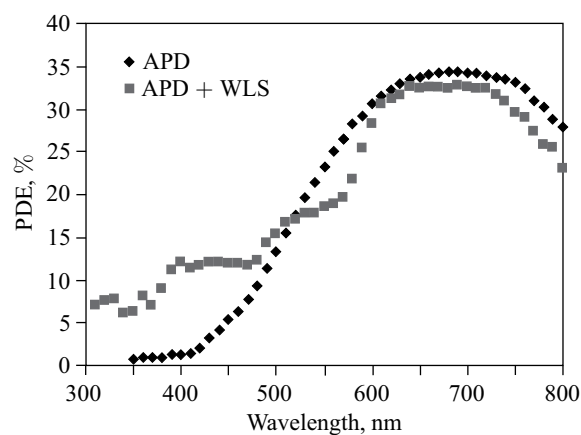


Рис. 2. Зависимость PDE фотодиодов MRS APD от длины волны света

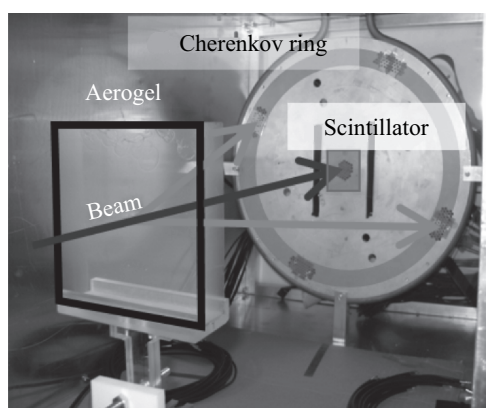


Рис. 3. Прототип FARICH на основе MRS APD

при рабочем напряжении 50 В. Частота импульсов темнового тока MRS APD при комнатной температуре равна 1 МГц. При понижении температуры при помощи элементов Пельтье и водяного охлаждения до  $-25^{\circ}\text{C}$  темновой ток снижается до 200 кГц, что позволяет регистрировать черенковский свет в однофотонном режиме [1]. На рис. 3 представлено фото основных составляющих прототипа: аэрогеля на подвижном держателе и прототипа детектирующей матрицы. Аэрогельный радиатор имеет четыре слоя с коэффициентами преломления порядка 1,04. Размер радиатора составляет  $100 \times 100 \times 31$  мм. Детектирующая матрица состояла из пяти секторов. Всего было задействовано 84 диода, чувствительная площадь каждого составляла  $1 \text{ мм}^2$ . В ка-

честве считывающей электроники использовалась плата TRB2, основанная на чипе NINO. Испытания прототипа проходили на ускорителе PS (ЦЕРН, Швейцария) на тестовом пучке T10. По результатам измерения, из-за малой геометрической эффективности, на кольцо приходилось не более двух фотоэлектронов, что усложняло выделение полезного сигнала из шума. Для улучшения регистрации черенковского света планировалось использовать фокусирующие конусы Винстона, а также реализовать охлаждение матрицы в прототипе. Однако дальнейшая разработка этого прототипа не была реализована в связи с разработкой нового прототипа на основе цифровых кремниевых фотоумножителей Philips DPC.

### ПРОТОТИП ДЕТЕКТОРА FARICH НА ОСНОВЕ PHILIPS DPC

Фотосенсоры DPC (Digital Photon Counter) — это новая технология цифровых кремниевых фотоумножителей, разработанная компанией Philips. Особенность DPC заключается в расположении логической схемы считывания сигналов на одной микросхеме с матрицей лавинных фотодиодов. Такая конструкция дает множество преимуществ по отношению к традиционной схеме, в которой считывающая электроника располагается отдельно от фоточувствительной матрицы. Каждый лавинный фотодиод имеет свой собственный электронный модуль, который отвечает за активное гашение разряда и перезарядку диода, генерацию логического сигнала и измерение времени его прихода. Таким образом, исключаются помехи и ослабление аналогового сигнала, которые были бы при его передаче на внешнюю детекторную электронику. Индивидуальное управление каждым лавинным диодом позволяет отключить часть сильно шумящих фотодиодов. При отключении 5% диодов темновой ток может понизиться на порядок [2].

В 2012 г. был спроектирован и создан прототип детектора FARICH с детектирующей матрицей фотосенсоров Philips DPC (рис. 4). Матрица имеет размер  $20 \times 20$  см и содержит  $48 \times 48$  пикселей размером  $3,2 \times 3,9$  мм, покрывающих площадь матрицы с эффективностью 69%. Эффективность регистрации фотонов одним пикселем по данным производителя составляет 36% при длине волны 430 нм. Для понижения темнового тока матрица охлаждается до  $-40^\circ\text{C}$  с помощью элементов Пельтье и термостата LAUDA Integral XT 150. При этой температуре частота темновых срабатываний фотосенсоров DPC составила  $2 \text{ кГц/мм}^2$ . Прототип размещается в тепло- и светоизолированном боксе и продувается сухим азотом. Аэрогель помещается внутри бокса в герметичный контейнер с окном из полиметилметакрилата толщиной 5 мм.

Аэрогель имел четыре слоя и размеры  $115 \times 115 \times 37,5$  мм, а коэффициент преломления в среднем был равен 1,04. Расстояние от радиатора до матрицы варьировалось в диапазоне от 170 до 220 мм.



Рис. 4. Прототип FARICH с матрицей на основе Philips dSiPM

Испытания прототипа FARICH на базе DPC проводились на ускорителе PS на пучке ( $e^+$ ,  $\mu^+$ ,  $\pi^+$ ,  $K^+$ ,  $p$ ) с импульсами от 1 до 6 ГэВ/с. Триггер подавался от двух сцинтилляционных счетчиков на базе ФЭУ-187, стоящих до и после прототипа. В среднем на кольцо приходилось 12 фотонов, что позволило распознавать черенковское кольцо для каждого события. Временное разрешение составило 48 пс. Для релятивистских частиц было получено разрешение по черенковскому углу ( $3,61 \pm 0,04$ ) мрад, разделение пионов и каонов составило  $3,5\sigma$  при импульсе 6 ГэВ/с, а разделение мюонов и пионов —  $5,3\sigma$  при импульсе 1 ГэВ/с [3].

#### **ПРОТОТИП ДЕТЕКТОРА FARICH НА ОСНОВЕ ФОТОСЕНСОРОВ PHILIPS DPC С ГРАДИЕНТНЫМ АЭРОГЕЛЕМ**

Наравне с многослойными аэрогелями в ИК СО РАН и ИЯФ СО РАН в Новосибирске получен аэрогелевый радиатор с коэффициентом преломления, непрерывно меняющимся по толщине радиатора. На рис. 5 показана зависимость коэффициента преломления от глубины в образце градиентного аэрогеля.

Испытание прототипа детектора FARICH с фотосенсорами DPC с градиентным аэрогелем проведено в 2013 г. на выведенном пучке электронов ускорителя ВЭПП-4М (ИЯФ, Новосибирск). Энергия электронов составила 1 ГэВ. Положение электронов регистрировалось с помощью четырех координатных детекторов GEM с разрешением 7 мкм. В каждом пикселе фоточувствительной матрицы была оставлена рабочая область размером  $1 \times 1$  мм с целью улучшить геометрическое разрешение. Расстояние от радиатора до фоточув-

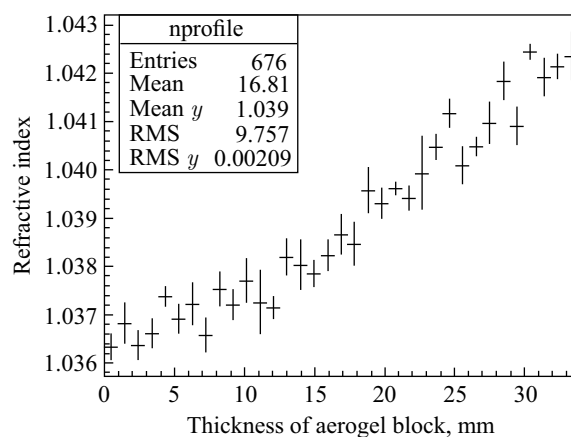


Рис. 5. Зависимость коэффициента преломления по оптической оси образца аэрогеля

ствительной матрицы составило 190 мм. Разрешение по радиусу черенковского кольца составило 2,6 мм. Следует отметить что из-за большого количества материала между детекторами GEM и аэрогелевым радиатором точность определения координат частиц оказалась меньше ожидаемой. Из-за малой чувствительной области каждого диода число фотоэлектронов составило в среднем до трех на кольцо, что не позволило распознавать черенковское кольцо по событию [4].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прототип детектора FARICH на основе DPC показал отличные результаты: разрешение по черенковскому углу  $(3,61 \pm 0,04)$  мрад,  $\pi/K$ -разделение  $3,5\sigma$  при импульсе 6 ГэВ/с, а  $\mu/\pi$ -разделение  $5,3\sigma$  при импульсе 1 ГэВ/с. Прототип на основе DPC может быть использован для прецизионного измерения характеристик аэрогелей на пучке частиц.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berlev A. I., Danilyuk A. F., Karavicheva T. L., Karpechev E. V., Kirillov V. L., Kononov S. A., Kravchenko E. A., Kupchinskiy Yu. V., Kurepin A. B., Kurepin A. N., Maevskaya A. I., Musienko Yu. V., Onuchin A. P., Razin V. I., Reshetin A. I., Finogeev D. A. Development of FARICH-Detector for ALICE Experiment at CERN // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 156–159.
2. Haemisch Y., Frach T., Degenhardt C., Thon A. Fully Digital Arrays of Silicon Photomultipliers (dSiPM) — a Scalable Alternative to Vacuum Photomultiplier Tubes (PMT) // Phys. Procedia. 2012. V. 37. P. 1546–1560.

3. *Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Bobrovnikov V. S., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Degenhardt C., Dorscheid R., Finogeev D. A., Frach T., Gulevich V. V., Karavicheva T. L., Kononov S. A., Kravchenko E. A., Kurepin A. B., Kuyanov I. A., Muelhens O., Onuchin A. P., Ovtin I. V., Razin V. I., Reshetin A. I., Schulze R., Talyshhev A. A., Usenko E. A., Zwaans B.* Beam Test of FARICH Prototype with Digital Photon Counter // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2013. V. 732. P. 352–356.
4. *Barnyakov A. Yu., Barnyakov M. Yu., Basok I. Yu., Blinov V. E., Bobrovnikov V. S., Borodenko A. A., Buzykaev A. R., Danilyuk A. F., Degenhardt C., Dorscheid R., Finogeev D. A., Frach T., Gulevich V. V., Karavicheva T. L., Kasyanenko P. V., Kononov S. A., Korda D. V., Kravchenko E. A., Kudryavtsev V. N., Kurepin A. B., Kuyanov I. A., Muelhens O., Onuchin A. P., Ovtin I. V., Podgornov N. A., Predein A. Yu., Prisekin V. G., Protsenko R. S., Razin V. I., Reshetin A. I., Schulze R., Shekhtman L. I., Talyshhev A. A., Usenko E. A., Zwaans B.* Tests of FARICH Prototype with Precise Photon Position Detection // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2014. V. 766. P. 88–91.