

УДК 539.1.074.3

МИКРОКАНАЛЬНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ТРЕКОВЫЙ ДЕТЕКТОР

Е. М. Гущин¹, В. А. Рябов, С. В. Сомов¹

Описан сцинтилляционный трековый детектор на базе микроструктурной мишени и трехкаскадного электронно-оптического преобразователя, работающего в одноэлектронном режиме. В качестве мишени исследованы микроканальная пластина, заполненная жидким сцинтиллятором, стеклянные волоконно-оптические шайбы и входная шайба ЭОП. Средняя плотность точек на треке пиона с энергией 3 ГэВ составляет соответственно $5,4 \pm 0,4$, $1,6 \pm 0,1$ и $2,5 \pm 0,2$ мм⁻¹.

В настоящее время активно разрабатываются микроканальные трековые детекторы (МКД), основным элементом которых является мишень из тонких (~ 10 мкм) сцинтилляционных стеклянных или пластических волокон или капилляров, заполняемых жидким сцинтиллятором. Свет, возникающий в мишени при прохождении заряженной частицы, транспортируется за счет полного внутреннего отражения к ее торцевой поверхности, где регистрируется сборкой электронно-оптических преобразователей (ЭОП). Такая сборка состоит из одного-двух электростатических ЭОП и ЭОП с микроканальной пластиной (МКП), имеет общее усиление по свету $\sim 10^6 - 10^7$ и работает в одноэлектронном режиме. Информация с экрана последнего ЭОП считывается высокочувствительной телевизионной трубкой или прибором с зарядовой связью (ПЗС).

Временное разрешение МКД определяется кинетикой высвечивания сцинтиллятора и люминофора экранов электростатических ЭОП, а также системой считывания информации. Пространственное разрешение МКД лимитируется разрешением сборки

¹Московский инженерно-физический институт.

ЭОП (25 – 30 пар линий (п. л.) на мм), диаметром волокна (капилляра), качеством его светоизоляции и числом фотоэлектронов, зарегистрированных на треке частицы. Последний параметр является основным для МКД как трекового детектора; он зависит от характеристик сцинтиллятора, геометрии и оптики каналов (калибр, коэффициенты преломления, прозрачность, качество поверхности и т. п.) и от чувствительности первого каскада сборки ЭОП. Поэтому усилия экспериментаторов направлены на исследования новых материалов и технологий для МКД. Разрабатываются сцинтилляторы с высоким световыходом, большим коэффициентом преломления и хорошей прозрачностью к собственному излучению, специальные сорта оптических и сцинтиллирующих стекол, способы изготовления микроканальных блоков с улучшенной светоизоляцией каналов и т. п. Исследуются новые типы ЭОП, например, безэкранные, в которых электронный поток бомбардирует непосредственно полупроводниковую систему считывания изображения (ПЗС или кремниевые микрополоски) [1, 2].

В настоящее время имеются проекты МКД для нейтринных экспериментов с мишенью длиной несколько метров и массой ~ 100 кг [3]. Вместе с тем, существуют задачи, где достаточно МКД с мишенью объемом ~ 1 см³ [4]. В представленной работе показано, что в качестве такой мишени можно с успехом использовать даже не приспособленные для этой цели существующие микроструктуры. Мы исследовали МКД на основе двух таких структур – стекловолоконных оптических шайб, предназначенных для передачи изображения, в частности, собственно входной шайбы ЭОП, и стандартной МКП, применяемой обычно в фотоэлектронных приборах. Их характеристики приведены в табл. 1.

В первоначальном варианте МКД использовалась трехкаскадная сборка из двух стандартных ЭОП "Клен" с электростатической фокусировкой и усилением по свету 30-40 (при напряжении питания 10 – 15 кВ) и ЭОП с МКП "Каскад" с усилением $3 \cdot 10^4$ [5]. Все ЭОП имели мультищелочные фотокатоды и экраны с "медленным" люминофором К-71, временные характеристики которого представлены на рис. 1. Диаметр поля зрения сборки определялся диаметром МКП в ЭОП "Канал" (24 мм); полное геометрическое разрешение сборки, измеренное в статическом режиме с помощью контактной миры ГОИ N 3, составляло 15 – 17 п. л./мм (в центре экрана). МКД размещался в пучке пионов с энергией около 3 ГэВ; проходящие через мишень МКД частицы выделялись триггерным телескопом из трех сцинтилляционных счетчиков, включенных на совпадения. ЭОПы "Клен" постоянно включены, а ЭОП "Канал" управлялся триггером, по сигналу которого на МКП ЭОП подавался треугольный импульс напряжения с ампли-

тудой до 850 В и постоянными времени переднего и заднего фронтов соответственно 50 нс и 100 мкс.

Т а б л и ц а 1

Характеристики исследованных мишеней. Для шайб ЭОП в числителе указана толщина в центре, в знаменателе – на краю. $N = 4\alpha/\pi d_c$ – линейная плотность каналов, пересекаемых частицей

Мишень	Диаметр структуры, мм	Толщина, s, мм	Диаметр канала, d_c , мкм	Коэфф. заполн. α	N , мм^{-1}	$\langle n \rangle$, мм^{-1}
Шайба ЭОП "Клен"	42	4/16	5	0,55	140	$1,6 \pm 0,1$
Шайба ЭОП "Шторка"	35	4/7	5	0,55	140	$2,5 \pm 0,2$
МКП на ЭОП "Клен"	24	1	40	0,60	20	$4,8 \pm 0,6$
МКП на ЭОП "Шторка"	24	1	40	0,60	20	$5,4 \pm 0,4^*$
Волоконные шайбы						
ТБФ-10	20	10	5	0,55	140	$1,5 \pm 0,2$
ТФ-105	49	7	5	0,55	140	$1,7 \pm 0,1$
ТБФ-10	20×20	100	5,5	0,58	130	$1,6 \pm 0,1$

* Без отражающей пленки на внешней поверхности.

При исследовании шайбы ЭОП выделяемые триггером частицы проходили перпендикулярно оси ЭОП; при исследовании МКП она заполнялась жидким сцинтиллятором (1-метилнафталин + 1 г/л ВРО + 0,1 г/л РОРОР), устанавливалась на входной шайбе первого ЭОП и вся сборка ориентировалась так, чтобы ось пучка проходила под углом 15° к плоскости МКП. Для увеличения светосбора внешние поверхности шайбы ЭОП или МКП закрывались алюминированной отражающей пленкой. Регистрируемые треки наблюдались визуально или фотографировались с экрана ЭОП "Канал" контактным способом.

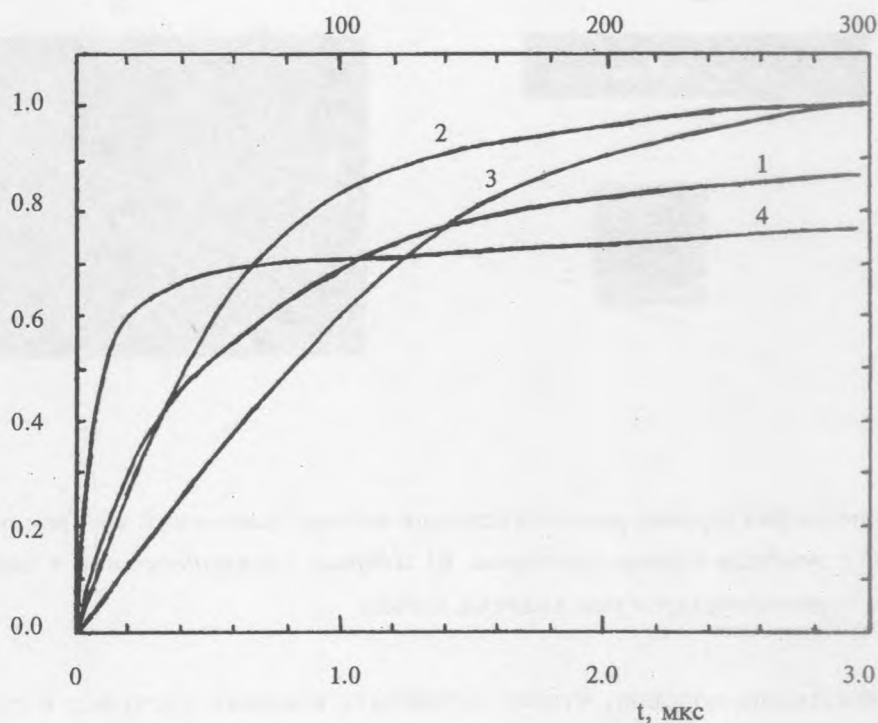


Рис. 1. Зависимость интегрального световыхода экранов ЭОП с различными люминофорами от времени. 1 — К-71; 2 — ФС-5, один каскад; 3 — то же, два каскада; 4 — КС-425, время высвечивания длинной компоненты около 40 мкс. 1 — верхняя шкала; 2, 3, 4 — нижняя шкала.

В обеих мишенях мы получили четкие треки релятивистских частиц со средней плотностью точек $\langle n \rangle = 4,8 \pm 0,6 \text{ мм}^{-1}$ для МКП с жидким сцинтиллятором (рис. 2а) и $\langle n \rangle = 1,6 \pm 0,1 \text{ мм}^{-1}$ для шайбы ЭОП (рис. 2б) [6]. Как видно из рис. 3, распределение размеров точек на треке достаточно узкое, причем средний диаметр точки приблизительно соответствует геометрическому разрешению МКД. Вместе с тем нами было обнаружено, что ширина трека заметно превышает ширину, ожидаемую из геометрического разрешения первого ЭОП и диаметра каналов мишени. Этот эффект в большей или меньшей степени наблюдается практически во всех МКД. Обычно его связывают с "растеканием" света из-за недостаточно хорошей светоизоляции каналов в мишени (коэффициент захвата света за счет полного внутреннего отражения в канале не превышает нескольких процентов). Однако передающие изображение волоконно-оптические шайбы при диаметре ядра волокна 5 мкм должны иметь высокоэффектив-

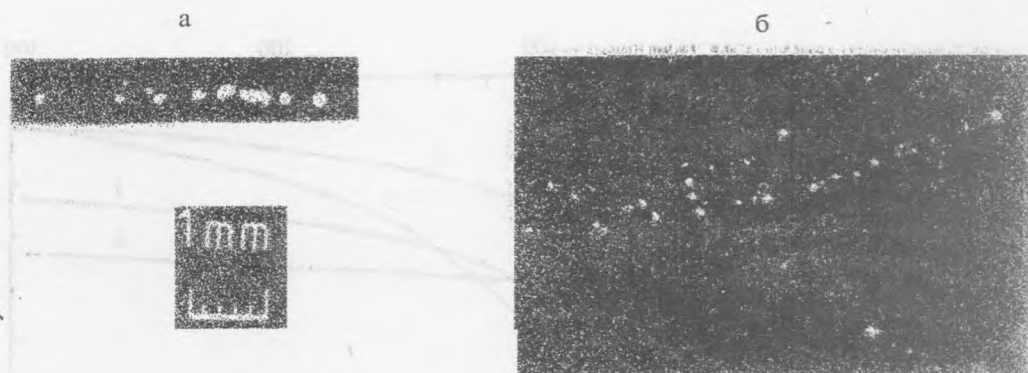


Рис. 2. Фотографии треков релятивистских частиц в мишенях. а) Трек пиона, прошедшего через МКП с жидким сцинтиллятором. б) Ядерное взаимодействие в шайбе ЭОП "Шторка". Пучок перпендикулярен оси волокна шайбы.

ную светоизоляцию волокон, чтобы обеспечить высокий контраст и разрешение до 100 п. л./мм. Весьма вероятной причиной уширения трека в нашем случае является вторичная эмиссия электронов с поверхности МКП в ЭОП "Канал". Известно, что при энергии первичных электронов 1 – 2 кэВ коэффициент вторичной эмиссии достигает 0,3 (см., например, [7]). Поскольку лишь 1 – 3% вторичных электронов являются упругоотраженными, мы предполагаем, что уширение трека должно быть в значительной степени подавлено в ЭОП с МКП, поверхность которой покрыта сплошной тонкой алюминиевой пленкой, задерживающей низкоэнергичные вторичные электроны.

В дальнейшем мы существенно улучшили характеристики МКП, применив в качестве первых каскадов специальные ЭОП "Шторка". Эти ЭОП имели высокочувствительный бищелочной фотокатод с квантовым выходом в максимуме спектральной характеристики (410 – 420 нм) до 0,25 фотоэлектронов на квант и экран с "быстрым" люминофором ФС-5 (рис. 1). Необходимо отметить, что бищелочной фотокатод наилучшим образом соответствует спектру свечения пластических сцинтилляторов, а также жидких сцинтилляторов с добавками РОРОР. В этом варианте ЭОП "Канал" управлялся электронным затвором на базе лампы 6В2П, который вырабатывал прямоугольный импульс напряжения с амплитудой до 1200 В и длительностью до 200 нс.

В качестве мишеней мы исследовали как входную шайбу первого ЭОП "Шторка", так и волоконно-оптические шайбы из различных стекол, которые на глицери-

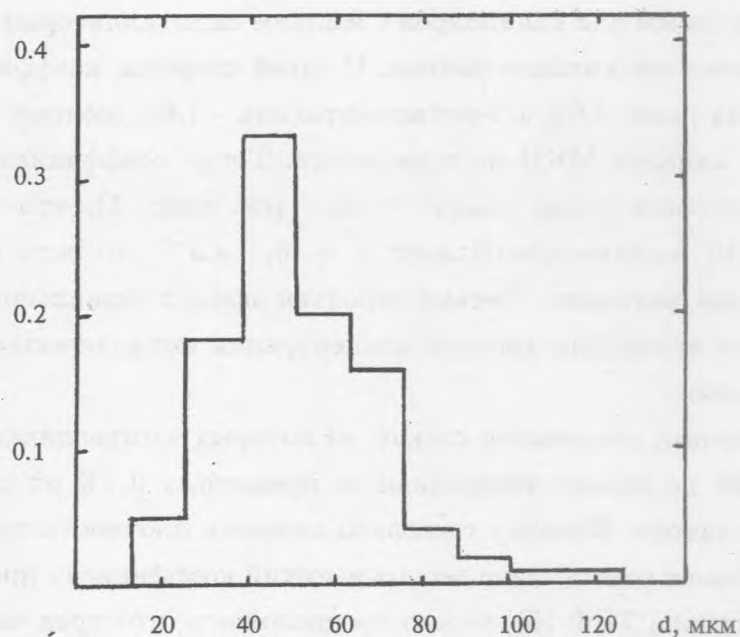


Рис. 3. Гистограмма распределения диаметров точек на треке пиона в шайбе ЭОП "Клен".
 $\langle d \rangle = 50$ мкм, $\sigma_d = 20$ мкм.

новой смазке устанавливались на входной шайбе. Полученные результаты представлены в табл. 1. Во всех волоконно-оптических шайбах плотность трека приблизительно одинакова². Большее же значение $\langle n \rangle = 2,5$ мм⁻¹ в шайбе ЭОП объясняется тем, что в этом случае нет потери света на стыке мишени и шайбы ЭОП. Вместе с тем, преимуществом волоконно-оптических шайб является отсутствие принципиальных ограничений на их размеры. Это позволяет эффективно использовать такие структуры в продольном облучении, когда первичный пучок параллелен оси волокон. При этом возможно определение как азимутальных, так и полярных углов вылета вторичных частиц относительно траектории первичной частицы [3].

На сегодняшний день плотность трека в МКД с мишенями, которые имеют диаметр

²Кроме указанных в таблице, мы наблюдали треки в шайбах из стекол ТК-16, ТФ-105 и радиационно стойких стекол с добавками церия.

каналов 20 – 30 мкм, колеблется от 1 – 2 точек на мм для сцинтилляционных волокон [8] до 5 – 6 точек на мм для капилляров с жидким сцинтиллятором [1]. Полученная нами плотность трека неожиданно высока. С одной стороны, коэффициент преломления свинцового стекла равен 1,64, а 1-метилнафталина – 1,61, поэтому полного внутреннего отражения в каналах МКП не происходит. Тогда коэффициент светосбора в ней определяется телесным углом $(d_c/s)^2 \sim 10^{-4}$ (см. табл. 1), что при эффективности сцинтиллятора 10 квантов/кэВ дает $n \sim 0,1 \text{ мм}^{-1}$, то есть на порядок меньше экспериментальной величины. Весьма вероятен эффект зеркального отражения света стенками каналов вследствие высокой концентрации металлического свинца в их приповерхностном слое.

С другой стороны, световыход стекол, из которых изготавливаются керны волокон оптических шайб, по нашим измерениям не превышает 0,1% от световыхода пластического сцинтиллятора. Поэтому следовало ожидать плотность трека $n \sim 0,01 \text{ мм}^{-1}$ или менее. Принимая во внимание весьма высокий коэффициент преломления этих стекол (до 1,812 у стекла ТБФ-10), можно предположить, что трек частицы в волоконно-оптических шайбах формируется черенковским излучением. Правда, для объяснения наблюдаемой плотности трека коэффициент захвата излучения волокном шайбы должен быть близок к 1.

Таким образом, механизм образования и транспортировки света в исследованных микроканальных структурах до конца не ясен. Вместе с тем полученные результаты дают возможность реализовать на их основе эффективный МКД с мишенью небольшого размера.

Авторы выражают глубокую признательность В. В. Аммосову и В. А. Гапиенко за постоянное внимание и поддержку и В. Ю. Федорову, Н. Н. Калашниковой и А. Н. Дервягину за помощь при разработке микроканального детектора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cianfarani C. et al., Nucl. Instr. Meth., **A339**, 449 (1994).
- [2] D'Ambrasio C. et al., CERN-PPE/94-152, CERN, 1994 (submitted to Nucl. Instr. Meth.).
- [3] Winter K., Proc. of Workshop on Application of Scintillating Fibers in Particle Physics, Blossin, 67 (1990).
- [4] Аммосов В. В. и др., СЕРП-П-176, ИФВЭ, 1993.

- [5] Ammosov V. V. et al., Abstracts of 17th Intern. Conf. on Nucl. Tracks in Solids, Dubna, 1994, p. 152.
- [6] Аммосов В. В. и др., Письма в ЖТФ, **20**, N 6, 1 (1994).
- [7] Шулман А. Р., Фридрихов С. А., Вторично-эмиссионные методы исследования твердых тел, М., Наука, 1977, с. 71.
- [8] Adinolfi M. et al., Nucl. Instr. Meth., **A311**, 91 (1992).

Поступила в редакцию 8 февраля 1995 г.