

## Разработка детектора заряженных частиц на основе МКП с CsI-фотокатодом

К. Г. Петрухин<sup>1,\*</sup>, А. Ю. Барняков<sup>1,2,3,†</sup>, М. Ю. Барняков<sup>1,3,‡</sup>, В. Е. Блинов<sup>1,2,3</sup>,  
В. С. Бобровников<sup>1,3</sup>, А. В. Быков<sup>1,3</sup>, В. Я. Иванов<sup>3,4</sup>, А. А. Катцин<sup>1,3</sup>,  
Е. В. Мамошкина<sup>1,3</sup>, И. В. Овтин<sup>1,2</sup>, С. Г. Пивоваров<sup>1,2,3</sup>, В. Г. Присекин<sup>1,3</sup>, Е. Е. Пята<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, д. 11

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, физико-технический факультет

Россия, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20, корпус 4

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет. Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2

<sup>4</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий

Россия, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, д. 6

(Поступила в редакцию 24.10.2022; подписана в печать 29.11.2022)

Для некоторых будущих экспериментов со встречными пучками потребуется технология регистрации заряженных частиц, обеспечивающая превосходное временное разрешение (лучше 50 пс). Детектор заряженных частиц с таким временным разрешением разрабатывается в Институте ядерной физики имени Будкера (ИЯФ). Прототипы на основе микроканальных пластин с полупрозрачным CsI-фотокатодом производства ИЯФ испытаны на пучке релятивистских электронов. Результаты испытаний балки и расчеты хорошо согласуются. Представлен процесс изготовления и испытаний прототипа. Описаны результаты измерения квантовой эффективности CsI-фото катода и результаты эксперимента на выведенном пучке электронов.

PACS: 85.60.На, 41.60.Вq

УДК: 539.1.074.6.

Ключевые слова: Времяпролетные системы, Микроканальные пластины, CsI фотокадод.

### ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах на встречных пучках, для идентификации частиц, часто используют метод измерения времени пролета (TOF от англ. Time Of Flight). С ростом энергии сталкивающихся пучков, повышаются требования к временному разрешению счетчиков, применяемых в TOF (лучше 50 пс). Создание детектора, способного определять время пролета частицы с точностью около 10–15 пс позволит, например, осуществлять разделение  $\pi$  и  $K$  мезонов до 3.5 ГэВ/с, на базе 1 м.

Также высокое временное разрешение важно в экспериментах на адронных коллайдерах с высокой светимостью ( $10^{35}$ – $10^{36}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>). Например, для разделения вершин, при проведении экспериментов с высокой светимостью на БАК в CERN, будут использоваться счетчики с временным разрешением <50 пс [1]. На данный момент, в ИЯФ СО РАН ведется разработка детектора заряженных частиц на основе микроканальных пластин (МКП) с проектным временным разрешением 10–15 пс [2], активной площадью около 10 см<sup>2</sup> и пространственным разрешением около 1 см (рис. 1).

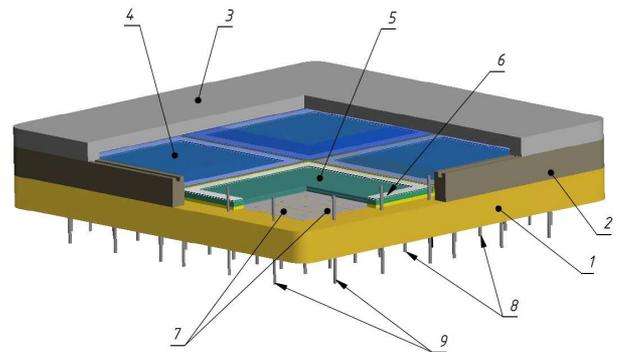


Рис. 1. Принципиальная схема детектора: 1 — керамическое основание (10x10 см), 2 — металлическая стенка, 3 — металлическая крышка, 4 — черенковский радиатор с напыленным фотокатодом (4 шт.), 5 — матрица 2×2 шевронных сборок МКП, 6 — керамическая прокладка, 7 — анодные площадки, 8 — выводы с анодов, 9 — высоковольтные вводы

### 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРОТОТИПА ПИКОСЕКУНДНОГО ДЕТЕКТОРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ МКП

Принцип работы прототипа детектора представлен на рис. 2 и заключается в следующем: когда заряженная частица проходит через черенковский радиатор, в нем рождается черенковское излучение, которое, с помощью полупрозрачного фото катода, конвертируется в фотоэлектроны. Поток фотоэлектронов усиливается при помощи шевронного блока МКП, после чего сигнал считывается с анода.

\* K.G.Petrukhin@inp.nsk.su

† A.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su

‡ M.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su

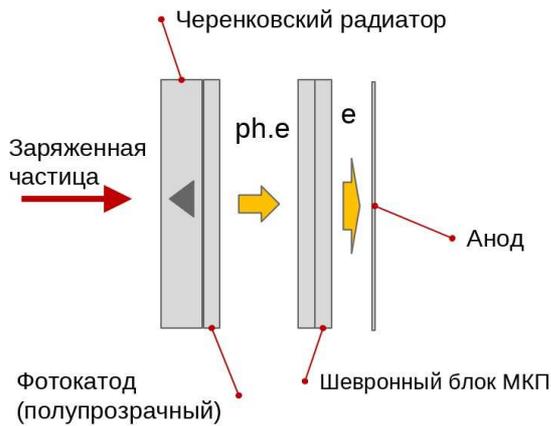


Рис. 2. Принцип работы прототипа детектора заряженных частиц на основе МКП

### 1.1. Черенковский радиатор и фотокатод

Расчетные параметры некоторых черенковских радиаторов [3] представлены на рис. 3. Прозрачность в области коротких длин волн ограничивает число черенковских фотонов слева. Поэтому выбор черенковского радиатора в основном определяется прозрачностью.

Наилучшей прозрачностью в коротковолновой области, а следовательно большим числом фотоэлектронов обладают следующие материалы: LiF и MgF<sub>2</sub>. В LiF образуется большее число черенковских фотонов, но LiF обладает свойством впитывать влагу из атмосферы. При работе с данным материалом необходимо поддерживать как можно более низкую влажность атмосферы, а также с осторожностью применять методы очистки поверхности от загрязнений, использующие различные жидкости. MgF<sub>2</sub> невосприимчив к влаге, но в нем образуется меньше черенковских фотонов, чем в LiF.

К фотокатоду предъявляются следующие требования: высокая прозрачность, чувствительность в области пика числа черенковских фотонов (наибольшее число черенковских фотонов приходится на диапазон длин волн 115–200 нм.), высокая стойкость к плохому вакууму, наличию обратной ионной связи, кратковременному нахождению в атмосфере. Данным требованиям удовлетворяет полупрозрачный CsI фотокатод. Недостатком данного материала является способность поглощать влагу из окружающей среды. Длительное нахождение в атмосфере ведет к потере эффективности. Пример спектра квантовой эффективности CsI фотокатода Hamamatsu R6835 представлен на рис. 4 [4].

Расчет полного числа фотоэлектронов производится по формуле (1) путем свертки спектральной характеристики фотокатода и спектра черенковского излучения.

$$\frac{dN_{\text{ф.э.}}}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \varepsilon_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{S(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda \quad (1)$$

Результаты вычислений для различных материалов черенковского радиатора представлены в табл. 1.

Таблица 1. Полное число фотоэлектронов для различных материалов с радиатора толщиной 5 мм

Материал радиатора	Число фотоэлектронов N <sub>ф.э.</sub>
Силикатное стекло (SiO <sub>2</sub> )	2,1
Фторид кальция (CaF <sub>2</sub> )	27,5
Фторид магния (MgF <sub>2</sub> )	32,2
Оксид алюминия (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	23,3
Фторид лития (LiF)	38,5

Наибольшее количество фотоэлектронов обеспечивает использование MgF<sub>2</sub> или LiF. Комбинация данных материалов радиатора и CsI-фотокатода используется при создании прототипов детектора.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА ПИКОСЕКУНДНОГО ДЕТЕКТОРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ МКП

На данный момент детектор заряженных частиц находится на этапе прототипирования, производится отработка технологии напыления фотокатода.

Корпус прототипа детектора, как показано на рис. 5, разделен на две части. Верхняя часть включает оптическое окно — черенковский радиатор с напыленным на него фотокатодом, силовые выводы для подачи напряжения на фотокатод и фланец для подключения к монохроматору. Нижняя часть включает шевронный блок МКП, анод и разъем к которому они подключены. Откачка вакуумного объема производится через патрубков.

Оптическое окно соединено с корпусом посредством индиевого уплотнения. Разъем МКП и анода уплотнен также индием. Верхняя и нижняя части прототипа уплотнены вакуумной резиной. Внутри прототипа поддерживается вакуум на уровне 10<sup>-6</sup> мБар для корректной работы МКП и как можно меньшей обратной ионной связи. CsI — фотокатод изготавливается в течении двух основных стадий. Первая — напыление Sr подложки толщиной 3 - 5 нм, на которую подается потенциал для создания однородного электрического поля. Вторая — напыление слоя CsI толщиной около 20 нм. Для удобства сборки плоскости фотокатода и входа МКП разнесены на 7 мм. Увеличение данного зазора ухудшает временное разрешение за счет увеличения разброса времени прихода фотоэлектронов на вход МКП.

Прототип включает в себя детали от ФЭУ с МКП производства ОАО «Катод». Задействованный шевронный блок МКП обладает коэффициентом усиления 10<sup>6</sup> и одноэлектронным временным разрешением 30 пс (рис. 6) [5]. В процессе подготовки прототипа детекто-

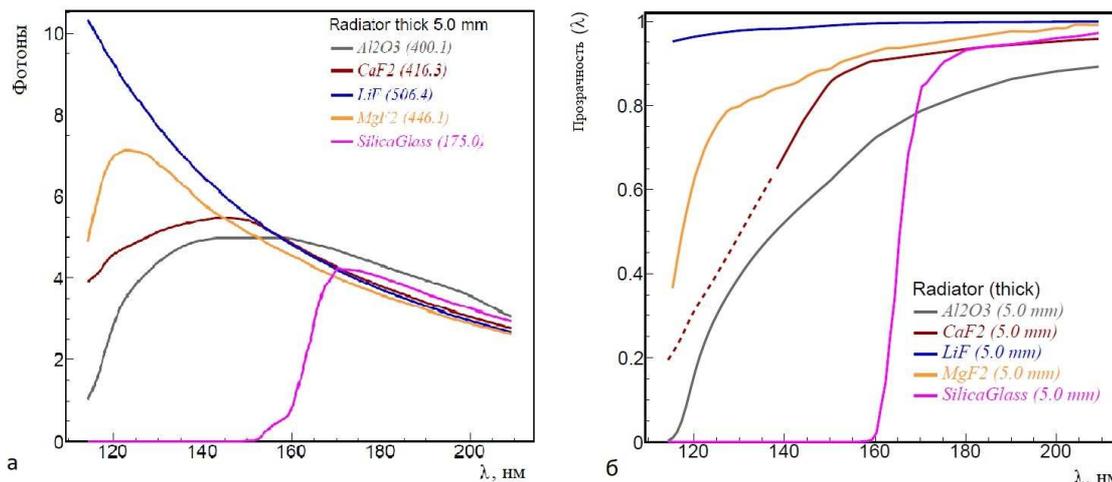


Рис. 3. Распределение числа черенковских фотонов по длине волны (а) и прозрачность материала радиатора (б)

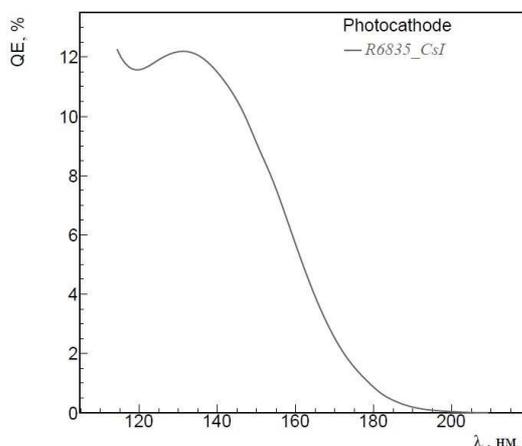


Рис. 4. Спектральная характеристика: Полупрозрачный CsI-фотокатод Namamatsu R6835

ра к напылению фотокатода из данной сборки удаляется, используемый в ней, мультищелочной фотокатод.

### 3. СТЕНД ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОТОТИПА ПИКОСЕКУНДНОГО ДЕТЕКТОРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ МКП

#### 3.1. Вакуумная камера

Напыление слоев Sr и CsI, а также последующая сборка прототипа детектора осуществляются в вакуумной камере, изображенной на рис. 7. Внутри камеры расположены два резистивных испарителя, кварцевый резонатор, штатив для нижней части прототипа и держатель для верхней части.

Резистивные испарители оснащены заслонками, при помощи которых осуществляется резкое перекрытие

потока испаряемого вещества. Держатель для верхней части прототипа имеет возможность вращения вокруг своей оси. Это необходимо для того, чтобы поочередно произвести напыление материалов фотокатода. Штатив для нижней части прототипа имеет возможность вертикального движения. С помощью него осуществляется сведение верхней и нижней частей прототипа. При помощи кварцевого резонатора можно контролировать толщину напыления Sr и CsI. Температура внутри камеры регулируется при помощи нагревательного элемента, расположенного за экраном в верхней части камеры.

#### 3.2. Методы контроля толщины напыления

Контроль толщины напыления (применяется только в случае напыления Sr) осуществляется как при помощи кварцевого резонатора [6], так и непосредственного измерения сопротивления напыленного слоя вещества. Измерение сопротивления осуществляется посредством подключения силовых выводов фотокатода к омметру. Контакт силовых выводов с поверхностью фотокатода реализован при помощи заранее напыленных на поверхность черенковского радиатора проводящих площадок. Данный метод контроля применяется для установления факта появления пленки Sr на поверхности черенковского радиатора.

Принцип работы кварцевого резонатора основан на измерении отклонения частоты колебаний кварцевого кристалла при осаждении на нем напыляемого материала. При изменении массы  $m$  кварцевого кристалла на величину  $\Delta m$  частота его колебаний  $f$  меняется пропорционально изменению массы на величину  $\Delta f$  (формула (2)).

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta m}{m} \tag{2}$$

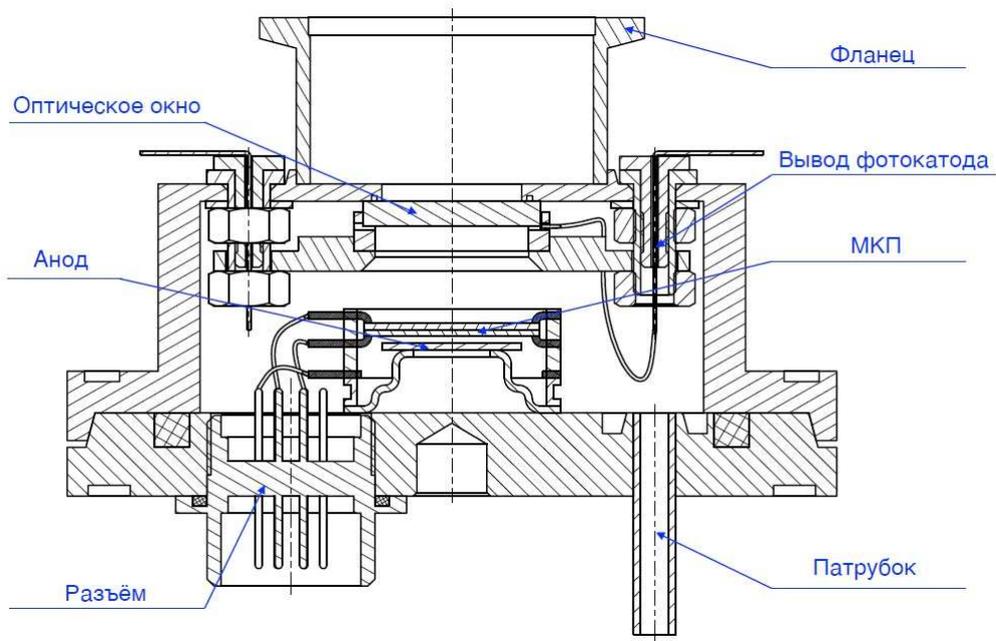


Рис. 5. Конструкция прототипа детектора

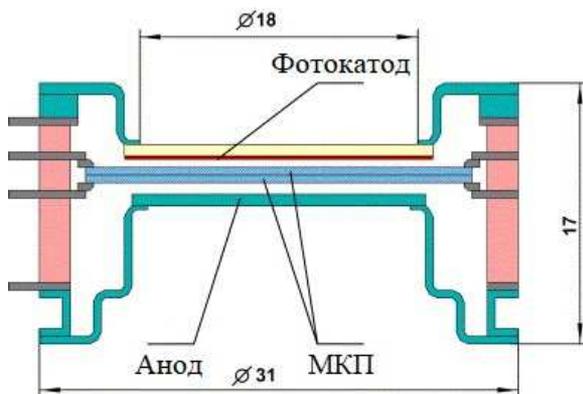


Рис. 6. Конструкция ФЭУ с МКП производства ОАО «Катод», применяемые в прототипе детектора

Объем напыленного слоя можно выразить формулой (3).

$$\nu = Sh = \frac{\Delta m}{\gamma} \quad (3)$$

Здесь  $S$  — площадь кварцевого кристалла;  $h$  — толщина слоя;  $\gamma$  — плотность пленки. Отсюда легко выразить толщину напыленного слоя.

### 3.3. Методы контроля температуры

Так как температура плавления индиевого уплотнения составляет  $157^\circ\text{C}$ , необходимо избегать нагрева свыше этого значения. Для контроля температуры

применяется терморезистор, закрепленный с внешней стороны оптического окна — черенковского радиатора (рис. 8).

### 4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОТОТИПА

Технологию изготовления прототипа можно разделить на следующие этапы:

- Откачка атмосферы до значения давления  $10^{-6}$  мБар.
- Прогрев камеры до температуры  $100^\circ\text{C}$  для удаления влаги.
- Напыление Sr.
- Снижение температуры до значения  $40-60^\circ\text{C}$ .
- Напыление CsI.
- Прогрев фотокатода при температуре  $60^\circ\text{C}$  в течении 7–8 часов. Этот шаг повышает квантовую эффективность и стабильность фотокатода [7, 8]
- Повышение температуры до  $100^\circ\text{C}$ .
- Перемещение внутрь камеры блока МКП (производится кратковременное завоздушивание) с повторной откачкой.
- Откачка вакуумной камеры МКП при температуре  $100^\circ\text{C}$  для удаления влаги из МКП.
- Сборка прототипа внутри вакуумной камеры.

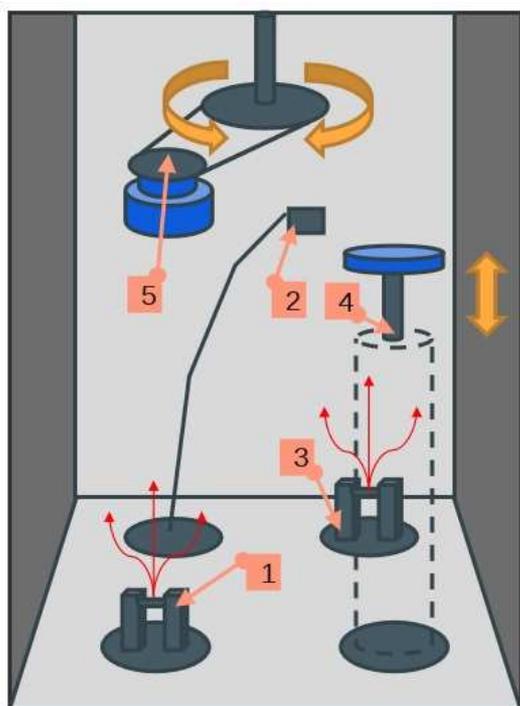


Рис. 7. Вакуумная камера: 1 — резистивный испаритель Sr, 2 — кварцевый резонатор, 3 — резистивный испаритель CsI, 4 — штатив, 5 — вращающаяся подложка с держателем. Синим закрасены части корпуса прототипа детектора

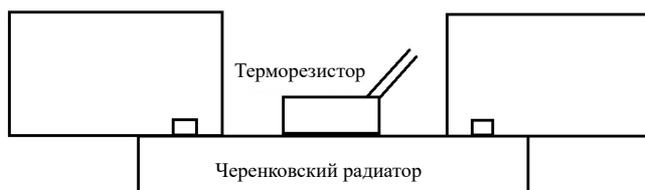


Рис. 8. Расположение терморезистора на поверхности оптического окна — черенковского радиатора

После осуществления сборки прототип детектора перемещается из вакуумной камеры и подключается к насосу, который поддерживает в нем уровень вакуума около  $10^{-6}$  мБар.

### 5. СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Стенд для измерения квантовой эффективности фотокатода представлен на рис. 9. В нем используется вакуумный монохроматор фирмы MCPerson Model 234/302 с двумя выходами, подключенный к вакуумному насосу Leybold TURBOLAB 350i [9, 10]. Ко входу монохроматора подключена дейтериевая лампа L11798 производства Hamamatsu [11]. К одному из выходов подключен прототип, к другому откалиброванный эталонный фотодиод S8552 производства Hamamatsu [12]. Напряжение между катодом прототипа и землей (ди-

одный режим) создает источник питания прототипа Keithley 2260B-800-4 [13]. Показания прототипа и эталонного фотодиода снимаются при помощи пикоамперметра Keysight B2981A [14]. Управление монохроматором осуществляется с помощью ПК.

Квантовая эффективность вычисляется по формуле (4):

$$\epsilon(\lambda) = \frac{N_k(\lambda)}{N_\phi(\lambda)}, \quad (4)$$

где  $\epsilon$  — квантовая эффективность,  $\lambda$  — длина волны, падающего на фотокатод излучения,  $N_\phi$  — число поглощенных фотонов,  $N_k$  — число образованных в результате поглощения квазичастиц (в данном случае электронов). Эквивалентом числу поглощенных фотонов является ток прототипа в диодном режиме, поэтому используется формула (5):

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_2 I_1}{I_2}, \quad (5)$$

где  $\epsilon_1$  — искомая квантовая эффективность фотодиода,  $I_1$  — ток фотодиода,  $I_2$  — ток эталонного фотодиода,  $\epsilon_2$  — известная квантовая эффективность эталонного фотодиода.

### 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОТОТИПОВ

В табл. 2 приведены основные параметры двух наиболее удачных прототипов детектора.

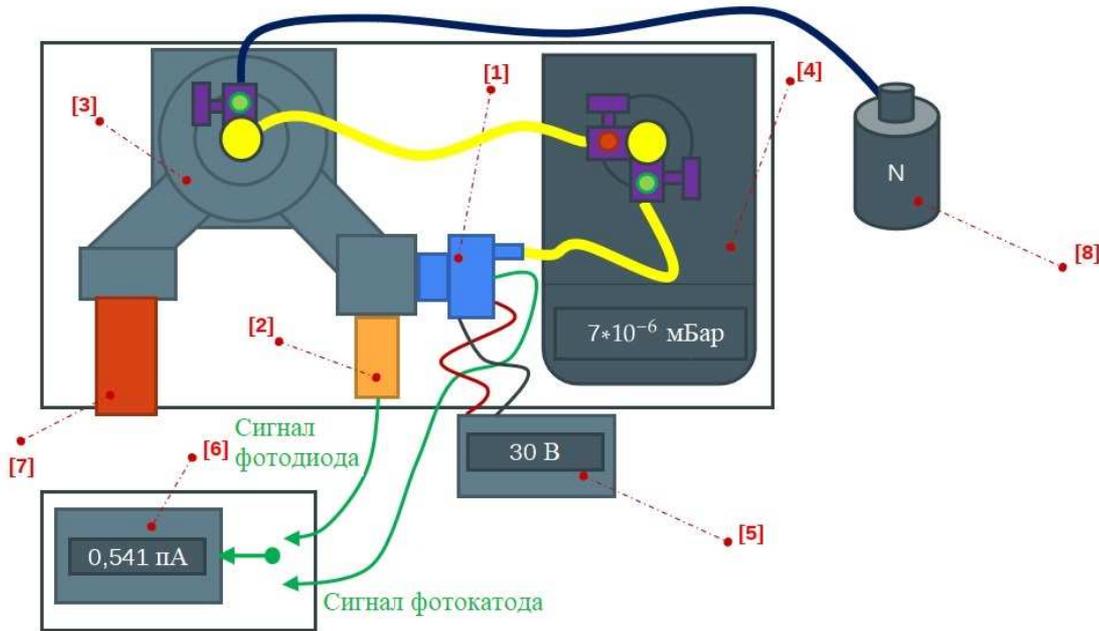


Рис. 9. Стенд для измерения квантовой эффективности: 1 — прототип, 2 — эталонный фотодиод, 3 — монохроматор, 4 — насос для откачки воздуха, 5 — источник питания прототипа, 6 — пикоамперметр, 7 — дейтериевая лампа, 8 — баллон с азотом. На стенде для испытаний фотокатода прототип тестируется в диодном режиме: напряжение 10–30 В подается между фотокатодом и корпусом–землей, сигналы снимаются со входа МКП

Таблица 2. Параметры прототипов D3 и D5

	D3	D5
Материал радиатора	MgF <sub>2</sub>	LiF
Толщина радиатора	3 мм	3 мм
Толщина слоя Sr	30 А	33 А
Толщина слоя CsI	220 А	207 А
Длительность выдержки при 60 °С	7 ч	7 ч
Максимальная квантовая эффективность	9.1% (140.3 нм)	7,4% (135.4 нм)

При изготовлении прототипа D3 блок МКП не подвергался откачке при температуре 100 °С. На рис. 10 представлены зависимости квантовой эффективности фотокатодов от длины волны излучения. Приведены графики для различных времен, прошедших с момента изготовления. Красной сплошной линией отмечена квантовая эффективность полупрозрачного фотокатода ФЭУ Hamamatsu R6835.

Важной характеристикой прототипа детектора является среднее число фотоэлектронов, приходящееся на заряженную частицу.  $N_{ф.э.}$  напрямую влияет на временное разрешение, как показано в формуле (6):

$$\sigma_{рез.} \sim \frac{1}{\sqrt{N_{ф.э.}}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{рез.}$  — результирующее временное разрешение.

Зная квантовую эффективность фотокатода ( $QE(\lambda)$ ), коэффициент сбора электронов МКП ( $CE$ ) и расчетное число черенковских фотонов с частицы ( $N_{ф}(\lambda)$ ), можно рассчитать среднее число фотоэлектронов, приходящееся на частицу по формуле (7).

$$N_{ф.э.} = CE \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} QE(\lambda) N_{ф}(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Долговременная стабильность в среднем числе фотоэлектронов с частицы для прототипов D3 и D5 представлена на рис. 11 и рис. 12 соответственно.

Фотокатод прототипа D3 заметно деградировал. Фотокатод прототипа D5 не проявил заметной деградации. Так как основное различие в технологии изготовления данных фотокатодов заключается в прогреве блока МКП до 100°С (для удаления влаги из блока), можно предположить, что степень деградации зависит от загрязненности блока МКП влагой из атмосферы.

## 7. ИСПЫТАНИЕ ПРОТОТИПА НА ВЫВЕДЕННОМ ПУЧКЕ ЭЛЕКТРОНОВ УСКОРИТЕЛЯ ВЭПП-4М

Прототипы D3 и D5 прошли тестирование на выведенном пучке электронов ускорителя ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН. Испытательный стенд, представленный на рис. 13, включает прототип детектора, на входе и выходе которого расположены триггерные счетчики и координатные детекторы на основе ГЭУ (Газовый Элек-

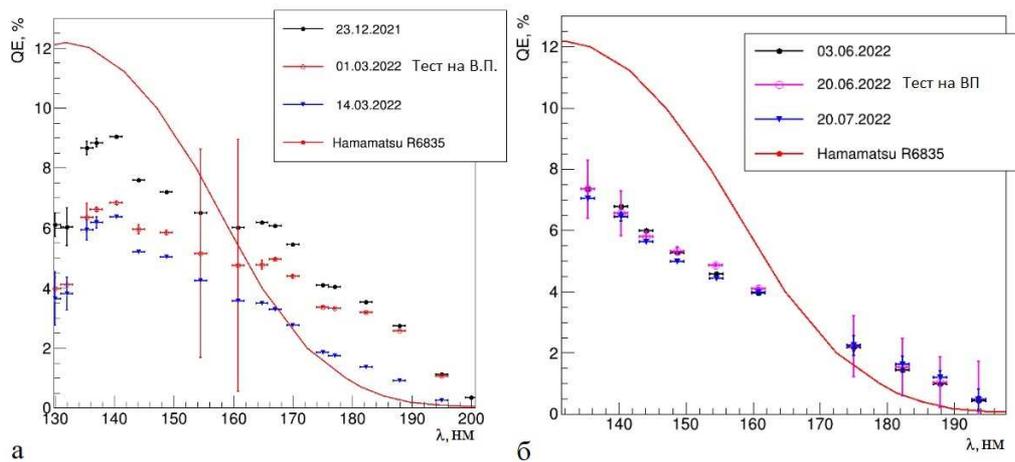


Рис. 10. Зависимость квантовой эффективности CsI фотокатода от длины волны света: а — для фотокатода прототипа D3; б — для фотокатода прототипа D5

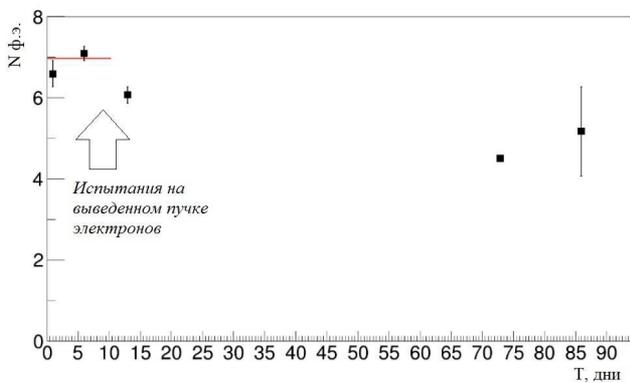


Рис. 11. Долговременная стабильность прототипа D3

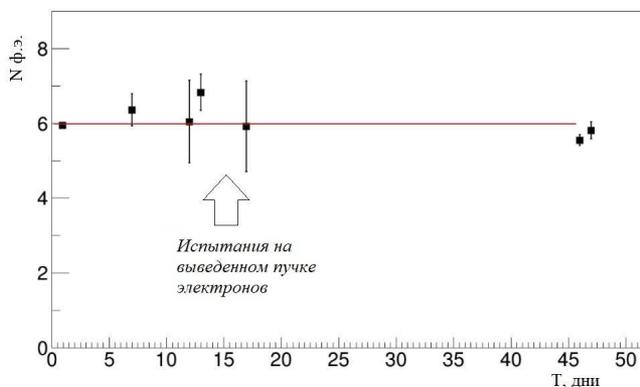


Рис. 12. Долговременная стабильность прототипа D5

тронный Усилитель). В качестве триггерных счетчиков применяются ФЭУ на основе МКП с мультищелочным фотокатодом и плексигласовым черенковским радиатором толщиной 5 мм. Они используются для первичного отбора событий в схеме совпадений и от-

счета времени с точностью  $\approx 10 \div 20$  пс. Отбираются только те события, которые были зарегистрированы в двух триггерных счетчиках. Сигналы прототипа детектора и триггерных счетчиков обрабатываются оцифровщиком CAEN V1742. Двух координатные детекторы на основе ГЭУ имеют пространственное разрешение 50 мкм по каждой координате и применяются для реконструкции трека.

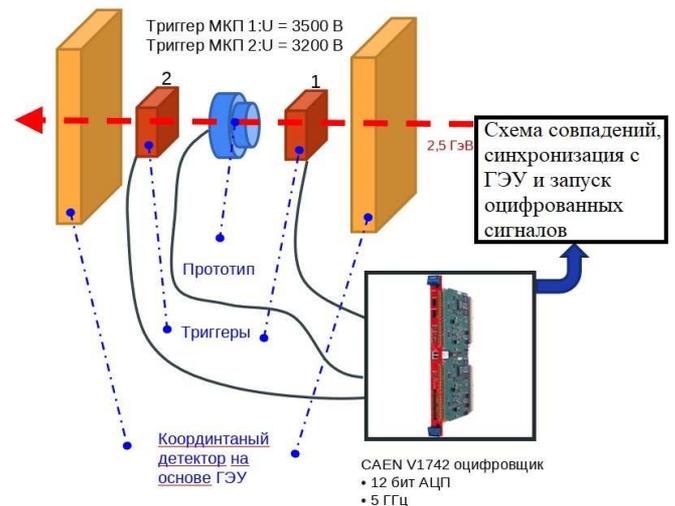


Рис. 13. Схема испытательного стенда для прототипа детектора, расположенного на выведенном пучке ВЭПП-4М

Пример типичного сигнала прототипа представлен на рис. 14. В процессе обработки данных захода производится фитирование фронта импульса, после чего, по точке на полувысоте амплитуды, определяется время сигнала.

Так как координатные детекторы на основе ГЭУ позволяют восстановить координату прохождения через прототип трека, становится возможным опреде-

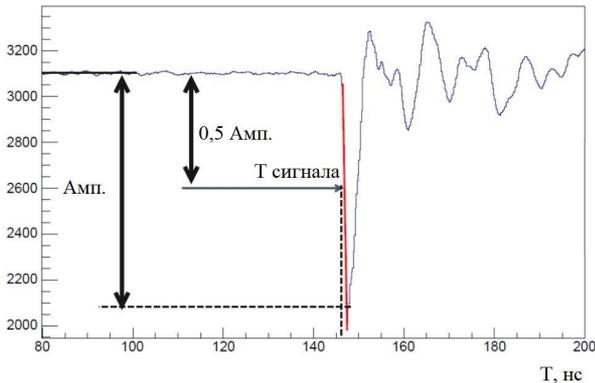


Рис. 14. Форма сигнала, характерная для прототипа детектора

лечь распределение эффективности по площади чувствительной части прототипа (рис. 15).

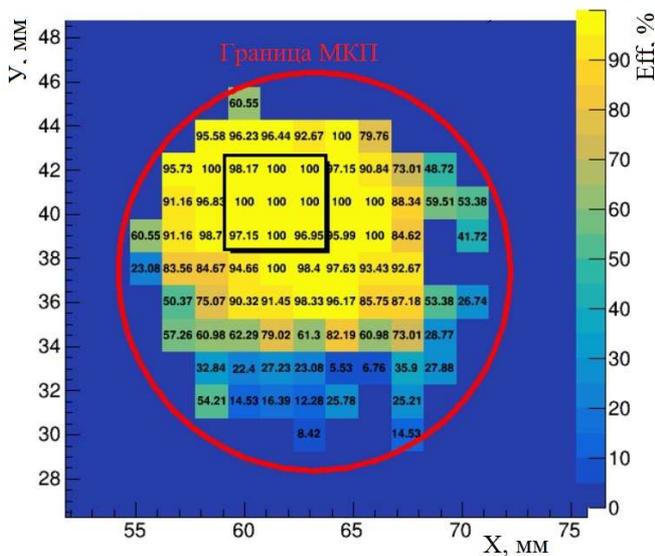


Рис. 15. Геометрическое распределение эффективности прототипа детектора на основе МКП. Черным выделена область с наиболее высокой эффективностью. Красным выделена граница блока МКП. Напряжение в зазоре между фотокатодом и входом МКП составляет 1 кВ

Расчет эффективности проводится по формуле (8):

$$Eff = 100 \frac{N_{\text{триг}}}{N_{\text{прот}}} [\%], \quad (8)$$

где  $N_{\text{триг}}$  — число срабатываний триггерных счетчиков, а  $N_{\text{прот}}$  — часть амплитудного спектра прототипа, находящаяся за пьедесталом (рис. 16), при условии наличия сигнала двух триггеров. На рис. 16 представлены пьедестальный спектр (красный) и спектр сигналов прототипа (синий). Амплитуды пьедестального спектра определяются по первым 100 нс осциллограммы, представленной на рис. 14.

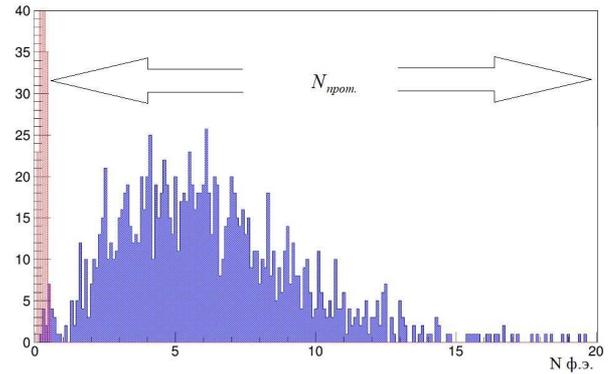


Рис. 16. Амплитудное распределение в числе фотоэлектронов для прототипа детектора на основе МКП

На неоднородность эффективности влияют следующие факторы: затенения вызванные контактами фотокатода, неполное попадание на МКП основания черенковского конуса ( $\varnothing \approx 4$  мм) вблизи затененных областей и краев МКП.

Для области, выделенной черным на рис. 15, амплитудное распределение (в числе фотоэлектронов) представлено на рис. 16.

Средняя эффективность для данной области составляет  $99.5 \pm 0.2\%$ . Среднее число фотоэлектронов составляет  $5.9 \pm 0.3$ , что хорошо совпадает с расчетными значениями, представленными на рис. 12.

При помощи метода нахождения времени прихода сигнала, представленного на рис. 14, можно построить временное распределение сигналов прототипа детектора. На рис. 17 представлены временные распределения для различных напряжений в зазоре между фотокатодом и входом МКП,  $\Delta$  — разница прихода сигналов одного из триггеров и прототипа детектора. Распределение фитировано двойным гауссом. Второй гаусс используется при аппроксимации для учета примеси сигналов из МКП:

- Сигнал от прохождения заряженной частицы через МКП может исказить фронт импульса от фотокатода, так как приходит раньше. По мере увеличения напряжения в зазоре между фотокатодом и входом МКП, временной промежуток, между проходом заряженной частицы через МКП и приходом фотоэлектронов на вход, снижается. Пример искаженного фронта представлен на 18.
- Большое напряжение, приложенное к зазору между фотокатодом и входом МКП, придает фотоэлектронам достаточно энергии, чтобы вызвать лавину не на входе МКП, а в глубине блока (рис. 19). Такие сигналы приходят раньше и имеют заниженную амплитуду. С увеличением приложенного напряжения этот эффект растет.

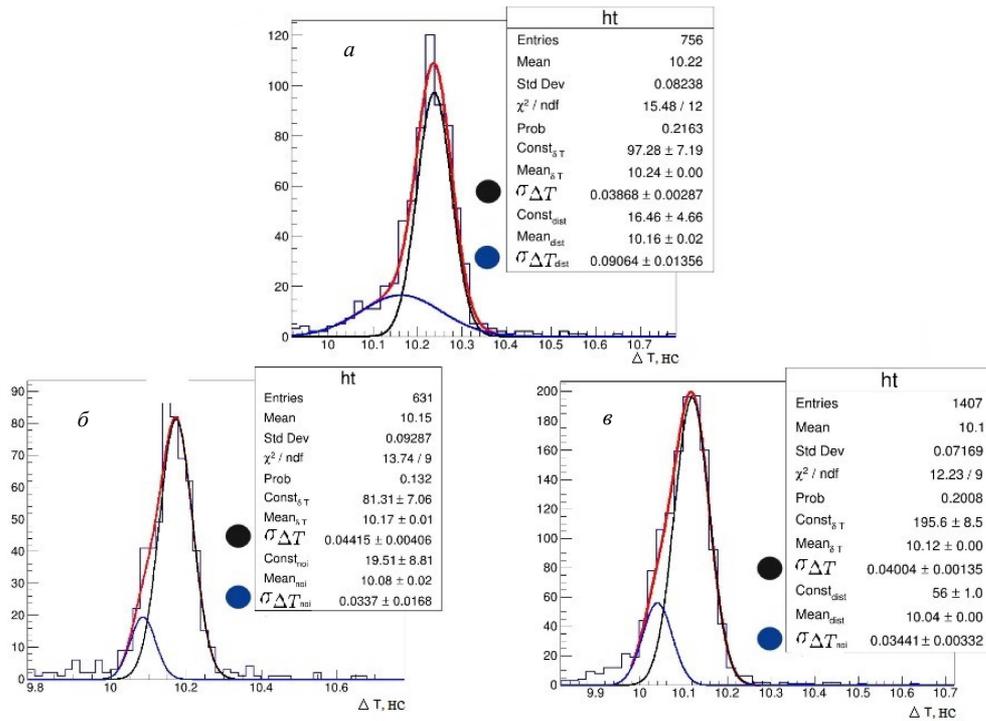


Рис. 17. Временные распределения прихода сигналов для различных напряжений, приложенных к зазору между фотокатодом и входом МКП: *a* — 600 В; *б* — 800 В; *в* — 1000 В. Черным отмечена величина  $\sigma_{\Delta T}$  для гаусса с большим числом событий. Синим отмечена величина  $\sigma_{\Delta T}$  для гаусса с меньшим количеством событий

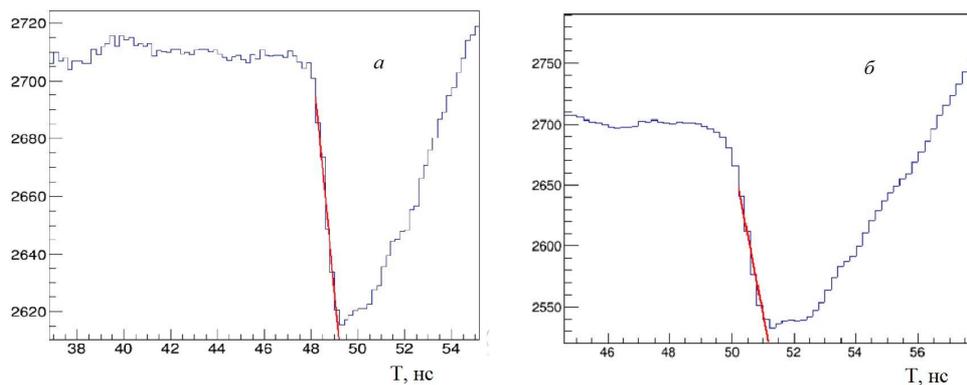


Рис. 18. Фитированные фронты импульсов: *a* — неискаженный; *б* — искаженный

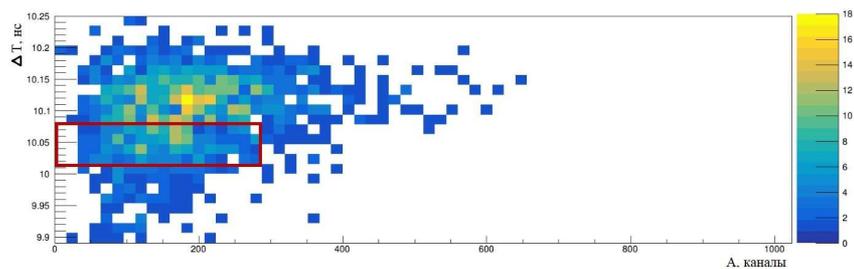


Рис. 19. Амплитудно-временное распределение для импульсов прототипа детектора. Красным выделены малые амплитуды, пришедшие раньше основной доли событий

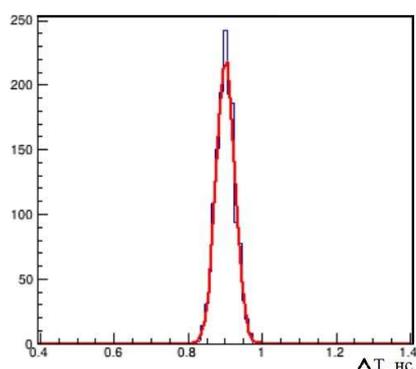


Рис. 20. Временное распределение для двух триггеров

Эффект от перечисленных факторов будет минимизирован при уменьшении зазора между фотокатодом и входом МКП с от  $\approx 7$  мм до 0.2 мм. При снижении времени пролета фотоэлектрона в зазоре амплитуда от прохождения заряженной частицы через МКП сольется с сигналом от фотокатода. Пропадет необходимость прикладывать большое напряжение в зазоре и эффект

проникновения фотоэлектрона внутрь МКП снизится. Временное разрешение прототипа составляет  $34 \pm 3$  пс, если за него принять параметр гаусса, в котором лежит основная доля событий. В это значение входит собственное временное разрешение триггера (рис. 20).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН разрабатывается детектор заряженных частиц на основе МКП с CsI-фотокатодом с высоким временным разрешением. Было создано несколько прототипов на основе черенковских радиаторов  $MgF_2$  и LiF с напыленным полупрозрачным CsI фотокатодом. Фотокатод имеет высокую стабильность. По результатам испытания на релятивистском пучке электронов были получены следующие параметры прототипа детектора с LiF-радиатором: эффективность составляет  $99.5 \pm 0.2\%$ , временное разрешение  $34 \pm 3$  пс и среднее число фотоэлектронов с частицы  $5.9 \pm 0.3$ , что хорошо согласуется с расчетом. Следующим этапом разработки станет уменьшение зазора между фотокатодом и входом МКП, чтобы улучшить временное разрешение до значения 10–15 пс.

- [1] *Barnyakov A.Yu., Barnyakov M.Yu., Brianza L., Cavallari F., Cipriani M., Ciriolo V., del Re D., Gelli S., Ghezzi A., Gotti C.* et al. Response of microchannel plates in ionization mode to single particles and electromagnetic showers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018.
- [2] *Barnyakov A.Yu., Barnyakov M.Yu., Blinov V.E., Bobrovnikov V.S., Bykov A.V., Ivanov V.Ya., Katcin A.A., Mamoshkina E.V., Ovtin I.V., Petrukhin K.G.* et al. Development of a picosecond MCP based particle detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019.
- [3] *Barnyakov A.Yu., Barnyakov M.Yu., Blinov V.E., Bobrovnikov V.S., Bykov A.V., Ivanov V.Ya., Katcin A.A., Mamoshkina E.V., Ovtin I.V., Pivovarov S.G.* et al. // JINST 2017. 12. C08024.
- [4] HAMAMATSU PHOTOMULTIPLIER TUBE R6835 [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R6835\\_TPMH1263E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R6835_TPMH1263E.pdf)
- [5] *Barnyakov A.Yu., Barnyakov M.Yu., Barutkin V.V., Bobrovnikov V.S., Buzykaev A.R., Gulevich V.V., Kononov S.A., Kravchenko E.A., Onuchin A.P., Tsigankov D.A.* Investigation and development of microchannel plate phototubes. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2007. **572**, Iss. 1. P. 404.
- [6] *Ушаков Н.Н.* Технология производства ЭВМ. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1991.
- [7] *Breskin A.* CsI UV Photocathode: history and mystery, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1996. **371**. P. 116.
- [8] *Braema A., Jorama C., Piuza F., Schynsa E., Seguinot B.* Technology of photocathode production. Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003.
- [9] MCPerson Monochromator System Model 234/302 <https://www.mcphersoninc.com/pdf/234302.pdf>
- [10] Leybold TURBOLAB 350i [https://leybold.ru/cat/CP\\_050\\_EN\\_TURBOLAB.pdf](https://leybold.ru/cat/CP_050_EN_TURBOLAB.pdf)
- [11] Hamamatsu L11798-01 Deuterium Lamp [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/etd/L7293\\_L13301\\_TLS1019E.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/L7293_L13301_TLS1019E.pdf)
- [12] Hamamatsu Si photodiode S8552 [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s8552\\_s8553\\_kspd1050e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s8552_s8553_kspd1050e.pdf)
- [13] Keithley 2260B-800-4 <https://www.eliks.ru/upload/keithley/2260B%20PWS%20DataSheet.pdf?ysclid=19mg4a8k6585077840>
- [14] Keysight B2981A <http://www.keysight.com/us/en/assets/7018-04484/data-sheets/5991-4878.pdf>

**Development of a charged particle detector based on MCP with CsI photocathode**

**K. G. Petrukhin<sup>1,a</sup>, A. Yu. Barnyakov<sup>1,2,b</sup>, M. Yu. Barnyakov<sup>1,2,c</sup>, V. E. Blinov<sup>1,2,3</sup>, V. S. Bobrovnikov<sup>1,3</sup>,  
A. V. Bykov<sup>1,3</sup>, V. Ya. Ivanov<sup>3,4</sup>, A. A. Katsin<sup>1,3</sup>, E. V. Mamoshkina<sup>1,3</sup>, I. V. Ovtin<sup>1,3</sup>, S. G. Pivovarov<sup>1,2,3</sup>,  
V. G. Prisekin<sup>1,3</sup>, E. E. Pyata<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk 630090, Russia*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk 630073, Russia*

<sup>3</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090, Russia*

<sup>4</sup>*Institute of Computational Technologies, Novosibirsk 630090, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>K.G.Petrukhin@inp.nsk.su, <sup>b</sup>A.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su, <sup>c</sup>M.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su*

Some future colliding-beam experiments require charged particle detection technology to provide excellent time resolution (better than 50 ps). Charged particle detector with such time resolution is being developed at the Budker Institute of Nuclear Physics (BINP). Prototypes based on microchannel plates with semitransparent CsI-photocathode manufactured at BINP have been tested with a beam of relativistic electrons. The beam test results and calculations are in good agreement. The prototype manufacturing and testing process are presented. Results of CsI-photocathode quantum efficiency measurement and electron test beam results are described.

PACS: 85.60.Ha, 41.60.Bq.

*Keywords:* Time-of-flight detector, Microchannel plate, CsI photocathode.

*Received 24 October 2022.*

**Сведения об авторах**

1. Петрухин Кирилл Геннадьевич — инженер-исследователь; e-mail: K.G.Petrukhin@inp.nsk.su.
2. Барняков Александр Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (383) 329-48-55, e-mail: A.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su.
3. Барняков Михаил Юрьевич — науч. сотрудник; тел.: (383) 329-46-35, e-mail: M.Yu.Barnyakov@inp.nsk.su.
4. Блинов Владимир Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (383) 329-47-31, e-mail: V.E.Blinov@inp.nsk.su.
5. Бобровников Виктор Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (383) 329-42-27, e-mail: V.S.Bobrovnikov@inp.nsk.su.
6. Быков Андрей Вячеславович — вед. инженер; тел.: (383) 329-45-31, e-mail: A.V.Bykov@inp.nsk.su.
7. Иванов Валентин Яковлевич — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: vivanov.48@mail.ru.
8. Катцин Александр Андреевич — мл. науч. сотрудник; тел.: (383) 329-48-55, e-mail: A.A.Katsin@inp.nsk.su.
9. Мамошкина Елена Викторовна — науч. сотрудник; тел.: (383) 329-40-24, e-mail: E.V.Abakumova@inp.nsk.su.
10. Овтин Иван Валерьевич — науч. сотрудник; тел.: (383) 329-49-34, e-mail: I.V.Ovtin@inp.nsk.su.
10. Пивоваров Сергей Григорьевич — вед. инженер; тел.: (383) 329-47-79, e-mail: S.G.Pivovarov@inp.nsk.su.
11. Присекин Вячеслав Геннадьевич — науч. сотрудник; тел.: (383) 326-41-78, e-mail: V.G.Prisekin@inp.nsk.su.
12. Пята Евгений Эдуардович — ст. науч. сотрудник; тел.: (383) 326-41-80, e-mail: E.E.Pyata@inp.nsk.su.