

ГИБРИДНЫЕ ВАКУУМНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ФОТОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ АСТРОФИЗИКИ ЧАСТИЦ

*Б. К. Лубсандоржиев**

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Дается обзор гибридных вакуумных детекторов фотонов, разработанных для широкомасштабных экспериментов в астрофизике частиц. Особо важную роль гибридные детекторы фотонов с люминесцентными экранами сыграли в черенковских детекторах — в глубоководном нейтринном телескопе NT-200 и в эксперименте по исследованию космических лучей «Тунка». Статья посвящена 40-летию начала разработки гибридного детектора фотонов КВАЗАР-370, ставшего сердцем экспериментов NT-200 и «Тунка». Гибридные вакуумные детекторы фотонов с микроканальными пластинами (MCP-PMTs) активно применяются в нейтринном эксперименте JUNO. Представлено современное состояние разработок гибридных детекторов фотонов, а также обсуждаются современные тенденции дальнейшего развития и перспективы их использования в экспериментах следующего поколения.

We review hybrid vacuum photon detectors developed for large-scale experiments in astroparticle physics. Hybrid vacuum photon detectors with luminescent screens played a particular role in Cherenkov arrays — in deep underwater neutrino telescope NT-200 and in Tunka cosmic ray experiment. This paper is devoted to the 40th anniversary of the beginning of hybrid photon detector Quasar-370 development. This photon detector became the heart of NT-200 and Tunka experiments. Hybrid vacuum photon detectors with micro-channel plates (MCP-PMTs) are actively used in the neutrino experiment JUNO. The current status of hybrid vacuum photon detectors developments is presented. Modern trends of further development of hybrid photon detectors and perspectives for their use in the next-generation experiments are discussed as well.

PACS: 85.60.На; 29.40.—n

ВВЕДЕНИЕ

Фотоумножители играют основополагающую роль в нейтринных телескопах. Во всех существующих и планирующихся нейтринных телескопах высокоэнергичные нейтрино регистрируются по черенковскому излучению в воде или во льду, вызванному продуктами взаимодействия нейтрино с веществом — релятивистскими заряженными лептона-

* E-mail: lubsand@rambler.ru

ми и высокоэнергичными электромагнитными или адронными ливнями. Регистрация черенковского излучения производится с помощью высокочувствительных быстродействующих детекторов фотонов, занимающих особое место в экспериментах такого рода.

Изобретение Л. А. Кубецким в Советском Союзе первого в мире вакуумного фотоэлектронного умножителя (фотоумножителя) [1] дало мощный толчок развитию физического эксперимента вообще. То же самое можно сказать и о кремниевом фотоумножителе, изобретенном также в Советском Союзе в 1980-е гг. З. Я. Садыговым и В. М. Головиным с коллегами [2]. Детекторы фотонов занимают особое место в истории успеха нейтринных телескопов.

Почти 50 лет назад в самом начале обсуждений проблемы глубоководного детектирования нейтрино и создания крупномасштабных нейтринных телескопов огромное внимание было уделено развитию именно детекторов фотонов.

ГИБРИДНЫЕ ФОТОДЕТЕКТОРЫ

В ходе активных обсуждений проектов первых глубоководных нейтринных экспериментов в 70–80-х гг. прошлого века были сформулированы требования к детекторам фотонов для таких экспериментов [3–5]. Перечислим только основные из них с краткими комментариями.

1. Высокая чувствительность к черенковскому свету в воде и во льду, что означало необходимость использования бищелочного фотокатода — в то время наиболее чувствительного в синей области спектра.

2. Большая чувствительная площадь в большом телесном угле, желательна $\sim 2\pi$, что привело к появлению детекторов фотонов с большим полусферическим фотокатодом.

3. Как можно более высокое временное разрешение или как можно меньший уровень разброса времен пролета фотоэлектронов. Определяется распределением времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода детектора фотонов. Это опять же говорит в пользу полусферических детекторов фотонов.

4. Как можно лучшее однофотоэлектронное разрешение. Определяется зарядовым распределением однофотоэлектронных импульсов. Характеризуется полной шириной на половине высоты (ПШПВ или на английском FWHM — Full Width at Half Maximum) этого распределения. В то время считалось, что при достаточно хорошем разделении пиков от одного, двух и т. д. фотоэлектронов возможно достичь эффективного подавления скорости счета фоновых импульсов, обусловленных, в основном, распадами ^{40}K в океанской воде.

5. Низкий уровень собственного темнового тока фотодетектора, а это вновь приводит к бищелочному фотокатоду.

6. Быстрый отклик фотодетектора — длительность выходного импульса фотодетектора на уровне ~ 10 нс или меньше. Считалось, что это позволит разделять одиночные мюоны от групп мюонов.

7. Нечувствительность к магнитному полю Земли.

Конечно, все эти требования соответствовали уровню знаний того времени о водной среде, фоновых условиях, свойствах самих детекторов фотонов и т. д., и с высоты сегодняшнего времени выглядят во многом наивными, напоминая общие олимпийские принципы: Citius, Altius, Fortius. На языке детекторов фотонов это могло бы означать, что детекторы должны быть более быстродействующими, более чувствительными и более «умными» — с английского «smart». Последнее понятие было введено С. Фликтом и означает иметь достаточно хорошее однофотоэлектронное разрешение, позволяющее четко разделять в зарядовом спектре выходных импульсов фотодетектора пики, обусловленные одним, двумя, тремя и т. д. фотоэлектронами с фотокатода детектора. Удивительно, несмотря на несколько наивное звучание, эти требования остаются актуальными и сегодня.

В самом начале разработки глубоководных нейтринных телескопов в 70-е гг. прошлого века начались активные обсуждения возможных конструкций фотоэлектронных умножителей (детекторов). Обсуждались самые разнообразные конструкции [6]. Но уже тогда все предлагавшиеся конструкции разделились на два основных направления. Первое направление концентрировалось на разработке оптического модуля на базе одного крупногабаритного фотоумножителя (один оптический модуль — один фотоумножитель), второй же подход заключался в использовании в одном оптическом модуле большого количества фотоумножителей малого размера. С фотодетекторами малого размера была связана и предлагавшаяся в то время оригинальная идея оптического модуля «Rogscipine», в котором на небольшой фотодетектор с высокой чувствительностью собирался свет с большой площади с помощью оптических световодов. Именно в рамках такой идеи начиналась разработка З. Я. Садыговым в ИЯИ РАН кремниевого фотоумножителя. Кремниевые фотоумножители получили бурное развитие за последние 20–25 лет.

Интересно, что большинство идей, обсуждавшихся в то время, получили свое развитие в нейтринных телескопах уже в наше время. На тот момент верх взял первый подход — один оптический модуль на базе одного крупногабаритного фотодетектора. Данный подход, в свою очередь, разделился на две ветви. Первая из них — это классические фотоумножители, в которых используется диодная система для умножения фотоэлектронов. Сегодня такие фотоумножители стали называть «динодные ФЭУ» (Dynode PMT).

Альтернативный подход заключается в использовании других методов умножения фотоэлектронов — люминесцентных экранов, микроканальных пластин, полупроводников диодов с внутренним усилением и без усиления, работающих на прострел динодов, и т. д. В последние годы

такие фотоумножители (MCP-PMTs), получившие название гибридных вакуумных фотодетекторов, стали довольно активно применяться в экспериментах в астрофизике частиц. В нейтринном эксперименте JUNO [7] используются около 15 тыс. крупногабаритных гибридных фотодетекторов с полусферическим фотокатодом диаметром 0,5 м, в которых используются микроканальные пластины. Также планируется использование таких гибридных фотодетекторов в экспериментах в физике космических лучей и гамма-астрономии высоких энергий LHAASO [8] и TAIGA [9].

ГИБРИДНЫЙ ФОТОДЕТЕКТОР КВАЗАР-370

На первых стадиях развития нейтринных телескопов в фотоумножителях использовалась жалюзийная диодная система. Ярким примером служит фотоумножитель серии R2018 [10] с полусферическим фотокатодом диаметром 40 см, разработанный фирмой Hamamatsu Photonics для первых глубоководных нейтринных экспериментов DUMAND (Deep Underwater Muon And Neutrino Detector) [11] вблизи Гавайских островов в Тихом океане.

Практически одновременно с американскими работами в Тихом океане в Советском Союзе начались работы в этом направлении. А. Е. Чудаков предложил создать глубоководный нейтринный телескоп на озере Байкал, провидчески указав на приемлемую глубину и прозрачность воды озера и наличие в течение 1,5–2 мес надежного ледового покрова, позволяющего вести монтажные работы при постановке, сборке и тестировании элементов нейтринного телескопа.

В 1983 г. Г. ван Аллер с сотрудниками из Philips Laboratories предложили идею создания крупногабаритного вакуумного гибридного фотодетектора для глубоководных нейтринных телескопов на базе электронно-оптического преобразователя [12]. В таком гибридном фотодетекторе фотоэлектрон с фотокатода большой площади ускоряется разностью потенциалов 20–30 кВ и попадает в тонкий люминесцентный экран малого размера и производит вспышки света, которые регистрируются малогабаритным фотоумножителем традиционного типа. Такой подход позволяет достичь хороших временных и амплитудных характеристик гибридного фотодетектора. В 1986 г. Г. ван Аллер с сотрудниками разработали уже полноценный вакуумный гибридный фотодетектор со сферическим фотокатодом диаметром 35 см XP2600 [13]. Следует отметить, что такая идея выдвигалась и ранее, например, А. Е. Чудаковым в 1950-е гг. [14]. Д. Винн и К. Рубиа выдвигали схожую идею создания большого бочкообразного гибридного фотодетектора [15].

В 1984 г. в ИЯИ РАН совместно с ОКБ КАТОД (Новосибирск) началась разработка отечественного крупногабаритного гибридного фотодетектора КВАЗАР-370. Данная статья может быть опубликована в год сорокалетия этого знаменательного события, поэтому уделим чуть больше внимания именно этому детектору фотонов.

Сначала на прототипах были оптимизированы люминесцентные экраны и другие конструкционные элементы. Проведены тщательные расчеты электронной оптики фотоумножителя. В результате расчетов оптимизирована форма стеклооболочки и анодного узла для достижения максимально возможного сбора фотоэлектронов и наилучшего временного разрешения.

Детектор фотонов КВАЗАР-370 [16–18] был разработан специально для первого в мире глубоководного нейтринного телескопа НТ-200 [19] на озере Байкал. Данный детектор фотонов является гибридным вакуумным фотодетектором, состоящим из электронно-оптического преобразователя света с полусферическим фотокатодом диаметром 37 см и фотоумножителя классического типа с фотокатодом малого диаметра (~ 3 см). Форма стеклооболочки фотодетектора оптимизирована для минимизации разности времен пролета фотоэлектронов по фотокатоду. Такой подход позволяет получить прекрасные временные и амплитудные параметры всего фотодетектора в целом: разброс времени пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода составляет 1,8–2,2 нс (FWHM), и однофотоэлектронное разрешение — 70–80% (FWHM). Разность времен пролета фотоэлектронов по фотокатоду меньше 1 нс. Конструкция детектора фотонов КВАЗАР-370 обеспечивает его чувствительность в телесном угле $\sim 2\pi$, при этом уровень неоднородности анодной чувствительности фотодетектора по всему чувствительному полю фотокатода не превышает 10%. Было налажено производство фотоумножителей КВАЗАР-370 малыми сериями в ОКБ КАТОД.

На базе детектора фотонов КВАЗАР-370 в сотрудничестве с рядом отечественных предприятий и институтов был разработан и создан оптический модуль [18] Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ-200. Защитный стеклянный корпус модуля выполнен из боросиликатного бескальциевого стекла С-49-1. Такой глубоководный защитный корпус используется для всех глубоководных модулей нейтринного телескопа НТ-200: как оптических модулей, так и модулей электроники. Оптический контакт детектора фотонов КВАЗАР-370 с защитной стеклянной сферой осуществляется при помощи химически чистого глицерина или оптического силиконового геля. Нейтринный телескоп НТ-200 состоит из 192 оптических модулей.

МОДИФИКАЦИИ ФОТОДЕТЕКТОРА КВАЗАР-370

С 1991 по 2000 г. нами был разработан ряд модификаций фотодетектора КВАЗАР-370 с люминесцентными экранами на базе различных скинтилляторов [20–22]. Наилучшие результаты получены в модификациях, использующих следующие скинтилляторы: YSO ($Y_2SiO_5:Ce$), YSOBF ($Y_2SiO_5:Ce + BaF_2$), LSO ($Lu_2SiO_5:Ce$), SBO ($ScBO_3:Ce$), YAP ($YAlO_3:Ce$), LuAP ($LuAlO_3:Ce$) и ряд других. Используются скинтилляторы в виде порошковых люминофоров и монокристаллов. Напомним,

что люминофор YSO применен в базовом фотодетекторе Байкальско-го нейтринного эксперимента КВАЗАР-370У, а люминофор YSOBF — в базовом фотодетекторе эксперимента «Тунка»–КВАЗАР-370G, о котором будет подробнее рассказано в следующем разделе. Люминесцентные экраны из перечисленных монокристаллов и люминофоров YSOBF и SBO отличаются повышенной химической устойчивостью по сравнению с экранами на основе люминофора YSO. Их световыходы практически не изменяются в процессе производства фотодетектора КВАЗАР-370.

В модификациях фотодетектора КВАЗАР-370 с новыми сцинтилляторами в люминесцентных экранах фотодетектора КВАЗАР-370 удается существенно улучшить временное и амплитудные разрешения фотодетектора КВАЗАР-370. Так, образцы фотодетекторов КВАЗАР-370LSO имеют временное разрешение $\Delta t_{\text{FWHM}} \sim 1$ нс (FWHM) и однофотоэлектронное разрешение 30–40 % (FWHM) при ускоряющем напряжении 25 кВ [21]. Следует отметить, что образцы фотодетекторов с монокристаллами характеризуются также относительно малыми уровнями скоростей счета темнового тока. Это может объясняться тем, что люминесцентный экран на основе монокристалла отличается повышенным качеством алюминиевого слоя. Последнее обстоятельство приводит к надежному подавлению оптической обратной связи в приборе. Следует отметить, что отличительной чертой люминесцентных экранов на основе монокристаллов является также их хорошая химическая устойчивость по сравнению с порошковыми люминофорами. Это объясняется, по-видимому, более качественным плотным алюминированием экрана.

В модификации фотодетектора КВАЗАР-370LSO достигается уже и субнаносекундное временное разрешение [21]. При этом однофотоэлектронное разрешение достигает величины 30 % (FWHM). Получается прекрасное разделение пиков, обусловленных вылетами одного, двух, трех и т. д. фотоэлектронов с фотокатода фотодетектора КВАЗАР-370LSO при ускоряющем напряжении 25 кВ. Отметим, что на сегодняшний день величина 25 кВ представляется неким технологическим пределом стабильной работы гибридных фотодетекторов.

Гибридные фотодетекторы с кремниевыми диодами в качестве умножительной системы фотоэлектронов (гибридные фотодиоды) начали разрабатываться с 60-х гг. прошлого века и получили сегодня довольно широкое развитие. В ИЯИ РАН совместно с АООТ КАТОД в 1994–1995 гг. был разработан первый в мире крупногабаритный вакуумный гибридный фотодиод КВАЗАР-370D. Для этого фотодиода была использована стеклооболочка фотодетектора КВАЗАР-370. В анодном узле этого фотодетектора люминесцентный экран был заменен кремниевым PIN-диодом с рабочим диаметром 5 мм. Предварительно диод был полностью покрыт пленкой SiO_2 толщиной ~ 100 нм для защиты диода от агрессивной среды во время процесса активировки фотокатода. Токи утечки диодов этих приборов остались такими же, как до сборки и нанесения фотокатодов — < 10 нА. В зарядовом распределении многофотоэлектронных

импульсов фотодетектора КВАЗАР-370D наблюдаются пики вплоть до 10 фотоэлектронов [23]. Это распределение получено с трансимпедансным предусилителем с эквивалентным электронным шумом на входе $\sim 3000 e^-$, напряжением смещения на диоде ~ 100 В и при ускоряющем напряжении питания ~ 20 кВ.

К сожалению, небольшие размеры диода требовали высокой механической точности при сборке прибора, чего мы не могли добиться в то время. По этой причине в этих приборах сбор фотоэлектронов осуществлялся не с полной области на фотокатоде. Тем не менее продемонстрирована возможность создания крупногабаритного фотодиода на базе фотодетектора КВАЗАР-370 без использования дорогостоящих технологических методов. Успешно отработана методика защиты кремниевого диода от агрессивных щелочных сред во время процесса изготовления фотодиода.

Для низкофоновых экспериментов был разработан фотодетектор КВАЗАР-370L [24] со стеклооболочкой из низкофонового стекла, производимого на заводе ЭКРАН (Новосибирск). Исследовалось содержание ^{238}U и ^{232}Th в образцах стекол, изготовленных в разные периоды времени после начала работы стекловарной печи. Был обнаружен постепенный рост содержания ^{238}U и ^{232}Th со временем изготовления этих образцов из-за накопления радиоактивных изотопов в конструкционных элементах печи [24]. Таким образом, для получения стекла с наименьшим радиоактивным фоном необходимо извлекать стекло, изготовленное в пределах одной недели после начала работы стекловарной печи. Сравнение уровней радиоактивности низкофоновых стекол производства завода ЭКРАН и фирмы SCHOTT показывает их примерное соответствие.

Особенности электронной оптики фотоприемника КВАЗАР-370 позволяют получить крупногабаритный фотодетектор с умеренной пространственно-координатной чувствительностью. В силу этих особенностей в фотодетекторе КВАЗАР-370 нет необходимости разделять люминесцентный экран фотоприемника, а достаточно использовать фотоумножитель, разделенный по фотокатоду и аноду на несколько частей.

Разработанные фирмой НАМАМАТСУ за последнее десятилетие фотоумножители с микросеточной диодной системой открывают прекрасную возможность для решения этой задачи. В ИЯИ РАН совместно с ОАО МЭЛЗ была разработана серия отечественных двухканальных фотоумножителей ФЭУ-БАЙКАЛ-2 с микросеточной диодной системой на базе серийного фотоумножителя ФЭУ-527, выпускаемого ОАО МЭЛЗ, для использования в составе фотодетектора КВАЗАР-370. Фотоумножитель получил название ФЭУ-БАЙКАЛ-2 [23]. Прямая электронная фокусировка, применяющаяся в этой серии фотоумножителей, позволяет разделить только анод этого фотоумножителя на две части, чтобы получить двухканальный фотоумножитель. Только в модификации ФЭУ-БАЙКАЛ-2БМ дополнительно еще разделен и фотокатод фотоумножителя.

Распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотозлектронной равномерной засветке фотокатода фотоумножителя характеризуется шириной на половине высоты $\Delta t_{\text{FWHM}} = 2,2$ нс. Следует отметить, что в данную величину вносят вклад длительность светового импульса и временная неопределенность электроники: «размытие» порогов дискриминаторов, временная неопределенность синхроимпульсов и т. д. Прямое измерение вклада электроники в величину Δt_{FWHM} дает значение $\Delta t_{\text{эл}} = 380$ пс. Зная величины Δt_{FWHM} , $\Delta t_{\text{св}}$ и $\Delta t_{\text{эл}}$, можно оценить истинное значение временного разрешения фотоумножителя — $\Delta t_{\text{ф.э.у}} \sim 0,8$ нс. При этом параметр $\Delta t_{\text{ф.э.у}}$ — это ширина на половине высоты распределения времен пролета фотоэлектронов при однофотозлектронной равномерной засветке фотокатода ф. э. у. световыми импульсами длительностью $\Delta t_{\text{св}} \ll \Delta t_{\text{ф.э.у}}$ при работе с электронной системой с $\Delta t_{\text{эл}} \ll \Delta t_{\text{ф.э.у}}$.

Наличие хорошего однофотозлектронного пика в зарядовом распределении однофотозлектронных импульсов фотоумножителя очень важно для амплитудных и временных характеристик всего фотодетектора КВАЗАР-370 в целом. В измерениях использовались выходные импульсы фотоумножителя с одного из анодов. Различий в форме спектров, полученных от различных анодов, не обнаружено. В зарядовых спектрах наблюдается ярко выраженный пик, отношение пик/долина этого спектра составляет $\sim 1,5$. Следует отметить, что сеточная диодная система имеет существенно меньшую эффективность регистрации фотоэлектрона по сравнению с другими диодными системами. Тем не менее наличие пика в зарядовом распределении однофотозлектронных импульсов в опытных образцах фотоумножителя ФЭУ-БАЙКАЛ-2 показывает возможность достижения в этой серии фотоумножителей хорошего однофотозлектронного разрешения, достаточного для использования в составе фотодетектора КВАЗАР-370. Уровень взаимного влияния каналов не превышает 2%.

Таким образом, временные свойства и однофотозлектронное разрешение, а также слабое взаимное влияние каналов ФЭУ-БАЙКАЛ-2 вполне приемлемы для создания двухканальной модификации фотодетектора КВАЗАР-370 и двухканального глубоководного оптического модуля на базе такого фотоприемника. Очевидные преимущества двухканальных оптических модулей могут позволить им в ближайшем будущем найти широкое применение в крупномасштабных глубоководных черенковских детекторах.

На базе двухканального фотодетектора КВАЗАР-370-II был разработан, создан и успешно испытан в натурных исследованиях двухканальный оптический модуль для нейтринных телескопов следующего поколения на озере Байкал [23–25].

В отличие от глубоководных нейтринных телескопов в широкоугольных черенковских детекторах широких атмосферных ливней (ШАЛ) фотодетекторы работают в условиях светового фона ночного неба, что

приводит к значительному среднему постоянному анодному току индивидуальных фотодетекторов $\sim 30\text{--}50$ мкА со значительными флуктуациями. С другой стороны, исследование первичного космического излучения в достаточно широком интервале энергий ($10^{14}\text{--}10^{17}$ эВ), являющееся главной задачей таких детекторов ШАЛ, требует большого линейного диапазона измеряемых амплитуд выходных сигналов индивидуальных фотодетекторов: от нескольких десятков фотоэлектронов (ф.э.) вплоть до 10^5 ф.э. Измеренные с помощью индивидуальных фотодетекторов времена регистрации ливня используются для восстановления направления прихода ШАЛ. Временное разрешение фотодетекторов определяет один из ключевых параметров всей установки в целом — ее угловое разрешение.

Гибридный фотодетектор КВАЗАР-370G разработан и создан в ИЯИ РАН совместно с АООТ КАТОД для использования в черенковских детекторах ШАЛ, исходя из приведенных выше требований к фотодетекторам для таких приложений. Фотодетектор КВАЗАР-370G является модификацией фотодетектора КВАЗАР-370У, описанного в предыдущем разделе. Использование нового люминесцентного экрана на основе люминофора YSOBF ($Y_2SiO_5:Ce + BaF_2$), более радиационно и химически устойчивого по сравнению с порошковым люминофором $Y_2SiO_5:Ce$, используемым в фотодетекторе КВАЗАР-370У, и специализированного фотоумножителя с повышенным максимальным анодным током позволяет существенно стабилизировать параметры фотоприемника при работе в условиях светового фона ночного неба. При этом временное разрешение фотодетектора практически не изменяется.

Основные характеристики данной модификации фотодетектора: рабочий диаметр фотокатода — 370 мм; форма фотокатода — полусферическая; материал фотокатода — K_2CsSb ; люминесцентный экран на основе порошкового люминофора YSOBF ($Y_2SiO_5:Ce + BaF_2$); коэффициент усиления — $\sim 10^4\text{--}10^5$; максимальная разность времен пролета фотоэлектронов, рожденных в разных точках фотокатода, — < 1 нс; разброс времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода — ≤ 2 нс; рабочее напряжение на электронно-оптическом преусилителе света фотоприемника — 20–25 кВ; предел линейности импульсной световой характеристики — 150 мА; максимальный постоянный анодный ток — 200 мкА. Такие характеристики фотодетектора стали возможны только с применением специально разработанного для этих целей фотоэлектронного умножителя.

Серия фотоэлектронных умножителей ФЭУ-«Тунка» разработана и создана на базе серийного ФЭУ-115 в ИЯИ РАН совместно с ОАО МЭЛЗ и предназначена для работы в составе фотодетектора КВАЗАР-370G в черенковских детекторах широких атмосферных ливней.

Основные технические характеристики данного фотоумножителя следующие: рабочий диаметр фотокатода — 30 мм; форма входного окна — плоская или плоско-вогнутая; материал входного окна — боросиликатное стекло С1-96, увиолевое стекло УТ-88 или кристаллы MgF_2 ; форма фотокатода — сферическая; материал фотокатода — бищелочной K_2CsSb или мультищелочной Na_2KCsSb ; число каскадов усиления 6, 8 или 10; коэффициент усиления — $\sim 10^3-10^5$; максимальная разность времен пролета фотоэлектронов, рожденных в разных точках фотокатода — < 1 нс; разброс времен пролета фотоэлектронов при однофотонной засветке фотокатода — ~ 2 нс; максимальное рабочее напряжение — 1000 В; предел линейности импульсной световой характеристики — 150 мА; максимальный постоянный анодный ток — 250 мкА. Значение последнего параметра значительно превышает величину среднего постоянного анодного тока фотодетектора, обусловленного световым фотоном ночного неба.

Применение ультрафиолетовых стекол и кристалла MgF_2 в качестве материала входного окна ФЭУ вместе с использованием бищелочного и мультищелочного фотокатодов позволяет получить широкий диапазон спектральной чувствительности фотоумножителей данной серии ФЭУ — от 150 до 700 нм. Это, в свою очередь, расширяет поиск новых сцинтилляционных материалов для фотодетекторов класса КВАЗАР-370G. Увеличение площади последних нескольких динодов наряду с применением сплавных эмиттеров позволило существенно увеличить максимально допустимый средний анодный ток до 250 мкА. Следует отметить, что разработка этой серии фотоумножителей была первой в мире попыткой создания быстрых высокочувствительных фотоумножителей с малым числом каскадов усиления. Последующее усиление анодных сигналов фотоумножителей при помощи быстродействующих трансимпедансных усилителей позволяет компенсировать малое усиление этих фотоумножителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гибридные вакуумные фотодетекторы играют значительную роль в экспериментальной астрофизике частиц, в нейтринной физике в особенности. Гибридный вакуумный фотодетектор КВАЗАР-370, разработка которого началась ровно 40 лет назад в ИЯИ РАН (Москва) и ОКБ КАТОД (Новосибирск), и на сегодняшний день остается одним из лучших фотодетекторов большой чувствительной площади с непревзойденными до сих пор временными и амплитудными характеристиками. Гибридный фотодетектор КВАЗАР-370 может служить прекрасной платформой для разработок крупногабаритных фотодетекторов для экспериментов следующего поколения в астрофизике частиц.

Благодарности. Автор искренне признателен В. Ч. Лубсандоржиевой за внимательное прочтение статьи и ценные замечания. Работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования

крупных научных проектов национального проекта «Наука» (грант № 075-15-2024-541).

Конфликт интересов. Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 24040. Приоритет 1930.08.04 / Кубецкий Л. А.
2. Гасанов А. Г., Головин В. М., Садыгов З. Я., Юсипов Н. Ю. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 706.
3. Proc. of the 1978 DUMAND Summer Workshop. V. 2. La Jolla, Scripps Inst. of Oceanogr., 1979. P. 103.
4. Lescovar B. // Proc. of DUMAND Signal Processing Workshop. Honolulu: DUMAND Center, 1980. P. 21.
5. Learned J. G., Roberts A. // Proc. of DUMAND Signal Processing Workshop. Honolulu: DUMAND Center, 1982. P. 57.
6. Лубсандоржиев Б. К. // ЭЧАЯ. 2016. Т. 47, № 6. С. 1758.
7. An F. et al. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2016. V. 43. P. 030401.
8. Cao Z. et al. // Nature. V. 594, No. 7861. P. 33.
9. Астанов И. И. и др. // ЖЭТФ. 2022. Т. 161, вып. 4. С. 548.
10. Kume H., Kyushima H., Ohashi Y. // Proc. of the DUMAND Optical Module Workshop. Sendai, Tohoku Univ., 1990. P. 1.
11. Learned J. et al. DUMAND II Proposal: DUMAND Center Rep. HDC-2-88. Honolulu: DUMAND Center, 1988.
12. van Aller G. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1983. V. 30, No. 1. P. 469.
13. van Aller G. et al. // Helv. Phys. Acta. 1986. V. 59. P. 1119.
14. Чудаков А. Е. Частное сообщение.
15. Winn D. R. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1989. V. NS-36, No. 1. P. 128.
16. Багдыев Р. И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 1993. Т. 57. С. 135.
17. Bagdiev R. I. et al. // Proc. of the Second Intern. Conf. on Trends in Astropart. Phys., Aachen, Germany, 1991. Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, 1994. P. 132.
18. Bagdiev R. I. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 420. P. 138.
19. Belolaptikov I. A. et al. // Astropart. Phys. 1997. V. 7. P. 263.
20. Lubsandorzhev B. K. // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 595. P. 58.
21. Lubsandorzhev B. K., Combettes B. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. V. 55. P. 1333.
22. Lubsandorzhev B. K. // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 602. P. 201.
23. Похил П. Г. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИЯИ РАН, 2004.
24. Лубсандоржиев Б. К. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИЯИ РАН, 2009.
25. Lubsandorzhev B. K., Pokhil P. G., Vasiliev R. V. // Proc. of the 27th Intern. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany, Aug. 2001. V. 3. P. 1294.