

На правах рукописи

Попова Елена Викторовна

РАЗРАБОТКА КРЕМНИЕВОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ ДЛЯ
ПРИМЕНЕНИЯ В АСТРОФИЗИКЕ И ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва – 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Юрий Борисович Гуров

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Баярто Константинович Лубсандоржиев
(ИЯИ РАН, г.Москва)

кандидат физико-математических наук,
Сандуковский Вячеслав Григорьевич
(ОИЯИ, г.Дубна)

Ведущая организация: ФГУП «ГНЦ РФ Институт теоретической
и экспериментальной физики», г.Москва

Защита состоится ” 29 “ февраля 2012г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, телефон 499-324-84-98, 499-323-95-26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан ” ____ “ _____ 2012г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,

Улин С.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований.

Для регистрации импульсного оптического излучения ультраслабых потоков на уровне одиночных фотонов в современном физическом эксперименте наиболее широкое распространение получили вакуумные фотоэлектронные умножители – ФЭУ. Однако, некоторые недостатки, основными из которых являются большие размеры, высокое напряжение питания и чувствительность к магнитным полям, препятствуют использованию ФЭУ в ряде экспериментов.

Эти недостатки ФЭУ стали причиной активной разработки твёрдотельных приборов на основе полупроводниковых материалов, использующих явление внутреннего фотоэффекта. Для регистрации светового импульса сигнал детектора должен превышать шум электроники в соответствующей частотной полосе. В случае импульсов слабой интенсивности, длительностью не превышающих несколько микросекунд, для обеспечения этого условия необходимо иметь достаточно высокое внутреннее усиление в фотодетекторе. Полупроводниковые приборы с внутренним усилением заряда, обусловленным ударной ионизацией – лавинные фотодиоды (ЛФД), были разработаны более 50 лет назад. Достоинствами ЛФД являются их высокая квантовая эффективность (до 90 %), быстродействие и широкий динамический диапазон. Однако, флуктуация коэффициента умножения, обусловленная статистической природой процесса размножения носителей, приводит к появлению избыточного шума (шум-фактора), не позволяющего регистрировать одиночные фотоны.

Лавинные фотодиоды, работающие в гейгеровском режиме, обеспечивают такую возможность, но не позволяют получать информацию об интенсивности светового сигнала.

Таким образом, назрела необходимость в появлении полупроводникового детектора, позволяющего с высокой эффективностью и амплитудным разрешением регистрировать как одиночные фотоны, так и свет более высокой интенсивности.

Прототипы таких детекторов появились в России в конце 80-х годов 20 века, однако принцип их работы был неясен и эффективность регистрации света низка. В 90-х годах появилось понимание физических принципов работы этих приборов и, в результате, были заложены теоретические основы создания нового класса твёрдотельных фотодетекторов, основанных на совокупности гейгеровских микросчетчиков, объединенных на общей подложке. Такой тип приборов будем далее обозначать как кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ)

В настоящее время в мире начинают разрабатывать аналоги SiФЭУ, достигая для отдельных параметров рекордных значений. Лучшими результатами на текущий момент являются эффективность регистрации синего света, равная 40% (оптическая связь при этом 30-40%), полученная на аналогах SiФЭУ, изготовленных японской фирмой Hamamatsu Photonics и величина оптической связи, равная 1-2% (при эффективности регистрации света 16%) на детекторах, произведенных фирмой STMicroelectronics.

Основной проблемой является создание детектора с максимальной возможной эффективностью регистрации фотонов, особенно синего и ультрафиолетового диапазона, что требуется в ряде крупных физических экспериментов, одновременно с минимальным уровнем оптической связи между элементами (ячейками) SiФЭУ.

Так, например, для будущего Международного Линейного Коллайдера (ILC) требуется построение адронного калориметра со сверхвысокой гранулярностью, содержащего несколько миллионов каналов и работающего в магнитном поле 4 Т. Было экспериментально показано, что создание такой установки возможно на основе пластиковых сцинтилляторов (тайлов), с установленными в них волокнами-смещителями спектра и с использованием SiФЭУ. Однако требовалось разработать специальный тип SiФЭУ с максимальной чувствительностью к свету с длиной волны 420 нм, что соответствует спектру высвечивания пластикового сцинтиллятора. Такой SiФЭУ позволит существенно упростить детектирующий элемент калориметра – сборку тайл-SiФЭУ, благодаря прямому считыванию света без применения дополнительных спектросмещающих волокон.

В гамма-астрономии диапазон энергий гамма-квантов от десятков ГэВ до ~1 ТэВ является наименее изученным, поскольку при этих энергиях эффективность космических методов наблюдений существенно падает, а чувствительность наземных Черенковских телескопов недостаточна для надежной идентификации первичных гамма-квантов. Эксперимент MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cerenkov Telescope) успешно функционирует в настоящий момент и обладает самым низким в мире порогом по энергии ~20 ГэВ. В качестве фотодетекторов в нем используются вакуумные ФЭУ с квантовой эффективностью ~34%. Увеличение эффективности регистрации света в диапазоне 300-600 нм в результате использования SiФЭУ, по-видимому, позволит еще понизить порог по энергии.

Для использования в экспериментах физики высоких энергий и астрофизики был разработан и изготовлен кремниевый фотоэлектронный умножитель, чувствительный к синему и ультрафиолетовому излучению, исследованы параметры и созданы прототипы на его основе.

Целью работы являлась разработка конструкции и технологии изготовления SiФЭУ большой площади, с высокой чувствительностью к синему и ультрафиолетовому свету и минимальной оптической связью для использования в экспериментах физики высоких энергий и астрофизики.

Для достижения поставленной цели необходимо было:

1. Разработать конструкцию SiФЭУ для регистрации синего и ультрафиолетового излучения, оптимизировать технологический маршрут при помощи компьютерного моделирования с использованием САПР ISE TCAD, изготовить партию и провести изучение характеристик SiФЭУ;
2. Разработать методику измерения оптической связи между элементами SiФЭУ;
3. Разработать способы подавления оптической связи между элементами SiФЭУ;
4. Разработать конструкцию и изготовить прототипы на основе SiФЭУ для использования в качестве детектирующего элемента в тайловом адронном калориметре ILC и в эксперименте MAGIC.

Научная новизна

1. Определены причины возникновения взаимосвязи между элементами SiФЭУ за счет вторичного оптического излучения при гейгеровском срабатывании ячейки;
2. Предложены новые методы подавления оптической связи, основанные на создании:
 - второго р-п-перехода, разделяющего между собой фоточувствительный слой и подложку SiФЭУ;
 - областей повышенного поглощения света на обратной стороне и/или в объеме подложки SiФЭУ;
3. Изготовлены SiФЭУ с эффективностью регистрации света синего и ультрафиолетового диапазона более 50% и обладающие одновременно взаимосвязью между ячейками на уровне 3-6%, что позволило создать детектор фотонов с шум-фактором, практически равным 1.
4. Создан многоканальный прототип адронного калориметра на основе SiФЭУ для будущего ILC и впервые получена информация о внутренней структуре адронных ливней.

Практическая значимость работы состоит в том, что в результате исследований получены кремниевые фотодетекторы, которые используются в экспериментальных физических установках, а также могут быть применены в медицинских и инженерных приложениях.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Методы подавления оптической связи в кремниевых фотоэлектронных умножителях;
2. Методика моделирования SiФЭУ для регистрации синего и ультрафиолетового света с использованием приборно-технологической САПР ISE TCAD;
3. Детектирующий элемент на основе SiФЭУ, созданный для тайлового адронного калориметра ILC;
4. Охлаждаемый модуль на основе матрицы из SiФЭУ для использования в эксперименте MAGIC.

Достоверность и обоснованность основных научных положений и выводов диссертационной работы определяются практическим использованием созданных детекторов, сравнением результатов измерений настоящей работы с опубликованными в литературе сопоставимыми данными других авторов и использованием для измерений современной высокоточной электроники и программного обеспечения, публикацией результатов в печати и апробацией на научных конференциях и семинарах.

Вклад автора

Автор осуществлял компьютерное моделирование и участвовал в разработке технологии производства SiФЭУ, контролировал изготовление детекторов в Технологическом центре МИЭТ, принимал участие в измерении характеристик образцов SiФЭУ, в создании и тестировании прототипа калориметра в CERN и обсуждении результатов измерений. Автору принадлежит определяющая роль в создании прототипа охлаждаемого модуля для использования в эксперименте MAGIC.

Апробация работы

Результаты исследований, положенные в основу диссертации, представлялись и обсуждались на 4th International conference on New Developments in Photodetection (Beaune 2005), международных совещаниях по детектированию света слабой интенсивности, проводимых институтом Макса Планка по Физике (Мюнхен) LIGHT06 (Израиль 2006) и LIGHT07 (Мюнхен 2007), на Научной сессии МИФИ-2007 и 2008, International Workshop on New Photon Detectors (Япония, Shinshu University, 2009), International Conference on imaging techniques in subatomic physics, astrophysics, medicine, biology and industry (Стокгольм 2010), Industry-academia matching event on SiPM and related technologies (CERN 2011).

Получен патент Российской Федерации №2290721 “Кремниевый фотоэлектронный умножитель (варианты) и ячейка для кремниевого фотоэлектронного умножителя» от 27/12/2006.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 7 статей.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Содержит 78 страниц печатного текста, 48 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 91 наименования. Полный объем 123 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении указана актуальность темы диссертации, ее цель, научная и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются существующие в настоящее время детекторы импульсного света слабой интенсивности.

Для регистрации слабых световых сигналов чрезвычайно перспективным оказался изобретенный в 1930г. Л.А.Кубецким “многоэлементный электронный прибор”, в одном вакуумном баллоне которого были размещены фотокатод и группа электродов, называемых диодами, обеспечивающих усиление первичного потока фотоэлектронов за счёт использования эффекта вторичной эмиссии. Впоследствии такой прибор получил название фотоэлектронного умножителя - ФЭУ.

ФЭУ широко используются в различных физических экспериментах, например, в калориметрах, RICH (Ring Image Cherenkov counter)- и DIRC (Detection of Internally reflected Cherenkov light)-детекторах и трековых детекторах.

Однако большое количество современных и планируемых в будущем экспериментов имеют или предполагают иметь высокое магнитное поле, поэтому для работы в таких условиях приходится находить замену вакуумным ФЭУ в виде твердотельных, например, полупроводниковых, детекторов.

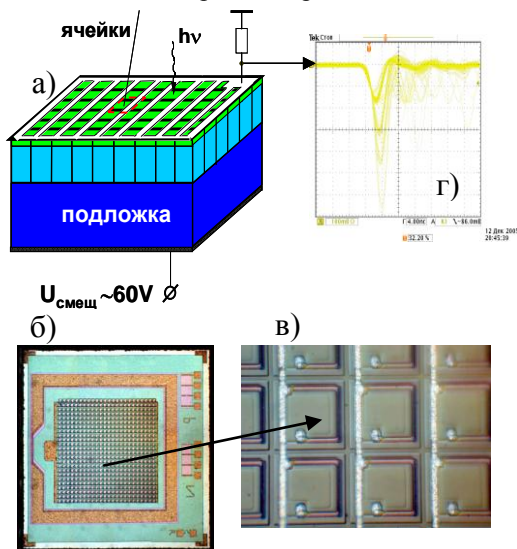
Всё многообразие полупроводниковых детекторов фотонов можно разделить на две большие группы:

- фотодетекторы, в которых преобразование светового сигнала происходит без внутреннего усиления заряда;
- фотодетекторы с внутренним усилением заряда.

К первой группе относятся, например, PIN-фотодиоды, которые благодаря своей надежности, компактности и невысокой стоимости, успешно применяются в различных физических экспериментах (CLEO, L3, BELLE, BABAR, GLAST). Их недостатком при регистрации света длительностью < 1 мкс является необходимость использования широкополосного внешнего

усилителя, что, из-за шумов самого усилителя, не позволяет зарегистрировать вспышку света с количеством фотонов менее 1000.

У детекторов второй группы внутреннее усиление заряда происходит, как правило, за счёт процесса ударной ионизации в сильных электрических полях. Под действием поля свободный носитель заряда (электрон или дырка) приобретает энергию, достаточную для ионизации нейтрального атома и освобождения ещё одной электрон-дырочной пары, причём такой процесс может повторяться неоднократно. К таким детекторам относятся лавинные фотодиоды - ЛФД, которые могут работать как в пропорциональном, так и в гейгеровском режимах. Из-за избыточного шума, связанного с



разбросом коэффициента усиления ЛФД при работе в пропорциональном режиме, одиночные фотоны регистрировать невозможно.

Такая возможность появляется при использовании ЛФД в гейгеровском (непропорциональном) режиме, поскольку величина снимаемого сигнала (заряд Q) определяется в данном случае произведением

$$Q = C \cdot (V - V_{\text{проб}}),$$

где C - емкость ЛФД, V - рабочее (приложенное) напряжение обратного смещения, V_{проб} - напряжение пробоя ЛФД.

Как правило, при использовании приложенного напряжения на несколько вольт выше пробойного, получаемый сигнал уже не требует последующего усиления.

Однако информация об интенсивности входного воздействия при этом теряется.

Для того, чтобы сохранить возможность измерения интенсивности при регистрации одиночных фотонов, был разработан детектор фотонов нового типа - кремниевый фотоумножитель - SiFЭУ.

SiFЭУ состоит из упорядоченного набора одинаковых ячеек - лавинных фотодиодов, работающих в гейгеровском режиме и образующих макроскопический детектор чувствительной площадью до $5 \times 5 \text{ мм}^2$ (рис. 1а, б).

Типичное количество ЛФД-ячеек, составляющих SiFЭУ, 100-4000 шт/мм². Ячейки выполнены на общей кремниевой подложке, каждая содержит индивидуальный поликремниевый резистор и посредством алюминиевых шин все ячейки объединены в общей точке (рис. 1в), с которой и снимается электрический сигнал (см. рис. 1г).

В результате гейгеровского разряда во внешней цепи появляется электрический сигнал, заряд которого определяется элементарной емкостью ячейки и приложенным перенапряжением (превышением напряжения над напряжением пробоя).

Гашение гейгеровского разряда происходит благодаря падению напряжения на токоограничивающем резисторе, в результате чего напряжение на p-n-переходе падает ниже пробойного и разряд прекращается.

Таким образом, сигнал с ячейки стандартизован и фактически является цифровым ("0" или "1"), тогда как SiFЭУ уже аналоговый прибор и позволяет измерять интенсивность падающего на него света.

Во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с существованием взаимосвязи между ячейками SiFЭУ, обусловленной вторичным излучением света в результате гейгеровского разряда сработавшей ячейки.

Идеальный SiFЭУ должен состоять из независимых ячеек, но в результате развития гейгеровского разряда свободные носители, с вероятностью порядка 10^{-5} испускают кванты электромагнитного излучения широкого спектрального состава (от ультрафиолетового до инфракрасного излучения).

Эти фотоны распространяются внутри объема SiFЭУ и вызывают срабатывание других ячеек. Взаимодействие между ячейками – оптическая связь, является основным недостатком SiFЭУ, значительно ухудшающим его характеристики. То есть, оптическая связь – это вероятность того, что от сработавшей ячейки SiFЭУ сработает какая-либо другая ячейка из данного SiFЭУ.

Примеры одноэлектронных зарядовых распределений сигналов SiFЭУ с коэффициентом оптической связи ~60% (а) и ~1% (б) показаны на рис. 2. Одноэлектронное (однойячеечное) распределение сигналов - это спектр, состоящий из набора пиков, соответствующих срабатыванию 0, 1, 2 и т.д. ячеек SiFЭУ. При этом пик, соответствующий отсутствию сигнала с SiFЭУ (0 сработавших ячеек), обычно называют «пьедесталом».

При наличии оптической связи можно корректно вычислять количество первоначально сработавших ячеек только по числу отсчетов, содержащихся в пьедестале одноэлектронного распределения. Поскольку события пьедестала соответствуют случаю, когда гейгеровского разряда не произошло, то оптическая связь не оказывает влияния на статистику событий в этом пике. Если источник света флукутирует по Пуассону, тогда вероятность «нулевых» (пьедестальных) событий $P(0)$ определяет среднее число сработавших ячеек SiФЭУ N_{pix0} :

$$P(0) = \frac{N_{pix0}^0}{0!} \cdot e^{-N_{pix0}} = e^{-N_{pix0}}$$

Количество первичных, то есть, сработавших на внешнюю вспышку света ячеек, одинаково для обоих представленных на рис.2 распределений и равно $N_{pix0}=4.30\pm 0.05$.

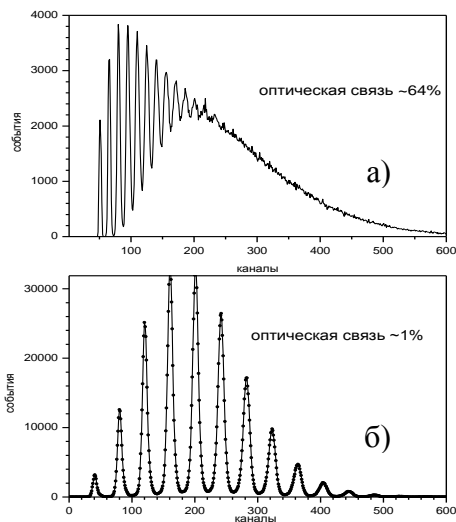


Рис.2 Распределение сигналов для SiФЭУ с разным значением оптической связи при равной вероятности «нулевых» событий

При анализе спектра, соответствующего SiФЭУ с высокой оптической связью, видно, что за счет срабатывания ячеек от вторичных фотонов уменьшается доля сигналов с малыми амплитудами и увеличивается - с большими. Ширина распределения также растет. Это означает, что шум-фактор такого прибора >1 . В среднем на каждую первичную ячейку, сработавшую от внешней вспышки, за счет оптической связи приходится еще 2 дополнительно сработавших ячейки. Это означает, что оптическая связь приводит к уменьшению эффективного динамического диапазона SiФЭУ.

Оптическая связь влияет и на шумовые параметры SiФЭУ. На рис.3 показана зависимость темновых шумов SiФЭУ в зависимости от порога для 3 различных коэффициентов усиления (различных перенапряжений) SiФЭУ.

Порог выражен в количестве сработавших ячеек. SiФЭУ не имеет защиты от оптической связи.

Коэффициент оптической связи xt определяется как отношение количества темновых импульсов SiФЭУ соответствующих 2 и более одновременно (в течение длительности определенного временного интервала) сработавших ячеек $N_{2>}$ к 1 и более $N_{1>}$:

$$xt = \frac{N_{2>}}{N_{1>}}$$

Из этого отношения следует, что для идеального прибора, не имеющего связи между ячейками, наличие темновых импульсов, соответствуют только одной сработавшей ячейке. При наличии связи появятся темновые импульсы, соответствующие более чем одной сработавшей ячейке. Видно, что с увеличением усиления (перенапряжения) коэффициент оптической связи растет.

Эффект медленного падения частоты темновых шумов SiФЭУ с высо-

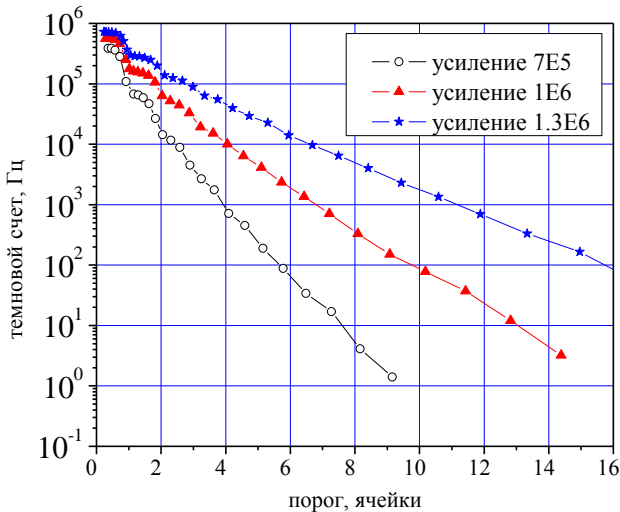


Рис.3 Частота темновых шумов SiФЭУ в зависимости от порога при разных усилениях ячейки.

кой оптической связью, ограничивает их применение в экспериментах, где требуется вырабатывать «самотриггер». Несмотря на чувствительность SiФЭУ к одиночным фотонам, скорости счета темновых импульсов не позволяют установить минимальный уровень порога. Это означает, что при попытке получить максимальную эффективность регистрации света, необходимое повышение перенапряжения приводит к быстрому увеличению оптической связи, что делает невозможным применение SiФЭУ в экспериментах с низким уровнем светового сигнала.

Отсюда следует, что требуется создать SiФЭУ с подавлением оптической связи. Для этого, прежде всего, необходимо установить пути распространения вторичного оптического сигнала в кремниевой структуре (рис.4).

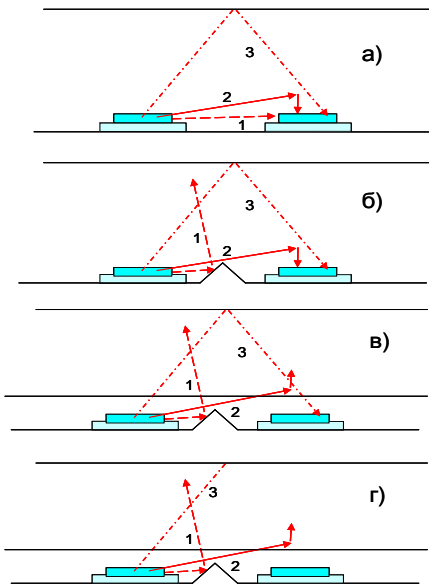


Рис.4. Пути распространения вторичного оптического сигнала внутри SiФЭУ

оставальным ячейкам SiФЭУ.

Теперь допустим, что ячейки разделены V-образными канавками (рис.4б), которые получаются в процессе анизотропного жидкостного трав-

Допустим вначале, что оптической изоляции ячеек нет (рис.4а). Свет, порожденный гейгеровским разрядом ячейки, может проникнуть в соседние ячейки напрямую, распространяясь в области пространственного заряда по траектории «1». Если траектория света уходит вглубь подложки, но фотоэффект происходит на расстоянии диффузионной длины от ОПЗ, то появившийся свободный носитель может попасть в ОПЗ соседней ячейки посредством диффузии. Этот путь обозначен цифрой «2». И для самого длинноволнового света существует вариант, когда фотон отражается от обратной стороны подложки и снова попадает в ОПЗ соседней ячейки – траектория «3».

Во всех трех случаях здесь и далее выражение «соседняя ячейка» относится как к ближайшим к сработавшей, так и к

ления кремния с ориентацией (100). Канавки защищают соседние ячейки от попадания в них прямого света, увеличивая долю событий, приходящихся на варианты «2» и «3». Однако, при оставшихся возможными вариантах регистрации вторичных фотонов по типу «2» и «3», оптическая защита ячейки будет неполной.

Для исключения механизма образования оптической связи по варианту «2», необходимо создание потенциального барьера между активной областью (ОПЗ) SiФЭУ и остальной частью подложки, обеспечивающей механическую прочность кристаллу SiФЭУ (рис.4в) (патент Российской Федерации №2290721 “Кремниевый фотоэлектронный умножитель (варианты) и ячейка для кремниевого фотоэлектронного умножителя» от 27/12/2006).

Оставшуюся (см. рис.4г) последнюю компоненту вторичного излучения, распространяющуюся по варианту «3» - отражение от подложки - можно уменьшить за счет использования дополнительных светопоглощающих слоев, создаваемых в объеме и/или на обратной поверхности подложки.

В третьей главе приводится методика расчетов и результаты моделирования SiФЭУ чувствительного к ультрафиолетовому свету. Эффективность регистрации света ε - это ключевой параметр фотодетектора. Большинство применений заинтересовано в фотодетекторах как можно более высокой эффективности.

Для SiФЭУ эффективность регистрации света ε является комбинацией нескольких независимых факторов:

$$\varepsilon = G * QE * A,$$

где G- гейгеровская эффективность, то есть, вероятность образования гейгеровского разряда свободным носителем (парой свободных носителей), находящимся в области высокого поля, QE- квантовая эффективность, то есть, среднее количество электрон-дырочных пар, произведенных в результате фотоэффекта в области пространственного заряда (ОПЗ), A – геометрическая эффективность, то есть, отношение фоточувствительной площади SiФЭУ к полной площади.

Каждый из этих факторов можно оптимизировать независимо от других.

Особенностью синего света является глубина поглощения в кремнии <100нм. Фактически, такой свет поглощается у самой поверхности SiФЭУ, что определяет принципы построения фотодетектора.

Поскольку SiФЭУ состоит из гейгеровских счетчиков, большое значение имеет оптимизация его конструкции для достижения максимально воз-

можной гейгеровской эффективности. Вероятность развития гейгеровского разряда для стартового электрона существенно выше, чем для дырки при фиксированном перенапряжении. Из этого следует основной вывод – для регистрации синего света SiФЭУ должен иметь конструкцию типа р-о-п. Это означает, что в приповерхностной области кремния n-типа проводимости необходимо сформировать область р-типа так, чтобы появившиеся в ней или вблизи нее в результате поглощения фотонов электроны двигались к области n-типа, пересекая зону высокого поля.

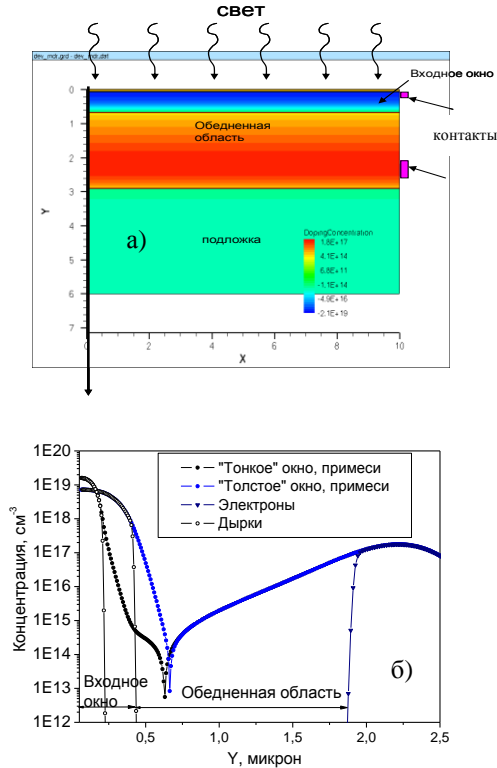


Рис.5. Структура SiФЭУ, используемая для моделирования выноса свободных носителей из области входного окна(а), распределение легирующих примесей и свободных носителей при напряжении пробоя, приложенном к структурам SiФЭУ с «тонким» и «толстым» входными окнами (б).

необходимо сформировать область р-типа так, чтобы появившиеся в ней или вблизи нее в результате поглощения фотонов электроны двигались к области n-типа, пересекая зону высокого поля.

Носители, сгенерированные в необходимом (сильнолегированном) слое входного окна фотодетектора, с определенной степенью вероятности будут вынесены в ОПЗ за счет диффузии или под действием встроенного поля, возникающего из-за градиента легирующей примеси.

Создание тонкого слоя входного окна является определяющим фактором, позволяющим получить высокие значения внутренней квантовой эффективности для ультрафиолетового света. Для оценки влияния толщины входного окна на внутреннюю квантовую эффективность было проведено компьютерное моделирование.

Моделирование проводилось при помощи программного пакета ISE

TCAD 6.0 с использованием двухмерной структуры, показанной на рис.5а. Распределение примесей получено в результате технологического моделирования с использованием программы DIOSISE. Моделирование проводилось для 2 типов входного окна – «толстого» и «тонкого», отличающихся технологическими режимами изготовления. Также на рис.5б показано распределение свободных носителей (границы ОПЗ) при напряжении пробоя. При этом толщина области «тонкого» входного окна составляет порядка 200 нм, «толстого» - порядка 400 нм.

Свет падает перпендикулярно входному окну на всю площадь структуры. Длина волны света 400нм, длительность импульса 10пс.

Для обоих вариантов входного окна проводились квазистационарные и динамические расчеты. Расчет заключался в решении системы уравнений, включающей уравнение Пуассона и два уравнения непрерывности (для электронов и для дырок).

Методика расчетов заключалась в следующем:

1) Определялось напряжение пробоя структуры с определенным типом входного окна по достижению значений ионизационных интегралов электронов и дырок равных 1.

2) Квазистационарным образом поднималось напряжение обратного смещения, приложенное к моделируемой структуре, до значения на 20% превышающего напряжение пробоя, при этом определялся темновой ток I_{DARK} структуры для заданных значений времен жизни носителей.

3) Для данного напряжения проводилось динамическое моделирование светового воздействия на структуру в течение 10пс (временной интервал от 10^{-13} до 10^{-11} с). Интенсивность света, одинаковая для обеих моделируемых структур, задавалась так, чтобы значение фототока было много больше значений темного тока и концентрация сгенерированных светом носителей не превышала концентрацию легирующих примесей в необедненных областях.

4) Полученные на предыдущем шаге распределения использовались для дальнейшего динамического моделирования уже без воздействия света (релаксация системы) для временного интервала от 10^{-11} до 10^{-5} с.

Все расчеты, кроме пункта 1, проводились без учета процессов ударной ионизации.

Результатом моделирования являлись параметры и форма импульсов токов $I(t)$ (рис. 6), возникающие на контактах моделируемой структуры.

Квантовая эффективность Q_E структуры определялась как отношение числа электронов $N_{\text{электрон}}$, образованных под действием света и прошедших через область пространственного заряда, электронов к числу фотонов $N_{\text{фотон}}$, попавших в кремний:

$$Q_E = N_{\text{электрон}} / N_{\text{фотон}}$$

$N_{\text{фотон}}$ определялось из известной интенсивности падающего света, площади за светки и длительности светового импульса и составило 530 ± 1 штук. Количество электронов $N_{\text{электрон}}$ определялось интегрированием по времени импульса тока на контакте моделируемой структуры. Количество

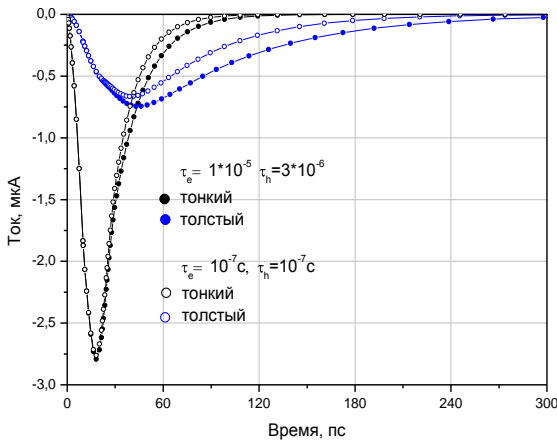


Рис.6 Импульсы токов $I(t)$ на контактах моделируемой структуры SiFЭУ.

электронов и, следовательно, квантовая эффективность, зависят от времени жизни свободных носителей. Необходимо заметить, что время жизни свободных носителей является «подгоночным» параметром при моделировании с использованием ISE TCAD, так как определяется технологией изготовления приборов.

Величины, полученные при расчете квантовой эффективности, представлены в табл.1:

Таблица 1

Входное окно	$N_{\text{электрон}}$, шт.	$N_{\text{электрон}}$, шт.	Q_E , %	Q_E , %
	$\tau_e = 3 \cdot 10^{-6}$ с $\tau_h = 1 \cdot 10^{-5}$ с	$\tau_e = 1 \cdot 10^{-7}$ с $\tau_h = 1 \cdot 10^{-7}$ с	$\tau_e = 3 \cdot 10^{-6}$ с $\tau_h = 1 \cdot 10^{-5}$ с	$\tau_e = 1 \cdot 10^{-7}$ с $\tau_h = 1 \cdot 10^{-7}$ с
«толстое»	516 ± 5	355 ± 5	97 ± 1	67 ± 1
«тонкое»	522 ± 5	463 ± 5	98 ± 1	87 ± 1

Из анализа табл. 1 видно, что для времен жизни электронов и дырок соответственно $\tau_e = 3 \cdot 10^{-6}$ и $\tau_h = 1 \cdot 10^{-5}$ с разница в квантовой эффективности между двумя моделируемыми типами профилей входного окна достаточно мала. При этом абсолютные значения квантовой эффективности близки к 100%. Существенная разница наблюдается в форме импульса тока, получаемого для «тонкого» и «толстого» окна. В первом случае ширина импульса тока на полувысоте составляет 22пс, во втором – 85пс.

При уменьшении времен жизни до $\tau_e = \tau_h = 1 \cdot 10^{-7}$ с квантовая эффективность снижается, причем сильнее этот эффект выражен для «толстого» входного окна. Длительность импульса тока на полувысоте также несколько уменьшается.

На основании проведенного моделирования можно сделать вывод, что для достижения наилучших параметров SiФЭУ как с точки зрения эффективной регистрации ультрафиолетового излучения, так и временных характеристик, необходимо делать как можно более тонкое входное окно, т.е. ≤ 200 нм.

В четвертой главе изложены результаты измерений характеристик SiФЭУ и представлены прототипы для применения в экспериментах на ИЛС и в MAGIC.

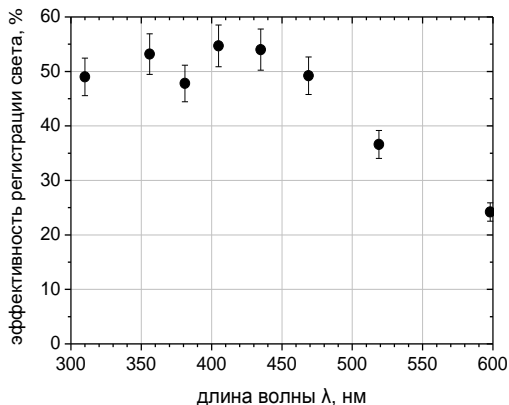


Рис.7 Измеренная эффективность регистрации света SiФЭУ в зависимости от длины волны для перенапряжения 4.7В.

вариантами топологии и размерами ячейки 50x50 и 100x100 мкм². Геометрическая эффективность при этом варьируется в пределах от 40 до 80% в зависимости от топологии ячейки.

К настоящему времени изготовлены образцы SiФЭУ с усиленной защитой от оптической связи. SiФЭУ имеют входное окно р-типа, активную область n-типа и подложку р-типа проводимости. Ячейки разделены V-образными канавками глубиной 3.5 микрона.

Были изготовлены SiФЭУ с площадью 1x1 и 3x3мм² с различными

На рис.7 показана эффективность регистрации света в зависимости от длины волны света для SiФЭУ (размеры ячейки $100 \times 100 \text{ мкм}^2$, геометрическая эффективность 80% и площадь SiФЭУ $1 \times 1 \text{ мм}^2$), измеренная в термостате при температуре +20С и перенапряжении 4.7В. В качестве источников света использовались светоизлучающие диоды с разной длиной волны высвечивания в импульсном режиме. Референсный фотодетектор – калиброванный PIN-фотодиод с известной квантовой эффективностью. Пик эффективности SiФЭУ приходится на спектральный диапазон 350-450нм и соответствует задачам как эксперимента MAGIC так и адронного калориметра для Международного линейного коллайдера.

На рис.8 показаны измеренные зависимости оптической связи для SiФЭУ различной чувствительной площади (1×1 и $3 \times 3 \text{ мм}^2$).

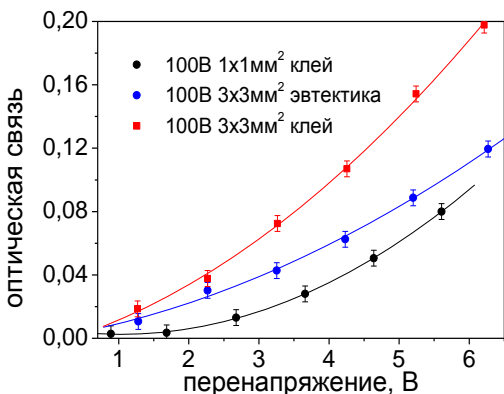


Рис.8 Измеренная зависимость оптической связи от перенапряжения для SiФЭУ различной чувствительной площади и для разных способов сборки в корпус.

Оптическая связь для SiФЭУ с размерами $1 \times 1 \text{ мм}^2$ составляет 3.5% для перенапряжения 4В. Для SiФЭУ с размерами $3 \times 3 \text{ мм}^2$ оптическая связь оказывается больше (10%). Это связано с эффектом отражения вторичного излучения от обратной стороны кристалла и регистрацией его ячейками SiФЭУ.

Для SiФЭУ $3 \times 3 \text{ мм}^2$ представлено 2 кривых оптической связи – для кристаллов, собранных в корпус при помощи клея и при помощи эвтектики. Эвтектика - это способ присоединения полупроводниковых кристаллов к основанию корпуса, основанный на

образовании расплавленной зоны, в которой происходит растворение поверхностного слоя полупроводникового материала и слоя металла основания корпуса. Очевидно, что создание эвтектической прослойки между кристаллом и корпусом изменяет условия отражения-поглощения света, что и приводит к существенному снижению оптической связи.

Изучение физических явлений, ожидающихся на ILC, невозможно без создания детектирующей системы с беспрецедентными параметрами, по-

звolyющей эффективно различать массы тяжелых бозонов W, Z и H в многоструйных событиях. Это условие требует точности определения энергии струй $30\%/\sqrt{E}(\text{ГэВ})$, что примерно в 2 раза лучше, чем в существующих в настоящее время адронных калориметрах.

Согласно результатам моделирования такого разрешения можно достигнуть только при прослеживании индивидуально траектории каждой частицы внутри всего объема детектора и только оптимально комбинируя информацию, полученную с трековых детекторов и с калориметров. Этот подход лежит в основе нового метода восстановления энергии частицы

(Particle Flow Method). Калориметры при этом должны являться «визуализирующими» трек частицы устройствами, что требует сверхвысокой гранулярности как в продольном, так и поперечном направлении и, соответственно, экстремально большого общего количества каналов (несколько миллионов). Основной задачей для адронного калориметра является разделение ливней, инициированных нейтральными и заряженными частицами, находящимися в непо-

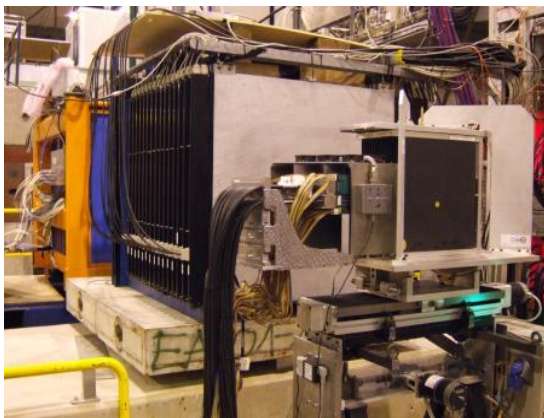


Рис.9 Прототип адронного калориметра на основе SiФЭУ в экспериментальном зале CERN

средственной близости друг от друга.

С появлением кремниевых фотоумножителей, необходимая гранулярность может быть достигнута, например, в калориметрах, где активным веществом являются сцинтилляторы.

Адронный калориметр для ИС находится сейчас в стадии разработки (строительство прототипов). Постройка «физического» прототипа на основе сцинтилляционных тайлов и SiФЭУ уже завершена. Прототип содержит 7620 регистрационных каналов.

Основными задачами прототипа являлись:

- «физическая» - изучение формы адронных ливней и тестирование концепции Particle Flow Method
- «техническая» - измерение характеристик и изучение надежности 7620 SiФЭУ, установленных в прототип.

SiФЭУ были разработаны совместно НИЯУ МИФИ и ПУЛЬСАР. Это было первое в мире масштабное применение SiФЭУ. Прототип (представлен на рис.9) имеет размеры порядка 1 м^3 и содержит 38 плоскостей (~5 ядерных длин взаимодействия), составленных из сцинтилляционных тайлов толщиной 5 мм и площадью от 30×30 до $120 \times 120 \text{ мм}^2$ (рис.10б). Тайлы упакованы в стальные кассеты (рис.10а), между плоскостями установлен абсорбер толщиной 20 мм. В каждый тайл вмонтировано волокно-смещитель

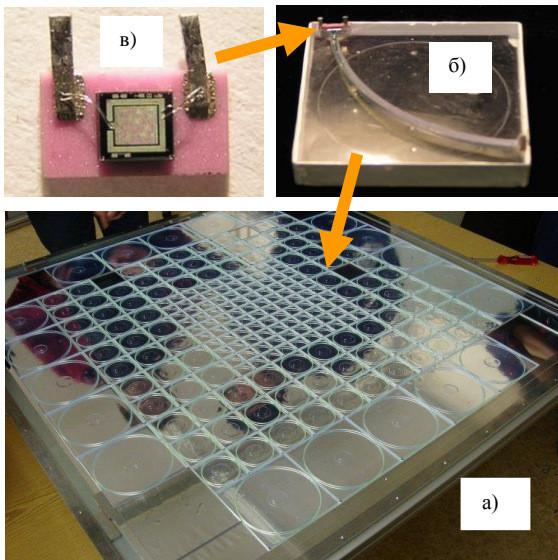


Рис.10. Кассета (а) со сборками тайл-SiФЭУ (б), SiФЭУ (в)

спектра диаметром 1мм, по которому сцинтилляционный свет транспортируется на SiФЭУ с размером чувствительной области $1.1 \times 1.1 \text{ мм}^2$ (рис.10а). Сборки тайл – волокно-смещитель спектра – SiФЭУ были изготовлены и протестированы в ИТЭФ.

При регистрации ливня рабочим является режим, когда через каждый тайл в течение длительности временных ворот после триггерного сигнала, определяемого моментом столкновения пучков в коллайдере, проходит не более одной частицы. Ионизирующая частица, с траекторией, перпендикулярной плос-

кости тайла, пересекая его, оставляет в сцинтилляторе определенное количество энергии. Для релятивистских частиц эта энергия примерно равна энергосбросу минимально ионизирующей частицы. Тогда можно ввести

такую характеристику ячейки калориметра, как ее отклик на прохождение минимально ионизирующей частицы Амип.

Удобно энерговыделение ливней считать в количестве зарегистрированных минимально ионизирующих частиц. Для этого энерговыделение в каждом из тайлов A_i необходимо разделить на наиболее вероятное значение потерянной в тайле энергии $A_{\text{мин}}$:

$$N_i = A_i / A_{\text{мин}}$$

Тогда энергия ливня N равна сумме выделившейся энергии во всех сработавших тайлах N_i . Для данного прототипа $A_{\text{мин}} \approx 15$ сработавших ячеек SiФЭУ, максимальная измеряемая величина сигнала с одного тайла $\sim 100 A_{\text{мин}}$.

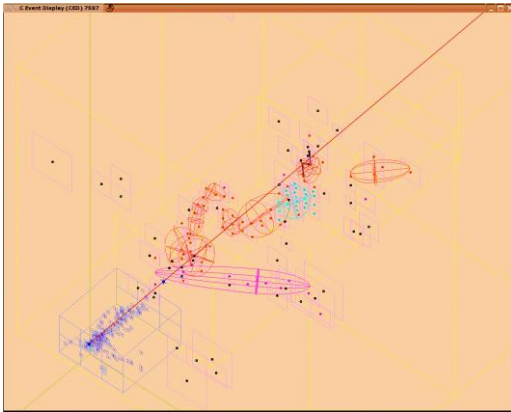


Рис.11 Адронный ливень, зарегистрированный прототипом калориметра.

Прототип тестировался на ускорительных пучках DESY, CERN и FNAL и впервые в мире позволил в реальности наблюдать и исследовать в деталях развитие адронных ливней (рис.11). Полученная информация использовалась для отработки алгоритмов восстановления ливней и разделения струй и отладки и уточнения различных программ MC моделирования развития адронных ливней. По предварительным оценкам

энергетическое разрешение прототипа для адронных ливней составляет $45\% / \sqrt{E(\text{ГэВ})}$.

В настоящий момент исследуется возможность использования прямого считывания сцинтилляционного тайла посредством SiФЭУ, без использования спектросмещающего волокна.

Преимущества такого подхода очевидны. Отсутствие волокна существенно упрощает конструкцию сборки, уменьшает количество операций и снижает требования к точности установки SiФЭУ на корпус и, соответственно, в тайл. Поскольку полное число каналов калориметра несколько миллионов, такое упрощение сборки имеет большое значение.

Для обеспечения возможности реализации варианта «прямого» считывания тайла SiФЭУ должен иметь максимум спектральной чувствительности 420 нм и оптическую связь не выше 10%.

Было проведено исследование прямой (без помощи спектросмещающего волокна, интегрированного в сцинтилляционный тайл) регистрации минимально ионизирующих частиц, пересекающих тайл перпендикулярно большой плоскости, посредством SiФЭУ.

Сцинтиллятор был изготовлен на предприятии «Uniplast» (г.Владимир) и имел геометрические размеры - $30 \times 30 \times 3 \text{ мм}^3$. Для повышения светосбора тайл был обернут фольгой ЗМ. В качестве фотодетектора использовался разработанный SiФЭУ с площадью чувствительной поверхности $1 \times 1 \text{ мм}^2$ и размером ячейки $100 \times 100 \text{ микрон}^2$ при геометрической эффективности 60%. Поверхность SiФЭУ защищена посредством прозрачного эпоксидного компаунда фирмы EPOTEK.

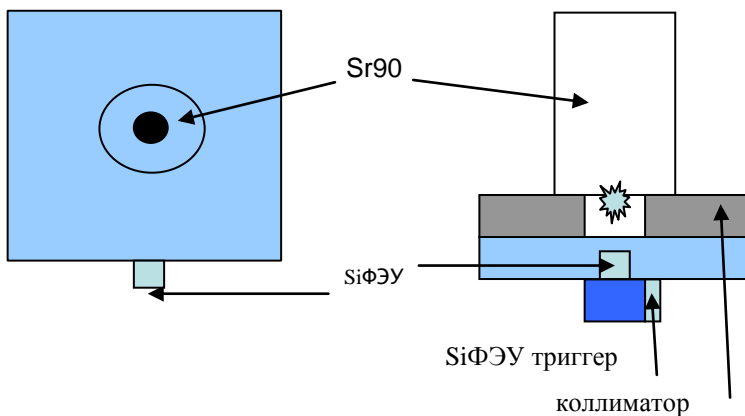


Рис.12. Схема установки по регистрации минимально ионизирующих частиц сборкой сцинтилляционный тайл-SiФЭУ.

В качестве источника минимально ионизирующих частиц использовался коллимированный (диаметр отверстия около 1мм) бета-источник Sr^{90} , расположенный в геометрическом центре большой стороны тайла. SiФЭУ устанавливался вплотную к боковой стороне сцинтиллятора без использования оптической смазки (воздушный зазор). Под исследуемым сцинтиллятором располагался еще один пластиковый сцинтиллятор, просматривае-

мый посредством стандартного вакуумного ФЭУ и используемый для выработки триггерного сигнала, соответствующего регистрации электронов, прошедших перпендикулярно через исследуемый тайл и поглощенных в триггерном тайле (рис.12).

Результаты регистрации минимально ионизирующих частиц приведены на рис.13 и показывают принципиальную возможность применения SiФЭУ в тайловом адронном калориметре с прямым считыванием сцинтилляционных тайлов. Для достижения максимальной эффективности регистрации минимально ионизирующей частицы необходимо использование компактного корпуса для SiФЭУ и установки его непосредственно внутрь сцинтиллятора.

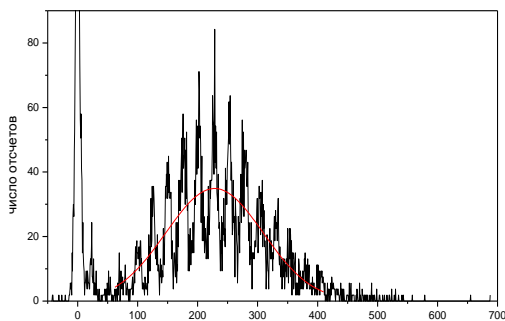


Рис.13. Регистрация минимально ионизирующих частиц сборкой сцинтилляционный тайл-SiФЭУ. Прямое считывание тайла.

вичных гамма-квантов (первичный гамма-квант производит в среднем 500 шт/ГэВ фотонов в диапазоне от 300 до 600нм, большая часть из которых рассеивается или поглощается в атмосфере).

Эксперимент MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cerenkov Telescope) – это самая большая в мире наземная атмосферная черенковская телескопическая система, состоящая из 2 телескопов MAGIC I и MAGIC II с зеркалами диаметром 17 м. MAGIC имеет самый низкий порог по энергии гамма-квантов в мире около 20 ГэВ.

В астрофизике для изучения гамма-квантов сверхвысоких энергий используется так называемая «атмосферная черенковская методика». Следует отметить, что диапазон энергий от десятков ГэВ до ~ 1 ТэВ является наименее изученным в гамма-астрономии, поскольку при этих энергиях эффективность космических методов наблюдений существенно падает, а чувствительность наземных Черенковских телескопов недостаточна для надежной идентификации пер-

Одна из наиболее важных частей Черенковского телескопа - это фотодетектирующая камера. В качестве фотодетекторов в MAGIC II используются вакуумные ФЭУ с квантовой эффективностью $\sim 34\%$. Однако увеличение эффективности регистрации света фотодетектора возможно позволить еще понизить порог по энергии.

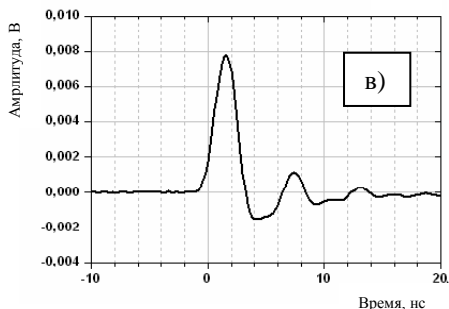
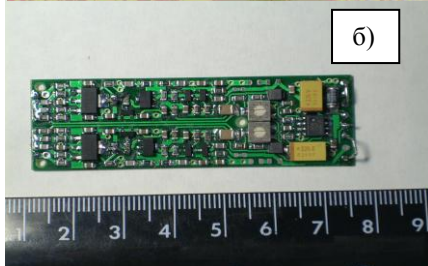
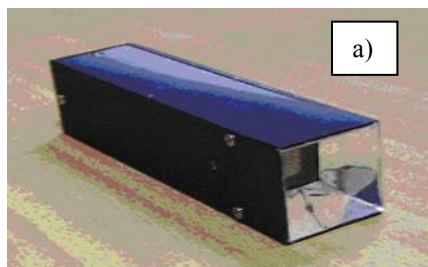


Рис.14. Охлаждаемый модуль для регистрации гамма-квантов(а), предусилитель-формирователь(б), одноканальный сигнал с SiФЭУ (в).

Для замены в эксперименте MAGIC обычных фотоэлектронных умножителей на кремниевые SiФЭУ был разработан модуль для регистрации гамма-квантов, показанный на рис.14а. Модуль состоит из концентратора света (конус Винстона), 4-х SiФЭУ, каждый из которых имеет чувствительную площадь $3 \times 3 \text{ мм}^2$, собранных в виде матрицы 2×2 , двухкаскадного элемента Пельте и специальной быстрой электроники (рис. 14б).

Предусилитель-формирователь обеспечивает формирование выходного импульса с SiФЭУ с длительностью фронта по уровню 0.1-0.9 менее 1 нс, с шириной на полувысоте не более 2.4 нс (рис.14в). Это позволяет разделить импульсы, следующие друг за другом через 3 нс.

Предусилитель-формирователь обеспечивает формирование выходного импульса с SiФЭУ с длительностью фронта по уровню 0.1-0.9 менее 1 нс, с шириной на полувысоте не более 2.4 нс (рис.14в). Это позволяет разделить импульсы, следующие друг за другом через 3 нс.

Элемент Пельте позволяет охладить SiФЭУ до -30°C при работе модуля при комнатной температуре. Такая температура достаточна для уменьшения темновых шумов сборки SiФЭУ ниже уровня шума ночного неба в эксперименте MAGIC.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Определены требования к геометрическим и электрофизическим параметрам входного окна SiФЭУ для обеспечения максимальной эффективности регистрации синего и ультрафиолетового света.
2. Разработана структура и оптимизированы толщины слоев просветляющего покрытия фоточувствительной поверхности SiФЭУ, позволяющее в несколько раз увеличить пропускание синего и ультрафиолетового света внутрь кремниевой структуры SiФЭУ.
3. Показано, что для обеспечения независимости ячеек SiФЭУ друг от друга, детектор должен обладать комплексной защитой от оптической связи, состоящей из V-образных канавок между ячейками, второго p-n-перехода, отделяющего активную область SiФЭУ от подложки и области с повышенным поглощением света, расположенной в объеме и/или на поверхности обратной стороны кристалла SiФЭУ.
4. Изготовлена партия образцов SiФЭУ, обладающих рекордной эффективностью $\geq 50\%$ при регистрации света (350 – 450 нм), и одновременно низким уровнем оптической связи 3–6%.
5. Создан и экспериментально исследован на тестовых пучках DESY, CERN и FNAL прототип тайлового адронного калориметра нового типа на основе SiФЭУ для Международного линейного коллайдера. Прототип содержит 7620 SiФЭУ и обеспечивает беспрецедентную гранулярность, что позволило впервые исследовать в деталях развитие адронных ливней. Энергетическое разрешение для адронов составляет $45\%/\sqrt{E}$ (ГэВ).
6. Показано, что SiФЭУ может быть использован в качестве детектора для прямого считывания сцинтилляционного тайла в адронном калориметре для ILC. Отсутствие спектросмещающего волокна существенно упрощает и удешевляет конструкцию сборки тайл-SiФЭУ.
7. Спроектирован и изготовлен прототип модуля для эксперимента MAGIC, содержащий охлаждаемую матрицу из 4 штук SiФЭУ и специально разработанную быструю аналоговую электронику, обеспечивающую формирование импульсов SiФЭУ с длительностью 2.4 нс на полувысоте.

Результаты исследований опубликованы в следующих основных работах:

1. Е.В.Попова, П.Ж.Бужан, et al. Твердотельный электронный умножитель многоцелевого назначения на основе гейгеровских микроячеек // Прикладная физика, 2003, т.2, с.123-127.

2. E. Popova., B. Dolgoshein, et al. Prospects of using silicon photomultipliers for the astroparticle physics experiments EUSO and MAGIC // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2006, v. 53(2), p. 636-640.
3. P. Buzhan, B. Dolgoshein, et al. Large area silicon photomultipliers: Performance and applications // Nucl.Instr.Meth.Phys.Res. A567 Issue 1 (2006), p. 78-82.
4. E. Popova, B. Dolgoshein, et al. Construction and commissioning of the CALICE analog hadron calorimeter prototype//JINST 5 (2010)P05004.
5. E. Popova, V.Balagura, et al. Study of Scintillator Strip with Wavelength Shifting Fiber and Silicon Photomultiplier // Nucl.Instr.Meth.Phys.Res. A564 (2006) 590-596
6. E. Popova, R. Mirzoyan, B. Dolgoshein, et al. SiPM and ADD as advanced detectors for astro-particle physics // Nucl.Instr.Meth.Phys.Res. A572 (2007) 493–494.
7. E. Popova, P. Buzhan, B. Dolgoshein, et al. The cross-talk problem in SiPMs and their use as light sensors for imaging atmospheric Cherenkov telescopes // Nucl.Instr.Meth.Phys.Res. A610(2009) 131-134