

КРЕМНИЕВЫЙ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Твердотельные кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ) – быстро развивающийся класс фотодетекторов, который становится основой для решения широкого круга научных и прикладных задач, требующих регистрации импульсного излучения малой интенсивности. Характеристики современных детекторов позволяют не только заменять вакуумные ФЭУ во многих применениях, но и создавать на их основе качественно новые системы, содержащие тысячи каналов регистрации: адронные калориметры, телескопы для гамма-астрономии, позитронно-эмиссионные томографы нового поколения. Малые габариты, совместимость со стандартной МОП-технологией и, как следствие, низкая стоимость делают этот класс фотоэлектронных приборов перспективным коммерческим продуктом.

ВВЕДЕНИЕ

Для регистрации импульсного оптического излучения малой интенсивности используются различные типы фотодетекторов – приборов, преобразующих энергию фотонов в электрический сигнал. Наиболее широкое распространение для решения этой задачи получили вакуумные фотоэлектронные умножители – ФЭУ, способные регистрировать отдельные фотоны. Эффективность преобразования излучения современных ФЭУ достигает 45%, расширяется и их спектральный диапазон чувствительности.

Основные недостатки, препятствующие использованию ФЭУ в некоторых конкретных применениях, – большие размеры, высокое напряжение питания и чувствительность к магнитным полям. Кроме того, при построении систем, содержащих сотни тысяч каналов регистрации, важнейшим фактором становится цена детектора, которая в случае ФЭУ достаточно высока. Эти факторы стали причиной активной

С. Клемин*, Ю.Кузнецов*, Л.Филатов*, П.Бужан**,
Б.Долгошеин**, А.Ильин**, Е.Попова**

разработки твердотельных приборов, использующих явление внутреннего фотоэффекта.

Полупроводниковые детекторы 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 р-і-п-фотодиоды, которые благодаря своей надежности, компактности и невысокой стоимости успешно применяются в различных физических экспериментах. Квантовая эффективность этих фотодиодов в максимуме спектральной чувствительности достигает 90%. Однако при регистрации света малой длительности (менее 1 мкс) необходимо применять внешний широкополосный усилитель, шумы которого не позволяют зарегистрировать вспышку света с числом фотонов менее 1000. Кроме того, относительно большая толщина обедненной области делает р-і-п-фотодиоды чувствительными к другим видам излучения (гамма-кванты, заряженные частицы).

У детекторов второй группы внутреннее усиление заряда происходит, как правило, за счет ударной ионизации носителей в сильных электрических полях. Под действием поля свободный носитель заряда (электрон или дырка) приобретает энергию, достаточную для ионизации нейтрального атома и освобождения еще одной электронно-дырочной пары, причем такой процесс может повторяться неоднократно. Полупроводниковые детекторы с внутренним усилением заряда, обусловленным ударной ионизацией, – лавинные фотодиоды (ЛФД) – были разработаны более 50 лет назад. Достоинства ЛФД – высокие быстродействие и квантовая эффективность (до 90%), а также широкий динамический диапазон. Коэффициент усиления промышленных образцов кремниевых ЛФД, работающих в пропорциональном режиме (т.е. при сигнале на выходе ЛФД, пропорциональном интенсивности регистрируемого света), составляет $\sim 10^2$. Специальные технологии позволяют изготавливать ЛФД

* ФГУП НПП "Пульсар".

** Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет).



с коэффициентом усиления до $\sim 10^3$ [1]. При таком коэффициенте усиления сигнал от одиночного фотоэлектрона может превысить уровень шумов усилителя, однако флуктуации коэффициента умножения в ЛФД не позволяют зарегистрировать световые импульсы, содержащие менее 20–50 фотонов.

Увеличить коэффициент умножения традиционного кремниевого ЛФД до 10^4 и более не представляется возможным. Это связано с тем, что коэффициенты ионизации для электронов и дырок в кремнии при больших напряженностях электрического поля очень близки и в образовании лавины участвуют оба типа свободных носителей, что приводит к неограниченному росту лавины и, как следствие, к тепловому пробоем р-п-перехода и выходу прибора из строя. Таким образом, регистрировать одиночные фотоны традиционными детекторами на основе р-п-перехода, работающими без усиления и в пропорциональном режиме усиления, невозможно.

Однако был найден способ, позволяющий увеличить усиление, – это создание структуры, в которой лавинный разряд ограничивается механизмом обратной связи. Работы в этом направлении в России проводились в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН, где исследовалась структура типа металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) [2]. В таких структурах появляющиеся во время лавины носители накапливаются на границе раздела полупроводник–диэлектрик, что приводит к локальному снижению напряженности электрического поля, уменьшению коэффициентов ударной ионизации и прекращению образования лавины. Основные недостатки МДП-структур – необходимость подачи импульсного напряжения смещения для рассасывания инверсного заряда и деградация характеристик прибора.

Проблемы были решены при использовании структур металл–резистивный слой–полупроводник (МРП). В отличие от МДП-структур МРП имеют высокую проводимость резистивного слоя, что предотвращает накопление встроенного заряда на границе раздела слоев. Это позволило существенно увеличить коэффициент усиления фототока (до 10^4), улучшить стабильность характеристик, увеличить площадь чувствительной поверхности и срок службы приборов [3, 4].

Одновременно в ряде лабораторий мира изучалась возможность применения для регистрации одиночных фотонов р-п-переходов, работающих в лавинном режиме при напряжении выше пробойного, т. е. в режиме гейгеровского разряда [5, 6]. Такие детекторы, названные SPAD (Single Photon Avalanche Diode), способны регистрировать одиночные фотоны с эффективностью до 80%. В гейгеровском режиме сигнал от одного фотона, поступающий на 50-Ом нагрузку, может составлять несколько вольт. Для регистрации следующего фотона лавина, после возникновения, должна как можно быстрее прекратиться, погаснуть. Это означает, что гейгеровский разряд необходимо ограничивать, что предохраняет р-п-переход от повреждения. Гейгеровский разряд гасится с помощью либо внешнего резистора (пассивное гашение), либо электронных схем га-

шения лавины и принудительного восстановления рабочего напряжения на р-п-переходе (активное гашение). Активное гашение позволяет существенно увеличить быстродействие детектора. В настоящее время SPAD изготавливаются на различных полупроводниковых материалах с соответствующим диапазоном спектральной чувствительности и находят широкое применение в системах, где требуется счет фотонов.

Недостаток SPAD – фиксированная амплитуда сигнала на выходе, не зависящая от величины внешнего воздействия, а также нечувствительность детектора к внешнему воздействию в период после срабатывания и до момента восстановления.

В разработку твердотельных детекторов одиночных фотонов с улучшенными характеристиками включились кафедра физики элементарных частиц Московского инженерно-физического института, принимавшая с момента своего образования в 1992 году активное участие в международных проектах по физике высоких энергий, и ФГУП НПП "Пульсар" при поддержке Немецкого национального исследовательского центра DESY (Гамбург). В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований и был предложен детектор фотонов нового типа [7].

УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ SiФЭУ

SiФЭУ – это фотоприемник на основе упорядоченного набора (матрицы) р-п-переходов (ячеек), выполненных на общей подложке (рис.1). Характерный размер ячейки составляет порядка 30–100 мкм. Плотность упаковки матрицы – 100–1000 ячеек/мм². Площадь чувствительной поверхности SiФЭУ,

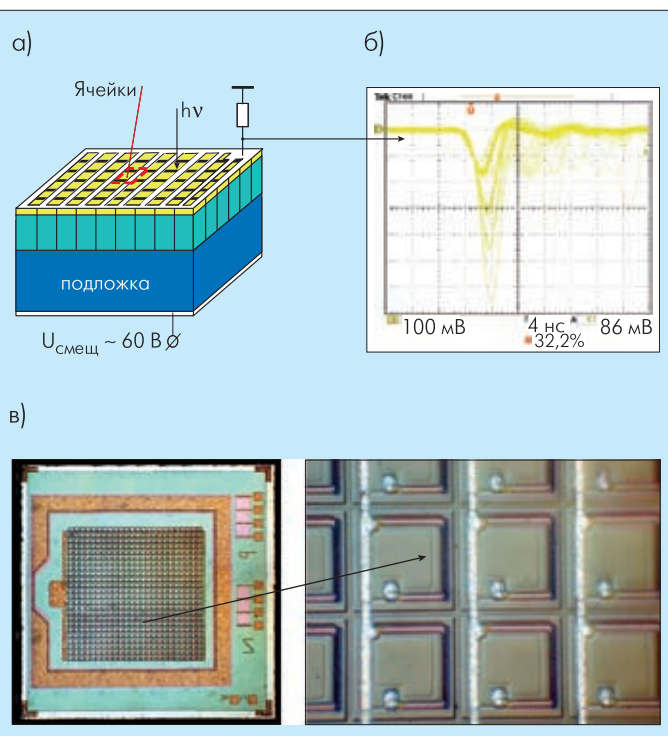


Рис.1. Конструкция (а), осциллограмма сигналов (б) фотография фото-чувствительной поверхности кремниевого фотомножителя (SiФЭУ) (в)

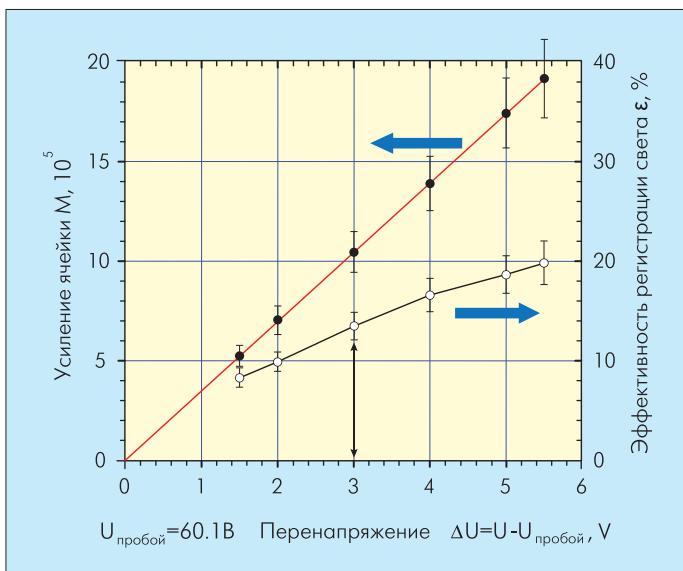


Рис.2. Зависимости от перенапряжения эффективности регистрации света с длиной волны 595 нм и коэффициента усиления SiФЭУ

разработанных в ходе совместной работы МИФИ-“Пульсар”, лежит в пределах от 1×1 до 5×5 мм. Все ячейки одинаковые. Все они объединены в общей точке токопроводящими шинами. Напряжение смещения всех ячеек общее и на несколько вольт (значение перенапряжения) превышает напряжение пробоя p-n-перехода.

Каждая ячейка содержит токоограничивающий резистор, в результате чего гейгеровский разряд в ячейке ограничен. Сигнал каждой ячейки – логический и не зависит от числа первоначальных носителей, вызвавших срабатывание ячейки. Однако сам SiФЭУ как целое представляет собой аналоговый детектор, так как его выходной сигнал равен сумме одинаковых сигналов p-n-переходов, сработавших при поглощении ими фотонов (что хорошо видно на осциллограмме на рис.1б).

Эффективность регистрации фотонов ϵ (основная характеристика фотоприемника) – это вероятность того, что падающий на фотоприемную площадку SiФЭУ фотон будет зарегистрирован. Эффективность можно определить следующим образом: $\epsilon = \langle N_{\text{ячеек}} \rangle / \langle N_{\text{фотонов}} \rangle$, где $\langle N_{\text{фотонов}} \rangle$ – среднее число фотонов во вспышке, падающих на фотоприемную площадку, $\langle N_{\text{ячеек}} \rangle$ – среднее число ячеек SiФЭУ, сработавших от вспышки.

Эффективность регистрации ϵ можно выразить через произведение трех основных независимых друг от друга составляющих: $\epsilon = QE \cdot A \cdot G$, где QE – квантовая эффективность p-n-перехода, A – геометрическая эффективность и G – вероятность возникновения гейгеровского разряда.

Квантовая эффективность QE – вероятность генерации фотоном свободного носителя, который достигнет области умножения (области высокого поля, достаточного для ударной ионизации). Использование просветляющего покрытия, оптимизация толщины слоя, где происходит поглоще-

ние излучения, позволяют получать значения квантовой эффективности до 90%.

Геометрическая эффективность A, определяемая соотношением активной и общей площади ячейки SiФЭУ, зависит от размера ячейки и составляет 30–80% для ячеек размером от 30×30 до 100×100 мкм.

Вероятность возникновения гейгеровского разряда G при попадании свободного носителя в область высокого поля зависит от значения перенапряжения, т. е. разности между приложенным к SiФЭУ напряжением и напряжением пробоя. Экспериментальная зависимость эффективности регистрации ϵ от перенапряжения для одного из типов SiФЭУ представлена на рис.2.

Эффективность регистрации света зависит от длины волны регистрируемого излучения. Достигнутые на последних образцах SiФЭУ значения ϵ в максимуме спектральной чувствительности составляют 30–40% (рис.3).

Коэффициент усиления SiФЭУ (K) зависит от значения накопленного емкостью ячейки заряда: $K = C_{\text{я}} \cdot (U - U_{\text{пр}}) / e$, где $C_{\text{я}}$ – емкость ячейки; $(U - U_{\text{пр}})$ – перенапряжение, e – заряд электрона. Значение емкости ячейки определяется ее площадью и шириной области пространственного заряда. Типичное значение емкости лежит в диапазоне (25–500) фФ при размерах ячейки от 30×30 до 100×100 мкм. При перенапряжении 2–5 В значения коэффициента усиления находятся в диапазоне 3·10⁵–1·10⁷ (рис.2).

Отметим, что в отличие от обычных лавинных фотодиодов зависимость коэффициента усиления SiФЭУ от перенапряжения является линейной, поэтому требования к стабильности напряжения питания для этих приборов гораздо ниже, чем для ЛФД. Разброс значения коэффициента усиления определяется технологическим разбросом значений емкости ячеек и напряжения пробоя от ячейки к ячейке и составляет менее 10%. Такой разброс позволяет получать ам-

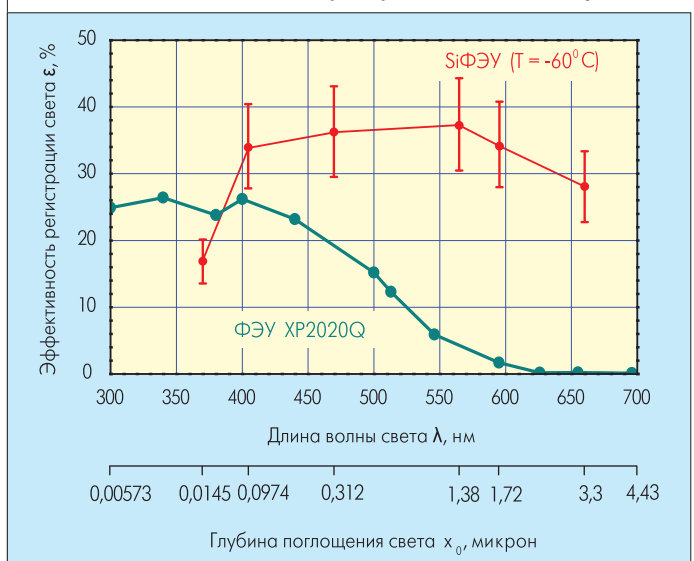


Рис.3. Спектральная зависимость эффективности регистрации света SiФЭУ

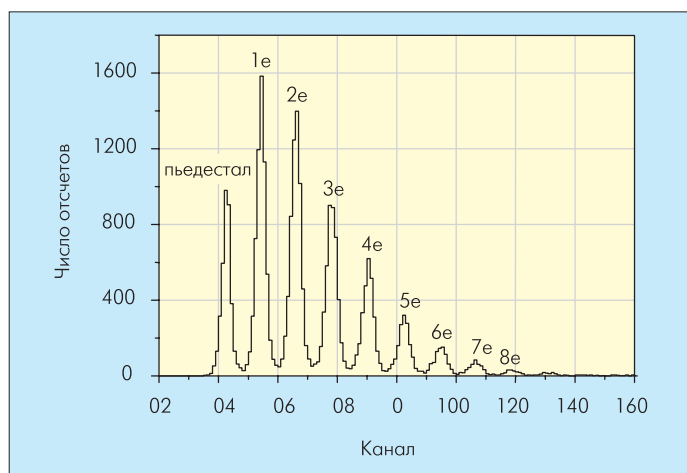


Рис.4. Амплитудный спектр SiFЭУ при регистрации света слабой интенсивности

Амплитудные спектры сигналов SiFЭУ с отличным одноэлектронным разрешением (рис.4).

Темновой счет. При рабочем напряжении, приложенном к SiFЭУ в отсутствие светового воздействия, выходные импульсы по форме и амплитуде соответствуют сигналам сработавших ячеек. Причины их появления – тепловая генерация свободных носителей, генерация носителей в сильном электрическом поле, освобождение носителей, захваченных ловушками в запрещенной зоне при прохождении предыдущих разрядов. Абсолютное значение скорости темнового счета зависит от качества кремния (времени жизни неосновных носителей) и объема, из которого носители могут попадать в область умножения. Типичные значения в рабочем режиме при комнатной температуре составляют 0,5–2 МГц/мм².

Скорость темнового счета, как и эффективность регистрации света и коэффициент усиления, определяется значением перенапряжения. Это означает, что для каждого конкретного применения SiFЭУ необходимо выбирать рабочую точку по напряжению, при которой соотношение параметров будет оптимальным. При повышенных требованиях к скоро-

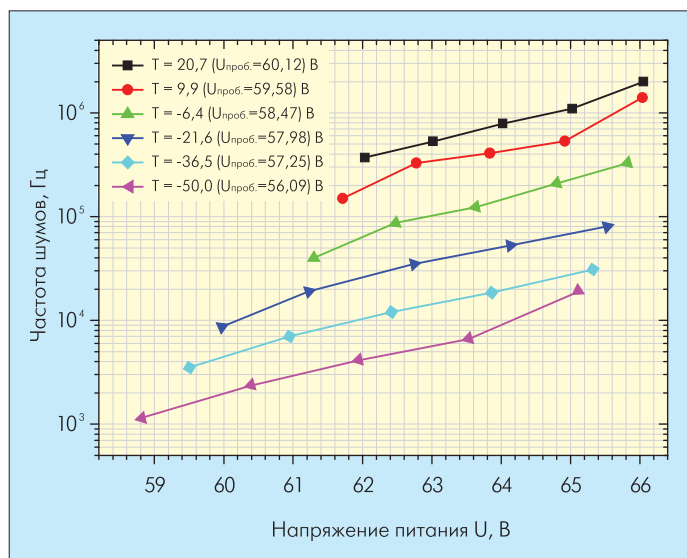


Рис.5. Зависимости частоты темновых импульсов SiFЭУ от перенапряжения при различных значениях температуры

сти темнового счета в ряде случаев может помочь охлаждение SiFЭУ. С понижением температуры частота темновых импульсов для фиксированного перенапряжения снижается, уменьшается и напряжение пробоя p-n-перехода (рис.5).

Временные характеристики SiFЭУ определяются временем развития гейгеровского разряда в ячейке. Собственной характеристикой детектора является разброс времени срабатывания одиночной ячейки SiFЭУ. Измерения, проведенные при использовании полупроводникового лазера ($\lambda = 670$ нм) с длительностью импульса 40 пс, показали, что такой разброс равен 100 пс (полуширина на половине высоты). При увеличении интенсивности вспышки разброс времени срабатывания уменьшается пропорционально квадратному корню из числа сработавших ячеек. Для 30 ячеек временное разрешение равно 20 пс.

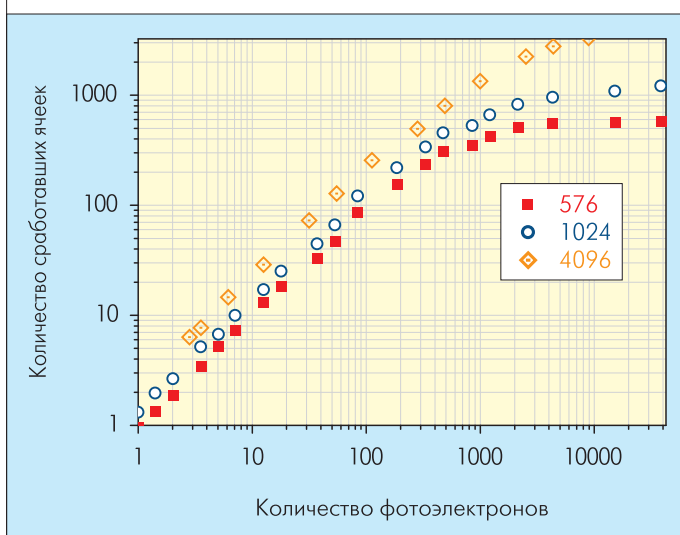


Рис.6. Зависимость амплитуды выходного сигнала SiFЭУ от среднего числа фотонов во вспышке, падающих на чувствительную поверхность детектора, для образцов SiFЭУ с полным числом ячеек 576, 1024-и 4096

Динамический диапазон и линейность. Сигнал на выходе SiFЭУ пропорционален интенсивности входного сигнала до тех пор, пока вероятность того, что срабатывание ячейки вызвано двумя или большим числом электронно-дырочных пар, будет пренебрежимо мала. В этом случае диапазон линейности SiFЭУ определяется полным числом ячеек. При высокой интенсивности вспышки света наступает насыщение сигнала SiFЭУ (рис.6). Форма кривой зависимости для детектора фиксированной конструкции постоянна. Ее можно предварительно измерить и использовать для коррекции насыщения выходного сигнала.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ SiFЭУ

Первое масштабное применение SiFЭУ нашли в уникальном детекторе, используемом в области ускорительной физики высоких энергий для измерения энергии и прослеживания траекторий элементарных частиц, – адронном калориметре со сверхвысокой гранулярностью. Сейчас научное физическое со-

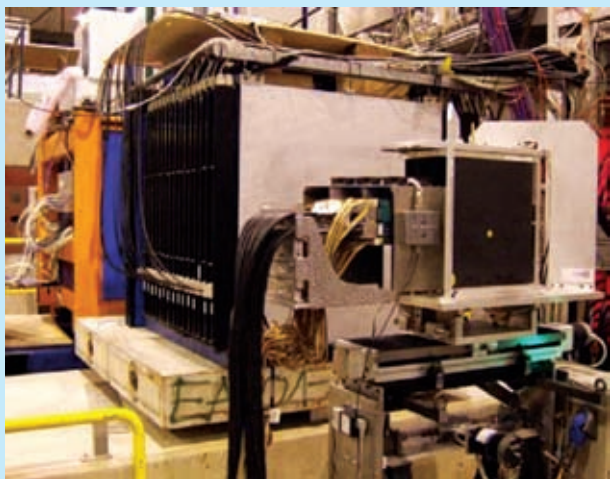


Рис.7. Прототип адронного калориметра на основе SiФЭУ в экспериментальном зале CERN

общество активно обсуждает проект постройки большого ускорителя – Международного линейного коллайдера (International Linear Collider – ILC)*. Цель постройки ускорителя – детальное изучение стандартной модели и поиск явлений, лежащих за пределами применимости общепризнанных теорий. Для этого ILC должен обеспечить выполнение беспрецедентных требований как к конструкции ускорительной системы, так и к детекторам, с помощью которых будут изучаться рождающиеся в столкновениях частицы. В частности, требования к точности восстановления энергии адронным калориметром более чем в два раза превышают точность, достигнутую в таких устройствах на сегодняшний день.

Для решения этой задачи нужны новые подходы как к принципам детектирования частиц, так и к обработке информации. Новая концепция предполагает индивидуальное детектирование и прослеживание траектории каждой частицы в калориметре. Для этого калориметр объемом в несколько сотен кубических метров должен быть разделен на независимые детектирующие каналы сантиметровых размеров. Плата за такой подход – калориметр с несколькими миллионами каналов, расположенных максимально компактно, практически без зазора, в магнитном поле 4–5 Т. Такое плотное расположение каналов можно получить, если использовать в качестве детектирующих элементов пластиковый сцинтиллятор в виде светоизолированных плиток (тайлов). Элементарная частица, пролетая через тайл, вызовет в нем вспышку света, которую должен зарегистрировать фотодатчик. Изучалась возможность применения многоанодных вакуумных ФЭУ или как альтернативный вариант – лавинных фотодиодов. При этом свет с тайла на фотосенсор должен передаваться по пластиковому волокну на расстояние в несколько метров. Однако уже первые тесты, проведенные в 2003 году в DESY при участии специа-

листов МИФИ, ФГУП НПП "Пульсар" и ИТЭФ со 100-канальным прототипом адронного мини-калориметра на ускорительном пучке, показали, что есть только один реальный кандидат фотодетектора, и это – SiФЭУ [8].

В настоящее время построен и проходит испытание на различных ускорителях мира второй прототип калориметра (рис.7). Он содержит 7620 сборок сцинтилляционный тайл–SiФЭУ. Объем его ~1м³. Все детекторные элементы для этого калориметра были изготовлены и протестированы сотрудниками МИФИ, ГУП НПП "Пульсар" и ИТЭФ в рамках проекта МНТЦ 3090 – "Разработка, создание и пучковые испытания калориметрических модулей для коллайдеров нового поколения", который проводился с 2005 по 2007 год. На базе этих детекторных элементов в DESY собирали субмодули-кассеты (рис.8), подключали специально разработанную для SiФЭУ многоканальную электронику и устанавливали в калориметр.

Первые испытания прототипа на тестовом пучке CERN прошли успешно и показали, что SiФЭУ в целом удовлетворяют поставленным перед ними задачам [9]. Прототип калориметра позволил наблюдать и исследовать события, которые еще никто и никогда не видел, – развитие адронного ливня во всех подробностях, как в пространстве, так и во времени (рис.9). В 2008 году планируется продолжить тестирование прототипа калориметра на ускорителе в Фермиевской национальной ускорительной лаборатории (FNAL, США).

Вторая область масштабного применения SiФЭУ – медицинское оборудование. В первую очередь это объясняется тем,

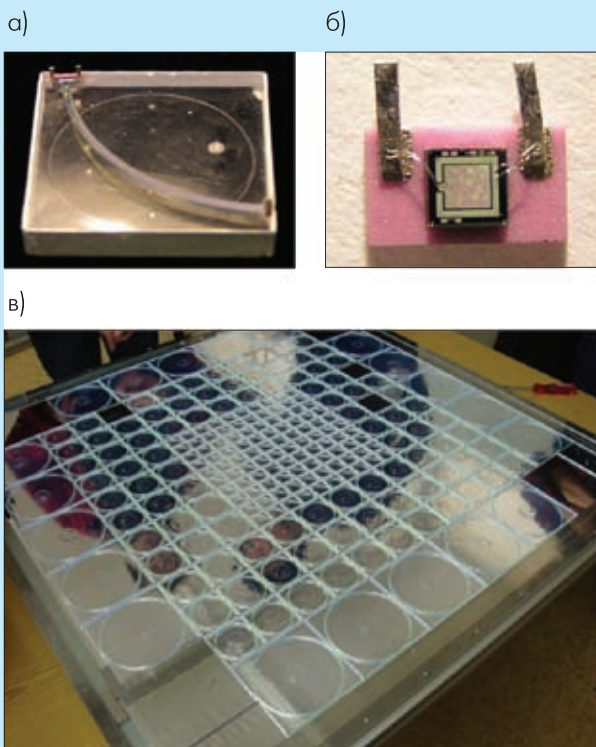


Рис.8. Фотоумножитель в сцинтилляционном тайле (а) и на керамическом прецизионном корпусе (б); кассета с модулями сцинтилляционный тайл-SiФЭУ (в)

*Коллайдер – ускоритель, в котором сталкиваются летящие навстречу друг другу частицы, в данном случае электроны и позитроны.

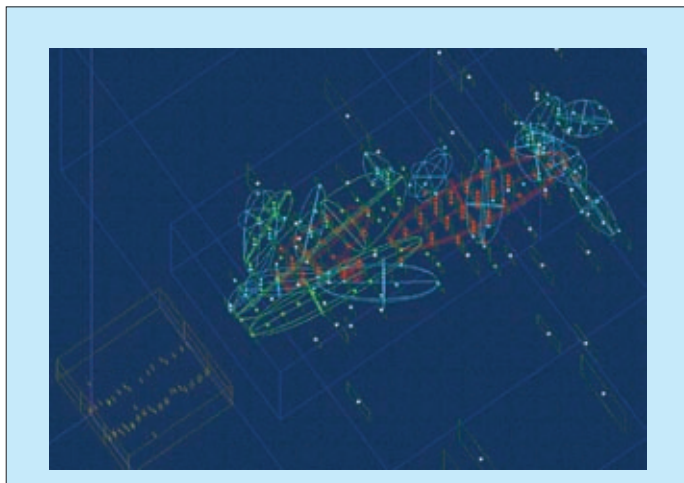


Рис.9. Адронный ливень, зарегистрированный прототипом калориметра

что SiФЭУ прекрасно подходит для применения в позитронно-эмиссионных томографах (ПЭТ). Многочисленные эксперименты показали возможность детектирования гамма-квантов с энергией 511 кэВ с помощью сборки сцинтиллятор (LSO, на кристалле окси-ортосиликата лития, или LYSO, на легированном церием ортосиликате литетия)–SiФЭУ. Энергетическое разрешение фотопика измерялось для различных размеров кристаллов сцинтиллятора, различной площади чувствительной поверхности SiФЭУ и условий оптического контакта между поверхностью SiФЭУ и сцинтиллятором.

Время высвечивания сцинтиллятора LSO составляет 40 нс. При регистрации аннигиляционных гамма-квантов временное разрешение системы LSO–SiФЭУ равно ~1 нс. При получении томографического изображения это позволяет использовать не только амплитудную, но и временную информацию о событиях, что существенно улучшает контраст изображения.

На рис.10 в качестве примера показано амплитудное распределение, полученное со сборки LSO–SiФЭУ при регистрации гамма-квантов с энергией 511 кэВ от радиоактивного источника ²²Na. Чувствительная площадь SiФЭУ, разработанных в ходе совместной работы МИФИ и ФГУП НПП "Пульсар", составляла 3×3 мм² [10]. Построенные на основе SiФЭУ позитронные томографы имеют следующие преимущества перед традиционными с использованием ФЭУ:

- более высокая пространственная разрешающая способность (каждый кристалл сцинтиллятора считывается одним SiФЭУ);
- возможность использования время-пролетной методики, что существенно повышает контраст изображения;
- низкое напряжение питания SiФЭУ, не более 100 В;
- нечувствительность SiФЭУ к магнитным полям, что позволяет строить комбинированные системы позитронного эмиссионного и магнитно-резонансного томографа;
- возможность создания передвижных томографов (благодаря компактности и простоте установки SiФЭУ);
- значительно более низкая стоимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время завершен этап лабораторных исследований характеристик SiФЭУ. В мире появился серьезный интерес к производству SiФЭУ, к их применению не только в ускорительной физике, но и в астрофизике [11], медицине, промышленности. Это отчетливо показало проведенное в сентябре 2007 года Институтом Макса Планка (Мюнхен, Германия) международное рабочее совещание по последним достижениям в области детектирования света слабой интенсивности – LIGHT–2007 [12]. На конференции присутствовали представители как научных организаций, разрабатывающих собственные конструкции SiФЭУ детекторов – Институт Макса Планка, Институт ядерной физики (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN, Италия), так и коммерческих фирм, уже выпускающих первые образцы таких детекторов (ЦПТА/Photonique, SensL, RMD) или планирующих их выпуск (Photonis, Siemens). Больших успехов добилась компания Hamamatsu Photonics, разрабатывающая SiФЭУ под названием MPPC (Multy-Pixel Photon Counter). Было отмечено, что SiФЭУ стоят на пороге освоения промышленного производства. Уже сегодня в Интернете можно найти предложения о продаже детекторов, подобных SiФЭУ. Цена их еще весьма высока, однако можно ожидать, что в будущем она не превысит нескольких долларов на 1 мм².

Важное направление развития твердотельных фотоумножителей – разработка приборов с расширенным диапазоном спектральной чувствительности. Это может быть достигнуто за счет использования при изготовлении твердотельных фотоумножителей полупроводников с отличной от кремния шириной запрещенной зоны (как большей, так и меньшей), таких как германий, карбид кремния. Стремление к миниатюризации, увеличению плотности информационных каналов, расширению диапазона спектральной чувствительности, снижению потребляемой мощности, снижению конечной стоимости изделия, упрощению условий эксплуатации и повышению надежности

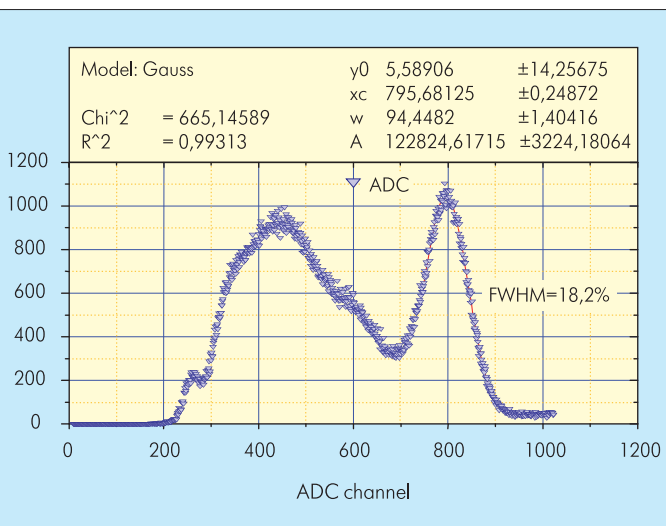


Рис.10. Амплитудное распределение, полученное сборкой сцинтиллятор LSO–SiФЭУ при регистрации гамма-квантов с энергией 511 кэВ (радиоактивный источник Na²²)

систем и установок в современном мире диктует направления дальнейшего развития твердотельных фотоумножителей.

Авторы выражают благодарность специалистам, чье участие в работе определило ее успех и обеспечило дальнейшее продвижение к новым достижениям: Валерию Петровичу Яромскому, Роберту Дмитриевичу Тихонову, Андрею Александровичу Жукову, Владимиру Владимировичу Дягилеву, Екатерине Михайловне Апостоловой, Нине Николаевне Гущиной, Надежде Егоровне Шеверневой, Эдвину Геннадьевичу Косогорову, Владимиру Юрьевичу Русинову и Евгению Ильичу Тарковскому.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Farrel R.** et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A353 (1994) 176–179.
2. **Кашеваров В.Л., Павлюченко Л.Н., Сокол Г.А.** Кремниевые детекторы с внутренним усилением. – Препринт ФИАН, 1994.
3. **Гасанов А.Г., Головин В.М., Садыгов З.Я.** и др. – Письма в ЖЭТФ, 1988, т.14, с.706.
4. **Гасанов А.Г., Головин В.М., Садыгов З.Я., Юсипов Ю.Н.** – Письма в ЖТФ, 1990, т.16, вып.1, с.14.
5. **Haitz R.H.** Model for Electrical Behavior of a Microplasma. – Journal of Applied Physics, May 1964, vol.35, N5, p.1370–1376.
6. **Cova S., Ghioni M., Lacaita A.**, et al. Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection. – Applied Optics, April 20 1996, v.35, N12.
7. **Bondarenko G., Dolgoshein B., Golovin V.** et al. Limited Geiger-mode silicon photodiode with very high gain.– Nuclear Physics B – Proceedings Supplements. Supplement 2, 1998, v.61, p.347–352.
8. **Andreev V.** et al. A high-granularity scintillator calorimeter readout with silicon photomultipliers.– NIM A 540, 2005, Issues 2–3, p.368–380.
9. **Sefkow F.** Presentation MGPDs for calorimeter and muons systems: requirements and first experience in the CALICE test beam – <http://www-conf.kek.jp/PD07/>
10. **Buzhan P.** et al. Large area silicon photomultipliers: Performance and applications.– NIM A 567, 2006, Issue 1, p.78–82.
11. **N.Otte** et al. The Potential of SiPM as Photon Detector in Astroparticle Physics Experiments like MAGIC and EUSO. – Nuclear Physics B – Proceedings Supplements, 2006, vol.150, p.144–149.
12. <http://wwwmagic.mppmu.mpg.de/light07/>