

Температурная зависимость чувствительности кремниевых фотоумножителей в режиме пофотонной регистрации ультрафиолетового излучения

© А.А. Богданов, Ю.В. Тубольцев, Ю.В. Чичагов, Е.Е. Холупенко, А.М. Красильщиков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: Alexander.A.Bogdanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 15 сентября 2020 г.
В окончательной редакции 18 ноября 2020 г.
Принято к публикации 18 ноября 2020 г.

В контексте разработки новой детектирующей камеры для черенковского гамма-телескопа TAIGA-IACT экспериментально исследованы температурные зависимости темнового счета и эффективности пофотонной регистрации двух кремниевых лавинных фотодетекторов ультрафиолетового излучения: OnSemi/SensL MicroFJ-60035 и Hamamatsu VUV4 S13371-6050CQ-02 на длине волны 277 nm. Показано, что основные характеристики указанных детекторов соответствуют заявленным производителями. Разработаны и протестированы схемы съема сигнала. Сделаны выводы о применимости таких детекторов в регистрирующих камерах черенковских гамма-телескопов.

Ключевые слова: SIPM, кремниевые фотоумножители, PDE, темновой счет, ультрафиолетовое излучение, TAIGA-IACT, front-end electronics.

DOI: 10.21883/JTF.2021.05.50695.270-20

Введение

В последние десятилетия в Тункинской долине была создана и в настоящее время продолжает активно развиваться обсерватория TAIGA [1], представляющая собой комплекс для исследования космических лучей и космических источников гамма-излучения. В состав этой обсерватории входит черенковский гамма-телескоп TAIGA-IACT [2], детектирующая камера которого основана на вакуумных фотоумножителях [3]. Однако развитие кремниевых фотоумножителей позволяет создавать детектирующие системы, по ряду важных параметров превосходящие нынешнее поколение основанных на вакуумных фотоумножителях черенковских детекторов. К этим параметрам относятся более низкие напряжения питания, компактность, устойчивость к засветке и др. В частности, в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся разработки детекторного кластера для камеры черенковского гамма-телескопа TAIGA-IACT на базе кремниевых фотоумножителей (SiPM) [4], чувствительных к излучению как в видимом (300–600 nm), так и в ультрафиолетовом (250–300 nm) диапазонах.

Разрабатываемая в ФТИ им. А.Ф. Иоффе конструкция пикселя проектируемого детекторного кластера основана на четырех SiPM OnSemi MicroFJ-60035. Выбор этого типа SiPM обусловлен высокой эффективностью детектирования (PDE), заявленной производителем как в видимом диапазоне (25–50% при перенапряжении 6 V в зависимости от длины волны), так и в ультрафиолетовом диапазоне (5–20% в зависимости от длины волны). Последнее обстоятельство является важным, поскольку проект модернизированной камеры предпола-

гает возможность осуществления грубой спектрометрии черенковского излучения широких атмосферных ливней [5], что может повысить эффективность определения типа первичной частицы (гамма-адронной сепарации). Также чрезвычайно важной отличительной особенностью данных детекторов является наличие быстрого выхода, позволяющего получить длительность сигнала порядка нескольких наносекунд, что необходимо для дифференциации низкоамплитудного сигнала на сильно зашумленном фоне, создаваемом в детектирующих камерах излучением ночного неба.

Однако кремниевые фотоумножители известны своей чувствительностью к изменениям температурного режима вследствие зависимости напряжения пробоя от температуры, а значит, и коэффициента усиления. Поэтому с целью тестирования и калибровки создаваемой детектирующей аппаратуры в температурных условиях, имитирующих условия работы в камере телескопа (12–15°C), создан испытательный стенд, включающий два блока температурной стабилизации для двух типов детекторов — OnSemi/SensL MicroFJ-60035 и Hamamatsu VUV4 S13370. С помощью этого стенда нами были измерены температурные зависимости чувствительности указанных детекторов.

1. Испытательный стенд, конструкция блоков термостабилизации, схемы съема сигналов

Источник PicoQuant PLS-270 [6] испускает импульсы рассеянного ультрафиолетового излучения длительно-

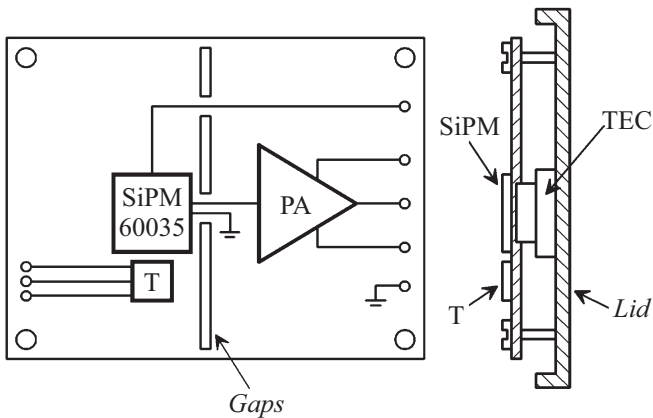


Рис. 1. Упрощенные виды печатной платы на крышке корпуса для OnSemi MicroFJ-60035.

стью 600 ps на длине волны 277 nm, которые попадают в детектирующий блок на базе SiPM через резиновую гофру, обеспечивающую светоизоляцию. Импульсы от детекторов после усиления на предусилительной электронике блоков фиксируются осциллографом LeCroy WaveRunner 620Zi с полосой пропускания 2 GHz в режиме связи по постоянному току с нагрузкой 50 Ω .

Было создано два схожих детектирующих блока — один на базе SiPM OnSemi MicroFJ-60035, а другой — на базе SiPM Hamamatsu VUV4 S13371-6050CQ-02. Оба блока конструктивно выполнены в виде металлических коробок с чернением внутренних поверхностей и фланцем для присоединения резиновой гофры. Печатная плата каждого блока с SiPM размещена на крышке корпуса для удобства доступа к элементам. На ней же с внешней стороны размещены разъемы питания и вывода сигнала. Каждая печатная плата имеет предусилитель, температурный датчик (DS18B20U с точностью измере-

ния $\pm 0.5^\circ\text{C}$ в диапазоне от -10 до $+85^\circ\text{C}$) и термоэлектрический охладитель. Рассмотрим конструктивные особенности каждой из плат.

Печатная плата для MicroFJ-60035 (рис. 1) спроектирована таким образом, чтобы минимизировать тепловой поток от предусилителя (PA) к SiPM, для чего на плате предусмотрены разрезы, а сигнал и напряжение смещения подаются по узким мостикам. Для повышения точности измерений температурный датчик (T) расположен в непосредственной близости от SiPM. С задней стороны под SiPM находится металлизированная канавка, электрически соединенная с сигнальной землей, в которую помещается холодная сторона двухкаскадного термоэлектрического охладителя (TEC). Горячая сторона TEC при помощи винтов прижимается платой к зачищенной поверхности крышки корпуса, тем самым обеспечивая теплоотвод. Такая конструкция и применение термопасты позволили достичь температур ниже 10°C , при нагружении охладителя менее чем на треть его холодопроизводительности.

Принципиальная схема съема сигнала с MicroFJ-60035 основана на схеме, описанной в работе [4], и изображена на рис. 2. Съем сигнала производится с быстрого выхода SiPM при помощи повторителя тока на транзисторе BFT93 и широкополосного малощумящего операционного усилителя AD8099. Ширина импульса на полувысоте составляет 3.55 ± 0.07 ns. Переходный процесс (~ 30 ns) после импульса связан с паразитными параметрами линии передачи сигнала к осциллографу (емкостью и индуктивностью разъемов и кабеля). Так как период следования импульсов в эксперименте составляет 200 ns, переходный процесс не оказывает влияния на точность измерения амплитуды последующих сигналов. В разрабатываемой детекторной камере будут приняты схемотехнические и конструктивные меры по минимизации переходного процесса.

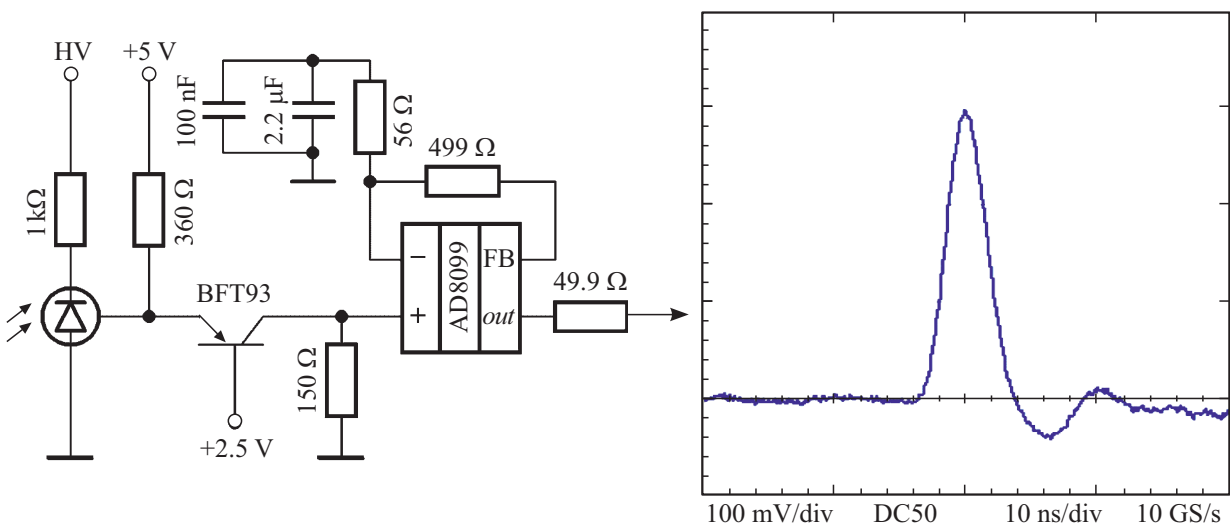


Рис. 2. Принципиальная схема съема сигнала с MicroFJ-60035 и вид выходного сигнала.

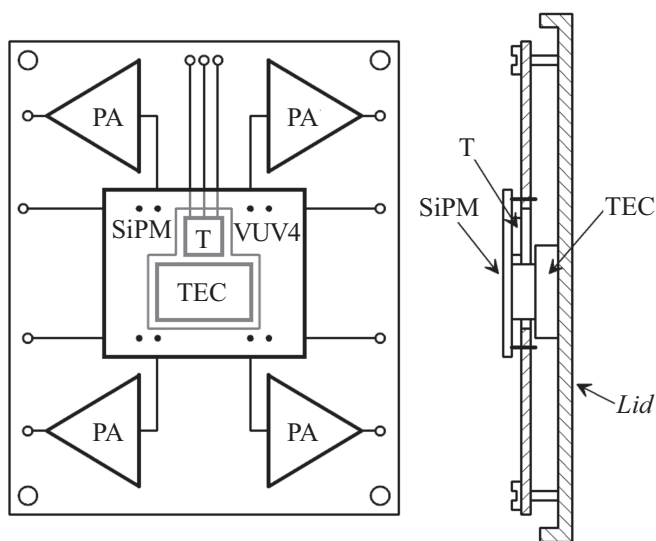


Рис. 3. Упрощенный вид печатной платы на крышке корпуса для Hamamatsu VUV4 S13371-6050CQ-02.

Печатная плата для VUV4 (рис. 3) конструктивно отличается от созданной для MicroFJ-60035 в силу того, что элемент S13371-6050CQ-02 выполнен в виде сборки из четырех детекторов на общей керамической подложке с четырьмя парами штырьков-выводов. Вследствие этого на плате размещено 4 предусилителя для каждого детектора сборки (канала), а в самой плате под VUV4 сделан фигурный вырез для термоэлектрического элемента TEC и размещения термодатчика T таким образом, чтобы они упирались в заднюю стенку SiPM. Этим обеспечивается точность измерения температуры и максимизация эффективности TEC, который также прижимается к крышке корпуса для отвода тепла. Однако при одновременной работе всех четырех каналов TEC может достичь только 12°C при полной

холодопроизводительности. Для того чтобы опустить температуру еще ниже, необходимо либо отключать питание неиспользуемых каналов предусилителей, либо использовать дополнительное внешнее охлаждение корпуса блока.

Принципиальная схема съема сигнала с VUV4 S13371-6050CQ-02 изображена на рис. 4. Съем сигнала производится с анода SiPM на нагрузке $49.9\ \Omega$ при помощи широкополосного малошумящего операционного усилителя AD8099. Ширина импульса на полувысоте составляет $61.3\text{--}3.7\ \text{ns}$.

2. Темновой счет

Одним из важных параметров SiPM является скорость темнового счета, понимаемая как количество ложных срабатываний ячеек детектора на единицу эффективной площади. Известно, что темновой счет существенно зависит от температуры, поэтому было необходимо экспериментально измерить его величину для исследуемых детекторов во всем диапазоне рабочих и лабораторных температур.

В случае с MicroFJ-60035 благодаря реализации схемы считывания сигнала с быстрого выхода и длительности импульсов в несколько наносекунд вероятность наложения импульсов темнового счета друг на друга крайне мала, что позволяет исследовать их статистику при помощи счетных функций осциллографа, измеряя среднюю скорость темнового счета и вычисляя стандартные отклонения ее величины (рис. 5, синяя линия с точками в виде квадратов (в online версии)). Из данных, приведенных производителем в описании MicroFJ-60035 [7], можно вычислить величину темнового счета при перенапряжении $5\ \text{V}$, равную примерно $120\ \text{kHz} \cdot \text{mm}^{-2}$ при 21°C , что согласуется со значением, полученным в ходе эксперимента для этой температуры: $140 \pm 40\ \text{kHz} \cdot \text{mm}^{-2}$.

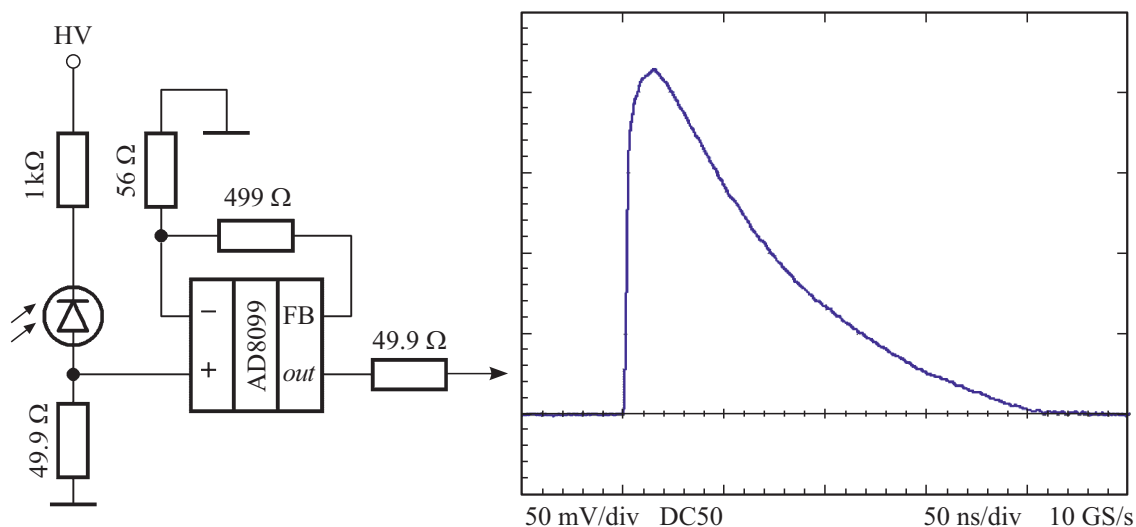


Рис. 4. Принципиальная схема съема сигнала с VUV4 S13371-6050CQ-02 и вид выходного сигнала.

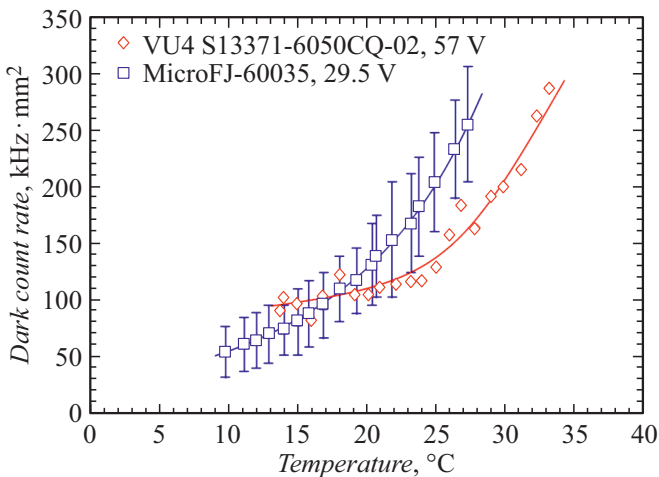


Рис. 5. Зависимость темного счета от температуры детекторов MicroFJ-60035 (квадраты) при перенапряжении 5 V и VUV4 S13371-6050CQ-02 (ромбы) при перенапряжении 4 V.

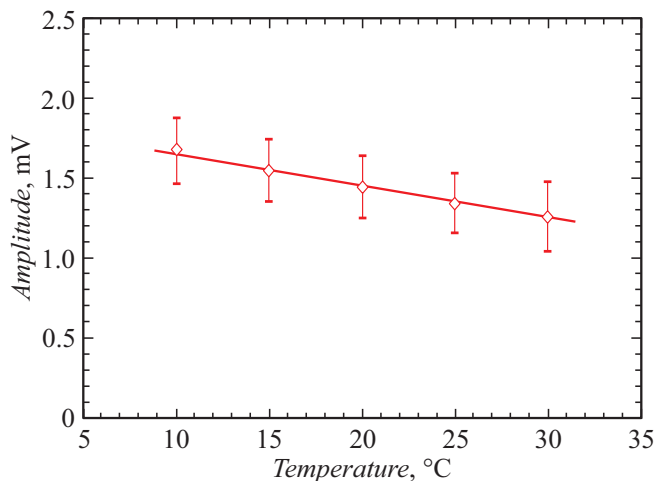


Рис. 6. Зависимость единичного сигнала с VUV4 S13371-6050CQ-02 от температуры.

В случае VUV4 вероятность наложения импульсов друг на друга велика из-за длительности импульсов порядка 150 ns, и применение осциллографа для счета фронтов не дает достоверных результатов. Поэтому счет импульсов для VUV4 был произведен вручную — визуальным подсчетом количества отображаемых импульсов темного счета на экране осциллографа (рис. 5, красная линия с точками в виде ромбов (в online версии)).

В описании VUV4 S13371-6050CQ-02 [8] величина темного счета указана как 4 MHz/канал (типичное) и 12 MHz/канал (максимальное) при 25°C, что говорит о большом разбросе данного параметра от детектора к детектору. В пересчете на эффективную фоточувствительную площадь $5.9 \times 5.85 \text{ mm}^2$ типичная величина темного счета равна $115 \text{ kHz} \cdot \text{mm}^{-2}$ при 25°C, что

хорошо согласуется со значением, полученным в эксперименте при данной температуре: $128 \text{ kHz} \cdot \text{mm}^{-2}$.

3. Единичный сигнал

Для определения величины полезного сигнала в единицах фотоэлектронов необходимо знать величину и зависимость однофотоэлектронного (единичного) сигнала от температуры. Здесь и далее под одним фотоэлектроном понимается сигнал от срабатывания одной микроячейки кремниевого фотумножителя, которое было вызвано либо темновым счетом, либо попаданием фотона.

Явление темнового счета позволяет определить величину единичного сигнала, так как абсолютное большинство импульсов темного счета представляют собой срабатывание одной, двух или трех ячеек. Поэтому величину единичного сигнала можно определить не только по величине однофотоэлектронного сигнала, но и как разницу между сигналами от одной и двух сработавших ячеек.

В процессе экспериментов с MicroFJ-60035 нам не удалось установить сколь-нибудь значимой зависимости амплитуды однофотоэлектронного сигнала от температуры в диапазоне от 10 до 28°C. В этом диапазоне величина единичного сигнала оказалась стабильной: $4.4 \pm 0.7 \text{ mV}$.

Температурная зависимость однофотоэлектронного сигнала с VUV4 изображена на рис. 6 и показывает линейное падение амплитуды единичного сигнала в области от 10 до 30°C в среднем на $0.02 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Амплитуда однофотоэлектронного сигнала с VUV4 при 25°C составила $1.34 \pm 0.19 \text{ mV}$.

4. Коэффициент эффективности пофотонной регистрации

Для определения эффективности пофотонной регистрации (PDE) использовался источник УФ излучения на длине волны 277 nm — PLS-270, заранее откалиброванный при помощи измерителя мощности излучения (более подробно процесс калибровки источника излучения будет описан в другой статье). При известной мощности излучения на длине волны 277 nm и частоте следования импульсов можно вычислить количество испускаемых источником фотонов, что с учетом известного расстояния до детектора и его геометрических размеров позволяет определить облученность детектора как количество фотонов, попавших на фоточувствительную площадь детектора. Таким образом, PDE равняется отношению количества зарегистрированных фотонов (амплитуда сигнала в фотоэлектронах) к облученности детектора.

Рис. 7 показывает зависимость PDE исследуемых детекторов от температуры. Хорошо прослеживается

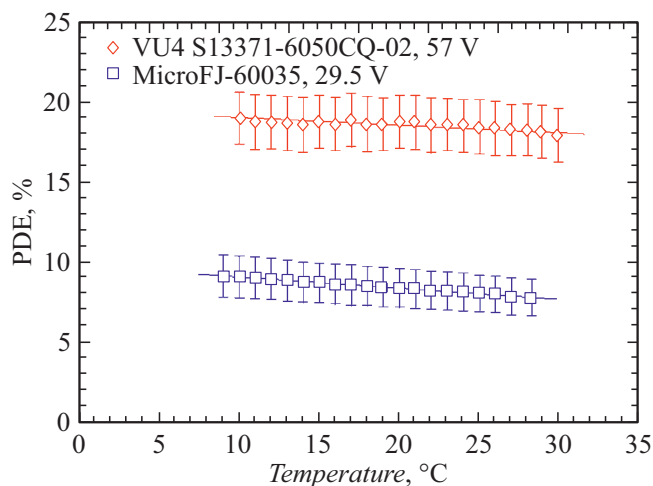


Рис. 7. Температурная зависимость эффективности пофотонной регистрации (PDE) детекторов MicroFJ 60035 (квадраты) при перенапряжении 5 V и VUV4 S13371-6050CQ-02 (ромбы) при перенапряжении 4 V.

общая линейная тенденция к уменьшению эффективности регистрации с ростом температуры в $0.07\%/^{\circ}\text{C}$ для MicroFJ-60035 и $0.04\%/^{\circ}\text{C}$ для VUV4. Из документации производителя MicroFJ-60035 можно получить величину PDE для перенапряжения 5 V при температуре 21°C , приблизительно равную 9%, что согласуется с полученной в эксперименте величиной PDE $8.1 \pm 1.2\%$ при 21°C . Аналогичным образом, для VUV4 из документации производителя можно получить величину PDE при перенапряжении 4 V и температуре 25°C , приблизительно равную 18%, что хорошо согласуется с полученной в эксперименте величиной $17.7 \pm 1.4\%$ при 25°C .

В величину ошибок измерений на рис. 7 вносят свой вклад нестабильности источника излучения, погрешность измерения амплитуды единичного сигнала и погрешность измерителя мощности излучения.

В эксперименте количество фотонов, испускаемых источником и попадающих на фоточувствительную площадь детектора MicroFJ-60035, в среднем составляет примерно 850, и эти фотоны с вероятностью $\sim 8\%$ могут спровоцировать срабатывание микроячейки детектора. Иными словами, из 22 292 микроячеек MicroFJ-60035 одновременно срабатывали только около 68 микроячеек (3% от общего количества), что позволяет говорить о низкой засветке и незначительности связанных с ней нелинейных эффектов, влияющих на измерение PDE. Аналогичные рассуждения применимы и для VUV4 S13371-6050CQ-02, на фоточувствительную площадь которого попадает в среднем около 660 фотонов, которые заставят сработать около 116 микроячеек из 13 923 ($\sim 8\%$ от общего количества).

Заключение

Проведенные нами измерения позволяют утверждать, что оба исследованных детектора обладают характеристиками, заявленными их производителями. Принимая во внимание тот факт, что целевая рабочая температура детекторов в УФ-камере телескопа TAIGA-IACST составляет $12\text{--}15^{\circ}\text{C}$, чувствительность (PDE) детекторов MicroFJ-60035 при перенапряжении 5 V составит $8.6 \pm 1.3\%$ и будет слабо зависеть от колебаний температуры в указанных пределах. Заметим, что при конструировании этой камеры будет необходимо учитывать собственное тепловыделение предусилительной электроники и принять меры по минимизации или нейтрализации теплового потока к детекторам с помощью решений, приведенных в настоящей работе и аналогичных им.

Важно так же отметить, что в эксперименте не измерялись и не учитывались эффект перекрестных помех (crosstalk) между микроячейками и послеимпульсы (afterpulsing), характерные для SiPM. В случае с MicroFJ перекрестные помехи могут добавлять около 20% к амплитуде сигнала при перенапряжении 5 V, что с одной стороны помогает усилить слабый сигнал, а с другой — затрудняет вычисление количества зарегистрированных фотонов. Причем данные эффекты так же зависят от температуры, что может стать дальнейшим объектом для исследований.

Измеренная зависимость темнового счета для MicroFJ-60035 позволяет оценить его величину в области целевых рабочих температур ($12\text{--}15^{\circ}\text{C}$) при перенапряжении 5 V как $71 \pm 24 \text{ kHz} \cdot \text{mm}^{-2}$ или $2.0\text{--}0.7 \text{ MHz/detector}$. Так как в проектируемых пикселях УФ камеры планируется применение сборок из четырех детекторов MicroFJ-60035, можно ожидать, что суммарный темновой счет составит около 7.8 MHz/pxel .

Наблюдавшееся в эксперименте отсутствие зависимости величины однофотонного сигнала MicroFJ-60035 от температуры в диапазоне от 10 до 28°C упрощает конвертацию амплитуды полезного сигнала в единицы фотоэлектронов.

Исследование характеристик детектора Hamamatsu VUV4 S13371-6050CQ-02 позволяет сделать вывод о перспективности применения таких детекторов в качестве калибровочных устройств в связи с их вдвое более высокой чувствительностью (PDE) по сравнению с MicroFJ-60035 на длине волны 277 nm .

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта РФФ 19-72-20045

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L.A. Kuzmichev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, V. Boreyko, A.N. Borodin, N.M. Budnev, R. Wischnewski, A.Y. Garmash, A.R. Gafarov, N.V. Gorbunov, V.M. Grebenyuk, O.A. Gress, T.I. Gress, A.A. Grinyuk, O.G. Grishin, A. N. Dyachok, A.V. Zagorodnikov, V.L. Zurbanov, A.L. Ivanova, Y.A. Kazarina, N.N. Kalmykov, N.I. Karpov, V.V. Kindin, P.S. Kirilenko, S.N. Kiryuhin, V.A. Kozhin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva, E.A. Kravchenko, M. Kunnas, A. Chiavassa, A.A. Lagutin, V.V. Lenok, B.K. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, R.R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R.D. Monkhoev, R. Nachtigall, E.A. Osipova, M.I. Panasyuk, L.V. Pankov, A.L. Pakhorukov, A.A. Petrukhin, V.A. Poleschuk, M. Popescu, E.G. Popova, A. Porelli, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, R.I. Raikin, G.I. Rubtsov, Ya.I. Sagan, V.S. Samoliga, L.G. Sveshnikova, Yu.A. Semeny, A.Y. Sidorenkov, A.A. Silaev, A.A. Silaev Jr., A.V. Skurikhin, M. Slunicka, A.V. Sokolov, V.P. Sulakov, V.A. Tabolenko, B.A. Tarashansky, L.G. Tkachev, A.V. Tkachenko, M. Tluczykont, O.L. Fedorov, A.D. Horns, C. Spiering, A.Sh.M. Elshoukrofy, I.I. Yashin. *Phys. Atom. Nucl.*, **81**, 497 (2018). <https://doi.org/10.1134/S1063778818040105>
- [2] Y. Sagan, I. Astapov, P. Bezyazeev, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, D. Horns, A. Ivanova, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, P. Kirilenko, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, M. Kunnas, L. Kuzmichev, Yu. Lemeshev, V. Lenok, N. Lubsandorzhev, B. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, R. Nachtigall, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, E. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, E. Rjabov, G. Rubtsov, B. Sabirov, V. Samoliga, A. Sidorenkov, A. Silaev, A. Silaev (junior), A. Skurikhin, V. Slunicka, A. Sokolov, Y. Suvorkin, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, A. Tanaev, B. Tarashansky, L. Tkachev, M. Tluczykont, R. Wischnewski, I. Yashin, A. Zagorodnikov, D. Zhurov. *Proceedings of 36th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC2019)*, **36**, 776 (2019).
- [3] N.M. Budnev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, A.N. Borodin, R. Wischnewski, A.Yu. Garmash, A.R. Gafarov, N.V. Gorbunov, V.M. Grebenyuk, O.A. Gress, T.I. Gress, A.A. Grinyuk, O.G. Grishin, A.N. Dyachok, D.P. Zhurov, A.V. Zagorodnikov, V.L. Zurbanov, A.L. Ivanova, Yu.A. Kazarina, N.N. Kalmykov, N.I. Karpov, V.V. Kindin, P.S. Kirilenko, S.N. Kiryuhin, V.A. Kozhin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva, E.A. Kravchenko, L.A. Kuzmichev, M. Kunnas, A. Chiavassa, A.A. Lagutin, V.V. Lenok, B.K. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, R.R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R.D. Monkhoev, R. Nakhtigall, E.A. Osipova, M.I. Panasyuk, L.V. Pankov, A.L. Pakhorukov, A.A. Petrukhin, V.A. Poleschuk, M. Popescu, E.G. Popova, A. Porelli, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, R.I. Raikin, G.I. Rubtsov, Y.I. Sagan, V.S. Samoliga, L.G. Sveshnikova, A.Yu. Sidorenkov, A.A. Silaev, A.A. Silaev, A.V. Skurikhin, M. Slunicka, A.V. Sokolov, V.P. Sulakov, V.A. Tabolenko, A.B. Tanaev, B.A. Tarashansky, L.G. Tkachev, A.V. Tkachenko, M. Tluczykont, O.L. Fedorov, D. Horns, C. Spiering, I.I. Yashin. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **83**, 951 (2019). <https://doi.org/10.3103/S1062873819080100>
- [4] A.A. Bogdanov, E.E. Kholupenko, Yu.V. Tuboltsev, Yu.V. Chichagov. *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, **57** (1–2), 13 (2020). <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0002>
- [5] Е.Е. Холупенко, А.М. Красильщиков, Д.В. Бадмаев, А.А. Богданов, Ю.В. Тубольцев, Ю.В. Чичагов, А.С. Антонов, Д.О. Кулешов, Е.М. Хилькевич. *ЖТФ*, **90** (6), 925 (2020). [E.E. Kholupenko, A.M. Krassilchtchikov, D.V. Badmaev, A.A. Bogdanov, Yu.V. Tuboltsev, Yu.V. Chichagov, A.S. Antonov, D.O. Kuleshov, E.M. Khil'kevich. *Tech. Phys.*, **65** (6), 886 (2020).] <https://doi.org/10.1134/S1063784220060158>
- [6] Электронный ресурс. PLS Series Datasheet https://www.picoquant.com/images/uploads/downloads/pls_series.pdf
- [7] Электронный ресурс. OnSemi J-Series SiPM Sensors Datasheet <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MICROJ-SERIES-D.PDF>
- [8] Электронный ресурс. Hamamatsu VUV-MPPC 4th generation (VUV4) Datasheet [https://hamamatsu.su/files/uploads/pdf/3_mppc/s13370_vuv4_mppc_b_\(1\).pdf](https://hamamatsu.su/files/uploads/pdf/3_mppc/s13370_vuv4_mppc_b_(1).pdf)