

Калибровка матрицы кремниевых фотоумножителей камеры прототипа малого широкоугольного телескопа SIT

А. А. Аминова^{1,*}, А. В. Пантюхин^{1,†}, Д. А. Подгрудков^{1,2,‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, НИИЯФ МГУ, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Поступила в редакцию 30.05.2023; подписана в печать 28.07.2023)

Прототип широкоугольного черенковского телескопа (Small Imaging Telescope, SIT) входит в состав астрофизического комплекса TAIGA, расположенного в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия), в 50 км от озера Байкал. Особенностью прототипа является использование в качестве чувствительных элементов кремниевых фотоумножителей (КФУ). В статье приведены результаты калибровки камеры прототипа в контексте поиска зависимости «число фотоэлектронов–показания АЦП» при разных температурах и значениях напряжения для индивидуальных КФУ. Калибровка произведена на основе данных, полученных телескопом.

PACS: 29.40.Ka, 41.60.Bq, 98.70.Rz, 96.50.S

УДК: 524.1, 53.08

Ключевые слова: кремниевые фотоумножители, черенковские детекторы, космические лучи, гамма-астрономия.

ВВЕДЕНИЕ

Один из классов наземных приборов, работающих в гамма-диапазоне, — черенковские детекторы. Большинство таких телескопов имеют малый угол обзора, а черенковское излучение от широких атмосферных ливней (ШАЛ) регистрируется вблизи оси ливня и обладает короткой длительностью. Наблюдения возможны только в тех случаях, когда известно направление, с которого придет излучение, или если регистрируется событие, случайно попавшее в поле зрения телескопа.

Увеличивая угол обзора, можно покрыть большую площадь небесной сферы. Значит, пропадает необходимость нацеливаться на определенный источник. Но для определения типа первичной частицы стандартными методиками необходимо большое угловое разрешение. На покрытие всей небесной сферы потребуется огромное число пикселей, каждый из которых в современных черенковских телескопах представляет собой фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Такая установка будет иметь большой размер и потреблять большое количество энергии.

Прототипом широкоугольного телескопа является Small Imaging Telescope (SIT). Помимо широкого угла, особенностью аппарата является использование в качестве пикселей кремниевых фотоумножителей (КФУ), которые, в сравнении с обычными фотоумножителями, более компактны и менее энергозатратны. У КФУ есть недостатки: сильная зависимость коэффициента усиления от температуры и перенапряжения, которая индивидуальна для каждого отдельного КФУ.

В настоящей работе рассмотрен метод калибровки прототипа телескопа SIT в контексте поиска коэффициента усиления — получения зависимости «число фотоэлектронов — показания АЦП» при разных температурах и значениях перенапряжения на КФУ.

1. ПРОТОТИП МАЛОГО ШИРОКОУГОЛЬНОГО ТЕЛЕСКОПА SIT

Прототип широкоугольного телескопа SIT входит в состав астрофизического комплекса TAIGA [1, 2]. Телескоп подключен к системе сбора данных и синхронизации массива TAIGA-HiSCORE и рассчитан, в том числе на совместную с ним работу [3].

Оптическая система прототипа представляет собой упрощенную систему Шмидта без пластины-корректора с углом обзора 8–10 градусов и входным окном с эффективной площадью 0.1 м². В качестве корпуса телескопа используется стандартный контейнер массива TAIGA-HiSCORE: металлический ящик размерами 1×1×1 м³ с защитной крышкой на дистанционном управлении [4]. Помимо камеры, внутри расположена вся необходимая для работы установки электроника [5].

Камера прототипа состоит из 49 кремниевых фотоумножителей SensL MicroFC-SMTPA-60035 [6]. У этого типа фотоумножителей присутствует быстрый выход, а чувствительная область имеет размеры 6×6 мм². Камера матрицы собрана из семи сегментных плат — по 7 умножителей на каждой. Выход каждого КФУ подключен к двухступенчатому преусилителю. Первая ступень работает как преобразователь тока в напряжение. Вторая используется для передачи сигнала через 50-омный микрокоаксиальный кабель к системе сбора данных. Полуширина одиночного фотоэлектронного импульса составляет примерно 20 нс,

* amineva.aa19@physics.msu.ru

† pantiukhin.av19@physics.msu.ru

‡ d.a.podgrudkov@physics.msu.ru

а амплитуда при максимальном усилении (5×10^6) составляет около 30 мВ. На каждой плате также установлен датчик температуры, а каждая линия питания кремниевого фотоумножителя имеет пару АЦП-ЦАП преобразователей для постоянного контроля и управления усилением каждого КФУ.

Сигнал с кремниевых фотоумножителей оцифровывается при помощи двух 40-мегагерцовых АЦП Analog Devices AD9203ARU [7], работающих параллельно с эффективной частотой 80 МГц, и подается на линию задержки. При срабатывании триггера система записывает примерно 10 мкс данных, включая около 1 мкс до срабатывания триггера — порядка 700 относительных единиц времени или шагов оцифровки сигнала (бинов), каждый из которых длится 12.5 нс. На рисунке 1 представлены сигналы в каждом из каналов в зависимости от времени. В конце каждой записи на матрицу подается искусственный сигнал — синхроимпульс. Он нужен для синхронизации работы всех каналов. Для задачи калибровки синхроимпульс не используется, поэтому последние 50 бинов в канале для каждого события не рассматривались.

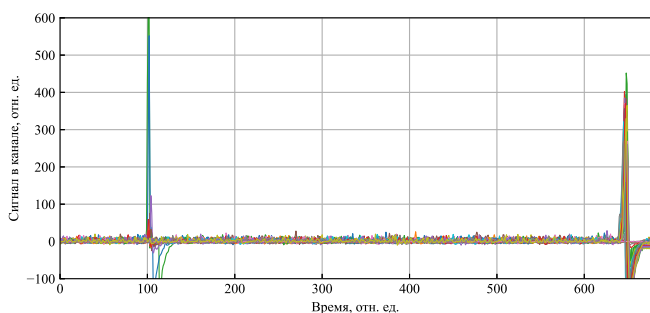


Рис. 1. Пример выходных сигналов от каждого из 49 КФУ (событие № 5723620, один цвет соответствует одному каналу)

Кроме того, из-за особенностей организации буфера данных, информация в первых двух-трех бинах может быть недостоверной. Они также исключались из рассмотрения.

Размер массива, записанного в один файл, определяется общим числом каналов и длиной записи. Всего у детектора 64 канала, из них 49 несущих информацию с детектора, а остальные 15 — служебные.

Также ведется запись телеметрической информации о состоянии детектора: температура внутри блока электроники и блока мозаики, напряжение питания, напряжение на матрице, токи потребления и средний ток, стекающий с матрицы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Прототип начал работу в сентябре 2019 года [8]. Измерения проводятся в ясные безлунные ночи. В период

с сентября 2019 по май 2022 года было зарегистрировано 7.3 миллиона триггерных срабатываний, однако из-за системных сбоев количество корректно записанных событий составляет около 6 миллионов.

Измерения проводились при разных температурах и напряжениях на КФУ. За весь период измерений температура изменялась в диапазоне от -27 до $+21^\circ\text{C}$, а напряжение — от 25.72 до 28.78 В. Напряжение изменялось в целях подбора оптимального коэффициента усиления и для изучения работы КФУ в разных условиях. Температура изменялась из-за слабой системы термостабилизации.

Известно, что коэффициент усиления КФУ зависит от температуры T и перенапряжения U_{over} на нем. Перенапряжение — разность между напряжением U , подаваемым на КФУ, и напряжением пробоя U_{br} (характеристика КФУ, см. ниже):

$$U_{\text{over}}(T, U) = U - U_{\text{br}}(T). \quad (1)$$

В рамках поставленной задачи нельзя определить перенапряжение U_{over} достаточно точно: могут наблюдаться падения подаваемого напряжения на элементах схемы, зависимость напряжения пробоя U_{br} от внешних условий. Поэтому была получена зависимость коэффициента усиления КФУ от температуры и напряжения, которые снимались встроенными датчиками.

3. КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОУМНОЖИТЕЛИ

В качестве камеры прототипа используются кремниевые фотоумножители MicroFC-SMTPA-60035 — датчики, решающие задачу обнаружения, синхронизации и количественной оценки сигналов при слабом освещении вплоть до однофотонного режима. Детектор работает при малом напряжении, является нечувствительным к магнитным полям, обладает механической прочностью.

КФУ — плотный массив лавинных фотодиодов (микроячеек), работающих в гейгеровском режиме. Типичный КФУ имеет плотность от сотен до нескольких тысяч микроячеек на квадратный миллиметр. Фототоки от каждого из диодов суммируются и формируют квазианалоговый выходной сигнал, который дает информацию о величине мгновенного потока фотонов.

Одной из важных характеристик КФУ является напряжение пробоя U_{br} — такое напряжение, при котором напряженность электрического поля в обедненной области полупроводника достаточна, чтобы создать гейгеровский разряд. Обычно КФУ работают при напряжениях, которые на 10–25% выше, чем U_{br} .

Основным источником шума в КФУ является скорость темнового счета. Она связана с тепловыми электронами, возникающими в чувствительной области и вызывающими срабатывание микроячеек, и является функцией от перенапряжения и температуры. Каждый темновой отсчет — результат появления термоэлектрона, и сигналы от такого электрона и от зарегистри-

рованного фотона идентичны. Таким образом, это явление — источник шумов при однофотонном режиме работы. Для непрерывных измерений иногда удобнее рассматривать этот вклад как «темновой ток», а его значение можно найти в таблицах от производителя. Скорость темнового счета увеличивается с увеличением перенапряжения U_{over} и с повышением температуры.

Дополнительный шум возникает из-за оптической связи между ячейками — из-за «кросс-токов». Они также зависят от перенапряжения U_{over} .

Во время лавины в микроячейке ускоренные носители заряда могут излучать фотоны [9], которые, в свою очередь, могут вызвать вторичную лавину в соседней микроячейке. Обычно вторичные фотоны по энергии находятся в ближней инфракрасной (ИК) области [10], поэтому могут перемещаться через кремний на значительные расстояния. На один электрон приходится 2×10^{-5} вторичных ИК фотонов. Они могут перемещаться либо по направлению к соседней микроячейке, либо отражаясь от материала входного окна (полимер или стекло), либо отражаясь от нижней части кремниевой подложки.

Кросс-токи определяются вероятностью того, что оптический фотон от лавины в одной микроячейке вызовет лавину во второй. Процесс происходит практически мгновенно, поэтому один фотон может вызвать сигнал, эквивалентный 2, 3 и более фотонам. Вклад кросс-токов увеличивается с увеличением перенапряжения U_{over} . Значит, необходимо искать баланс между эффективностью регистрации фотонов (увеличивается с ростом перенапряжения) и значениями кросс-токов (уменьшаются с уменьшением перенапряжения).

Вероятность возникновения кросс-токов сильно зависит и от типа конкретного КФУ. В некоторых случаях она может достигать значений порядка 50% [11].

4. КАЛИБРОВКА КФУ КАМЕРЫ ПРОТОТИПА

4.1. Построение амплитудного распределения

Формула перевода значений, записанных в условных единицах АЦП, в значение тока, протекающего через КФУ во время регистрации события, выглядит следующим образом:

$$I = 2 \cdot \frac{n \cdot x}{a \cdot R}, \quad (2)$$

где I — ток в мА, протекающий через КФУ при регистрации события, $n = 2$ мВ — шаг АЦП, x — значение, снятое с выхода АЦП, $a = -30$ — коэффициент усиления операционного усилителя, стоящего перед АЦП, $R = 50$ Ом — сопротивление резистора, с которого снимается напряжение.

Нельзя гарантировать, что форма импульса тока не зависит от температуры и перенапряжения. Поэтому необходим переход от тока к зарядам с учетом постоянной компоненты — значения, записанные в канале,

могут колебаться не относительно нуля. Учет постоянной компоненты производился в два этапа: вычитание медианного значения данных в канале из каждого значения в этом канале и приведение наиболее вероятного значения в канале к нулевому. Далее следовало само интегрирование импульсов, которое производилось с помощью метода трапеций. В результате получался набор значений зарядов, который использовался в дальнейшем для построения амплитудного распределения.

Пример амплитудного распределения для температуры -26°C и напряжения 26.60 В (число событий — 4995) представлен на рисунке 2. На графике хорошо видны пики, амплитуды которых уменьшаются по мере удаления от нуля. Из амплитудных распределений можно получить два важных параметра: расстояние между пиками d_m , которое связано со значением коэффициента усиления при данных температуре и напряжении, и амплитуды пиков A_i ($i = 1, 2, \dots$), которые помогут оценить величину кросс-токов.

4.2. Аппроксимация амплитудного распределения

В силу того, что при построении амплитудных распределений производилась работа с температурами и напряжениями, количество событий для которых велико, отдельные пики описывались распределением Гаусса, а все распределение в целом — их суммой. Связь параметров распределений обоснована с точки зрения принципа работы КФУ. Расстояние между пиками соответствует числу вторичных электронов, входящих на один фотоэлектрон, а, значит, это расстояние фиксировано. Нулевой пик является шумовым, его природа отлична от природы последующих пиков, и поэтому стандартное отклонение для него отличается от отклонений для остальных пиков, которые приняты одинаковыми в силу того, что все они соответствуют вариациям коэффициента усиления. Положение нулевого пика, хотя ранее и производилось выравнивание, все равно отличается от нуля. Таким образом, для аппроксимации использовалась следующая формула:

$$P(x) = \frac{A_0}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_0^2}\right\} + \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left\{-\frac{(x-m-i \cdot d_m)^2}{2\sigma_1^2}\right\}. \quad (3)$$

Здесь A_0 — амплитуда нулевого (шумового) пика, вызванного флуктуациями тока, протекающего через АЦП, вне фотоэлектронных пиков, A_i — амплитуды 1, 2, ..., N пиков, σ_0 — стандартное отклонение для нулевого пика, σ_1 — стандартные отклонения 1, 2, ..., N пиков, m — положение, соответствующее максимуму нулевого пика, i — номер пика ($i = 1, 2, \dots, N$), d_m — расстояние между пиками.

Процесс подбора параметров аппроксимации был разделен на два этапа, чтобы уменьшить количество

свободных параметров для повышения устойчивости процедуры. На первом этапе амплитуды пиков связывались через константу, а все остальные параметры распределения являлись свободными и записывались. Далее эти параметры, уже как константы, использовались для подбора амплитуд, которые уже не были связаны друг с другом. Результат аппроксимации распределения для одной пары температура-напряжение представлен на рис. 2.

Уже на этом этапе можно говорить о коэффициенте усиления — он напрямую связан с расстоянием между пиками. На рис. 2 это расстояние приведено в единицах заряда и равно $d_m = 0.3$ пКл. Если разделить это значение на заряд электрона, можно получить коэффициент усиления в числе вторичных электронов, приходящихся на один первичный:

$$K = \frac{d_m}{e}, \quad (4)$$

где d_m — расстояние между пиками, e — заряд электрона.

В таком случае, для амплитудного распределения, изображенного на рис. 2, коэффициент усиления:

$$K = \frac{0.3 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 2.02 \cdot 10^6, \quad (5)$$

что примерно соответствует паспортным данным КФУ [6].

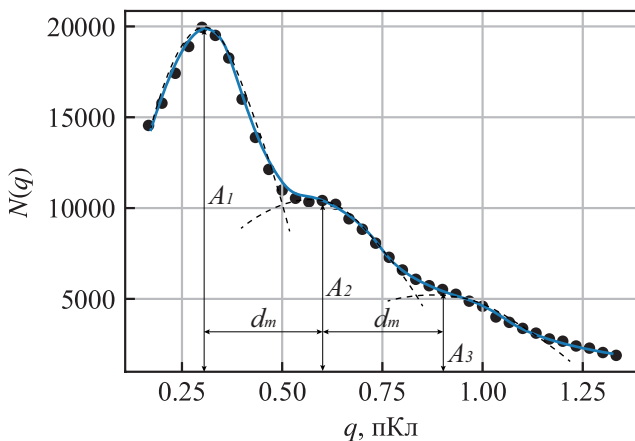


Рис. 2. Аппроксимация амплитудного распределения при $T = -26^\circ\text{C}$, $U = 26.60$ В и 4995 событиях (точки — данные, синяя кривая — аппроксимация, пунктир — схематическое изображение пиков)

4.3. Зависимость коэффициента усиления от напряжения

После того, как были получены значения коэффициента усиления для разных пар температура-напряжение, рассматривались некоторые важные зави-

симости. Первая из них — зависимость коэффициента усиления K от напряжения U при фиксированной температуре — представлена на рисунке 3. Согласно документации КФУ, эта зависимость — линейная, что и было заложено в основу аппроксимации. Из графика видно, что коэффициент усиления растет с увеличением напряжения. Напряжение, при котором коэффициент усиления достигает нулевого значения, и есть напряжение пробоя КФУ U_{br} .

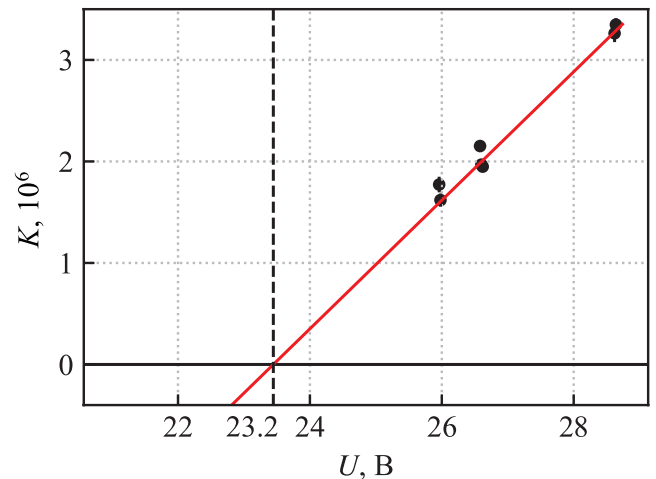


Рис. 3. Аппроксимация зависимости коэффициента усиления от напряжения при $T = -21^\circ\text{C}$ для 1 канала. Напряжение пробоя $U_{br} = 23.20$ В

Наклон прямой отвечает за изменение коэффициента усиления с напряжением dK/dU . Обе величины имеют характерную зависимость от температуры.

4.4. Температурные зависимости dK/dU и U_{br}

На рис. 4 представлена зависимость изменения коэффициента усиления с напряжением dK/dU от температуры T для первого канала. Из графика видно, что эта зависимость слабая. Согласно документации, именно это и должно наблюдаться. Для других каналов наблюдается такая же слабая зависимость.

Изменение напряжения пробоя с температурой в документации КФУ дается следующим выражением:

$$U_{br}(T) = U_{br}(T = 22^\circ\text{C}) + 0.0215 \cdot \frac{\text{В}}{^\circ\text{C}} \cdot (T - 22^\circ\text{C}), \quad (6)$$

где $U_{br} \in [24.2, 24.8]$ В — напряжение пробоя при температуре 22°C .

Таким образом, имеем линейную зависимость напряжения пробоя U_{br} от температуры. Для первого канала она представлена на рис. 5. Синим отмечена область, в которую, согласно документации, должна попасть полученная зависимость. Видно, что данные из документации, продолженные на рабочий диапазон телескопа,

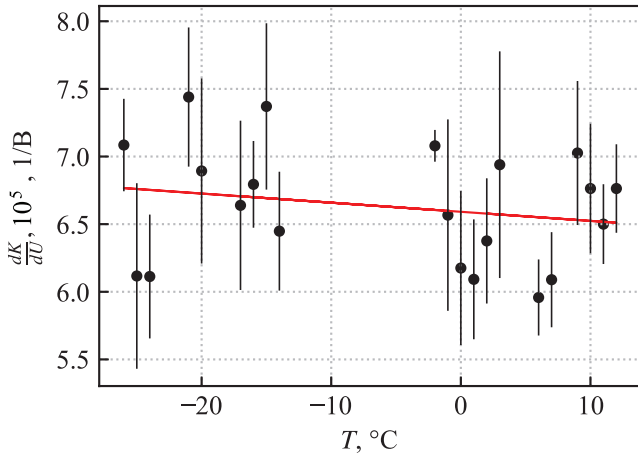


Рис. 4. Зависимость изменения коэффициента усиления с напряжением dK/dU от температуры для первого канала

хорошо согласуются с тем, что было получено при обработке. Напряжение пробоя U_{br} линейно увеличивается с температурой.

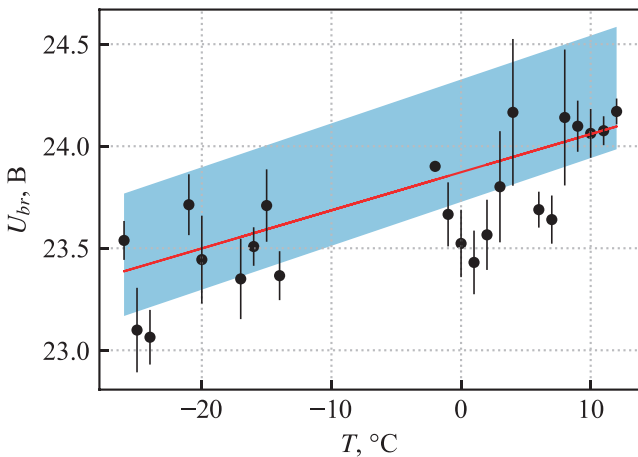


Рис. 5. Аппроксимация зависимости напряжения пробоя от температуры для первого канала (точки — данные, красная линия — аппроксимация) и данные из документации (синяя область)

Это справедливо для всех каналов. Значения для разных каналов различаются между собой, но в целом напряжение пробоя U_{br} попадает в область, которая предполагается документацией. Отличия могли возникнуть из-за погрешностей измерения и падения напряжения на элементах схемы.

4.5. Зависимость коэффициента усиления от температуры

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента усиления K от температуры при напряжении

26.00 В. Из графика понятно, что коэффициент усиления уменьшается с ростом температуры. Это связано с ростом напряжения пробоя U_{br} при увеличении температуры, и, следовательно, уменьшением перенапряжения U_{over} . Если бы коэффициент усиления определялся только этим фактором (перенапряжением U_{over}), он был бы линеен по температуре. Но так как есть, хотя и слабая, зависимость коэффициента усиления по напряжению dK/dU от температуры (см. рис. 4), картина становится более сложной. Более того, существует температурная зависимость и у АЦП, измеряющих напряжение на элементах. Значит, их показания имеют погрешность, тоже зависящую от температуры. Несмотря на то, что в блоке электроники стоят несколько датчиков, температуру каждого элемента электроники определить не представляется возможным, так как у АЦП нет встроенных термометров, а температурное распределение выглядит сложно и меняется во времени. Следовательно, зависимость коэффициента усиления от температуры при фиксированном измеряемом напряжении не описывается простой функцией.

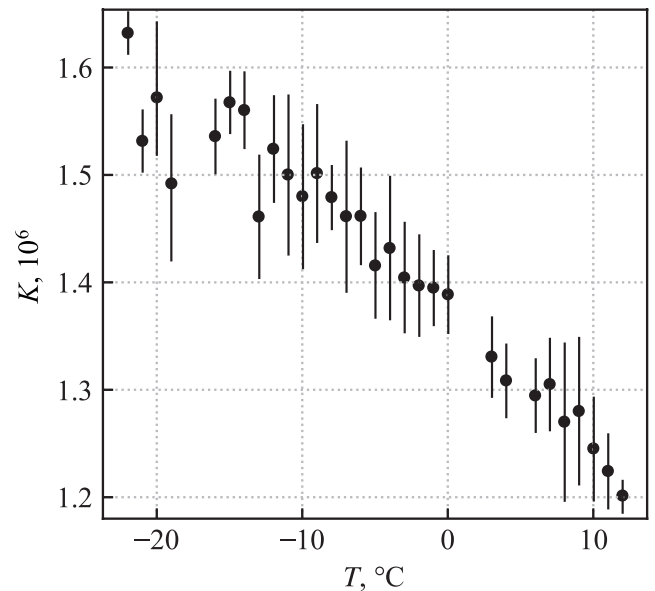


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления от температуры при $U = 26.00$ В

4.6. Общая зависимость коэффициента усиления от температуры и напряжения

На основе приведенных ранее зависимостей было получено общее выражение для коэффициента усиления:

$$K(T, U) = \frac{dK}{dU}(T) \cdot (U - U_{br}(T)). \quad (7)$$

Так как зависимость коэффициента усиления по напряжению от температуры линейна, она была представ-

лена в следующем виде:

$$\frac{dK}{dU}(T) = C + D \cdot T. \quad (8)$$

Аналогично, напряжение пробоя в рабочей области прототипа линейно меняется с температурой, поэтому было представлено в виде:

$$U_{br}(T) = A + B \cdot T. \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) при подстановке в (7) была получена следующая полиномиальная зависимость:

$$K(T, U) = c_{00} + c_{10} \cdot T + c_{01} \cdot U + c_{11} \cdot U \cdot T + c_{20} \cdot T^2, \quad (10)$$

где коэффициенты c_{ij} выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} c_{00} = -A \cdot C; \\ c_{10} = -(A \cdot D + B \cdot C); \\ c_{01} = C; \\ c_{11} = D; \\ c_{20} = -B \cdot D \end{cases} \quad (11)$$

При использовании этой полиномиальной зависимости в качестве аппроксимирующей функции, для каждого канала была получена зависимость коэффициента усиления от температуры и напряжения. Пример такой аппроксимации изображен на рис. 7. Параметры полинома для этого случая имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \{c_{00}, c_{10}, c_{01}, c_{11}, c_{20}\} = \\ = \{-1.56 \cdot 10^7, -1.79 \cdot 10^4, 6.56 \cdot 10^5, 2.83 \cdot 10^2, -4.81\} \end{aligned} \quad (12)$$

Получив такую зависимость, можно определить значение коэффициента усиления, задав любую пару температура-напряжение. Эта процедура была проведена для каждого канала.

5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ФОТОНОВ

Для того, чтобы в контексте коэффициента усиления перейти от соотношения «фотоэлектрон — число вторичных электронов» к соотношению «число прилетевших фотонов — число вторичных электронов», необходимо знать зависимость квантовой эффективности (PDE) от перенапряжения U_{over} . Этот параметр выражается в процентах и показывает, насколько эффективно фотоны регистрируются детектором.

Зависимость PDE от перенапряжения представлена в документации КФУ в виде таблицы. Для пересчета при любом перенапряжении табличные значения были аппроксимированы логарифмической функцией:

$$PDE_i = G + H \cdot \ln\left(\frac{U_{over}(T, U)}{1 \text{ В}}\right), \quad (13)$$

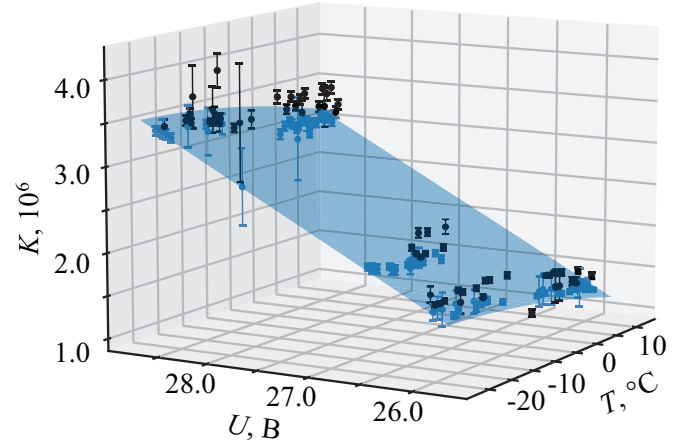


Рис. 7. Аппроксимация зависимости $K(T, U)$ полиномом для второго канала

где PDE — вероятность регистрации фотона; $G = 0.1993$, $H = 0.1319$ — коэффициенты, подобранные с помощью аппроксимации, $U_{over}(T, U)$ — перенапряжение (см. (1) и (9)), определяемое индивидуально для каждого КФУ.

6. КРОСС-ТОКИ

Зависимость кросс-токов от температуры и напряжения можно получить из соотношения амплитуд пиков. Она описывается двумя параметрами: λ — среднее по Пуассону число сработавших от пришедших извне фотонов или термоэлектронов микроячеек, p — среднее по Пуассону число ячеек, которые сработали от вторичных фотонов, образованных в ходе лавины в соседних ячейках.

Получить аналитическую формулу для описания кросс-токов не представилось возможным из-за большого количества процессов, которые в ней должны быть учтены [12]. Поэтому для аппроксимации амплитуд пиков было проведено моделирование регистрации фотонов установкой. Качественно процесс можно описать следующим образом:

1. С помощью распределения Пуассона со средним λ рассчитывается число микроячеек, сработавших от фотоэлектронов или термоэлектронов при регистрации отдельного пика в развертке выходного сигнала КФУ (см. 1);
2. Каждая сработавшая микроячейка рассматривается по порядку по одной.
3. При этом каждая микроячейка может испустить вторичные фотоны, которые будут зарегистрированы другими микроячейками. Этот процесс происходит с вероятностью, распределенной по Пуассону со средним p , и увеличивает общее количество сработавших ячеек.

4. Счетчик амплитуды события увеличивается на 1, сработавшая ячейка исключается из дальнейшего рассмотрения. Берется следующая.
5. Процесс продолжается до исчерпания количества сработавших ячеек. Полученное значение амплитуды считается амплитудой зарядового пика.
6. Процедура моделирования повторяется до тех пор, пока не набирается необходимая для аппроксимации статистика. Число запусков программы определяется числом событий, зарегистрированных при данных температуре и напряжении.

Например, для температуры -13°C и напряжения 25.72 В таким методом было получено следующее значение параметра: $p = 0.1$.

Если верить документации, значение вероятности кросс-токов при перенапряжении $U_{\text{over}} = 5$ В составляет 35%. Поэтому при моделировании было выставлено ограничение сверху на параметр p . В результате анализа было получено, что при перенапряжениях больше 4 В вероятность кросс-токов должна быть выше этого ограничения. Для этого типа КФУ отмечено систематическое занижение производителем данных о величине кросс-токов [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы для КФУ камеры прототипа SIT получены индивидуальные зависимости коэффициента усиления от измеряемых на них температуры и напряжения питания. Зависимости согласуются с паспортными, но каждый канал имеет индивидуальные вариации. Кроме того, диапазон температур, при которых осуществлялась работа прототипа, сильно отличается от значений, для которых предоставлены паспортные данные для коэффициента усиления.

На основе документации получена аппроксимация зависимости PDE от перенапряжения U_{over} , с помощью которой можно перейти к изменению PDE с температурой и напряжением на каждом КФУ. Такая зависимость может быть использована для перехода от соотношения «фотоэлектрон — число вторичных электронов» к соотношению «число прилетевших фотонов — число вторичных электронов» для любой пары температура-напряжение.

Получены оценки величин кросс-токов для разных пар температура-напряжение. Вероятность кросс-токов превышает заявленную производителем в документации величину, что подтверждается результатами других исследований. Требуется дополнительный анализ возможной зависимости вероятности кросс-токов от температуры.

-
- [1] Волчугов П.А. // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. 2019. № 4. 1941601.
 - [2] Астапов И.И., Безъязыков П.А., Бланк М. и др. // ЖЭТФ. **161**, № 4. 548. (2022). (I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, M. Blank et al. // ZhETF. **134**. 469. (2022).)
 - [3] Chernov D., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // JINST. **15**. C09062 (2020).
 - [4] Gress O., Astapov I., Budnev N. et al. // NIMA. **845**. 367. (2017).
 - [5] Chernov D., Bovech E., Astapov I. et al. // JPCConf. 2374. id: 012045. (2022).
 - [6] ON Semiconductors // Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive. 2020. www.onsemi.com/pdf/datasheet/microc-series-d.pdf
 - [7] Analog Devices // Product specification. www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9203.pdf
 - [8] Подгрудков Д.А., Бонвеч Е.А., Вайман И.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. **85**, № 4. 541. (2021). (Podgrudkov D.A., Bovech E.A., Vaiman I.V. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. **85**, N 4. 408. (2021).)
 - [9] Newman R. // Phys. Rev. **100**, Iss. 2. 700. (1955).
 - [10] Rech I., Ingargiola A., Spinelli R. et al. // Opt. Express. **16**, N 12. 8381. (2008).
 - [11] Eckert P., Schultz-Coulon H., Shen W. et al. // NIMA. **620**, N 2/3. 217. (2010).
 - [12] Biland A., Bretz T., Buß J. et al. // JINST. **9**. P10012. (2014).
 - [13] Rehbein F., Bretz T., Alfaro R. et al. // arXiv: 2007.02444 [astro-ph.IM]. (2021).

Calibration of a silicon photomultiplier camera matrix for a prototype of a small wide-angle imaging telescope (SIT)

A. A. Amineva^{1,a}, A. V. Pantiukhin^{1,b}, D. A. Podgrudkov^{1,2,c}

¹Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University
Moscow 119191, Russia

E-mail: ^aamineva.aa19@physics.ru, ^bpantiukhin.av19@physics.msu.ru, ^cd.a.podgrudkov@physics.msu.ru

Small Imaging Telescope (SIT) is a part of the TAIGA astrophysical complex located in the Tunka Valley (Republic of Buryatia, Russia), 50 km from Lake Baikal. The main feature of this prototype is the use of silicon photomultipliers

(SiPM) as the sensitive element of the detection camera. This paper presents the results of the calibration procedure of the prototype camera in the context of the dependence between “the number of photoelectrons and the number of ADC readings” at different temperatures and voltage values for individual SiPMs. The calibration was done using the data obtained by the telescope.

PACS: 29.40.Ka, 41.60.Bq, 98.70.Rz, 96.50.S

Keywords: silicon photomultipliers, cherenkov detectors, cosmic rays, gamma astronomy.

Received 30 May 2023.

Сведения об авторах

1. Аминева Анна Александровна — студентка 4 курса; e-mail: amineva.aa19@physics.ru.
2. Пантюхин Артем Владиславович — студент 4 курса; e-mail: pantiukhin.av19@physics.msu.ru.
3. Подгрудков Дмитрий Аркадьевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: d.a.podgrudkov@physics.msu.ru.