

After-pulsing and cross-talk comparison for KETEK PM1125NS-SB0, Hamamatsu S10362-11-100C and Hamamatsu S13360-3050CS.

1. Abstract

В настоящее время широкое распространение получили кремниевые лавинные фотодиоды (SiPM). Они превосходят фотоэлектронные умножители по квантовой эффективности, размерам и устойчивости к магнитному полю. Однако в силу особенностей строения они имеют большие значения темнового шума, а также имеют дополнительные источники шумов: кроссток и послеимпульсы. Кроме того, эти параметры могут иметь зависимость от температуры. В данной статье производится изучение и сравнение темнового шума, вероятностей кросстока и послеимпульса при различных напряжениях и температурах для двух современных SiPM: Hamamatsu S13360-3050CS и KETEK PM1125NS-SB0 и SiPM предыдущего поколения: Hamamatsu S10362-11-100C. Для нахождения этих параметров производилась offline обработка сигнала посредством аппроксимации импульсов с последующей реконструкцией амплитуды и времени старта. В результате найдено, что при достигнутой точности измерения зависимость от температуры и напряжения имеет только темновой шум, а кроссток и послеимпульсы имеют лишь зависимость от перенапряжения. Измеренная вероятность кросстоков для KETEK PM1125NS-SB0 и Hamamatsu S13360-3050CS при их рабочем напряжении составляет около 6%, что в два раза меньше, чем для Hamamatsu S10362-11-100C. Суммарная вероятность послеимпульсов (быстрая и медленная компонента) для KETEK PM1125NS-SB0 и Hamamatsu S13360-3050CS тоже почти в 2 раза ниже, чем Hamamatsu S10362-11-100C. Частота шумовых импульсов для Hamamatsu S13360-3050CS при температуре 20 °C составляет всего лишь 30 $\kappa\text{Гц}/\text{мм}^2$, против 80 $\kappa\text{Гц}/\text{мм}^2$ для KETEK PM1125NS-SB0.

2. Introduction

ИЯФ СО РАН много лет занимается разработкой установок для рентгеновского досмотра [1]. Данные установки можно использовать в различных областях: досмотр в аэропортах, метро или на предприятиях. До настоящего времени в качестве детектора рентгеновского излучения использовалась многополосковая ионизационная камера повышенного давления (Xe, 15 bar). Однако такой детектор имеет серьезный недостаток - он работает в интегрирующем режиме, поэтому при низких входных потоках частиц шум электроники существенно ухудшает качество получаемых изображений. Другой недостаток - недостаточно высокая эффектив-

ность регистрации фотонов больших энергий. В связи с этим было принято решение перейти на детектор, работающий в режиме прямого счета фотонов на основе SiPM и сцинтиллятора, который может иметь эффективность регистрации $>90\%$.

Основная цель данной работы - измерить вероятности послеимпульсов и кросстоков двух SiPM: KETEK PM1125NS-SB0 и Hamamatsu S13360-3050CS и сравнить их с характеристиками Hamamatsu S10362-11-100C - SiPM предыдущего поколения.

3. Measurement of breakdown voltage

Одной из важных характеристик любого SiPM является напряжение пробоя. Напряжение пробоя V_{BD} - это напряжение, при котором коэффициент усиления равен нулю.

В различных работах было показано, что коэффициент усиления различных SiPM имеет линейную зависимость как от температуры, так и от напряжения. Таким образом, выражение для коэффициента усиления $G(V, T)$ записывается следующим образом [2–5]:

$$G(V, T) = a \cdot V + b \cdot T + c, \quad (1)$$

Из уравнения (3) легко найти напряжение пробоя, приравняв коэффициент усиления к нулю:

$$V_{BD}(T) = \frac{-(b \cdot T + c)}{a} = \frac{dV}{dT} \cdot T + const \quad (2)$$

Для измерения напряжения пробоя и коэффициента усиления была собрана следующая установка (рис. 1). Led Driver по световоду посылает короткую вспышку на SiPM, вырабатывая триггерный сигнал, идущий к АЦП CAEN dt5720a. Сигнал с SiPM проходит через усилитель и поступает в АЦП CAEN dt5720a, который интегрирует сигнал при наличии триггерного сигнала. Полученный зарядовый спектр в режиме on-line поступает на компьютер. Температурная стабилизация обеспечивалась при помощи ПИД-регулятора TPM 101. SiPM был установлен внутри металлической коробки. С одной из сторон размещен вентилятор, который необходим для отвода тепла с Пельтье элемента. Часть вентилятора, расположенная внутри коробки, приклеена к медной пластине. С обратной стороны медной пластины расположен SiPM.

Вычисление напряжения пробоя шло в несколько этапов. Во-первых, сигнал интегрировался в воротах длительность 200 нс ($\approx 5 \cdot \tau$). Интенсивность Led driver

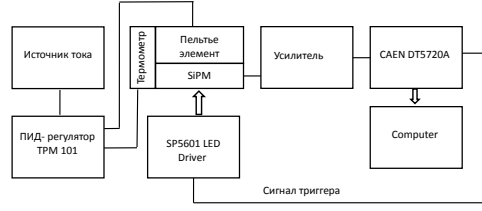


Рис. 1. Схема измерения напряжения пробоя SiPM. Свет из LED Driver регистрируется SiPM, усиливается и оцифровывается DT5720a. Температурная стабилизация обеспечивается ПИД-регулятором. Отклонение температуры от установленной не превышает 1К.

была выставлена так, чтобы в основном не было срабатываний, либо регистрировался 1 фотон. Далее вершины шумового пика и пика от регистрации одиночного фотона аппроксимировались функцией гаусса и находилось среднее и стандартное отклонение. При аппроксимации учитывались вершины пиков, т.к. послеимпульсы искажают хвосты распределения. Затем вычислялось расстояние Δ между 0-м и 1-м пиком. Расстояния между 1-м и 2-м, 2-м и 3-м и т.д. пиками не учитывались, т.к. при увеличении номера пика его среднее положение все более будет искажаться от истинного из-за наличия послеимпульсов. Пример зарядового спектра изображен на рис. 2. При измерениях погрешность выставления напряжения ΔV оценивалась в 0.01 В, а погрешность по температуре ΔT оценивалась как минимальный шаг по температуре 1 К, деленный на $\sqrt{12}$.

Величина Δ связана с коэффициентом усиления следующим образом:

$$G = \Delta \cdot ADC_{\text{conversion rate}} / \text{charge of electron},$$

где $ADC_{\text{conversion rate}} [Kл/(мВ \cdot с)]$ - коэффициент конверсии. Для нахождения коэффициента конверсии меандр с генератора подавался на вход CAEN dt5720a через тестовый вход усилителя, нагруженный на емкость $C = 1нФ$. После калибровки тракта все измерения $G(V, T)$ аппроксимируются зависимостью (3), чтобы найти параметры a , b и c . Далее по формуле (2) находится напряжение пробоя от температуры.

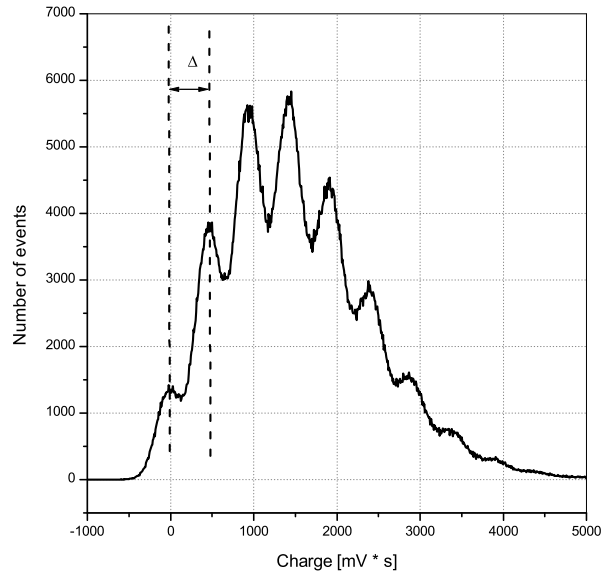


Рис. 2. Спектр SiPM KETEK PM3325NP-SB0 Pin при напряжении 23.4 В и температуре 265 К при облучении светодиодом. Штриховыми линиями показано положение пиков. Время интегрирования 1 мкс.

4. Algorithm of finding cross-talk and after-pulsing probabilities

4.1. Theory

Существует несколько алгоритмов нахождения вероятностей кросстока. Один из них описан в [6], fig. 12. Идея заключается в измерении частоты темнового тока при различных порогах. Вероятность кросстока можно найти как отношение частот при пороге 1.5 photoelectron and 0.5 photoelectron:

$$P_{X-talk} = \nu_{1.5pe} / \nu_{0.5pe} \quad (3)$$

Однако этот метод имеет существенный недостаток: послеимпульсы неотличимы от кросстока, если первые выше установленного порога. Кроме того, такой алгоритм не использует информацию о форме сигнала, что делает зависимость частоты от порога более размытой и усложняет нахождение величины $\nu_{1.5pe}$.

Более сложный алгоритм должен использовать информацию о форме сигнала. Здесь существуют два подхода к обработке сигнала: обратная свертка [7] и аппроксимация исходного сигнала [8–10]. В данной работе мы решили использовать метод аппроксимации сигнала, т.к. он более детально описан в вышеупомянутых работах.

В процессе аппроксимации сигнала мы получим набор амплитуд и времени начала сигнала. Используя эту информацию, можно восстановить постоянную времени и вероятность послеимпульсов.

Послеимпульс - срабатывание ячейки, происходящее через некоторый промежуток времени после предыдущего срабатывания ячейки. Причина появления послеимпульсов заключается в захвате электронов в ловушки во время лавины с их последующим высвобождением через промежуток времени, обычно длящийся от нескольких наносекунд до нескольких микросекунд [6]. После срабатывания первичного сигнала напряжение на ячейке уменьшится до напряжения пробоя и далее будет восстанавливаться к исходному значению по экспоненциальному закону:

$$V_{current} = V_{bias} \cdot (1 - \exp(-\Delta t / \tau_{rec})), \quad (4)$$

где V_{bias} - рабочее напряжение SiPM, τ_{rec} - время восстановления ячейки.

Существует несколько процессов, которые могут вызвать повторное срабатывание ячейки. Во-первых, это послеимпульсы. Из-за наличия различных физических механизмов образования электронных ловушек существуют два вида послеимпульсов: с быстрой и медленной компонентой [8–10]. Во-вторых, повторное срабатывание ячейки могут вызвать темновые токи. Каждый из этих трех процессов имеет экспоненциальное время распределения со своим собственным временем τ :

$$f(\Delta t) = \frac{1}{\tau} \cdot \exp(-\Delta t / \tau), \quad (5)$$

где τ - среднее время, проходящее между двумя импульсами при рассмотрении лишь одного из вышеперечисленных эффектов. В реальности каждый из этих процессов может приводить к срабатыванию ячейки. Поэтому, измерив расстояния между сигналами и аппроксимировав плотность вероятности временных интервалов аналитической функцией можно найти постоянные времени и вероятности процессов, приводящих к срабатыванию.

Поскольку мы интересуемся плотностью временных интервалов, то необходимо узнать вероятность $P(t)$ того, что на участке от 0 до t не должно быть импульсов, а на участке от t до $t + \delta t$ должен произойти один импульс.

Если рассматривать лишь один экспоненциальный процесс, то эта вероятность есть $P_{exp}(t) = \nu \cdot e^{-t \cdot \nu} \cdot \delta t$.

Выведем плотность вероятности для временных интервалов, если в ячейке могут происходить послеимпульсы или темновые импульсы. Для начала рассмотрим случай, когда имеются послеимпульсы только одного типа, происходящие с вероятностью p и временем ν . Темновые импульсы, как и послеимпульсы имеют экспоненциальное распределение (5). Поскольку темновые импульсы не зависят от послеимпульсов, то искомую вероятность $P(t)$ можно записать следующим образом:

$$P(t) = P\{\text{нет послеимпульсов от } 0 \text{ до } t + \delta t\} \cdot P\{\text{есть темновой импульс от } t \text{ до } t + \delta t\} + \quad (6)$$

$$P\{\text{есть послеимпульс от } t \text{ до } t + \delta t\} \cdot P\{\text{нет темнового импульса от } 0 \text{ до } t + \delta t\}$$

Вклад каждого из процессов будет следующий:

$$\begin{aligned} P\{\text{нет послеимпульсов от } 0 \text{ до } t + \delta t\} &= (1 - p) + p \cdot e^{-\nu \cdot t} \\ P\{\text{есть темновой импульс от } t \text{ до } t + \delta t\} &= (\nu_{dc} \cdot e^{-\nu_{dc} \cdot t}) \cdot \delta t \\ P\{\text{есть послеимпульс от } t \text{ до } t + \delta t\} &= p \cdot (\nu \cdot e^{-\nu \cdot t}) \cdot \delta t \\ P\{\text{нет темнового импульса от } 0 \text{ до } t + \delta t\} &= e^{-\nu_{dc} \cdot t} \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, подставив значения вероятностей из (7) в (6) и сократив итоговое выражение на δt , получим плотность вероятности временных интервалов:

$$f(t) = p \cdot (\nu + \nu_{dc}) \cdot e^{-(\nu + \nu_{dc}) \cdot t} + (1 - p) \cdot \nu_{dc} \cdot e^{-\nu_{dc} \cdot t} \quad (8)$$

Стоит отметить, что аналогичная формула приведена в [10], страница 8, однако допущена ошибка в знаке между слагаемыми.

В итоге при учете быстрых и медленных послеимпульсов и темновых токов плотность вероятности распределения временных интервалов запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} f(t) &= p_s \cdot p_f \cdot (\nu_s + \nu_f + \nu_{dc}) \cdot e^{-(\nu_s + \nu_f + \nu_{dc}) \cdot t} + \\ &\quad p_s \cdot (1 - p_f) \cdot (\nu_s + \nu_{dc}) \cdot e^{-(\nu_s + \nu_{dc}) \cdot t} + \\ &\quad p_f \cdot (1 - p_s) \cdot (\nu_f + \nu_{dc}) \cdot e^{-(\nu_f + \nu_{dc}) \cdot t} + \\ &\quad (1 - p_s) \cdot (1 - p_f) \cdot \nu_{dc} \cdot e^{-\nu_{dc} \cdot t} \end{aligned} \quad (9)$$

Формула 9 действительна лишь в том случае, если измеряются расстояния между сигналами, вызванными срабатыванием одной ячейки. Сигналы, вызванные одновременным срабатыванием двух и более ячеек (т.к. из-за кросстока) не должны рассматриваться при нахождении плотности временных интервалов.

В статье [9] приведен другой результат для плотности временных интервалов, отличный от полученного в данной работе, т.к. они предполагали, что имеется еще один процесс - delayed cross-talk. Однако на практике вероятность delayed cross-talk значительно ниже, чем вероятность direct cross-talk и в наших измерениях мы его не наблюдали.

Про другие процессы, которые вызывают срабатывание ячейки можно найти в [11].

Получив формулу для плотности вероятности временных интервалов 9, перейдем к нахождению экспериментального спектра.

4.2. Signal finder

Экспериментальная установка аналогична той, что представлена на рис.1. Отличие состоит в том, что на этот раз led driver был выключен и данные в сыром формате записывались на компьютер посредством осциллографа Tektronix DPO 4104B. При записи триггер был установлен на уровень шумов. Длина непрерывной записи была 5MS при частоте оцифровки в 5GHz. Для каждом напряжении и температуре на SiPM было записано 1000 файлов, т.е. 1 секунда сигнала.

Сигнал с SiMP можно представить как сумму одноэлектронных импульсов $Signal_{1e}(t - t_i)$ со случайной амплитудой A_i и временем возникновения t_i :

$$V(t) = \sum_{i=0}^N A_i \cdot Signal_{1e}(t - t_i) + V_0 \quad (10)$$

Форма одноэлектронного импульса находится из записанного сигнала и аппроксимируется аналитической функцией. Записанный сигнал обрабатывается по специальному алгоритму, который находил одноэлектронные импульсы без примеси послеимпульсов и усреднял их. Отбрасывать сигналы с послеимпульсами необходимо для нахождения корректной формы сигнала. Форма одноэлектронного спектра для различных SiPM показана на рис.3. Форма сигнала была померена при различных значениях перенапряжения (от 2 до 4.5 V) и температуры (от -8 до 27 C°), но оказалась практически неизменной.

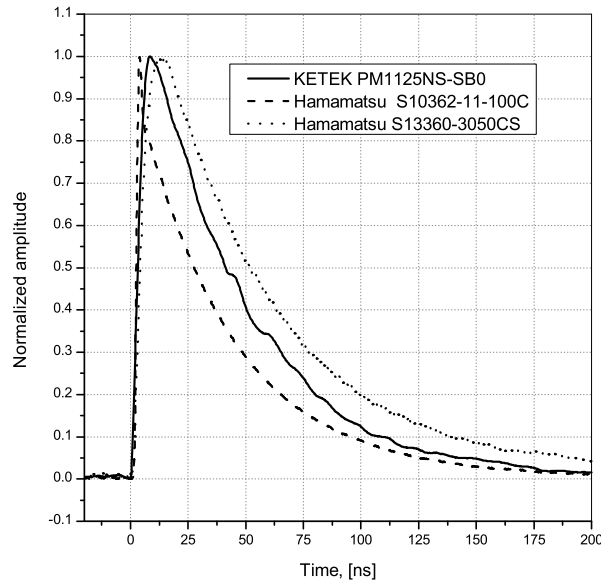


Рис. 3. Форма одноэлектронных сигналов с различных SiPM. Рассмотрены лишь сигналы без примеси послеимпульсов.

Далее одноэлектронные импульсы аппроксимировались функцией (12), полученной от свертки функции (11) с функцией гаусса.

$$V(t) = A \cdot \exp \left[-\frac{t - t_0}{\tau_{rec}} \right] \cdot \left(1 - \exp \left[-\frac{t - t_0}{\tau_{rise}} \right] \right) \cdot \theta(t - t_0) + V_0, \quad (11)$$

где A - амплитуда импульса, t_0 - задержка по времени, τ_{rec} - искомое время восстановления ячейки, τ_{rise} - время нарастания переднего фронта, V_0 - напряжение в отсутствии сигнала, $\theta(t - t_0)$ - функция Хевисайда.

$$V(t) = V_0 + \frac{A}{2} \cdot \left(\{F(\sigma, \tau_{rec}) - F(\sigma, \tau_{total})\} \right) \quad (12)$$

$$F(\sigma, \tau) = \exp \left[\frac{\sigma^2 - 2t \cdot \tau}{2\tau^2} \right] \cdot \left(1 + \operatorname{Erf} \left[\frac{t - \sigma^2/\tau}{\sigma\sqrt{2}} \right] \right)$$

$$\tau_{total} = \frac{\tau_{rec} \cdot \tau_{rise}}{\tau_{rec} + \tau_{rise}}$$

После нахождения формы одноэлектронного импульса, задача заключается в нахождении параметров A_i , t_i , а также параметра N , который характеризует число перекрывающихся сигналов. Если сигналы не перекрываются, то файл можно разделить на множество независимых частей, каждая из которых будет описывать сигнал по формуле (10) при фиксированном параметре N . Для обработки сырых данных используется программа на языке C++.

Основная проблема, возникающая при обработке - наличие шума. Существует множество цифровых фильтров, которые могут сгладить сигнал, однако их применение приведет к потере информации о послеимпульсах, т.к. послеимпульсы имеют экспоненциальное распределение по времени (5) и с большой вероятностью они будут происходить при малых временах, когда напряжение на ячейке еще не восстановилось (4).

Однако нахождение сигналов можно улучшить, есть в алгоритм аппроксимации передавать начальные параметры, близкие к искомым. Для этого считалась производная по сигналу с одновременным сглаживанием (фильтр Савицкого-Голея третьего порядка и числом точек равным 51 (10.2 нс)). Таким образом, информация о производной тоже участвовала при обработке.

Чтобы разделить записанный файл на множество независимых сигналов, используется следующий алгоритм:

- 1) Вычисляется первая производная при помощи фильтра Савицкого-Голея.
- 2) Пробегает последовательно все значения по времени
- 4) Если производная и амплитуда оказываются выше пороговых значений th_{der} и th_{amp}^{start} , то время, предшествующее этому событию на 20 нс, берется как время старта сигнала. Это условие необходимо для правильного вычисления базовой линии сигнала. В противном случае хвост от предыдущего сигнала исказит базовую

линию.

5) Если после предыдущего шага проходит более 5 нс и уровень сигнала ниже порога по амплитуде th_{amp}^{stop} , а также впереди на 20 нс производная не выше порога th_{der} , то данное время считается временем окончания сигнала. Порог по амплитуде th_{amp}^{stop} выбирается как пересечение сигнала с зашумленной базовой линией.

Чтобы определить порог, th_{amp}^{start} построим график-лестницу при различных значениях мертвого времени τ_{amp}^{dead} . Пример приведен на рис. 4 для Hamamatsu S10362-11-100C при $T = 295K$ и $V = 1V$. Порог для запуска по амплитуде th_{amp}^{start} выбирается на уровне половины амплитуды одноэлектронного сигнала и соответствует примерно 0.02. Причем найденные пороги практически не зависят от выбора мертвого времени τ_{amp}^{dead} . Аналогичный график можно построить и для производной (рис. 5). При его построении отбирались лишь те сигналы, которые превышали амплитудный порог $th_{amp}^{stop} = 0.002$. Это позволило увидеть лестничную структуру. Без использования условия на порог график был бы существенно искажен, т.к. шумы могут иметь производную, значение которой сравнимо с производной сигнала. Выше порога $-4 \cdot 10^{-4}$ вклад шумов значительно подавлен. Это значение и выбирается в качестве th_{der} . При других значениях перенапряжения пороги th_{der} и th_{amp}^{start} будут другие.

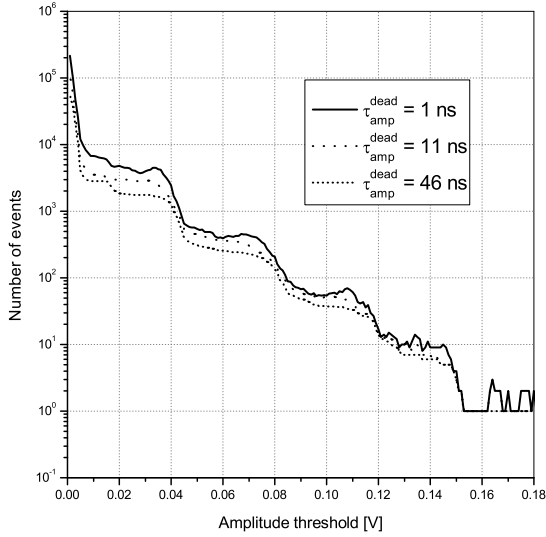


Рис. 4. Зависимость числа найденных сигналов от порога по амплитуде и мертвого времени τ_{amp}^{dead} для Hamamatsu S10362-11-100C при перенапряжении 1В и температуре 295К.

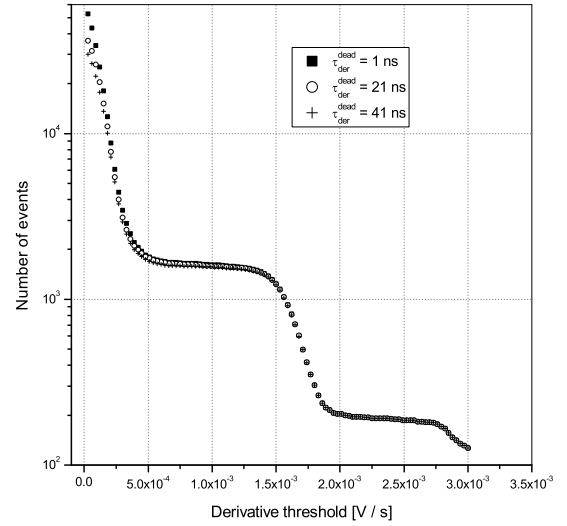


Рис. 5. Зависимость числа найденных сигналов от порога по производной и мертвого времени τ_{amp}^{dead} для Hamamatsu S10362-11-100C при перенапряжении 1В и температуре 295К. Отобраны лишь сигналы, превышающие порог $th_{amp}^{stop} = 0.002$

В результате работы данного алгоритма файл с данными разбивается на множество независимых участков. На каждом участке может находиться как один импульс, так и большее количество.

4.3. Correlation analysis

Чтобы найти параметры A_i и t_i , данный участок необходимо аппроксимировать функцией (10). Поскольку данная функция внутренне нелинейна по параметру t_i , то необходимо задать начальные параметры времени старта сигнала. Для этого используется следующий алгоритм:

- 1) Если первая производная выше порога, то на участке, начиная с этого момента и заканчивая временем, большим на 5 нс, ищется максимум производной. Время, при котором первая производная достигла максимума, далее будет использовано в качестве стартового значения параметра t_i .
- 2) Если первая производная ниже порогового значения и прошло более 5 нс, то разрешается поиск следующего превышения порога.

Далее каждый независимый участок аппроксимировался функцией (10) при $N = 1$. Рассмотрим корреляцию между амплитудой и значением χ^2/Dof (рис. 6). Можно заметить несколько четко выделяющихся кластеров: A_1 , B_1 , C_1 и т.д. Кластер A_1 соответствует одноэлектронным сигналам. Кластеры B_1 , C_1 и т.д. соответствуют событиям, когда одновременно сработали две, три и большее количество ячеек (cross-talk), причем эти сигналы расположены вдали от других сигналов. Из-за этого они имеют низкое значение χ^2/Dof при аппроксимации однокомпонентной функцией. Остальные события со значением $\chi^2/Dof > 4$ (будем обозначать множеством Z_1) соответствуют нескольким сигналам, расположенным на относительно небольшом расстоянии друг от друга.

Далее аппроксимируем события из множества Z_1 функцией (10) при $N = 2$. В том случае каждое событие будет характеризоваться четырьмя параметрами: χ^2/Dof , amp_1 , amp_2 - амплитуды первого и второго сигнала, Δt - расстояние между сигналами. Для начала построим корреляцию между суммарной амплитудой $amp_1 + amp_2$ и значением χ^2/Dof (рис. 7).

В этом случае также можно выделить несколько характерных множеств: A_2 , B_2 , C_2 и т.д. Более наглядное представление о сигналах, образующих эти множества, можно получить из корреляции $amp_1 + amp_2$ и Δt , построенной для конкретного множества (рис. 8 и рис. 9).

Множество A_2 составляют сигналы, которые условно разделяются на два множества: α_1 и β_1 . Множество α_1 соответствует двум близкорасположенным сигналам, причем их суммарная амплитуда вдвое больше амплитуды одноэлектронного

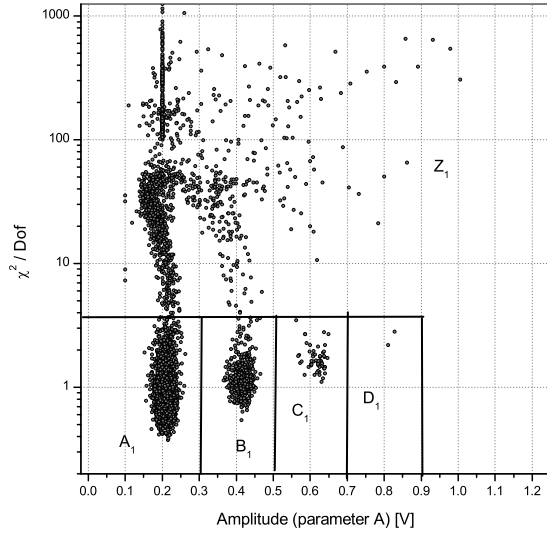


Рис. 6. Корреляция амплитуда - χ^2/Dof при аппроксимации всех найденных сигналов однокомпонентной функцией. Сигнал получен с Hamamatsu S10362-11-100C при перенапряжении 1В и температуре 295К.

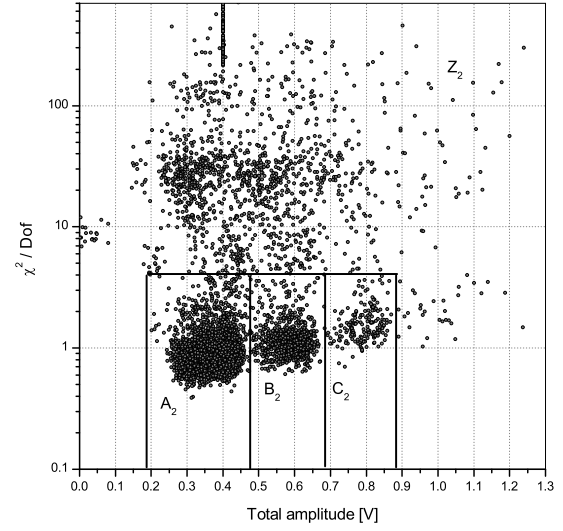


Рис. 7. Корреляция амплитуда - χ^2/Dof при аппроксимации множества Z_1 (см. рис. 6) двухкомпонентной функцией. Сигнал получен с Hamamatsu S10362-11-100C при перенапряжении 1В и температуре 295К.

импульса. Это означает, что эти сигналы пришли с разных ячеек и являются темновыми импульсами. В тоже время сигналы из множества β_1 имеют амплитуду, зависящую от расстояния между сигналами. Это означает, что первый сигнал был одноэлектронным, а последующий оказался послеимпульсом. Аналогичную корреляцию можно построить и для множества B_2 (рис. 9). В этом случае в множестве α_2 будут принадлежать два близкорасположенных сигнала один из которых имеет одноэлектронную амплитуду, а другой двойную амплитуду, т.е. вызванный одновременным срабатыванием двух ячеек из-за кросстока. Множество β_2 содержит сигналы, которые можно разделить на две группы. Первая группа образована сигналами, в которых вначале одновременно сработали две ячейки, а потом одна из ячеек дала послеимпульс. Вторая группа образована сигналами, в которых вначале сработала одна ячейка, затем через некоторое время произошел послеимпульс, который вызвал кроссток. Множества, аналогичные A_2 и B_2 с большой суммарной амплитудой, соответствуют событиям, когда одновременно сработало большее количество ячеек.

Далее построим спектр временных интервалов. При его построении нужно учитывать лишь сигналы без кросстоков, чтобы потом аппроксимировать спектр функцией (9). Это означает, что для нахождения спектра временных интервалов

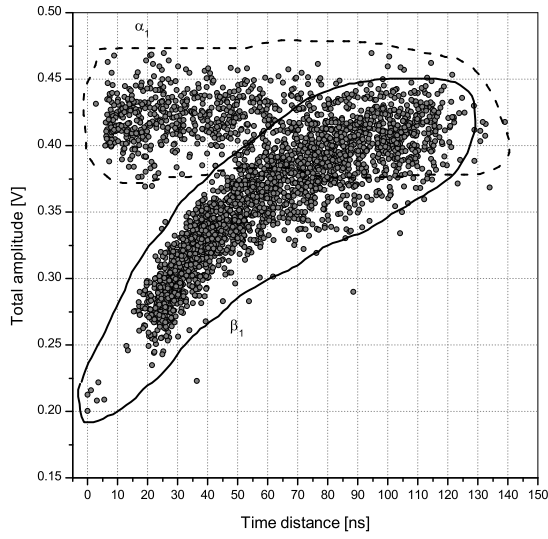


Рис. 8. Корреляция расстояния между сигналами и суммарной амплитудой при аппроксимации множества A_2 (см. рис. 7) двухкомпонентной функцией. Сигнал получен с Hamamatsu S10362-11-100C при перенапряжении 1В и температуре 295К.

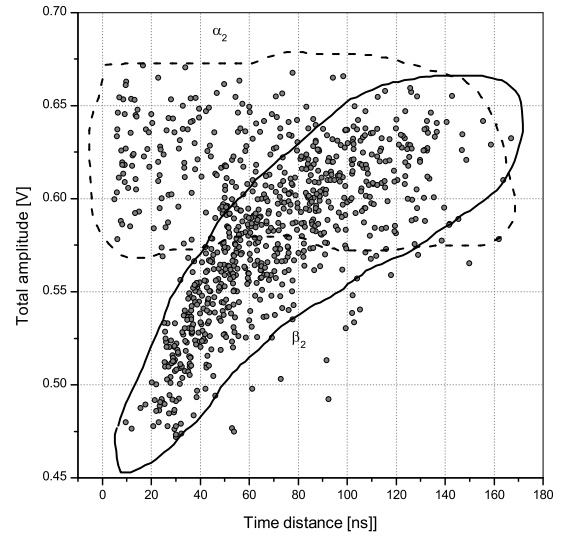


Рис. 9. Корреляция расстояния между сигналами и суммарной амплитудой при аппроксимации множества B_2 (см. рис. 7) двухкомпонентной функцией. Сигнал получен с Hamamatsu S10362-11-100C при перенапряжении 1В и температуре 295К.

мы измеряем расстояния лишь между теми сигналами, которые попали в множества A_1 или A_2 (числом событий, попавших в множества A_3 , A_4 и т.д., можно пренебречь).

В результате получим спектр временных интервалов, изображенный на рис. 10. При аппроксимации спектра функцией (9) найдем параметры p_s , p_f , ν_s , ν_f , ν_{DC} . Для аппроксимации используется небинированный фит и пакет RooFit.

При времени около 25 нс наблюдается изменение монотонности спектра. Это связано с тем, что если послеимпульс происходит в ячейке через промежуток времени меньше 25 после предыдущего импульса, то его амплитуда будет мала и такой импульс нельзя будет отличить от шумов. Из-за этого импульс будет распознан как однокомпонентный и он не даст вклада в малые времена. Это приведет к искажению спектра. Для правильной аппроксимации необходимо принимать во внимание только временные интервалы, больше некоторого порогового времени. Чтобы уточнить это время была проведена аппроксимация при различных пороговых значениях. На рис. 11 приведена зависимость параметра τ_f от временного порога. Для данного типа SiMP при температуре 295К и перенапряжении 1 В был выбран порог в 25 нс. При уменьшении перенапряжения временной порог увеличивается.

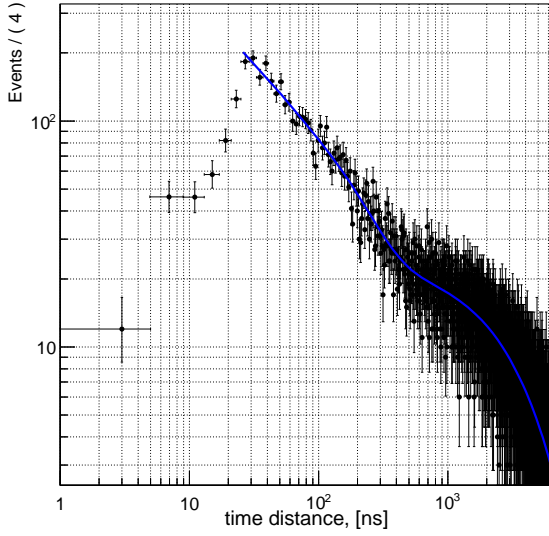


Рис. 10. Спектр временных интервалов, аппроксимированный функцией (9). События с кросстоком не учитываются. Сигнал получен с Hamamatsu S10362-11-100C при перенапряжении 1В и температуре 295К.

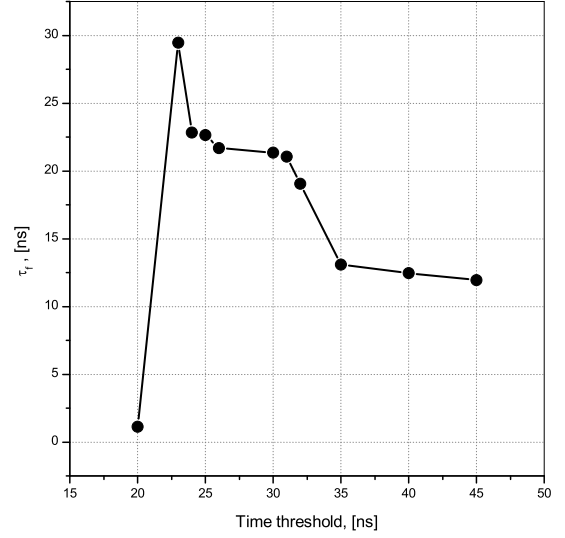


Рис. 11. Зависимость времени быстрой компоненты послеимпульса от временного порога. Сигнал получен с Hamamatsu S10362-11-100C при перенапряжении 1В и температуре 295К.

5. Results

5.1. Dark noise

В результате аппроксимации спектра временных интервалов получены зависимости частоты темнового тока от температуры и перенапряжения (рис.12). Также известны теоретические зависимости частоты темнового тока от температуры и перенапряжения[4]. Частота темновых токов пропорциональна плотности свободных носителей, которая выражается следующей формулой:

$$\nu(\Delta V = const, T) \propto n(T) = A \cdot T^{3/2} \cdot \exp \left[-\frac{E_g}{2k_B \cdot T} \right], \quad (13)$$

где A - константа, зависящая от материала и технологических параметров, T - абсолютная температура, E_g - ширина запрещенной зоны, k_B - константа Больцмана. Зависимость частоты от перенапряжения можно выразить линейным законом:

$$\nu(\Delta V, T = const) = k \cdot \Delta V \quad (14)$$

Для Hamamatsu S13360-3050CS аппроксимация зависимости темнового тока от перенапряжения выполнена константой, поскольку в эксперименте не удалось набрать достаточно статистики для более точной аппроксимации. По той же при-

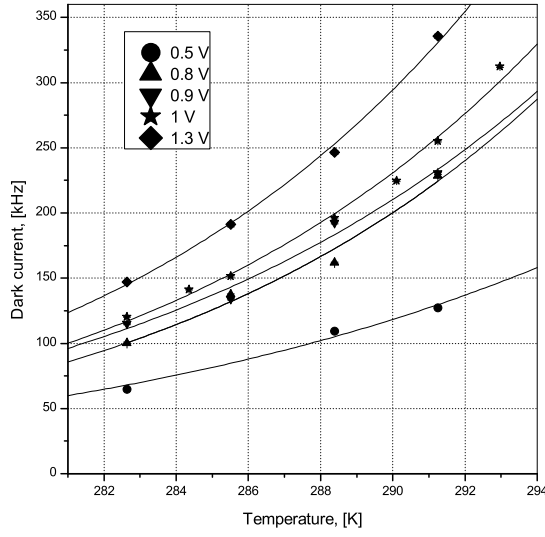


Рис. 12. Зависимость частоты темнового тока от температуры при фиксированном перенапряжении для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы функцией (13).

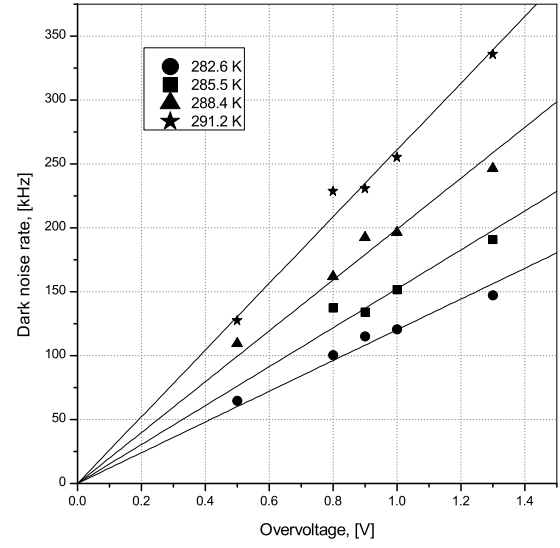


Рис. 13. Зависимость частоты темнового тока от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы линейной функцией (14).

чине для KETEK PM1125NS-SB0 получена лишь одна точка при максимально возможной стабильной температуре.

5.2. Cross-talk

Еще раз рассмотрим рис. 6 и рис. 7. В множестве A_1 содержатся одноэлектронные импульсы. В множестве B_1 содержатся импульсы, вызванные одновременным срабатыванием двух ячеек. В множестве C_1 содержатся импульсы, вызванные одновременным срабатыванием трех ячеек. В множестве A_2 содержатся импульсы, вызванные срабатыванием либо одной ячейки с последующим послеимпульсом, либо двух ячеек в разные моменты времени из-за темновых токов. В множестве B_2 содержатся импульсы, вызванные либо одновременным срабатыванием двух ячеек срабатыванием с последующим послеимпульсом одной из ячеек, либо срабатыванием одной ячейки с последующим послеимпульсом, вызывающим кроссток.

На данный момент мы вычисляем вероятность кросстока следующим образом:

$$P_{X-talk} = (N_{B_1} + N_{C_1}) / (N_{A_1} + N_{B_1} + N_{C_1}) \quad (15)$$

Это приближенная формула, т.к. необходимо учитывать тот факт, что небольшая часть событий с кросстком будет содержаться в множествах B_2 , C_2 , B_3 , C_3 и т.д.

Вероятность кросстока должна иметь в первом приближении квадратичную зависимость от перенапряжения. Это объясняется тем, что вероятность кросстока

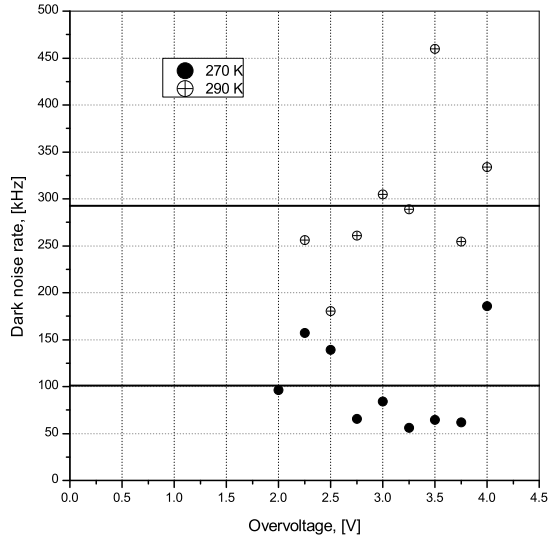


Рис. 14. Зависимость частоты темнового тока от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S13360-3050CS. Линии - аппроксимация частоты константой для разных температур.

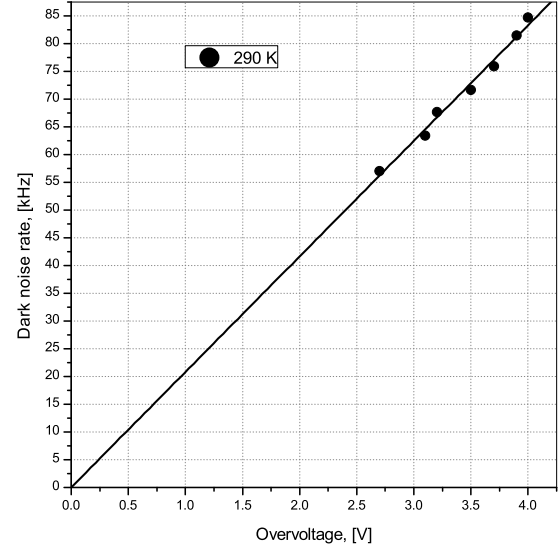


Рис. 15. Зависимость частоты темнового тока от перенапряжения при фиксированной температуре для KETEK PM1125NS-SB0. Линия - аппроксимация частоты линейной функцией.

P_{x-talk} пропорциональна числу образовавшихся электронов в лавине G и вероятности срабатывания ячейки от фотона ε_{Geiger} , причем каждая из этих величин имеет линейную зависимость от перенапряжения (для величины ε_{Geiger} зависимость отличается от линейной при больших перенапряжениях [12]):

$$P_{x-talk}(\Delta V) \propto G(\Delta V) \cdot \varepsilon_{Geiger}(\Delta V) \quad (16)$$

Таким образом, будем аппроксимировать экспериментальные данные следующей зависимостью:

$$P_{x-talk}(\Delta V, T) = k_{x-talk} \cdot \Delta V^2 \quad (17)$$

Исходя из экспериментальных данных, можно сделать вывод, что вероятность кросстока не зависит от температуры.

5.3. Проверка модели 4-х соседей

В статье [7] отмечалось существование SiPM, которые не соответствуют модели 4-х соседей. Модель 4-х соседей подразумевает, что сработавшая ячейка может вызвать срабатывание лишь 4-х ближайших ячеек. В этом случае вероятность кросстока в соседней ячейке p связана с полной вероятностью кросстока P_{x-talk}

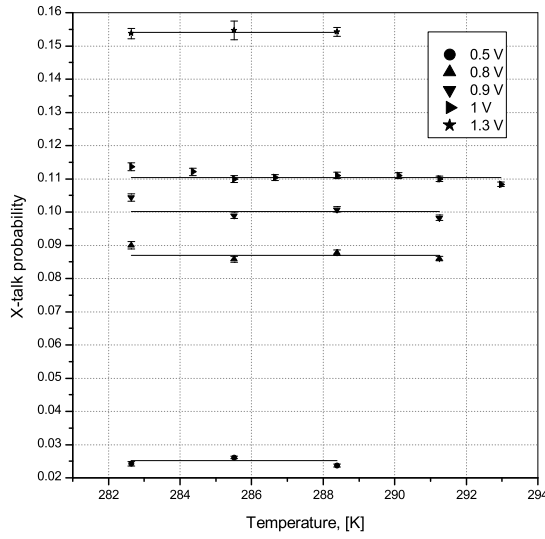


Рис. 16. Зависимость вероятности кросстока от температуры при фиксированном перенапряжении для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы константой.

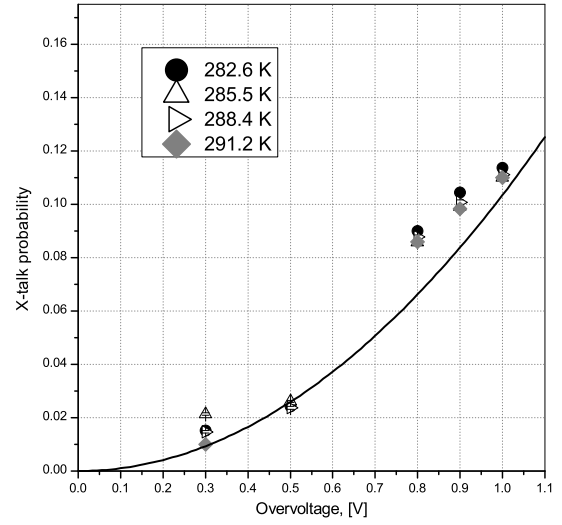


Рис. 17. Зависимость вероятности кросстока от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

следующим соотношением:

$$(1 - p)^4 = 1 - P_{X-talk} \quad (18)$$

Знание величины p необходимо, чтобы правильно посчитать мат. ожидание и дисперсию числа фотоэлектронов. Полную вероятность кросстока рассчитаем по формуле (15). Далее вычислим величину p из (18). Затем вычислим вероятность того, что из-за кросстока сработала одна дополнительная ячейка: $p_{2p.e.}^{theory} = 4 \cdot p \cdot q^6$. С другой стороны, аналогичную вероятность $p_{2p.e.}^{exp}$ можно вычислить как отношение числа событий $N_{2p.e.}$ к полному числу событий. На рис. 20, 21, 22 приведено отношение $p_{2p.e.}^{exp} / p_{2p.e.}^{theory}$ в зависимости от перенапряжения при фиксированной температуре.

Из графиков видно, что модель 4-х соседей работает хорошо для всех рассмотренных типов SiPM.

5.4. Послеимпульсы

Также аппроксимации спектра временных интервалов мы находим вероятности и времена послеимпульсов.

Вероятности послеимпульсов p_s и p_f при текущей точности измерения не зависят от температуры. От перенапряжения вероятности послеимпульсов должны

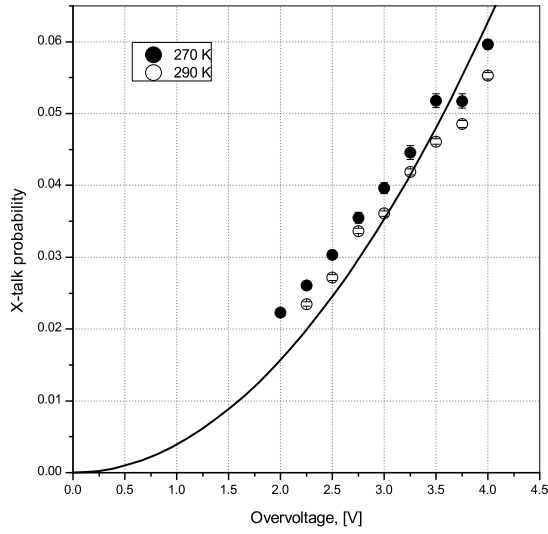


Рис. 18. Зависимость вероятности кросстока от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S13360-3050CS.

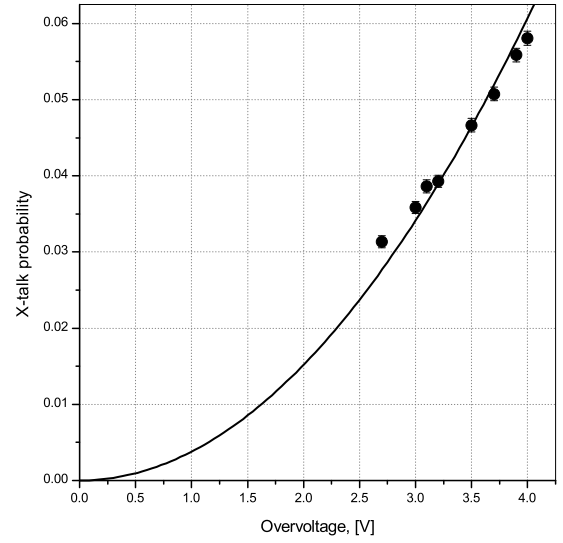


Рис. 19. Зависимость вероятности кросстока от перенапряжения при фиксированной температуре для KETEK PM1125NS-SB0.

иметь квадратичную зависимость:

$$p_i(\Delta V, T) = k_i^p \cdot \Delta V^2 \quad (19)$$

Времена послеимпульсов τ_s и τ_f при данной точности измерений не имеют зависимости от перенапряжения. Лишь для Hamamatsu S10362-11-100C τ_f имеет линейный тренд.

6. Conclusions

В результате работы был описан алгоритм измерения напряжения пробоя, темновых токов, вероятности кросстоков и послеимпульсов, времен послеимпульсов для трех типов SiPM : KETEK PM1125NS-SB0, Hamamatsu S10362-33-025C and Hamamatsu S13360-3050CS. При достигнутой точности измерения в интервале температур от 0 до 20C° вероятность кросстока, вероятность послеимпульса и время послеимпульса не зависят от температуры. Была проведена проверка SiPM на соответствие модели 4-х соседей. Все три типа SiPM имеют отличие от модели менее, чем на 10%. Вероятность кросстока для Hamamatsu S10362-33-025C при рабочем перенапряжении (1 В) составляет около 12%, для Hamamatsu S13360-3050CS и KETEK PM1125NS-SB0 (рабочее перенапряжение 4 В) составляет около 6%. Вероятность послеимпульса для Hamamatsu S10362-33-025C при рабочем перенапряжении составляет около 10% (быстрая компонента) и 15% (медленная

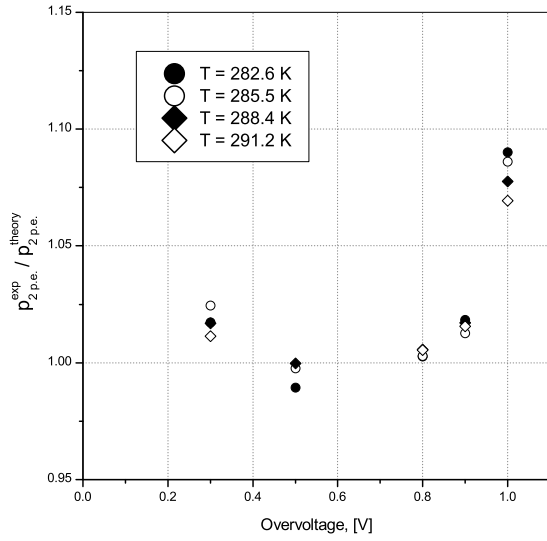


Рис. 20. Зависимость отношения экспериментальной вероятности срабатывания дополнительной ячейки из-за кросстока к теоретической вероятности от температуры при фиксированном перенапряжении для Hamamatsu S10362-11-100C.

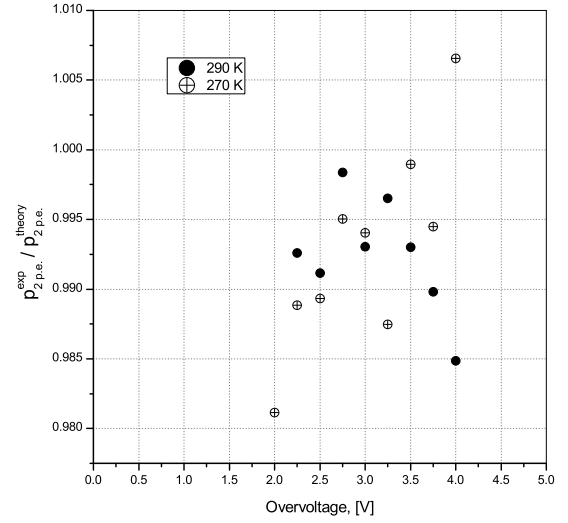


Рис. 21. Зависимость отношения экспериментальной вероятности срабатывания дополнительной ячейки из-за кросстока к теоретической вероятности от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S13360-3050CS.

компонента), для Hamamatsu S13360-3050CS и KETEK PM1125NS-SB0 составляет около 10%. Время послеимпульса для Hamamatsu S10362-33-025C составляет около 35 нс (быстрая компонента) и 170 нс (медленная компонента), для Hamamatsu S13360-3050CS - 9 нс, для KETEK PM1125NS-SB0 - 28 нс. Полученной зависимостью времени послеимпульса от перенапряжения мы пренебрегаем. Темновые токи для Hamamatsu S10362-33-025C при рабочем напряжении и температуре 20 °C составляют 300 $\kappa\Gamma\text{ц}/\text{мм}^2$, для Hamamatsu S13360-3050CS - 30 $\kappa\Gamma\text{ц}/\text{мм}^2$, для KETEK PM1125NS-SB0 - 80 $\kappa\Gamma\text{ц}/\text{мм}^2$.

Таким образом, на основании проделанных экспериментов, мы можем сделать вывод, что лучшим SiPM среди исследованных является Hamamatsu S13360-3050CS, который при прочих равных имеет меньшую частоту темновых токов, наименьшее время послеимпульса. Также этот SiPM имеет более высокую квантовую эффективность, о чем будет рассказано в следующих статьях.

В дальнейшем мы планируем использовать Hamamatsu S13360-3050CS в качестве детектора фотонов в системе рентгеновского контроля и медицинских установках.

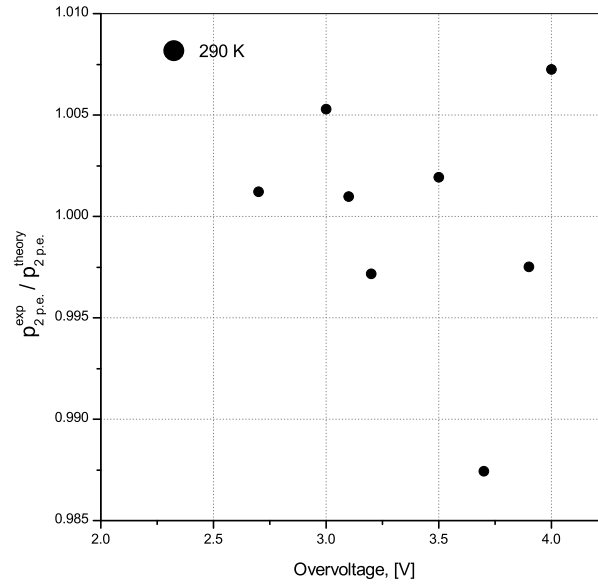


Рис. 22. Зависимость отношения экспериментальной вероятности срабатывания дополнительной ячейки из-за кросстока к теоретической вероятности от перенапряжения при фиксированной температуре для KETEK PM1125NS-SB0.

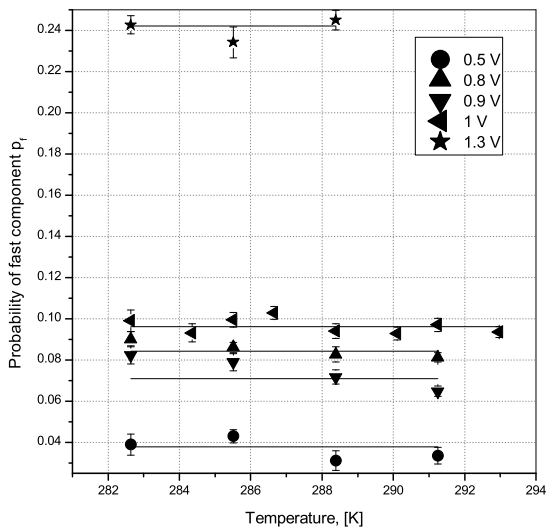


Рис. 23. Зависимость вероятности быстрой компоненты послеимпульса p_f от температуры при фиксированном перенапряжении для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы константой.

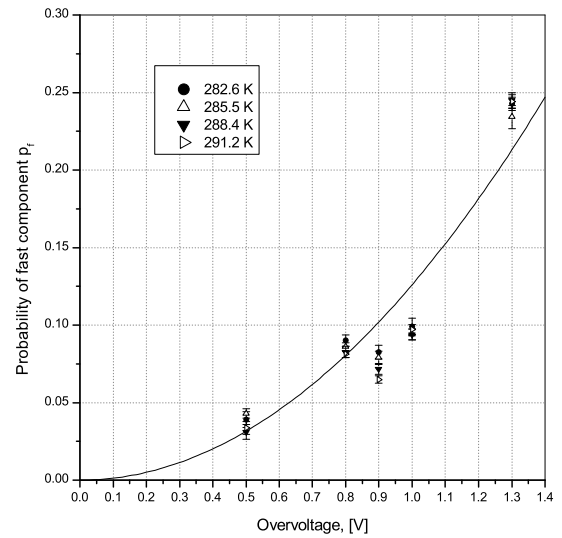


Рис. 24. Зависимость вероятности быстрой компоненты послеимпульса p_f от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

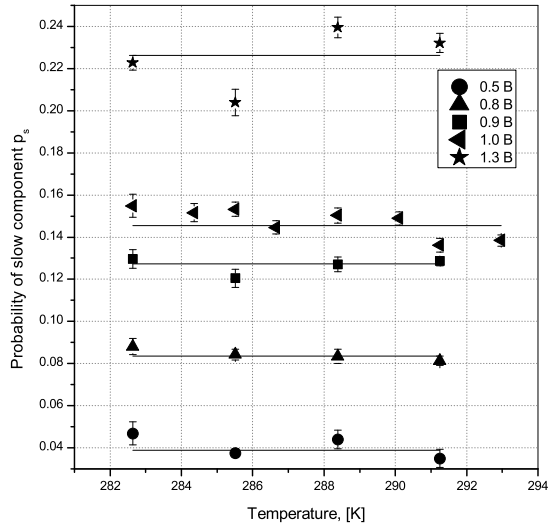


Рис. 25. Зависимость вероятности медленной компоненты послеимпульса p_s от температуры при фиксированном перенапряжении для Namamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы константой.

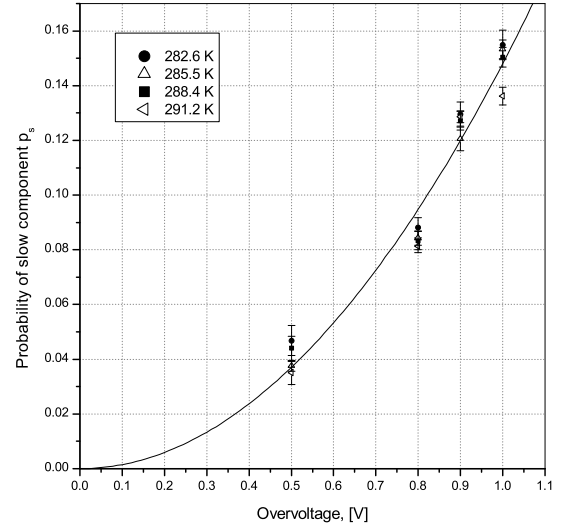


Рис. 26. Зависимость вероятности медленной компоненты послеимпульса p_s от перенапряжения при фиксированной температуре для Namamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

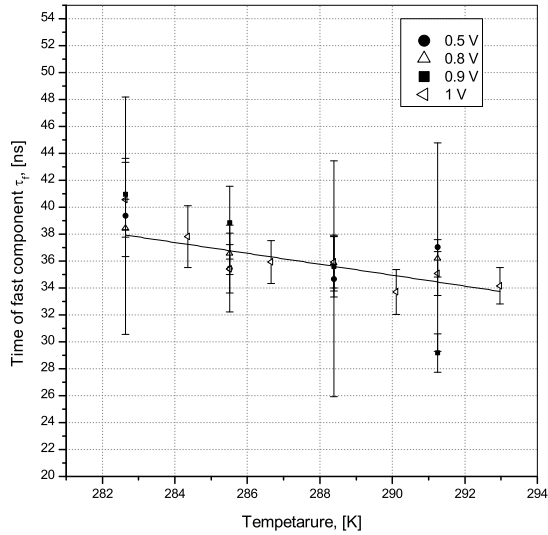


Рис. 27. Зависимость времени быстрой компоненты послеимпульса τ_f от температуры при фиксированном перенапряжении для Namamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы линейной функцией.

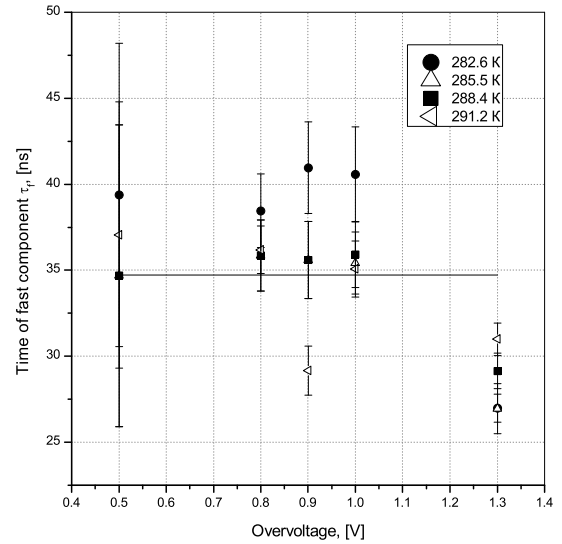


Рис. 28. Зависимость времени быстрой компоненты послеимпульса τ_f от перенапряжения при фиксированной температуре для Namamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы константой.

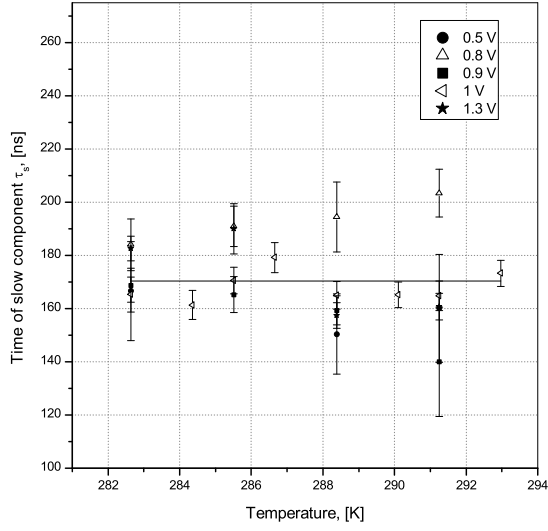


Рис. 29. Зависимость времени медленной компоненты послеимпульса τ_s от температуры при фиксированном перенапряжении для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы константой.

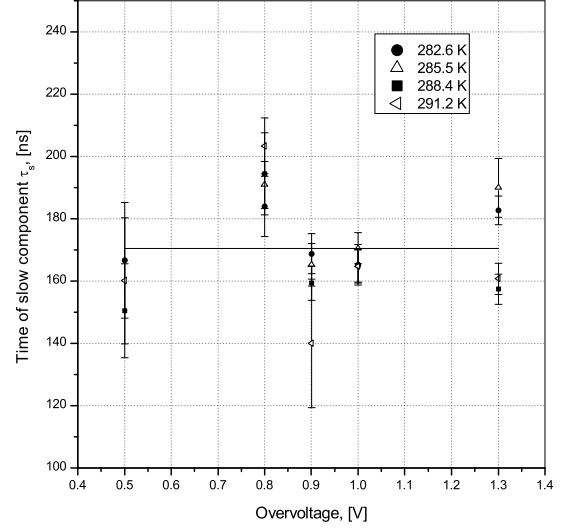


Рис. 30. Зависимость времени медленной компоненты послеимпульса τ_s от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы константой.

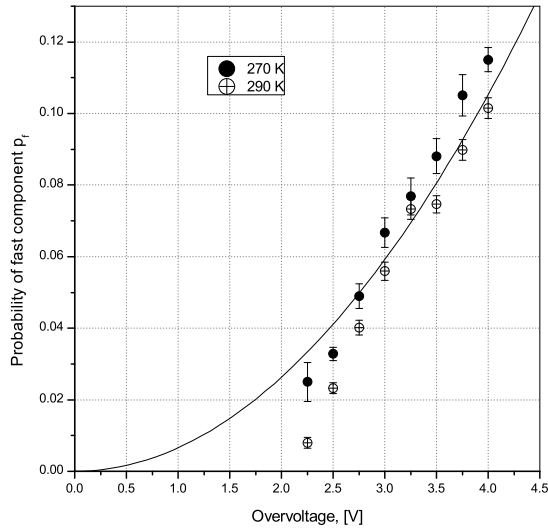


Рис. 31. Зависимость вероятности быстрой компоненты послеимпульса p_f от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S13360-3050CS. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

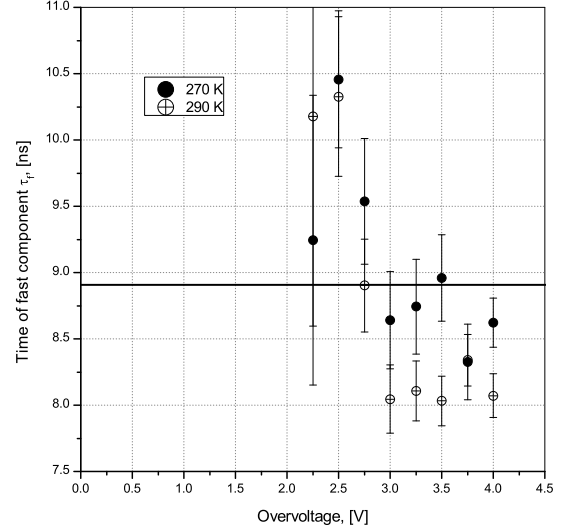


Рис. 32. Зависимость времени быстрой компоненты послеимпульса τ_f от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S13360-3050CS. Данные аппроксимированы константой.

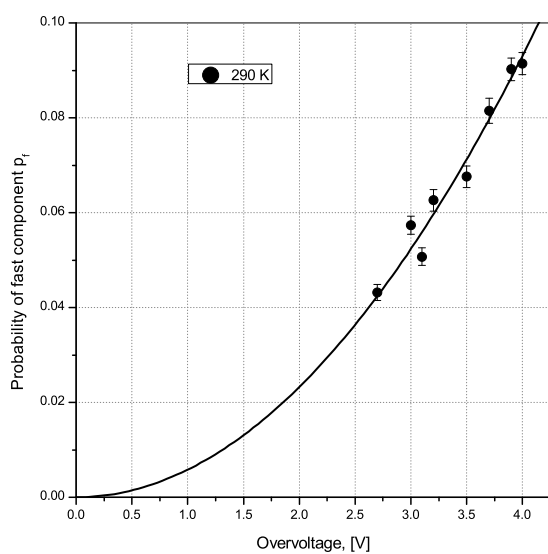


Рис. 33. Зависимость вероятности быстрой компоненты послеимпульса p_f от перенапряжения при фиксированной температуре для КЕТЕК РМ1125NS-SB0. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

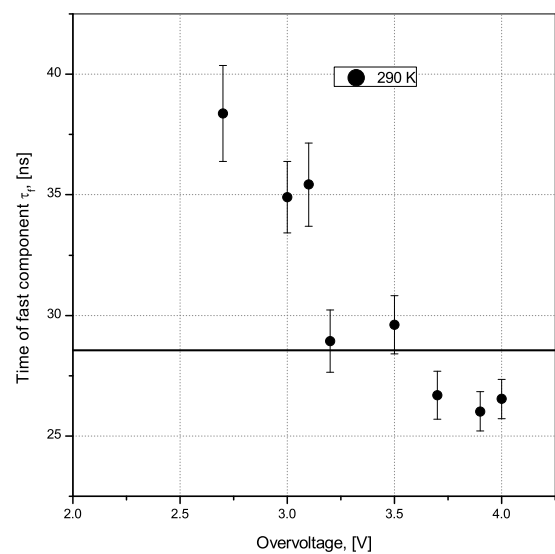


Рис. 34. Зависимость времени быстрой компоненты послеимпульса τ_f от перенапряжения при фиксированной температуре для КЕТЕК РМ1125NS-SB0. Данные аппроксимированы константой.

Список литературы

- [1] E.A. Babichev et al., SiPM based photon counting detector for scanning digital radiography, JINST 10 (2015) C03002
- [2] P. Dorosz et al., Silicon Photomultiplier's Gain Stabilization by Bias Correction for Compensation of the Temperature Fluctuations, , Nucl. Instrum. Meth. A 718 (2013) pp. 202–204
- [3] N. Dinu et al., Temperature and Bias Voltage Dependence of the MPPC Detectors, IEEE Oct. 30 2010–Nov. 6 2010 pp.215 - 219
- [4] Marco Ramilli, Characterization of SiPM: temperature dependencies, IEEE 19-25 Oct. 2008 pp. 2467 - 2470
- [5] P.K. Lightfoot et al., Characterisation of a silicon photomultiplier device for applications in liquid argon based neutrino physics and dark matter searches, JINST 3 (2008) P10001
- [6] Patrick Eckert et al., Characterisation Studies of Silicon Photomultipliers, Nucl. Instrum. Meth. A 620 (2010) pp. 217–226
- [7] L. Gallego et al., Modeling crosstalk in silicon photomultipliers, Nucl. Instrum. Meth. A 787 (2015) pp. 153–156
- [8] A. Vacheretc et al., Characterization and Simulation of the Response of Multi Pixel Photon Counters to Low Light Levels, Nucl. Instrum. Meth. A 656 (2011) pp. 69-83
- [9] Y. Du et al., After-pulsing and cross-talk in multi-pixel photon counters, Nucl. Instr. and Meth. A 596 (2008) pp. 396-401
- [10] Fabrice Retiere, Using MPPCs for T2K Fine Grain Detector, PoS PD07 (2006) 017
- [11] J. Rosado et al., Modeling crosstalk and afterpulsing in silicon photomultipliers, Nucl. Instr. and Meth. A 787 (2015) pp. 153–156
- [12] Daniel Orme et al., Measurement of PDE of MPPC with different wavelengths of light, PoS PD09 (2009) 019