

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
НАУК

ОЛЕЙНИКОВ ВЛАДИСЛАВ ПЕТРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ  
ОСТЕОДЕНСИТОМЕТРИИ**

01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

Отчёт по научно-исследовательской работе

Научный руководитель  
Поросев Вячеслав Викторович  
кандидат физико-математических наук

Оценка:

\_\_\_\_\_

Новосибирск — 2016

# 1. Введение

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 атм). 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 эффективность 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 - сравнительное измерение характеристик SiPM различных производителей. В частности, измерение вероятностей послеимпульсов и кросстоков двух SiPM: KETEK PM1125NS-SB0 и Hamamatsu S13360-3050CS и сравнение их с характеристиками Hamamatsu S10362-11-100C - SiPM предыдущего поколения.

## 2. Алгоритм нахождения кросстоков и послеимпульсов

Существует несколько алгоритмов нахождения вероятностей кросстока. Один из них описан в [2]. Идея заключается в измерении частоты темнового тока при различных порогах. Вероятность кросстока можно найти как отношение частот при пороге 1.5 фотоэлектрона и 0.5 фотоэлектрона:

$$P_{X-talk} = \nu_{1.5pe} / \nu_{0.5pe} \quad (1)$$

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 [3] и аппроксимация исходного сигнала [4–6].

В процессе аппроксимации сигнала мы получим амплитуду и время начала сигнала. Используя эту информацию, можно восстановить постоянную времени послеимпульса и вероятность послеимпульса.

Послеимпульс - повторное срабатывание ячейки, происходящее через некоторый промежуток времени после её срабатывания. Причина появления послеимпульсов заключается в захвате электронов в ловушки во время лавины с их последующим высвобождением через промежуток времени от нескольких наносекунд до нескольких микросекунд [2].

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 [4–6]. Во-вторых, повторное срабатывание ячейки могут вызвать темновые токи. Каждый из этих трех процессов имеет экспоненциальное время распределения со своим собственным временем  $\tau$ :

$$f(\Delta t) = \frac{1}{\tau} \cdot \exp(-\Delta t/\tau), \quad (2)$$

где  $\tau$  - среднее время, проходящее между двумя импульсами при рассмотрении лишь одного из вышеперечисленных эффектов. 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 частотой  $\nu$ . Темновые импульсы, как и послеимпульсы имеют экспоненциальное распределение (2). Поскольку темновые импульсы не зависят от послеимпульсов, то искомую вероятность  $P(t)$  можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} P(t) = & P\{\text{нет послеимпульсов от } 0 \text{ до } t + \delta t\} \cdot \\ & P\{\text{есть темновой импульс от } t \text{ до } t + \delta t\} + \\ & P\{\text{есть послеимпульс от } t \text{ до } t + \delta t\} \cdot \\ & P\{\text{нет темнового импульса от } 0 \text{ до } t + \delta t\} \end{aligned} \quad (3)$$

Вклад каждого из процессов будет следующий:

$$\begin{aligned}
P\{\text{нет послеимпульсов от } 0 \text{ до } t + \delta t\} &= (1 - p) + p \cdot e^{-\nu \cdot t} \\
P\{\text{есть темновой импульс от } t \text{ до } t + \delta t\} &= (\nu_{dc} \cdot e^{-\nu_{dc} \cdot t}) \cdot \delta t \\
P\{\text{есть послеимпульс от } t \text{ до } t + \delta t\} &= p \cdot (\nu \cdot e^{-\nu \cdot t}) \cdot \delta t \\
P\{\text{нет темнового импульса от } 0 \text{ до } t + \delta t\} &= e^{-\nu_{dc} \cdot t}
\end{aligned} \tag{4}$$

Таким образом, подставив значения вероятностей из (4) в (3) и сократив итоговое выражение на  $\delta t$ , получим плотность вероятности временных интервалов:

$$f(t) = p \cdot (\nu + \nu_{dc}) \cdot e^{-(\nu + \nu_{dc}) \cdot t} + (1 - p) \cdot \nu_{dc} \cdot e^{-\nu_{dc} \cdot t} \tag{5}$$

Стоит отметить, что аналогичная формула приведена в [6], однако с опечаткой в знаке между слагаемыми.

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

$$\begin{aligned}
f(t) &= p_s \cdot p_f \cdot (\nu_s + \nu_f + \nu_{dc}) \cdot e^{-(\nu_s + \nu_f + \nu_{dc}) \cdot t} + \\
&\quad p_s \cdot (1 - p_f) \cdot (\nu_s + \nu_{dc}) \cdot e^{-(\nu_s + \nu_{dc}) \cdot t} + \\
&\quad p_f \cdot (1 - p_s) \cdot (\nu_f + \nu_{dc}) \cdot e^{-(\nu_f + \nu_{dc}) \cdot t} + \\
&\quad (1 - p_s) \cdot (1 - p_f) \cdot \nu_{dc} \cdot e^{-\nu_{dc} \cdot t}
\end{aligned} \tag{6}$$

Формула (6) 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.

Таким образом, из анализа временных распределений импульсов становится возможным определение основных характеристик лавинных фотодиодов: темновых токов, кросстоков и послеимпульсов.

## 3. Результаты

### 3.1. Темновой шум

В результате аппроксимации спектра временных интервалов получены зависимости частоты темнового шума от температуры и перенапряжения (рис.1, 2, 3, 3). Зависимость частоты темновых токов от температуры выражается следующей формулой [? ]:

$$\nu(\Delta V = \text{const}, T) = A \cdot T^{3/2} \cdot \exp \left[ -\frac{E_g}{2k_B \cdot T} \right], \tag{7}$$

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

$$\nu(\Delta V, T = \text{const}) = k \cdot \Delta V \quad (8)$$

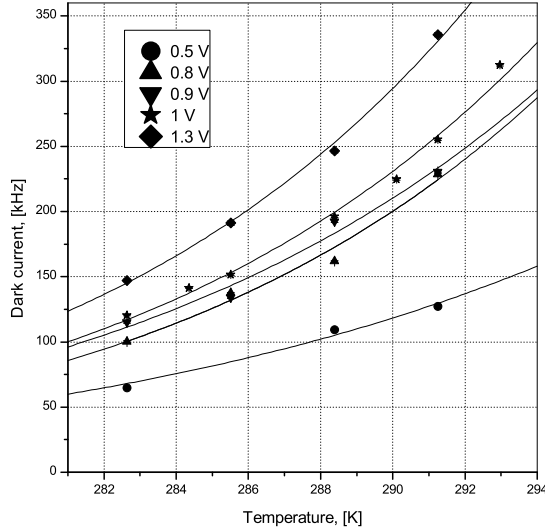


Рис. 1. Зависимость частоты темнового тока от температуры при фиксированном перенапряжении для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы функцией (7).

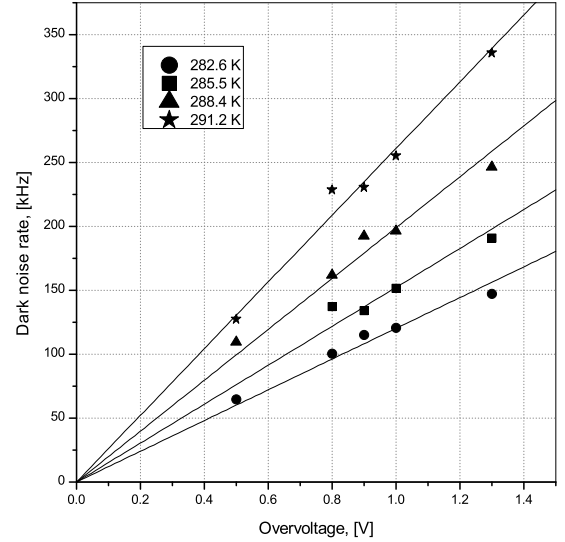


Рис. 2. Зависимость частоты темнового тока от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы линейной функцией (8).

### 3.2. Кроссток

Результаты обработки приведены на рис. 5, 6, 7, 8.

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

### 3.3. Послеимпульсы

В результате аппроксимации спектра временных интервалов мы находим также вероятности и времена послеимпульсов. Полученные данные приведены на рис. 9, 10, 11, 12, 13, 14.

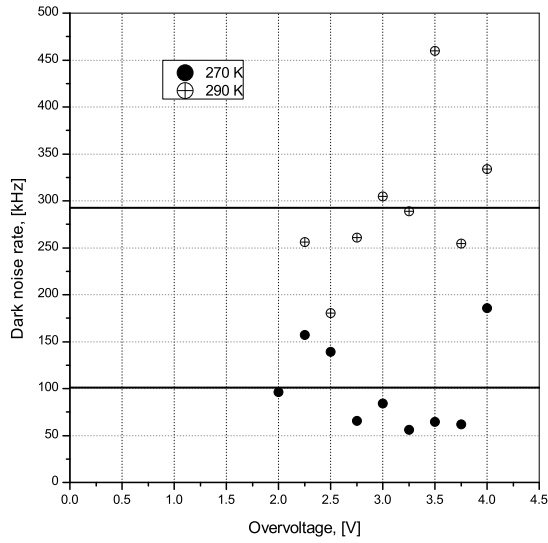


Рис. 3. Зависимость частоты темнового тока от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S13360-3050CS. Линии - аппроксимация частоты константой для разных температур.

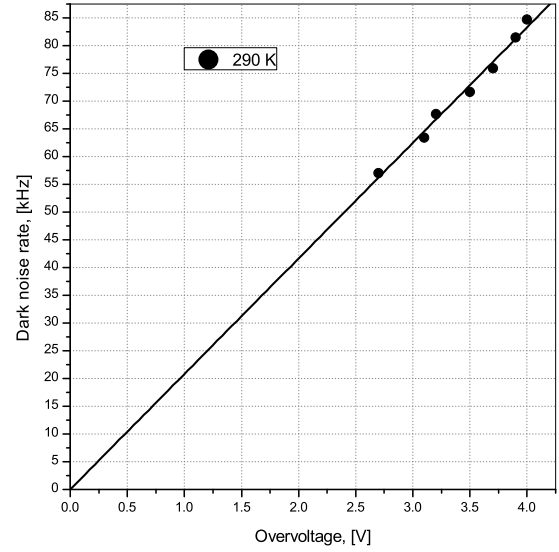


Рис. 4. Зависимость частоты темнового тока от перенапряжения при фиксированной температуре для KETEK PM1125NS-SB0. Линия - аппроксимация частоты линейной функцией.

## 4. Выводы

В работе 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 20°C вероятность кросстока, вероятность послеимпульса и время послеимпульса не зависят от температуры. 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 компонента). Для Hamamatsu S13360-3050CS и KETEK PM1125NS-SB0 из-за небольшой статистики была изучена только быстрая компонента, которая 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. Частота темновых шумов для Hamamatsu S10362-33-025C при рабочем напряжении и температуре 20 °C состав-

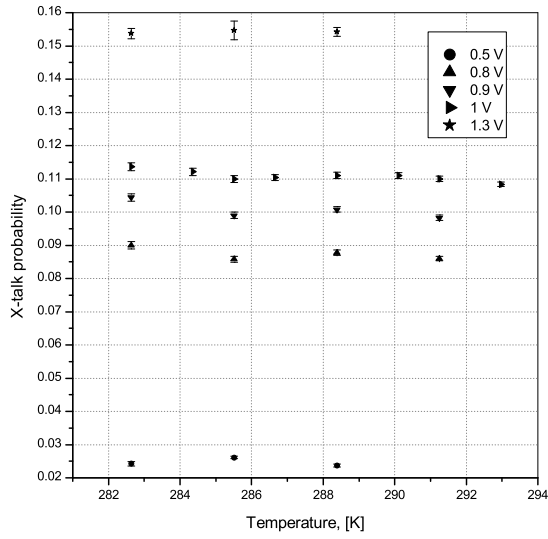


Рис. 5. Зависимость вероятности кросстока от температуры при фиксированном перенапряжении для Hamamatsu S10362-11-100C.

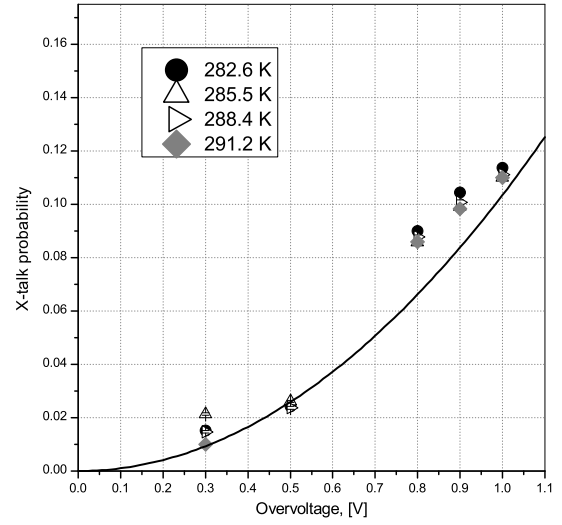


Рис. 6. Зависимость вероятности кросстока от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

ляет  $300 \text{ кГц/мм}^2$ , для Hamamatsu S13360-3050CS -  $30 \text{ кГц/мм}^2$ , для КЕТЕК PM1125NS-SB0 -  $80 \text{ кГц/мм}^2$ .

Таким образом, на основании проделанных экспериментов, мы можем сделать вывод, что лучшим кандидатом для использования в счетных детекторах среди исследованных SiPM является Hamamatsu S13360-3050CS, который при прочих равных имеет меньшую частоту темновых токов и наименьшее время послеимпульса.

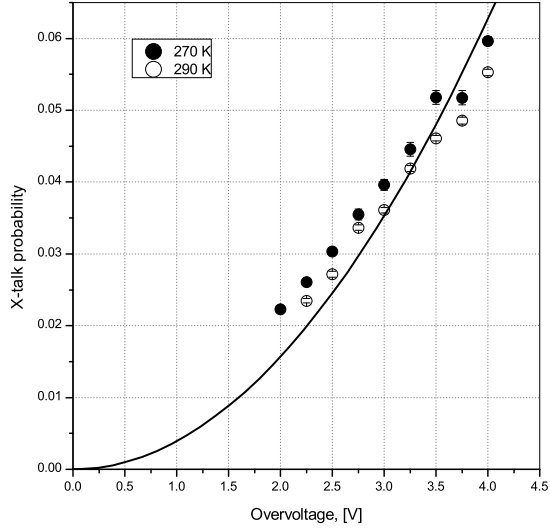


Рис. 7. Зависимость вероятности кросстока от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S13360-3050CS. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

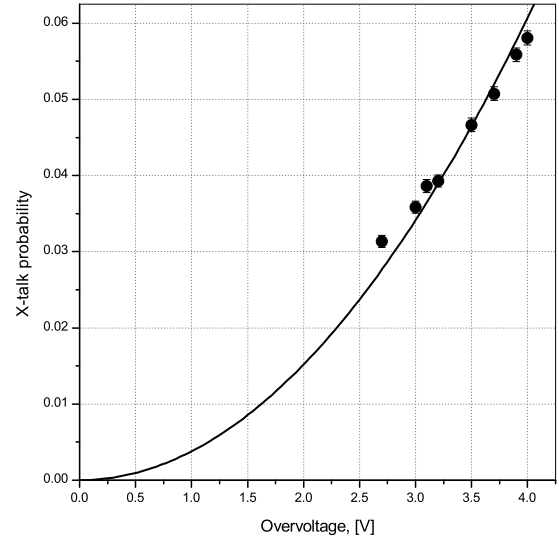


Рис. 8. Зависимость вероятности кросстока от перенапряжения при фиксированной температуре для KETEK PM1125NS-SB0. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

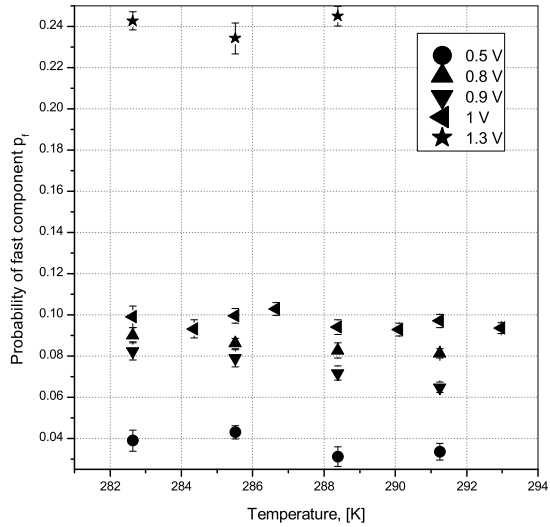


Рис. 9. Зависимость вероятности быстрой компоненты послеимпульса  $p_f$  от температуры при фиксированном перенапряжении для Hamamatsu S10362-11-100C.

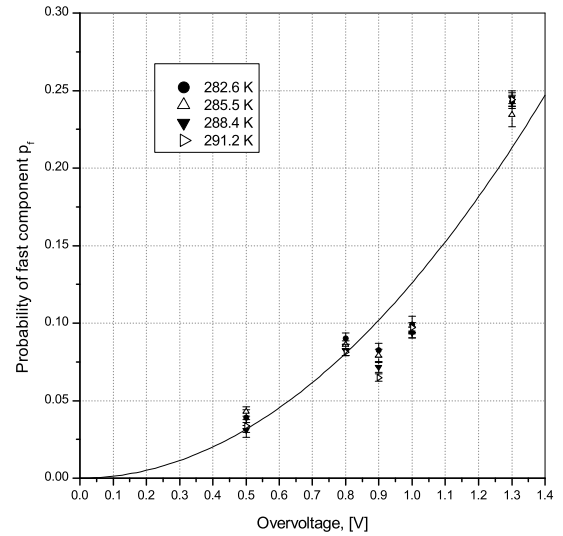


Рис. 10. Зависимость вероятности быстрой компоненты послеимпульса  $p_f$  от перенапряжения при фиксированной температуре для Hamamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.



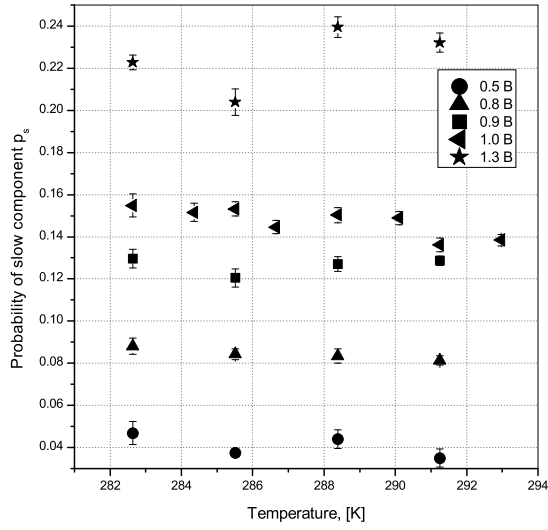


Рис. 11. Зависимость вероятности медленной компоненты послеимпульса  $p_s$  от температуры при фиксированном перенапряжении для Namamatsu S10362-11-100C.

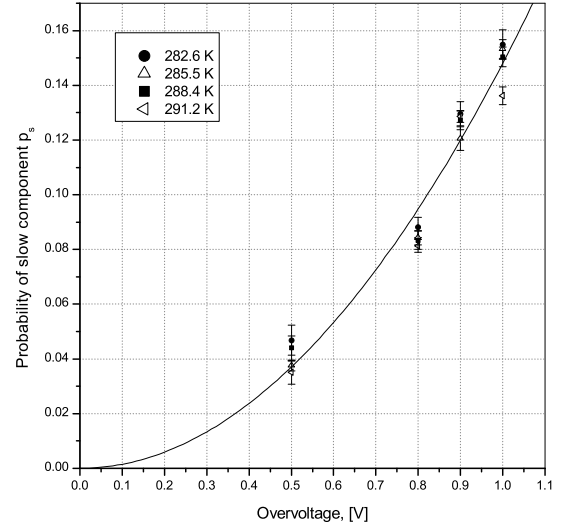


Рис. 12. Зависимость вероятности медленной компоненты послеимпульса  $p_s$  от перенапряжения при фиксированной температуре для Namamatsu S10362-11-100C. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

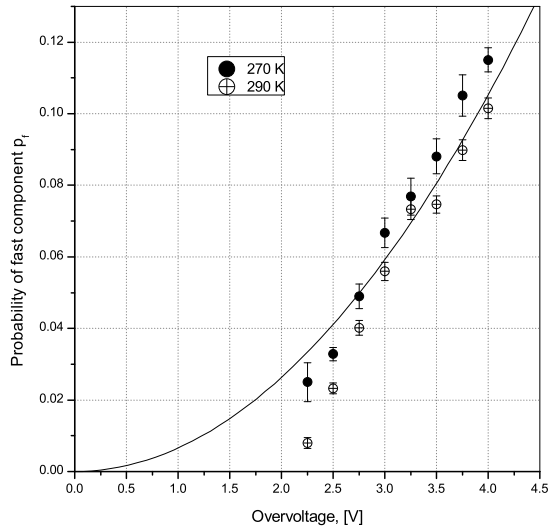


Рис. 13. Зависимость вероятности быстрой компоненты послеимпульса  $p_f$  от перенапряжения при фиксированной температуре для Namamatsu S13360-3050CS. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

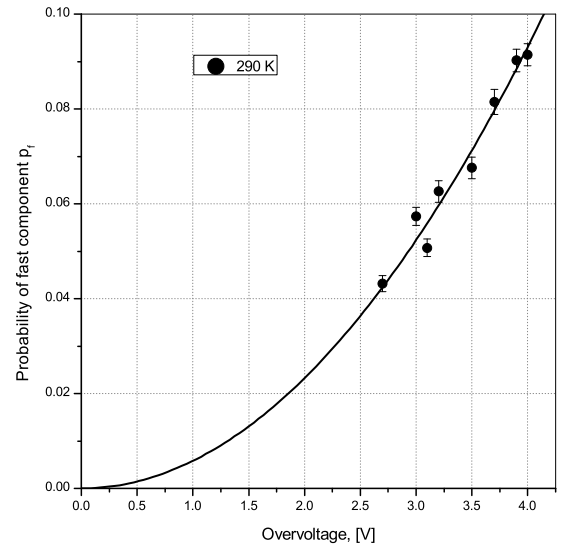


Рис. 14. Зависимость вероятности быстрой компоненты послеимпульса  $p_f$  от перенапряжения при фиксированной температуре для KETEK PM1125NS-SB0. Данные аппроксимированы квадратичной функцией.

## Список литературы

- [1] E.A. Babichev et al., SiPM based photon counting detector for scanning digital radiography, JINST 10 (2015) C03002
- [2] Patrick Eckert et al., Characterisation Studies of Silicon Photomultipliers, Nucl. Instrum. Meth. A 620 (2010) pp. 217–226
- [3] L. Gallego et al., Modeling crosstalk in silicon photomultipliers, Nucl. Instrum. Meth. A 787 (2015) pp. 153–156
- [4] 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
- [5] Y. Du et al., After-pulsing and cross-talk in multi-pixel photon counters, Nucl. Instr. and Meth. A 596 (2008) pp. 396-401
- [6] Fabrice Retiere, Using MPPCs for T2K Fine Grain Detector, PoS PD07 (2006) 017