

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ КРЕМНИЕВОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ

*Н. В. Анфимов<sup>1</sup>, А. В. Рыбников<sup>2</sup>*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В работе представлен метод измерения собственного временного разрешения, определяемого срабатыванием одиночного пикселя кремниевого фотоумножителя, а также параметра, определяемого шумами, которые важны при оценке временного разрешения детекторов. Метод основан на использовании хорошего однофотонного разрешения прибора, позволяющего отобрать времена, соответствующие амплитудам срабатывания от одного и нескольких пикселей.

A method for measuring the intrinsic time resolution of a silicon photomultiplier driven by triggering of a single pixel and a parameter determined by noise, which is important for estimation of the time resolution of detectors, is presented in this paper. The method is based on the use of a good single-photon resolution of the device, which allows selecting the times corresponding to amplitudes produced by triggering of one or several pixels.

PACS: 29.40.Mc; 29.40.Wl; 29.90.+r

### ВВЕДЕНИЕ

Кремниевый фотоумножитель (микрорексельный лавинный фотодиод) — это полупроводниковый прибор, состоящий из множества микроячеек (пикселей), каждая из которых способна регистрировать одиночные фотоны и работает в счетном режиме да/нет. Количество пикселей определяет динамический диапазон работы прибора. В настоящее время используются приборы с общим числом ячеек порядка десятков тысяч и активной площадью, достигающей десятков квадратных миллиметров. Большие площади обуславливают высокие темновые шумы на уровне нескольких МГц, а также достаточно большую емкость, которая влияет на амплитудно-частотные характеристики и определяет временные характеристики прибора.

В качестве параметра фотодетектора, характеризующего его временные свойства, часто приводится так называемое временное разрешение — это разрешение, полученное между идеальным триггером (пренебрежимо малым джиттером) и откликом фотодетектора на одиночный зарегистрированный фотон от идеального быстродействующего источника света. Таким источником света может служить, например, пикосекундный лазер, у которого длительность вспышки света намного короче временного разрешения фотодетектора. Однако следует учитывать вклад во временное разрешение, обусловленный измерительной аппаратурой, методом определения времени и шумами, которые заметно ухудшают измеряемое время для сигналов малых амплитуд.

---

<sup>1</sup>E-mail: anphimov@gmail.com

<sup>2</sup>E-mail: arsenfish@gmail.com

## СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ

Кремниевый фотоумножитель, обладая хорошим однофотоэлектронным (однопиксельным) амплитудным разрешением (например, рис. 1), позволяет разделить временные события, относящиеся к разным амплитудным пикам, и, таким образом, измеряя совместно амплитуду и время, можно получить зависимость временного разрешения от амплитуд, соответствующих различному числу сработавших пикселей (обозначены цифрами под пиками на рис. 1). В работе был использован аналогово-цифровой преобразователь с выборкой по времени, так называемый сэмплинг-АЦП — DRS4 [1]. Максимальная частота дискретизации 5 ГГц в сочетании с математической обработкой сигналов позволяет проводить временные измерения с погрешностью, не превышающей 10 пс, которая в основном определяется внутренним джиттером системы. Достаточно хорошее амплитудное разрешение 1 В/14 бит АЦП позволяет одновременно делать амплитудный (зарядовый) анализ совместно с временным.

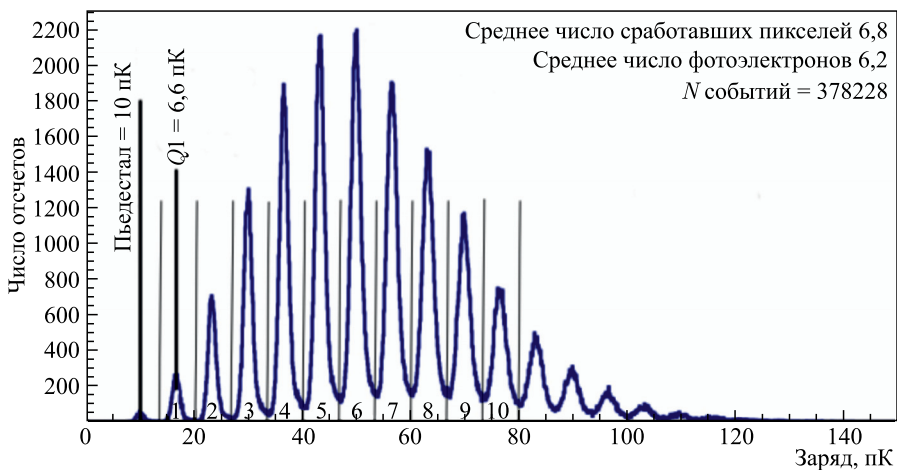


Рис. 1. Спектр кремниевого фотоумножителя MPPC S12572-010C(X) со средним числом фотоэлектронов 6,2 и средним числом сработавших пикселей 6,8. Размер ячейки — 10 мкм, активная область —  $3 \times 3$  мм.  $Q_1$  — зарядовая амплитуда от срабатывания одиночного пикселя. При измерении использовался усилитель с коэффициентом усиления  $K = 265$

Нами исследован фотодиод MPPC S12572-010C(MPPC10) фирмы Hamamatsu [2], который имеет размеры пикселя 10 мкм. Рабочее усиление пикселя — примерно  $1,5 \cdot 10^5$ . Фотодиод обладает достаточно быстрым фронтом нарастания сигнала  $(0,1-0,9) \approx 3$  нс.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Генератор импульсов EIG 1000D запускает пикосекундный лазер PiL044 компании Advanced Laser Diode Systems A.L.S. GmbH [3], который испускает световой импульс длительностью 45 пс, и затем свет транспортируется по прозрачному оптическому волокну к фотоприемнику (MPPC). Сигнал с фотодиода проходит через усилитель напряжения (AMP) с коэффициентом усиления  $K = 265$  и полосой около 50 МГц и далее попадает на второй канал АЦП DRS4. Генератор EIG 1000D имеет синхроимпульс уровня TTL, который пропускается через известную кабельную задержку Delay, инвертируется на широкополосном трансформаторе-

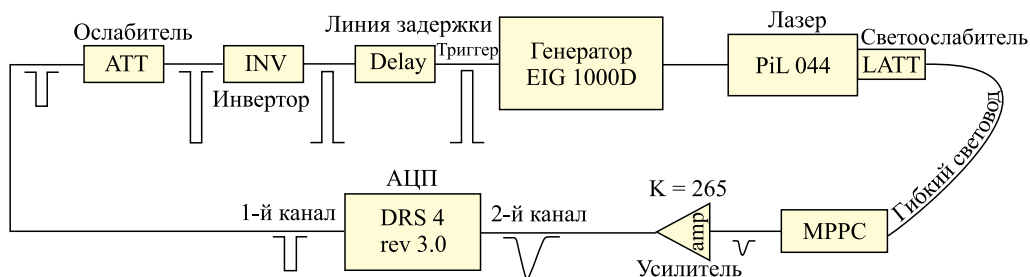


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

инверторе EG&G T100 (INV), ослабляется через широкополосный ослабитель фирмы Huber&Shuhner 20dB и подается на первый канал АЦП.

Данные с АЦП представляют собой осциллограммы сигналов, записанные в двоичном виде (2 байт/выборка). Примеры осциллограмм приведены на рис. 3, вертикальная шкала — в отсчетах АЦП. Вначале мы разветвили инвертированный синхросигнал с EIG 1000D, используя пассивный согласованный разветвитель, и подали его на разные каналы АЦП, чтобы измерить собственное и применяемого математического метода временное разрешение АЦП. Для уменьшения шумов и флуктуаций нами был применен фильтр низких частот (ФНЧ) на основе быстрого преобразования Фурье с использованием библиотеки быстрого преобразования Фурье fftw3 [4], ограничивающий полосу частот до 100 МГц, которая превышает полосу усилителя. Такой фильтр позволяет удалить собственные шумы АЦП и высокочастотные наводки. На рис. 3 приведены сигналы с генератора, пропущенные через ФНЧ. Далее базовая линия и фронт сигнала аппроксимировались линейными функциями. Время  $T$  вычислялось как пересечение этих функций с добавлением некоторой константы — смещения  $C$  для базовой линии BL, которая определялась эмпирически получением наилучшего временного разрешения и затем

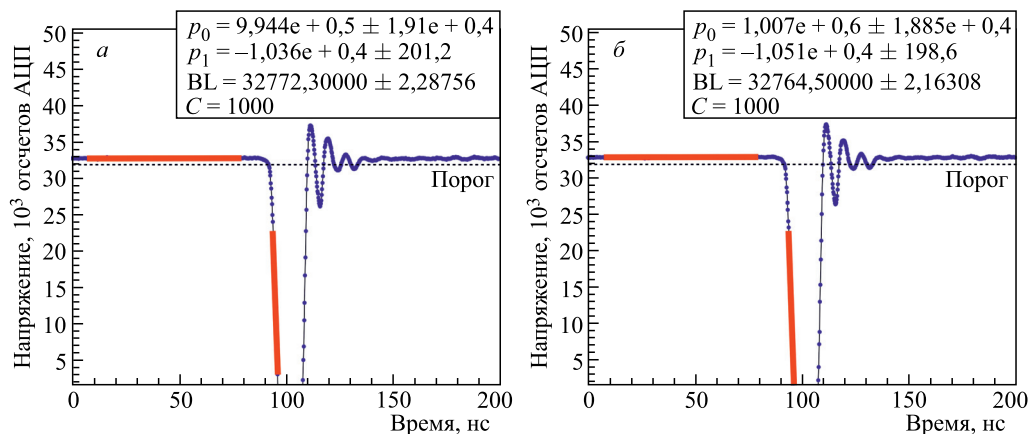


Рис. 3. Разветвленный сигнал с генератора, поданный на оба канала АЦП после ФНЧ. Анализ времени прихода сигналов при помощи линейной функции: а) первый канал; б) второй канал

фиксирувалась:

$$T = \frac{BL - p_0 - C}{p_1}, \quad (1)$$

где  $p_0$  и  $p_1$  — параметры линейной функции, полученные в результате аппроксимации фронта сигнала. Интервал для аппроксимации фронта сигнала определялся из условия превышения сигнала некоторого фиксированного порога. Для проверки правильности работы математического метода мы использовали различные кабельные задержки приблизительно известной величины (указана на кабеле), которые позволяли удостовериться в правильности измерения времени. Пример полученных гистограмм приведен на рис. 4 для случаев без задержки (рис. *а*), когда дополнительная кабельная задержка в 2 нс устанавливалась в первый канал (рис. *б*), а затем во второй канал (рис. *в*). Из гистограмм видно, что задержка на кабеле составляет примерно 2013 пс, что хорошо согласуется с задержкой, указанной на кабеле в 2 нс. Видно, что временное разрешение несколько изменилось при изменении задержки. Это вызвано тем, что время каждой отдельной выборки (семпла) флуктуирует, и чем больше задержка между сигналами, тем больший вклад таких флуктуаций во временное разрешение. Однако в пределах задержек от  $-2$  до  $+2$  нс можно гарантировать, что временное разрешение не хуже 20 пс (см. рис. 4, стандартное отклонение менее 20 пс).

Далее нами были произведены измерения с кремниевыми фотоумножителями. После определения времени прихода сигнала с фотодиода сигнал интегрировался и пересчитывался

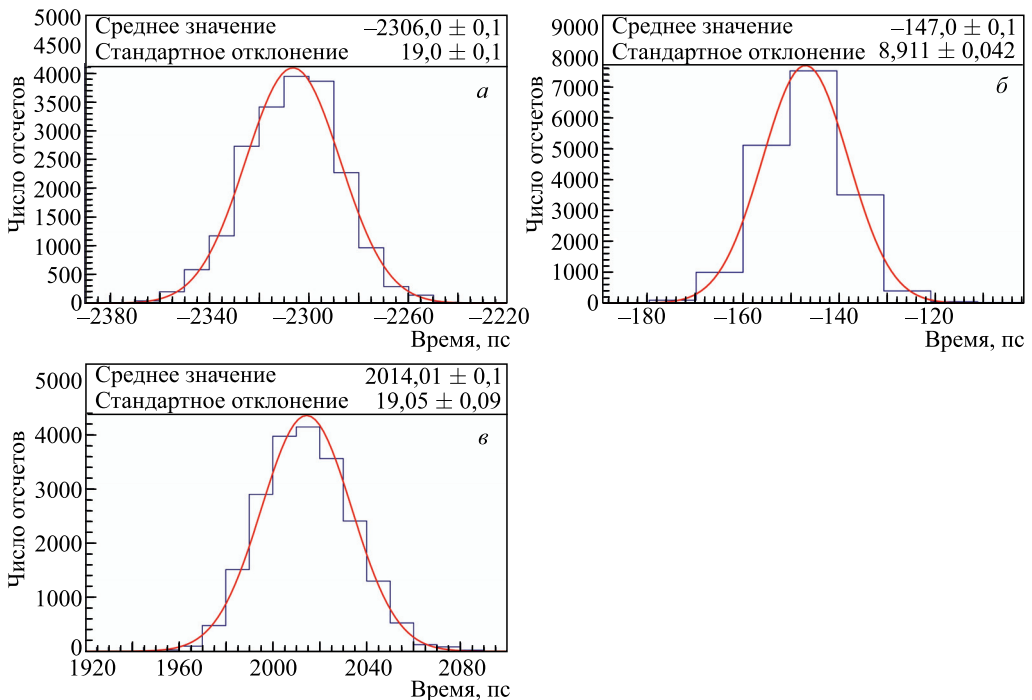


Рис. 4. Результаты измерения собственного временного разрешения системы и математического метода. Разница во времени между двумя сигналами: *а*) без кабельной задержки; *б*) с задержкой в 2 нс на первом канале; *в*) 2 нс на втором канале

вался в заряд в диапазоне времен, соответствующем длительности сигнала (30 нс). При этом мы добавляли 10 нс в окно интегрирования перед началом времени прихода во избежание потери части заряда, поскольку определяемое время не обязательно соответствует началу сигнала (зависит от выбора константы, прибавляемой к базовой линии). Зарядовый спектр с МРРС приведен на рис. 1. После усилителя и ФНЧ фронт сигнала с МРРС составляет порядка 6 нс, что, конечно, ухудшает временное разрешение (рис. 5). Из рис. 1 видно, что фотодиод обладает хорошим амплитудным разрешением событий от срабатывания различного числа пикселей. Используя это свойство, мы отобрали временные события по различным амплитудным пикам и построили соответствующие гистограммы разности времен между триггером и откликом фотодиода. На рис. 6 представлены примеры временных гистограмм, соответствующие отклику МРРС от 1 и от 6 одновременно сработавших пикселей. Гистограммы аппроксимировались функцией Гаусса, и временное разрешение определялось как параметр  $\sigma$  гауссовой функции.

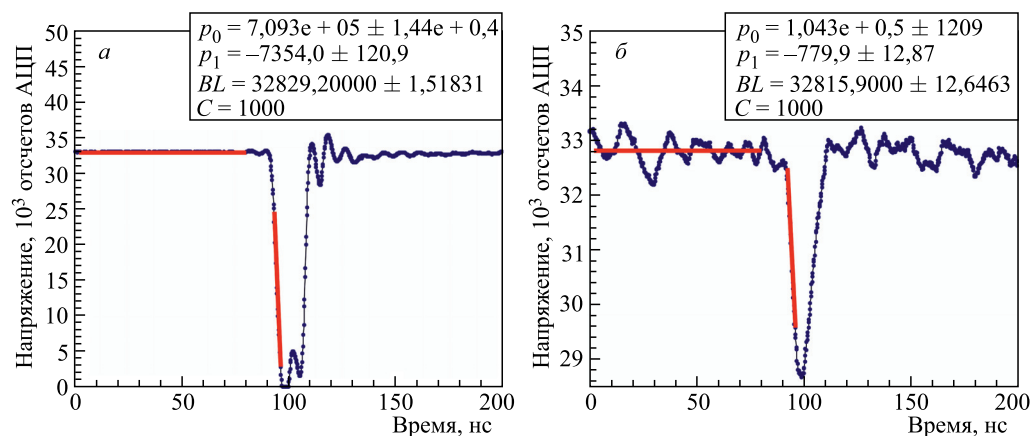


Рис. 5. Одиночные сигналы с генератора (а) и с фотодиода (б) после ФНЧ. Анализ времени прихода сигналов при помощи линейной функции

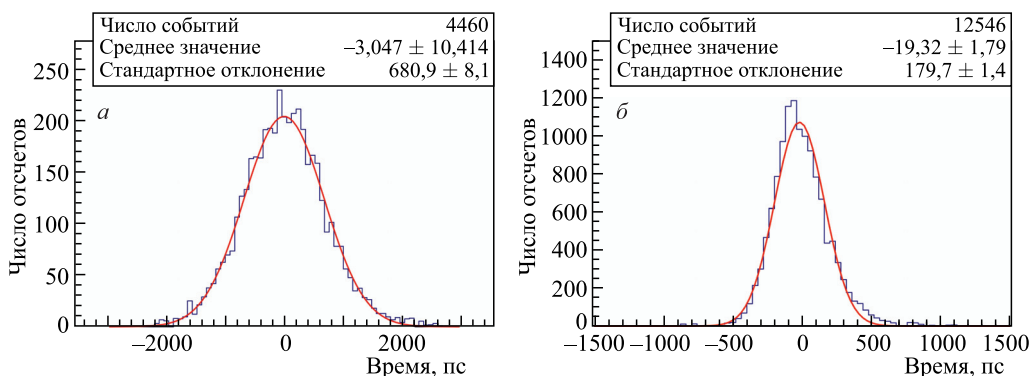


Рис. 6. Временные спектры от МРРС10: а) для первого фотоэлектронного пика; б) для шестого фотоэлектронного пика

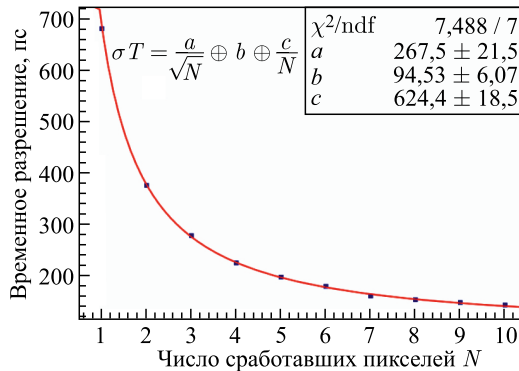


Рис. 7. Зависимость временного разрешения от числа сработавших пикселей

Полученные результаты (рис. 7) были положены на общий график и аппроксимированы функцией вида

$$\sigma T = \frac{a}{\sqrt{N}} + b + \frac{c}{N}, \quad (2)$$

где  $\sigma T$  — временное разрешение (RMS);  $a$  — собственное временное разрешение, соответствующее отклику от одиночного пикселя;  $b$  — константный член;  $c$  — линейный член, описывающий соотношение сигнал-шум, а  $N$  — число сработавших пикселей. Шумы, которые вносят постоянный вклад в разрешение, описываются константным членом. Константный член также содержит в себе шумы электроники и дифференциальную нелинейность методики измерения времени. Линейный член связан с тем, что аппроксимация линейной функцией заметно улучшается с ростом амплитуды, а флуктуации прямой линии из-за изменения наклона уменьшаются.

Для сравнения результатов приведем паспортные данные прибора из каталога фирмы Hamamatsu [5]. Для фотодиода MPPC S12572-010C указана цифра 500 пс (ПШПВ), что соответствует величине в 212 пс для RMS и несколько лучше представленного нами результата в 267 пс. Из приведенных данных в паспорте можно заключить, что прибор Hamamatsu работает с гораздо более быстрыми сигналами, используя более быстродействующую электронику. Однако заметим, что цифра, приведенная в этом же паспорте

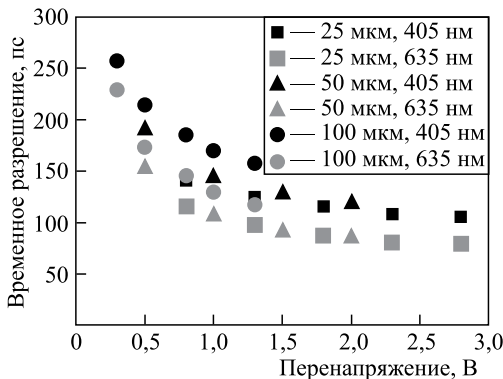


Рис. 8. Временное разрешение для фотодиодов MPPC-S10362-11-025P (пиксель — 25 мкм, квадраты), MPPC-S10362-11-050P (пиксель — 50 мкм, треугольники), MPPC-S10362-11-100P (пиксель — 100 мкм, кружки) для двух различных длин волн в зависимости от перенапряжения на пикселе (выше пробойного напряжения). Все диоды — с размером активной области  $1 \times 1$  мм [6]

для фотодиода с размером ячейки 15 мкм в 400 пс (ПШПВ), не согласуется с измерением, где для приборов с увеличением размера пикселя показано ухудшение временного разрешения (рис. 8) [6].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В заключение хотелось бы отметить, что данный метод позволяет разделить временное разрешение на компоненты, которые обычно измеряются совместно. Он также применим в тех случаях, когда однопиксельное временное разрешение трудно извлекать в условиях больших шумов прибора и электроники. Метод будет полезен при оценке временного разрешения при проектировании детекторов на основе кремниевых фотоумножителей.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Friederich H. et al.* A Scalable DAQ System Based on the DRS4 Waveform Digitizing Chip // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2011. V. 58, No. 4. P. 1652–1656.
2. <http://www.hamamatsu.com/jp/en/community/mppc/4400/S12572-010C>
3. <http://www.alsgmbh.com>
4. *Frigo M., Johnson S. G.* The Design and Implementation of FFTW3 // Proc. IEEE. 2005. V. 93, No. 2. P. 216–231.
5. [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12572-010\\_etc\\_kapd1045e.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12572-010_etc_kapd1045e.pdf)
6. *Ronzhin A. et al.* Tests of Timing Properties of Silicon Photomultipliers // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 616, No. 1. P. 38–44.

Получено 28 июня 2018 г.