



# НОВЫЙ КРЕМНИЕВЫЙ ФОТОУМНОЖИТЕЛЬ С БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИМ ВЫХОДОМ КОМПАНИИ SENS<sup>L</sup>\*

К. О'Нилл, koneill@sensl.com; Н. Павлов, npavlov@sensl.com;  
К. Джексон, cjackson@sensl.com; "SensL Technologies Limited",  
Корк, Ирландия; С. Долинский, dolinsky@research.ge.com,  
Международный исследовательский центр компании "GE" ("ДжиИ"), Нью Йорк, США

В статье представлен новый кремниевый фотоумножитель (SiФЭУ), конструкция которого дополнена добавочным быстродействующим выходом. Этот сигнальный выход обладает сверхбыстрым фотоэлектронным откликом (~2 нс FWHM). Такой детектор легко интегрируется в уже существующие приборы, благодаря возможности использования в качестве традиционного SiФЭУ (тогда сигнал снимается со стандартного анодного выхода), и в новые устройства, где требуется дополнительный быстродействующий сигнальный выход. Результат – время нарастания сигнала при использовании сцинтиллятора LYSO (ортосиликат лютеция и иттрия) вместе с SiФЭУ, обладающим быстродействующим выходом, составляет 2 нс (сравните с типовым значением в 20–40 нс для сигнала, снимаемого с анодного выхода SiФЭУ). Это позволяет улучшить производительность SiФЭУ серии MicroFM с точки зрения разрешающего времени схемы совпадений (Coincidence Resolved Time – CRT) кремниевых фотоумножителей с 300 до 250 пс. Более того, в сравнении со значением, получаемым при использовании сигнала с анодного выхода SiФЭУ, использование быстродействующего выхода позволяет расширить диапазон основных пороговых значений без значительного ухудшения CRT. Проиллюстрирована высокая эффективность обнаружения фотонов (Photon Detection Efficiency – PDE). Материал был представлен на Международном семинаре, посвященном новым фотонным фотоприемникам, в Лаборатории линейных ускорителей, Орси, Франция 13–15 июня 2012 года.

## ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые фотоумножители (SiФЭУ) – фотоприемники, наиболее предпочтительные для решения прикладных задач, предъявляющих

повышенные требования к временным параметрам детекторов (позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) [1], обнаружение радиоактивных и взрывчатых веществ, лазерное зондирование с помощью ЛИДАР-технологий). Этому способствуют (в сравнении с традиционными фотоэлектронными умножителями (ФЭУ))

\* Перевод предоставлен ЗАО "НТК "АЗИМУТ ФОТОНИКС",  
www.azimp.ru.

низкая стоимость SiФЭУ и постоянное улучшение их параметров. Однако имеется одна трудность в отношении SiФЭУ – необходимость улучшения временных характеристик. В то время как эффективность обнаружения фотонов является ключевым параметром в усовершенствовании временных параметров SiФЭУ, другой важный фактор – время нарастания сигналов с отдельных микроячеек и возможность отметить время прихода самого первого фотоэлектрона в сцинтилляционной вспышке [2]. Действенный способ улучшения временных параметров фотоприемников – возможность сделать передний фронт сигнала как можно более крутым. В этой статье обратим внимание на то, что благодаря использованию предлагаемого метода можно значительно улучшить временные характеристики кремниевых фотумножителей в широком диапазоне пороговых значений временных отметок.

### СТРУКТУРА НОВОГО SiФЭУ

Традиционная структура SiФЭУ состоит из параллельных массивов лавинных фотодиодов, каждый из которых последовательно соединен с гасящим резистором (рис.1а). В такой структуре подача напряжения смещения и считывание сигнала осуществляются на одном и том же электроде – аноде. Ввод

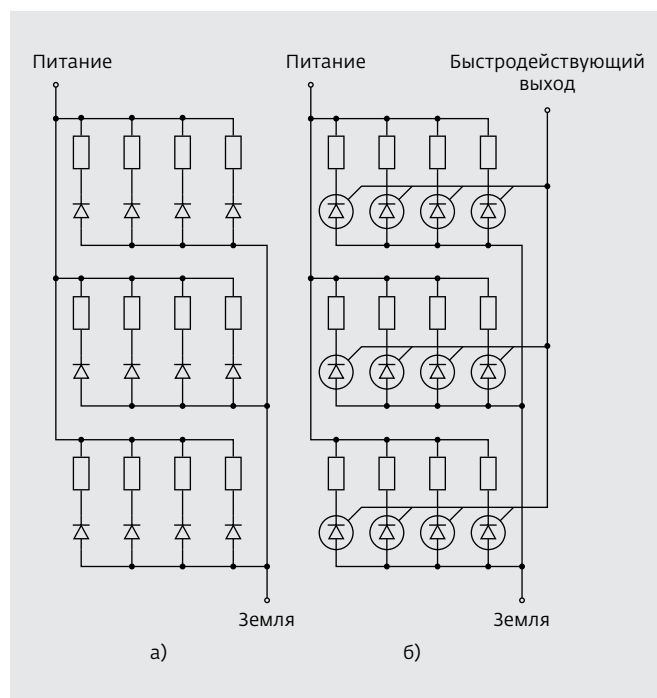


Рис.1. Структура SiФЭУ: а) традиционная; б) с быстродействующим выходом

дополнительного электрода в каждую пару лавинный фотодиод – гасящий резистор создает сигнальную линию специального назначения, по которой передаются более резкие временные

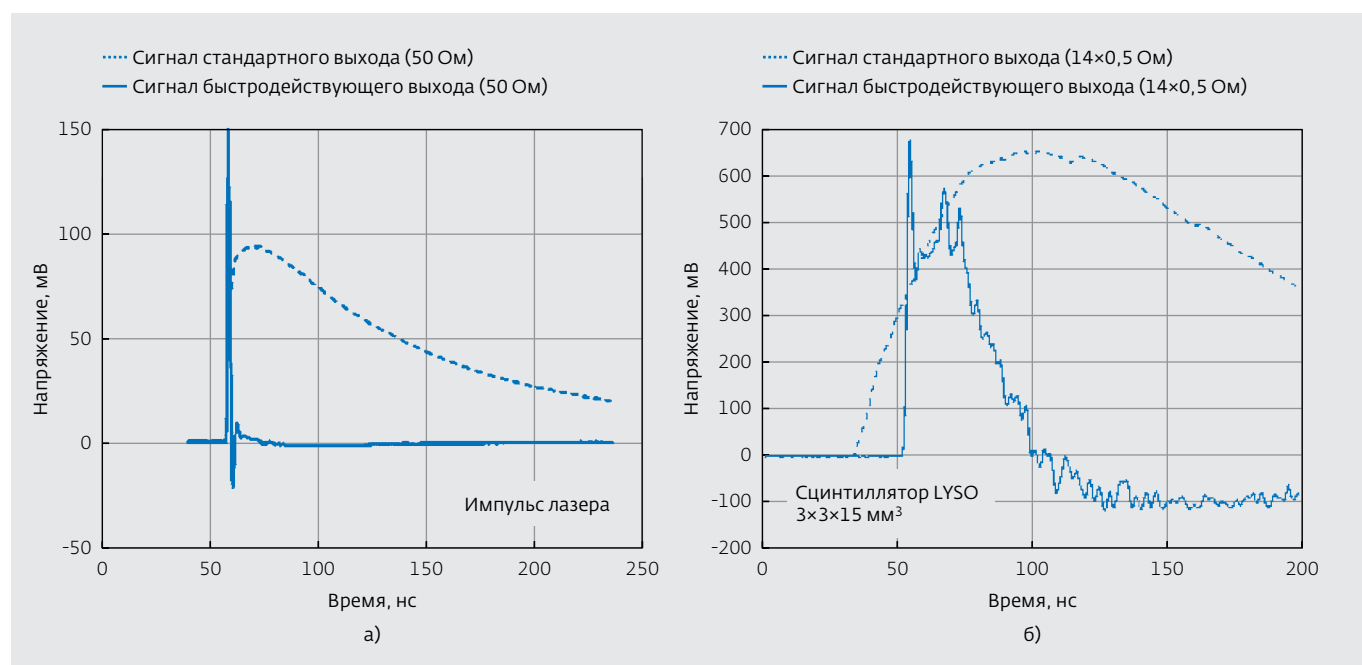


Рис.2. Отклики в форме электрического импульса: а) с SiФЭУ серий MicroFM и MicroSM при использовании импульсного лазера; б) с SiФЭУ при работе со сцинтилляционным кристаллом LYSO

импульсы, чем традиционный разряд, возникающий в SiФЭУ, который по своей природе ограничен большой выходной емкостью каждого лавинного фотодиода [3].

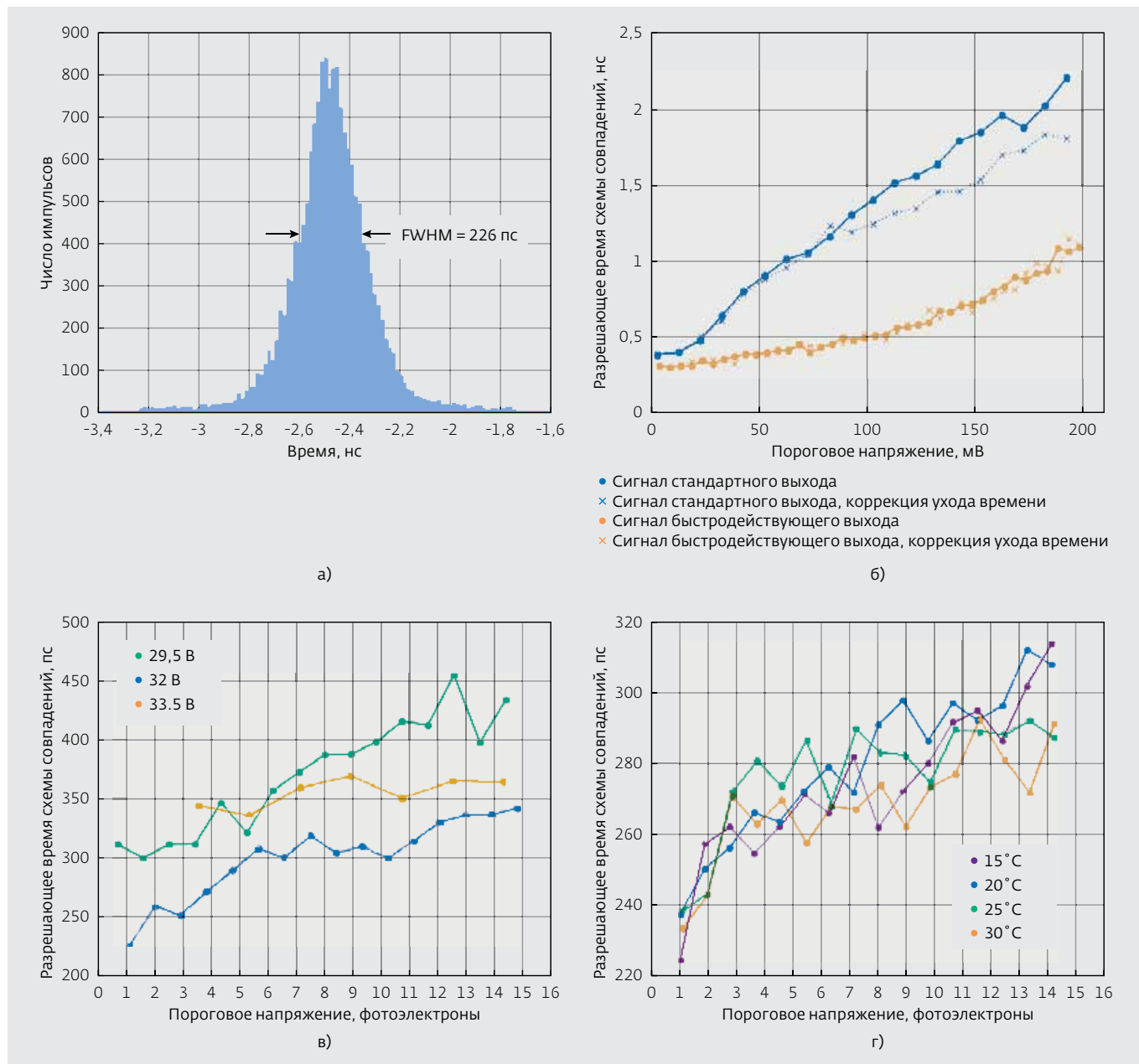
### ИЗМЕРЕНИЯ

Все измерения проводились при использовании SiФЭУ серии MicroFM с активной областью

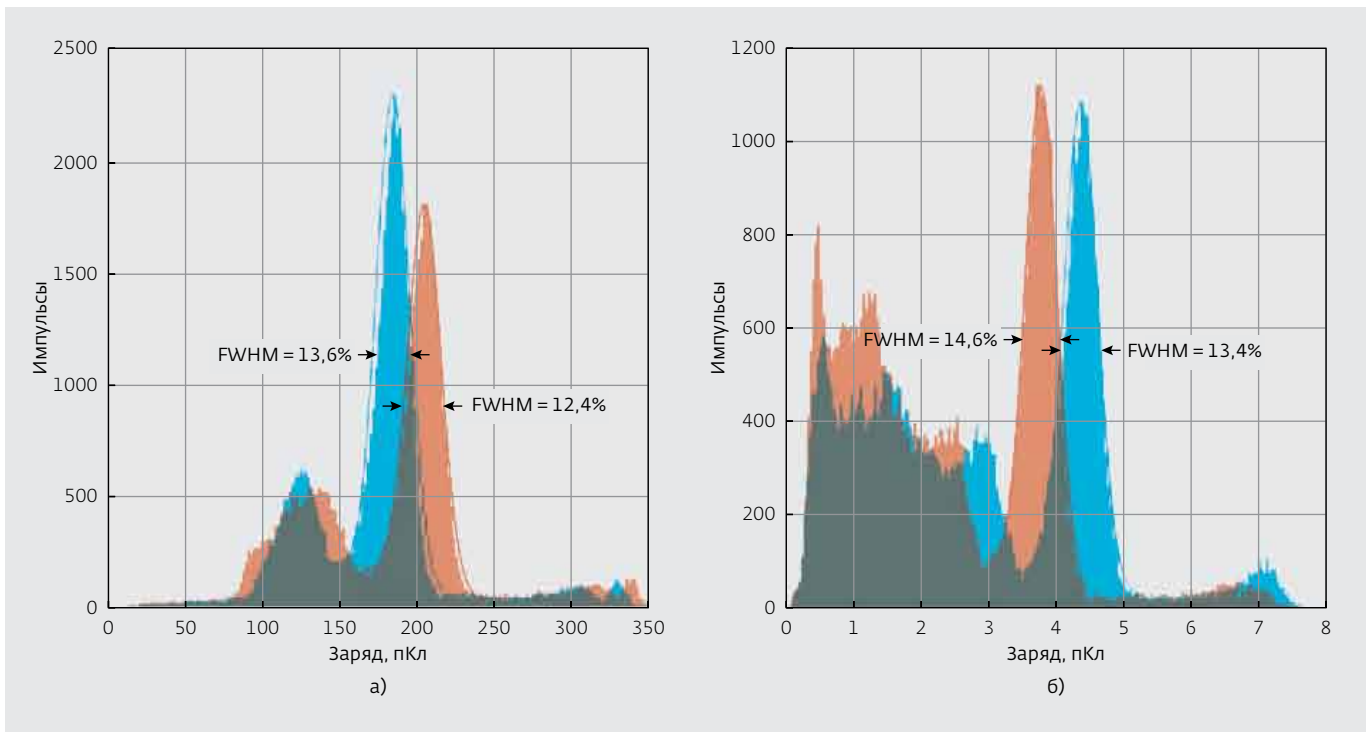
$3 \times 3 \text{ мм}^2$  с размером микроячейки 35 мкм. Каждый SiФЭУ состоит из параллельно соединенных 4774 микроячеек.

### Форма сигнала

На рис.2 показана форма сигнала быстродействующего выхода SiФЭУ по сравнению с сигналом со стандартного анодного выхода. Отклик на



**Рис.3.** Разрешающее время схемы совпадений (CRT) SiФЭУ: а) использующие выходные сигналы; б) зависимость CRT от изменения порогового напряжения в сравнении с быстродействующим (синий) и стандартным (зеленый) выходом (скорректированные данные ухода показаний моментов времени отмечены крестиками); в) изменение CRT с приложенным напряжением смещения (оптимальное напряжение смещения на 4,5 В выше напряжения пробоя 27,5 В); г) изменение CRT при разных температурах



**Рис.4.** Энергетическое разрешение (спектральный пик по линии 511 кэВ): а) для стандартного выхода; б) для быстродействующего выхода

короткие лазерные импульсы (лазерный излучатель Photech LPG-405 [4]), представленный на рис.2а, показывает, что быстродействующий выход способен выдавать импульсы с очень коротким временем нарастания (<1 нс) и очень малой шириной (2 нс). Преимущества данной формы сигнала для использования во времяпролетной ПЭТ показаны на рис.2б: представлены сигналы, полученные с быстродействующего выхода и со стандартного выхода SiФЭУ при работе со сцинтилляционным кристаллом LYSO размером 3×3×15 мм<sup>3</sup>. Сигнал, полученный с быстродействующего выхода, имеет намного более резкий фронт импульса (10%–90%, время нарастания 1,5 нс), чем сигнал со стандартного выхода (10%–90%, время нарастания 46 нс).

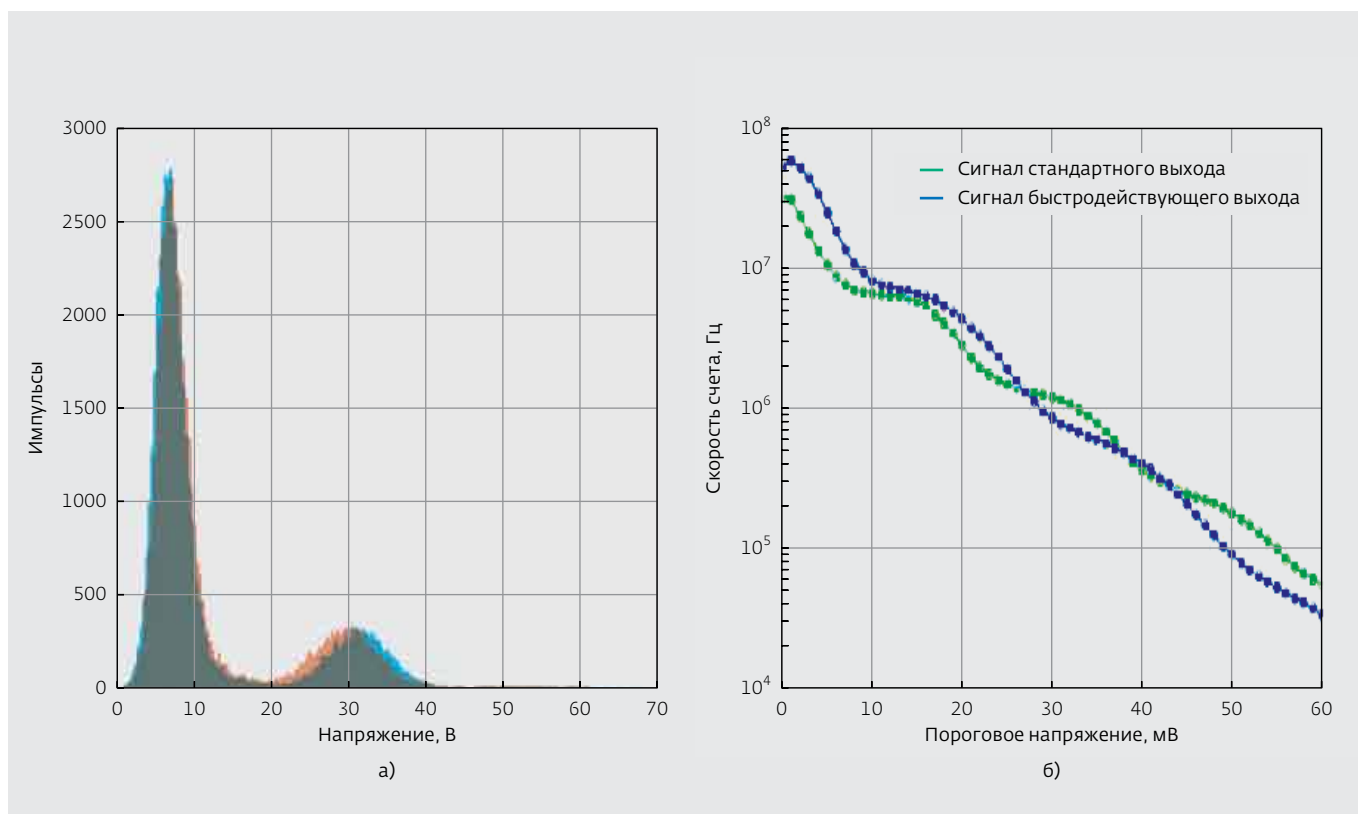
#### Разрешающее время схемы совпадений

Разрешающее время схемы совпадений (Coincidence Resolved Time – CRT) было измерено по излучению линии 511 кэВ источника <sup>22</sup>Na и сцинтилляционного кристалла LYSO размером 3×3×15 мм<sup>3</sup>. Измерения проводились с помощью 12-битного аналого-цифрового преобразователя с частотой преобразования 3,2 GS/s [5]. Для получения временных отметок

использовали триггеры переднего фронта. Фильтрация энергии осуществлялась для всего набора данных, полученных возле фотонного пика по линии 511 кэВ в диапазоне от 461 кэВ до 561 кэВ.

Временные параметры сигнала с быстродействующего выхода представлены на рис.3. На рис.3а показано, как кривая CRT достигает значения в 226 пс (FWHM) при оптимальном значении напряжения смещения, превышающем напряжение пробоя на 4,5 В. Для сравнения CRT быстродействующего выхода и стандартного выхода SiФЭУ (рис.3б) они представлены в виде функциональных зависимостей от порогового напряжения, превышающего на 2 В напряжение пробоя. Стоит отметить, что быстродействующий выход показывает незначительную зависимость от порогового значения в сравнении со стандартным выходом, повышаясь от 300 пс (при пороговом значении в 5 мВ) почти до 500 пс (при пороговом значении в 100 мВ). В таком же диапазоне пороговых значений CRT кремниевого фотоумножителя серии MicroSM увеличивается с 350 пикосекунд до 1,35 нс.

На рис.3в показана зависимость CRT быстродействующего выхода от порогового значения,



**Рис.5.** Исследование пороговых значений: а) быстродействующие выходы отчетливо выделяют темновые одиночные фотоэлектроны; б) сканограмма амплитуды порогового значения (заметен меньший эффект перекрестных помех между микроячейками при использовании быстродействующего выхода по сравнению со стандартным выходом)

(выраженного в числе фотоэлектронов) для трех различных значений перенапряжения: 2; 4,5 и 6 В (соответственно абсолютные значения напряжения составляют 29,5; 31 и 33,5 В). Таким образом, оптимальным значением перенапряжения для CRT при использовании быстродействующего выхода стала величина 4,5 В. Это может быть связано с повышенной эффективностью обнаружения фотона (PDE), возникающей в случае, когда более высокие помехи преобладают над изменчивостью сигнала, что приводит к ухудшению CRT.

На рис.3г показана зависимость CRT от порогового значения (выраженного в числе фотоэлектронов) при различных комнатных температурах. Подчеркнем, что не существует интерпретируемой статистики изменений CRT в диапазоне температур от 15 до 30°C.

### Энергетическое разрешение

Энергетическое разрешение может быть определено как с помощью стандартного, так и быстродействующего выхода (рис.4). Для SiФЭУ с активной областью 3×3 мм с размером микроячейки

35 мкм и при перенапряжении в 2 В среднее значение энергетического разрешения по линии 511 кэВ, (использован источник <sup>22</sup>Na и сцинтиллятор LYSO размером 3×3×15 мм), составляет 13% для стандартного выхода и 14% для быстродействующего выхода.

### Единичный фотоэлектронный отклик и сканограмма порогового значения

Импульсы быстродействующего выхода SiФЭУ достаточно коротки для того, чтобы выделить темновые импульсы на уровне шума. Для этого надо использовать сцинтилляционный спектр (рис.5а). Отклонения амплитуды от средней величины сигнала в темновой (не сцинтилляционной) части отклика были использованы для получения результатов CRT, представленных выше на рис.3. Используя эту информацию, можно стандартизировать пороговые значения напряжения по отношению к фотоэлектронам, как показано на рис.3в и рис.3г.

Сканограмма амплитуды порогового значения (рис.5б) показывает уменьшение перекрестных помех между микроячейками при



использовании быстродействующего выхода (по сравнению со стандартным выходом). Возможно, это проявляется благодаря способности кратковременного сигнала резко различать явления перекрестных помех, возникающих в пределах длительности импульса (~2 нс) таким образом, что может возникнуть наложение импульсов. Следовательно, перекрестные помехи при использовании быстродействующего выхода снижены до 8,5% от стандартного уровня перекрестных помех в 20%.

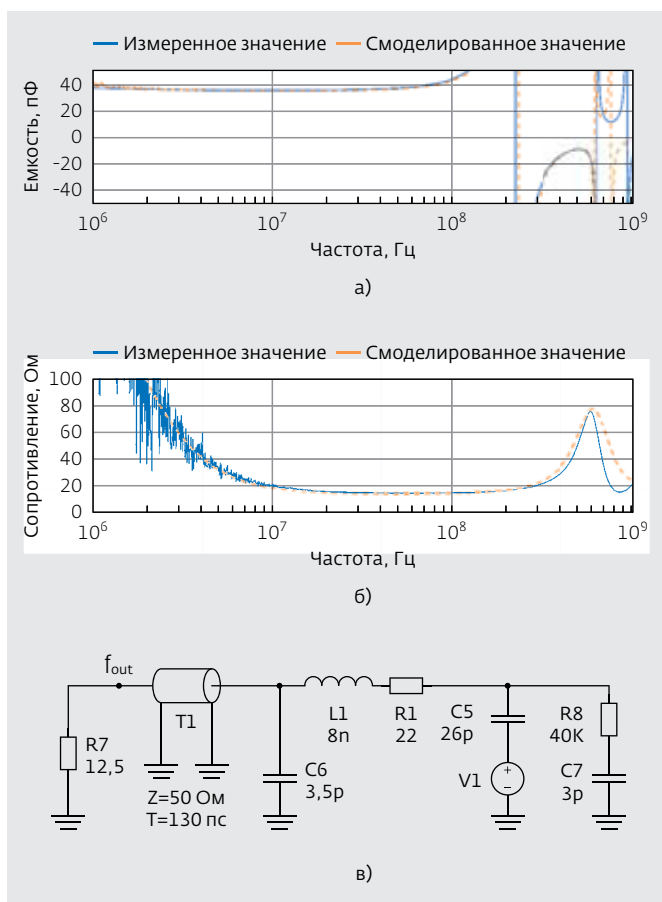
### Высокочастотная характеристика

Выходная емкость и сопротивление быстродействующего выхода SiФЭУ измерены с помощью векторного анализатора цепей (рис.6а и 6б). Выходная емкость и сопротивление быстродействующего выхода остаются неизменными в широкой полосе частот, но из-за резонансов, возникающих по причине паразитных емкостей и индуктивностей, начинают изменяться после 3 МГц. Представленная Spice-модель (рис.6в) точно отражает высокочастотную характеристику быстродействующего выхода SiФЭУ в широком диапазоне частот – до 700 МГц.

Таким образом, предложенный компанией SensL быстродействующий выход в кремниевых фотоумножителях серии MicroFM позволил улучшить временные характеристики SiФЭУ в пределах широкого диапазона пороговых значений. Кроме того, быстродействующий выход имеет низкую выходную емкость, что делает его совместимым с процессом обработки высокочастотных сигналов. Это первая демонстрация того, что способность обнаруживать первый сцинтилляционный фотон с помощью быстродействующего выхода SiФЭУ может привести к значительному улучшению CRT. Дальнейшее повышение эффективности обнаружения фотонов в сочетании с оптимизацией структуры SiФЭУ с быстродействующим выходом должно позволить кремниевым фотоумножителям достичь максимально возможных параметров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ронкэли.Э., Черри С. Применение кремниевых фотоумножителей в позитронно-эмиссионной томографии. – Ежегодник технологий биомедицинских систем, 2011, № 39, с.1358–1377.
2. Пост Р. и Шифф Л. Статистическое ограничение разрешающего времени сцинтилляционных счетчиков. – Физический вестник, 1950, т. 80, с. 1113.
3. Патент WO2011117309, Кремниевый фотоумножитель и метод считывания данных. Н. Павлов.
4. [www.photek.com](http://www.photek.com)
5. Д. Бретон и др. Высокора разрешающая фотонная синхронизация МКП ФЭУ: сравнение серийного дискриминатора с постоянным порогом (ДПП) и дискретизаторов аналоговых сигналов на основе специализированных ИС TARGET и Wavcatcher. – Издание Стэнфордского центра линейного ускорителя SLAC-PUB-14048.



**Рис.6.** Высокочастотные характеристики быстродействующего выхода (смоделированные кривые обозначены красным пунктиром): а) зависимость емкости от частоты; б) зависимость сопротивления от частоты; в) Spice-модель



# SENSL NEW FAST TIMING

## SILICON PHOTOMULTIPLIER

Kevin O'Neill, SensL Technologies Limited, Cork, Ireland, koneill@sensl.com;  
 Nikolai Pavlov SensL Technologies Limited, Cork, Ireland, npavlov@sensl.com;  
 Sergei Dolinsky, GE global research Niskayuna, NY, USA, dolinsky@research.ge.com;  
 Carl Jackson SensL Technologies Limited, Cork, Ireland, cjackson@sensl.com

In this paper we report on a new silicon photomultiplier (SPM) architecture with additional signal output. This additional output has very fast single photo electron response (~2 ns FWTM). This new device can be easily integrated into legacy systems by providing the ability to operate as a normal SPM with Anode readout or in new designs with an additional fast output. As result the rise time of timing signal for LYSO scintillator coupled to this new fast SPM is about 2ns, compared with typical 20-40ns for SPM's anode signal. This enables coincidence-timing performance improvements for SPM devices, from 300 ps (Coincidence Resolved Time – CRT – FWHM) to better than 250ps (CRT FWHM) coincidence timing resolution for SM series devices. Furthermore, use of the fast terminal allows for a wide range of leading thresholds without large degradation of CRT as compared with standard terminal. In this paper we will demonstrate that providing ability to detect first photon events provides significantly better CRT, comparable to large PDE improvement. (International Workshop on New Photon-detectors, LAL Orsay, France, June 13-15, 2012)

### INTRODUCTION

Silicon Photomultipliers (SPMs) are a favourite candidate for timing applications such as PET [1], Hazard and Threat detection or LiDAR because of their low cost and continually improving performance compared with Photomultiplier Tubes (PMTs). One of the major challenges in SPM is improving high performance timing performance. While photon detection efficiency is a key parameter in improving the timing performance of SPMs, another key ingredient is the rise time of the signals from the individual microcells and the ability to timestamp at the earliest photoelectron signal in the scintillation burst [2]. An effective way to improve timing in devices is to make the leading edge of the signal as steep as possible. In this paper we show that, using this route, a significant improvement in timing performance can be achieved over a wide range of time-stamp thresholds.

### NEW SPM ARCHITECTURE

The traditional SPM consists of a parallel array of avalanche photodiodes each in series with a quench resistor, as shown in Figure 1(a). In this configuration both bias and readout must occur on the same electrode. The introduction of a derivatively coupled electrode to each APD-resistor pair creates single-purpose signal line which delivers steeper rise-time pulses than the traditional SPM discharge which is inherently limited by the large output capacitance of each APD [3].

### MEASUREMENTS

All measurements were made using 3mm SPM devices with 35µm width microcells. Each SPM consists of 4774 microcells in parallel.

#### Signal Shape

The signal shape properties of the fast signal terminal compared with the standard terminal response are shown in Figure 2. The response to a fast pulsed laser signal (Photek LPG-405 [4]) in Figure 2(a) show that the signal terminal is capable of very fast rise time (<1ns) and very short pulse widths (2ns). The benefit of this to timing applications such as TOF-PET are demonstrated in Figure 2(b), in which the electrical response to a scintillation event in 3x3x15mm<sup>3</sup> LYSO crystal of a fast signal terminal is compared to the standard terminal response. The fast terminal demonstrates much steeper rising edge (10%-90% rise time 1.5ns) than the standard terminal (10%-90% rise time 46ns).

### Coincidence Timing Resolution

Coincidence resolving time (CRT) was measured in a side-by-side configuration using the 511keV emission of a <sup>22</sup>Na source and a 3x3x15mm<sup>3</sup> LYSO crystals. Measurements were made using a 12bit 3,2GS/s digitizer [5]. Leading edge triggers were used to validate and timestamp the traces. Energy filtering was performed on all data around the 511keV photon peak, from 461keV to 561keV.

The timing characteristics of the fast terminal are shown in Figure 3(a) - (d). Figure 3(a) shows the CRT at the optimum bias setting of 4,5V over break-down, achieving a FWHM folded CRT of 226ps. Figure 3(b) compares the fast terminal and standard terminal CRT obtained as a function of threshold voltage, at 2V over breakdown. We note that the fast terminal shows a shallow dependence on the threshold compared to the standard terminal, rising from 300ps at 5mV threshold to approximately 500ps at 100mV threshold. Over the same threshold range, the S series CRT rises from 350ps to 1,35ns. Figure 3(c) shows the fast terminal CRT dependence on threshold, expressed as photoelectron amplitude, for three different over-bias conditions: 2V, 4,5V and 6V (corresponding to absolute voltages 29,5V; 31V and 33,5V). Here we observe that the optimum over-bias condition for CRT using the fast terminal is 4,5V. This may be due to increased PDE available while at higher voltage noise dominates the variability of the signal, resulting in deteriorated CRT. Figure 3(d) show the CRT dependence on threshold, expressed in terms of photoelectron amplitude, for a variety of temperatures around room temperature. We note that there is no statistically meaningful variation of the CRT in the temperature range 15°C-30°C.

### Energy Resolution

Energy resolution can be determined from either standard or fast terminal. For 3mm detectors with 35µm width microcells and at 2V over-bias, the average energy resolution of the 511keV peak using a <sup>22</sup>Na source and a LYSO crystal with dimensions is 13% using the standard terminal, and 14% using the fast terminal. When determining the charge integral from the fast mode traces, only the positive part of the trace over the baseline is taken into account

### Single Photoelectron Peak and Threshold Scan

The fast signal terminal pulses are sufficiently short so that dark pulses can be resolved from the noise pedestal. This is performed during scintillator signal capture. This is demonstrated in Figure 5(a), where amplitude deviation from the median signal in dark (non-scintillating) part of





the traces used to construct the CRT results of section 3,2 is shown. Using this information, it is possible to normalize the voltage thresholds in terms of photoelectrons, as in Figure 3(c) and Figure 3(d).

The threshold amplitude scan shown in Figure 5(b) demonstrates reduced cross-talk of the fast terminal compared with in standard mode. This is thought to be due to the fast signal's ability to aggressively discriminate between cross-talk events that occur within a pulse-width (~2ns) so that pile-up may occur. Thus the fast terminal cross-talk is reduced to 8,5% from the standard mode cross-talk of 20%.

### High Frequency Response

Figure 6(a) and (b) shows the Vector Network Analyzer (VNA) output of a fast terminal device. The output capacitance and resistance of the fast terminal is flat over a wide frequency range, becoming distorted at over 3MHz due to resonances due to parasitic capacitances and inductances. Figure 6(c) shows a spice circuit that accurately models the high frequency response of the fast terminal over wide frequency range up to 700MHz.

### SUMMARY AND CONCLUSIONS

We have introduces a new fast terminal readout which improves the timing performance of SPMs over a wide range of thresholds. In addition, the fast terminal has low output capacitance which makes it highly compatible with high-frequency signal processing. This is the first demonstration that ability to detect first scintillation photon through improved SPM detector output response signal can lead to significantly improved CRT. Further improvements in photon detection efficiency (PDE) combined with a fast mode detector architecture should provide SPMs which reach the highest levels of performance possible with SPM technology. ■