

УДК 621.383.2

Твердотельный электронный умножитель многоцелевого назначения на основе гейгеровских микроячеек

Е. А. Георгиевская, С. Н. Клемин, Л. А. Филатов
ГУП «НПП «Пульсар»», Москва, Россия

П. Ж. Бужан, Б. А. Долгошеин, А. Л. Ильин, В. А. Канцеров, В. А. Каплин,
А. И. Каракаш, А. Д. Плешко, Е. В. Попова, С. Ю. Смирнов
Московский государственный инженерно-физический институт
(Технический университет), Москва, Россия

Представлен новый тип фотодетектора — кремниевый фотоэлектронный умножитель (SiФЭУ), представляющий собой фотоприемник на основе упорядоченного набора (матрицы) р-п-переходов (примерно 10^3 мм⁻²), выполненного на общей подложке. Каждый р-п-переход работает в гейгеровском режиме с коэффициентом умножения 10^6 , но весь SiФЭУ представляет собой аналоговый детектор, так как выходной сигнал SiФЭУ есть сумма сигналов р-п-переходов, сработавших при поглощении ими фотонов.

В течение ряда лет в МИФИ совместно с ГУП «НПП «Пульсар»» разрабатывался кремниевый фотоэлектронный умножитель (SiФЭУ) — прибор нового типа для детектирования вспышек света слабой интенсивности (на уровне одиночных фотонов) и длительностью порядка единиц—сотен наносекунд [1, 2]. SiФЭУ — это фотоприемник на основе упорядоченного набора (матрицы) *p-n*-переходов (пикселей), выполненного на общей подложке [3, 4]. Аналогично вакуумным ФЭУ SiФЭУ может стать прибором широкого применения благодаря следующим качествам:

- высокое внутреннее усиление порядка 10^6 , что значительно снижает требования к электронике;
- малый разброс коэффициента усиления (менее 10 %) и, как следствие, низкий шум-фактор;
- невысокая чувствительность коэффициента усиления к изменению температуры и напряжения питания;
- эффективность регистрации видимого света на уровне вакуумных ФЭУ;
- возможность регистрации наносекундных вспышек света без искажения формы детектируемого импульса;
- возможность работы как в режиме счета импульсов, так и в спектрометрическом режиме;
- хорошее временное разрешение (десятки пикосекунд);
- невысокое напряжение питания (25—60 В);
- нечувствительность к магнитному полю;
- компактность (размеры кристалла порядка $2 \times 2 \times 0,3$ мм).

Было изготовлено и исследовано несколько различных модификаций такого детектора.

Принцип действия SiФЭУ

На рис. 1 схематично показан принцип устройства SiФЭУ, который состоит из независимых пикселей с размерами порядка 30×30 мкм. Посредством алюминиевых шин все пиксели объединены, и к ним приложено одинаковое напряжение смещения, превышающее пробойное, что обеспечивает работу в гейгеровском режиме. При попадании кванта света в активную область пикселя в нем развивается самогасящийся гейгеровский разряд. Гашение, т. е. прекращение разряда, происходит из-за падения напряжения на *p-n*-переходе ниже пробойного благодаря наличию в каждом пикселе токоограничивающего резистора. Токовые сигналы от сработавших пикселей суммируются на общей

нагрузке. Усиление каждого пикселя составляет величину порядка 10^6 , поэтому детектор допускает работу на кабель без предварительного усиления. Разброс величины усиления определяется технологическим разбросом величины элементарной емкости и напряжением пробоя пикселей и составляет менее 10 %. Поскольку все пиксели одинаковы, отклик детектора на слабые световые вспышки пропорционален их интенсивности.

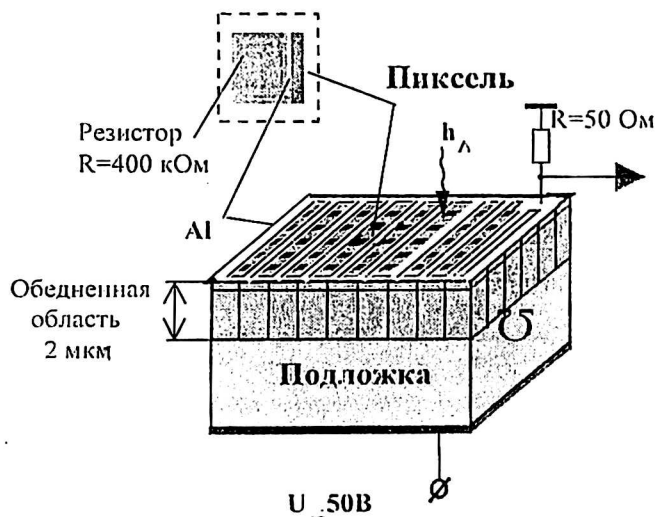


Рис. 1. Устройство SiФЭУ

Одной из особенностей работы в гейгеровском режиме является то, что зависимость усиления пикселя от напряжения смещения линейная в отличие от обычных лавинных фотодиодов, поэтому требования к стабильности напряжения питания гораздо более низкие, чем для ЛФД.

Регистрация слабых вспышек света с помощью SiФЭУ

На рис. 2 показаны осциллограммы импульсов с SiФЭУ, полученные на цифровом осциллографе Tektronix TDS3052 (500 МГц) с использованием внешнего токового усилителя с усилением порядка 100 (полоса пропускания 1 ГГц). Во временных воротах показан импульс от слабой световой вспышки (желтый светодиод $\lambda = 590$ нм, длительность импульса 10 нс), такой, что сработал только один пиксель. Другой импульс соответствует срабатыванию пикселя от темнового генерационного тока. Амплитуда «однопиксельных» импульсов примерно 50 мВ, время фронта 2 нс, постоянная времени спада 20 нс.

Ниже показан амплитудный спектр импульсов с SiФЭУ, соответствующий срабатыванию от световой вспышки в среднем 1 пикселя. На детектор за каждую вспышку падают в среднем 10 фотонов, при этом виден одноэлектронный характер спектра. Нулевой пик соответствует событиям, при которых не сработал ни один пиксель, его ширина определяется в основном шумами электроники. Первый пик — сработал 1 пиксель, второй пик — 2 и т. д. Расстояние между пиками соответствует коэффициенту усиления, ширина первого пика — разбросу коэффициента усиления. Нулевой пик значительно уже, чем первый. Это говорит о том, что за счет высокого внутреннего усиления прибора шумы электроники не влияют на характеристики детектора. Распределение амплитудного спектра сигналов с SiФЭУ подчиняется закону Пуассона.

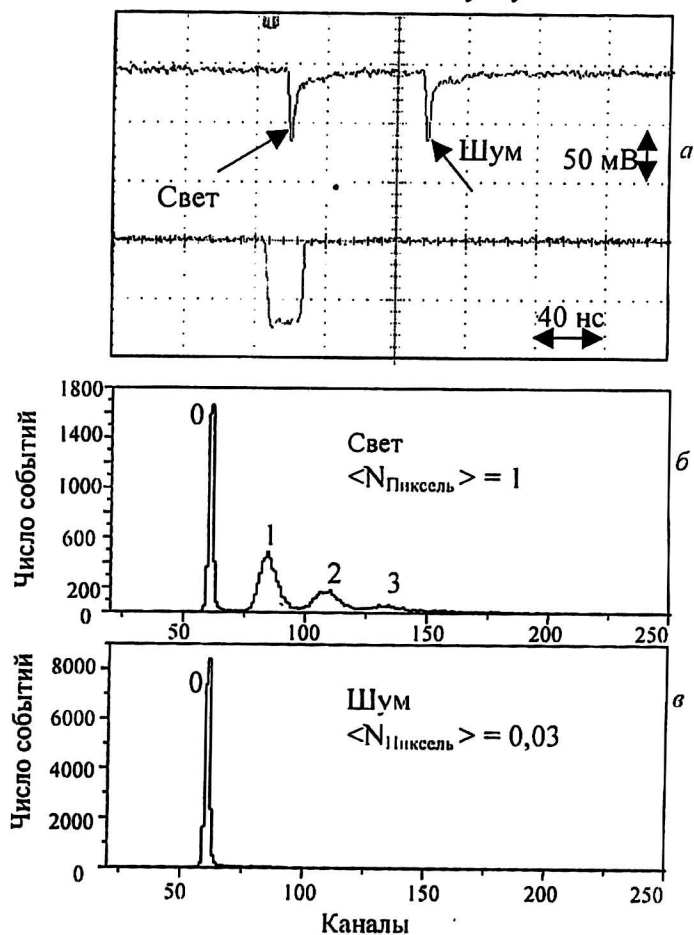


Рис. 2. Однопиксельный режим SiФЭУ:

- а — импульсы от срабатывания одного пикселя SiФЭУ;
- б — амплитудный спектр при слабой засветке;
- в — амплитудный спектр в отсутствие засветки

Особенностью регистрации вспышек света такой интенсивности является то, что при расчете соотношения сигнал/шум требуется учитывать

шум, связанный со статистическими флуктуациями самого сигнала. В данном случае эта компонента шума является доминирующей. Представленные рисунки соответствуют случаю, при котором отношение сигнал/шум равно 1. Зная эффективность регистрации света SiФЭУ, которая для данного случая $\lambda = 590$ нм равна 10 %, можно определить минимальную регистрируемую энергию W вспышки. Минимальная регистрируемая энергия равна $W = 3,3 \cdot 10^{-18}$ Дж.

На рис. 2, в представлен спектр шумов SiФЭУ, полученных при тех же условиях, что и предыдущий, но без воздействия света.

На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов и амплитудные спектры с SiФЭУ при более высоких интенсивностях вспышки света от светодиода. Для случая а (см. рис. 3, а) — за вспышку срабатывают в среднем 6 пикселей, для б (см. рис. 3, б) — 30 пикселей. На осциллограмме а шумовые импульсы имеют амплитуду, меньшую, чем сигнальный; на осциллограмме б — шумовые импульсы совсем не видны, поскольку сигнал от света в 30 раз больше. В случае а на детектор падают 60 фотонов, энергия вспышки $W = 2 \cdot 10^{-17}$ Дж, в случае б — 300 фотонов, энергия $W = 1 \cdot 10^{-16}$ Дж. Если при этом реализовать пороговое устройство, порог срабатывания которого будет равен 7 одновременно сработавшим пикселям SiФЭУ, то вероятность ложной тревоги, т. е. ошибочного принятия шумового импульса за сигнальный интервал наблюдения 20 нс, составит $P_{лт} = 10^{-6}$, а вероятность пропуска цели, т. е. того, что величина сигнала будет меньше выбранного порога, — $P_{пр} = 5 \cdot 10^{-4}$.

Одной из основных характеристик детекторов, применяемых для регистрации слабых световых сигналов, является удельная обнаружительная способность D^* . Для SiФЭУ она рассчитывается аналогично обычным вакуумным ФЭУ по методике, описанной в работе [5]. Для данного режима работы SiФЭУ $D^* = 2,3 \cdot 10^{13}$ Гц^{1/2}·см/Вт.

На рис. 4 показан график зависимости выходной амплитуды с SiФЭУ от среднего числа электрон-дырочных пар, приходящихся на один пиксель детектора. Здесь в детекторе сделано 576 ячеек. При высокой интенсивности вспышки света амплитуда сигнала с SiФЭУ испытывает насыщение. Динамический диапазон определяется суммарным количеством пикселей в детекторе (100—4000 мм²).

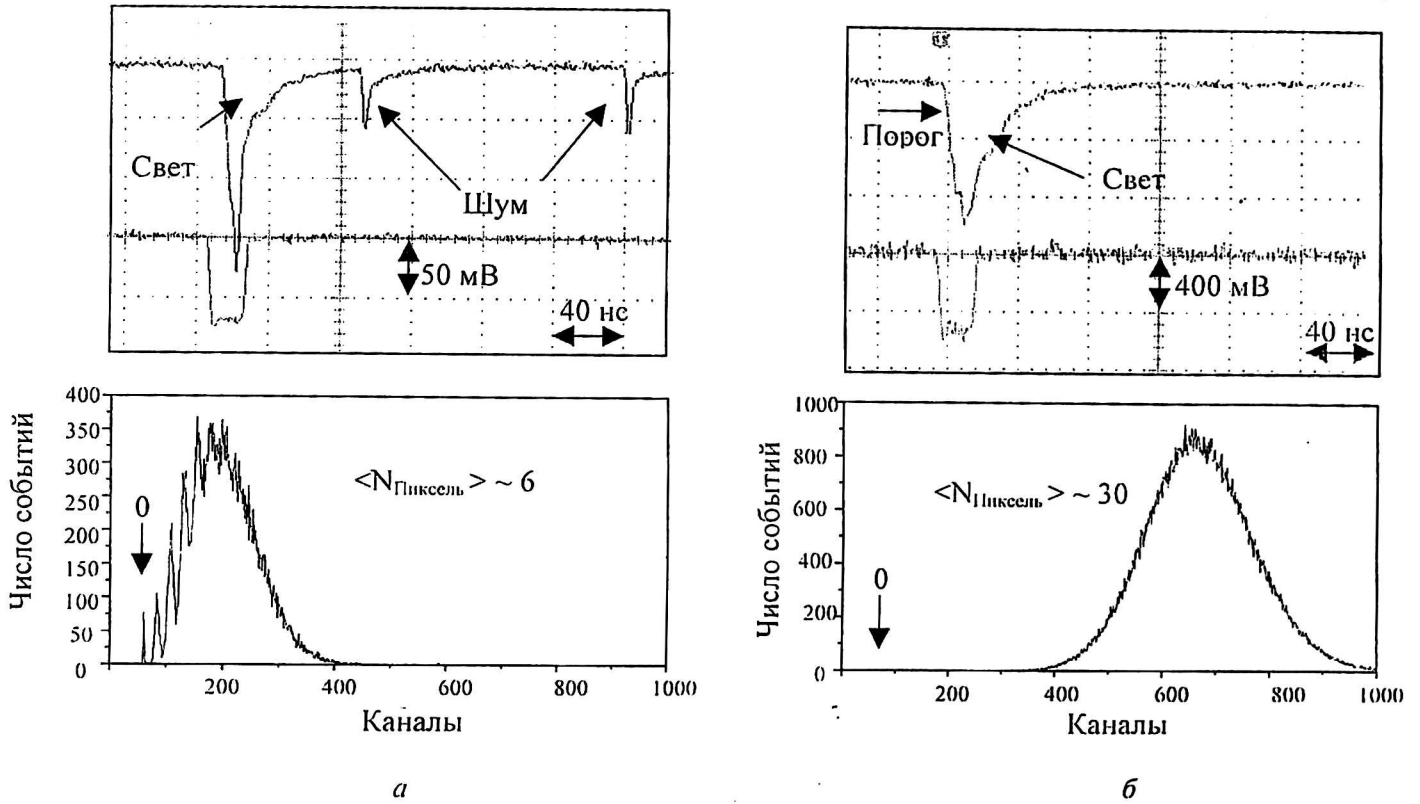


Рис. 3. Регистрация световых сигналов (СИД, $\lambda = 590$ нм, 10 нс):
 а — энергия вспышки $W = 2 \cdot 10^{-17}$ Дж; б — энергия вспышки $W = 1 \cdot 10^{-16}$ Дж

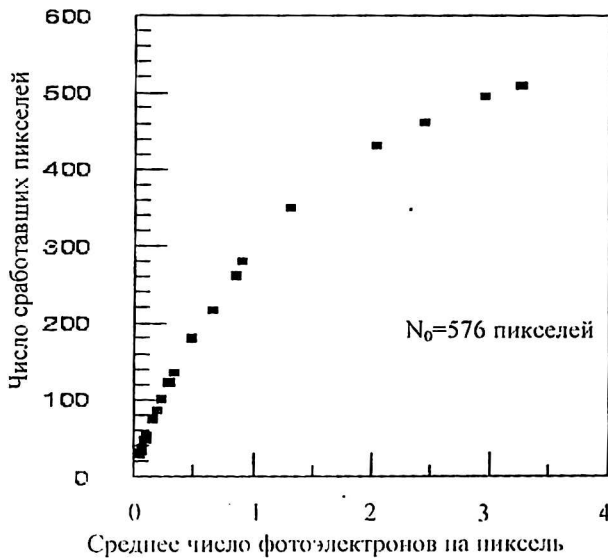


Рис. 4. Насыщение сигнала с SiФЭУ

Временные характеристики SiФЭУ

Поскольку детектор работает при высоких напряженностях электрического поля, он обладает хорошими временными характеристиками. На рис. 5, а показан разброс времени срабатывания SiФЭУ (джиттер) в зависимости от числа сработавших под воздействием света пикселей

N_{phe} . Измерения проводились с помощью полупроводникового лазера ($\lambda = 670$ нм) с длительностью импульса 40 пс. Собственной характеристикой детектора является джиттер, получаемый при срабатывании в среднем одного пикселя, он равен 100 пс. При увеличении интенсивности вспышки разброс времени срабатывания уменьшается пропорционально квадратному

корню из числа сработавших пикселей. Для 30 пикселей джиттер равен 20 пс, что позволяет для такого сигнала получить точность определения координаты светового источника примерно 6 мм. На рис. 5, б показаны распределения времени t срабатывания порогового устройства в зависимости от числа отсчетов детектора Q для

последовательно изменяющихся каждый раз на 30 мм положений лазера относительно SiФЭУ. Видно четкое разделение пиков.

В таблице представлены сравнительные характеристики SiФЭУ и таких известных и распространенных детекторов света, как PIN-фотодиод, лавинный фотодиод и вакуумный ФЭУ.

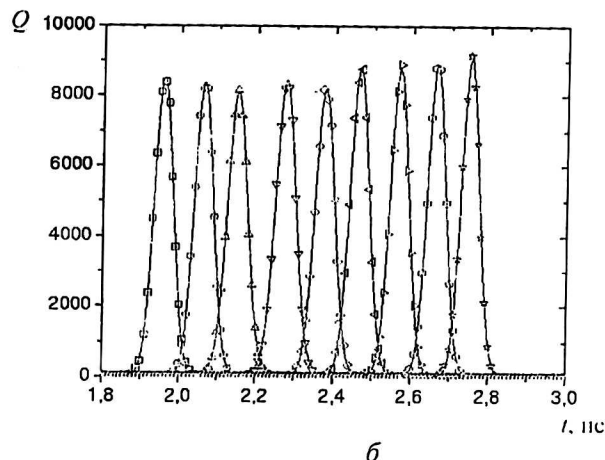
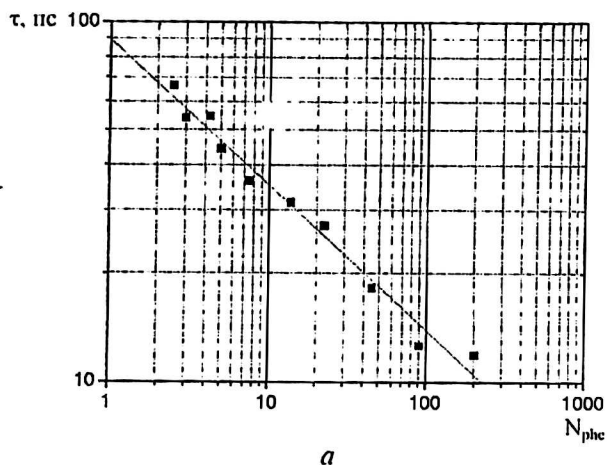


Рис. 5. Временные характеристики SiФЭУ:

а — временное разрешение SiФЭУ; б — распределение времени срабатывания t детектора SiФЭУ в зависимости от числа его отсчетов Q для последовательно изменяющегося на 30 мм расстояния от светового источника (лазер) до SiФЭУ

Сравнительные характеристики детекторов света

Показатели	PIN	ЛФД	ФЭУ	SiФЭУ
Эффективность регистрации света, %:				
470 нм	50	50	20	18
590 нм	60–70	60–70	7–15	17
670 нм	80	80	< 1	13
Усиление	1	100–200	10^6-10^7	10^6
Шум — фактор, F	1	≥ 2	1,3–4,0	1,1–1,3
Пороговая чувствительность ($S/N = 1$)	-200	-10	1	1
Разброс времени срабатывания, пс	—	~1000	~100	30
Напряжение смещения, В	20–200	100–1000	1000–2000	50
Работа в магнитном поле	ОК	ОК	Проблемы	ОК

Из анализа таблицы следует, что новый прибор в целом не уступает, а по ряду параметров превосходит эти параметры традиционных фотодетекторов. Можно предположить, что в скором времени он станет действительно детектором широкого применения.

Л и т е р а т у р а

1. Buzhan P. at al.: 7th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics. — Como, Italy, 2001. The advanced study of silicon photomultiplier. <http://www.slac.stanford.edu/pubs/icfa/fall01.html>.
2. Buzhan P. at al.: 3rd International Conference on New Developments in Photodetection. — Beaune, France, 2002. Silicon Photomultiplier and its possible applications.
3. Bondarenko G. at al.//Nuclear Physics B (Proc. Suppl. 1998. № 61B. P. 347–352.
4. Bondarenko G. at al.: NIM A242. 2000. — 187 p.
5. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. — М.: Высш. шк., 1974.

С 1999 по 2001 г. работа поддерживалась грантом МНТЦ, проект 1275-99, и грантом INTAS YSF00-150.

The solid-state silicon photomultiplier for a wide range of applications

E. A. Georgievskaya, S. N. Klemin, L. A. Filatov

State Unitary Enterprise Science Production Enterprise "Pulsar", Moscow, Russia

*P. J. Buzhan, B. A. Dolgoshein, A. L. Ilyin, V. A. Kantshero, V. A. Kaplin,
A. I. Karakash, A. D. Pleshko, E. V. Popova, S. Yu. Smirnov*

The Moscow Engineering and Physical Institute (State University), Moscow, Russia

The new type of photodetector — Silicon Photomultiplier (SiPM) is presented. The SiPM consists of the array (matrix) of p-n-junctions ($\sim 10^3 \text{ mm}^{-2}$) joint together on a common silicon substrate. Each p-n-junction working in limited Geiger mode with a gain 10^6 , but SiPM in whole is analogue detector, because the SiPM output signal is a sum of the signals from p-n-junctions fired by photons. The main SiPM features are described and its performance is compared with other photodetectors.