

УДК 539.1.075

## ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМЫ КОРОТКИХ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ОДНОФОТОННЫМ МЕТОДОМ

© 2012 г. В. А. Каплин, В. В. Кушин, Е. Ф. Макляев, С. Н. Федотов, Ю. Л. Теверовский

*Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”*

*Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31*

*E-mail: kaplinv@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.01.2012 г.

Представлены результаты измерения амплитудных и временных характеристик новых отечественных кремниевых фотоумножителей (SiPM), полученные однофотонным методом с применением пикосекундного твердотельного лазера. Продемонстрировано успешное использование SiPM в измерениях формы и длительности субнаносекундных световых импульсов от светодиода при различных интенсивностях свечения.

### ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень исследований быстропротекающих процессов в различных областях физики, техники и технологии предполагает применение высокоскоростных фотодетекторов с высокой квантовой чувствительностью в широком диапазоне длин волн, большим коэффициентом усиления, способностью регистрировать отдельные фотоны. Такими качествами обладают фотодетекторы сравнительно нового типа – кремниевые фотоумножители (SiPM), представляющие собой альтернативу традиционным вакуумным ф.э.у [1–5]. Эти твердотельные фотоумножители активно разрабатываются в последнее время для регистрации слабых оптических сигналов. Известно успешное использование SiPM в качестве фотоприемников сцинтилляционных и черенковских детекторов в ускорительных экспериментах и в области ядерной медицины [6, 7].

Временные характеристики современных SiPM открывают возможность их использования для измерения временного отклика быстрых сцинтилляторов. В этих исследованиях помимо быстрых фотодетекторов необходимы, в том числе, и специальные источники возбуждения сцинтиллятора, дающие результат, максимально приближенный по своим параметрам к его возбуждению заряженной частицей. В качестве таких источников могут рассматриваться, в частности, светодиоды. В настоящее время выпускается большое разнообразие светодиодов, излучающих в различных спектральных диапазонах, в том числе в синей и ближней ультрафиолетовой областях, которые наиболее подходят для возбуждения сцинтилляторов. Электрические и оптические характеристики таких приборов обычно хорошо известны,

однако их временные параметры в литературе, как правило, отсутствуют.

Цель данной работы – изучение некоторых характеристик новых отечественных SiPM и исследование длительности субнаносекундных световых импульсов от светодиода с их применением.

### КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРЕМНИЕВЫХ Ф.Э.У.

SiPM, структура которого показана на рис. 1, представляет собой сборку на общей подложке большого количества (от нескольких десятков до нескольких тысяч) одинаковых ячеек – элементарных фотодиодов, работающих при напряже-

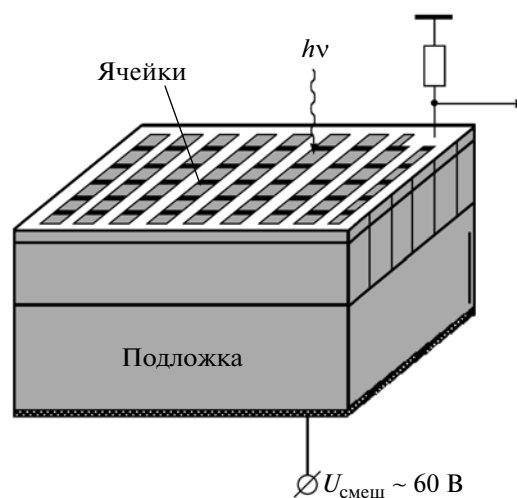


Рис. 1. Структура многопиксельного кремниевого фотоумножителя (SiPM).

нии  $U$  на несколько вольт выше пробойного, т.е. в режиме гейгеровского разряда с лавинным умножением числа первично образовавшихся фотоэлектронов. В зависимости от модификации SiPM размеры ячеек могут варьироваться от  $20 \times 20$  до  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>, общая площадь прибора составляет от 1 до 25 мм<sup>2</sup>. Каждая ячейка содержит последовательно включенный токоограничивающий резистор  $R \sim 10^5\text{--}10^6$  Ом для гашения разряда.

При поглощении одного или одновременно нескольких фотонов в одной ячейке с образованием гейгеровского разряда в ней величина заряда (интеграл от импульса тока) на ее выходе  $\Delta Q = C\Delta U$ , где  $C \sim 0.01\text{--}0.3$  пФ — емкость ячейки,  $\Delta U$  — превышение напряжения питания над напряжением пробоя (обычно  $\Delta U \sim 2\text{--}5$  В). Число электронов на выходе может достигать  $10^5\text{--}10^7$  в зависимости от площади (емкости) ячейки. Это число не зависит от количества первичных электронов, инициировавших лавину, т.е. амплитуды сигналов от разных ячеек одинаковы и не зависят от начальной ионизации в них. Сигналы со всех ячеек поступают на общие выводы SiPM. Таким образом, на выходе образуется сигнал, пропорциональный числу одновременно “сработавших” ячеек.

Основными достоинствами SiPM являются:

- более высокая, чем у вакуумных ф.э.у., эффективность регистрации фотонов;
- большое внутреннее усиление;
- низкое напряжение питания ( $U \sim 20\text{--}70$  В);
- малые размеры;
- сохранение работоспособности после сильной засветки;
- способность выдерживать большие ускорения;
- нечувствительность к магнитному полю.

Можно особо выделить два параметра SiPM, позволяющих измерять форму светового сигнала, в том числе и однофотонным методом:

1) хорошее временное разрешение, обусловленное малой толщиной обедненной области ( $\sim 2\text{--}5$  мкм) и очень высокой напряженностью поля в области перехода до  $3 \cdot 10^5$  В/см; в таком поле скорость дрейфа носителей заряда может достигать  $\sim 10^7$  см/с и развитие гейгеровского разряда происходит очень быстро ( $< 1$  нс);

2) хорошее амплитудное разрешение при регистрации одиночных фотонов, определяемое, в первую очередь, высокой технологической однородностью ячеек — их одинаковыми размерами и емкостью и соответственно одинаковой величиной выходного заряда.

К принципиальным недостаткам SiPM можно отнести сравнительно высокую частоту ( $\sim 1$  МГц/мм<sup>2</sup>) шумовых импульсов, имеющих ту же амплитуду, что и амплитуда сигнала от одиночных фотонов. Эти шумовые импульсы вызваны

“срабатыванием” ячеек из-за термической генерации в них свободных носителей заряда. Их частота может быть уменьшена при охлаждении прибора.

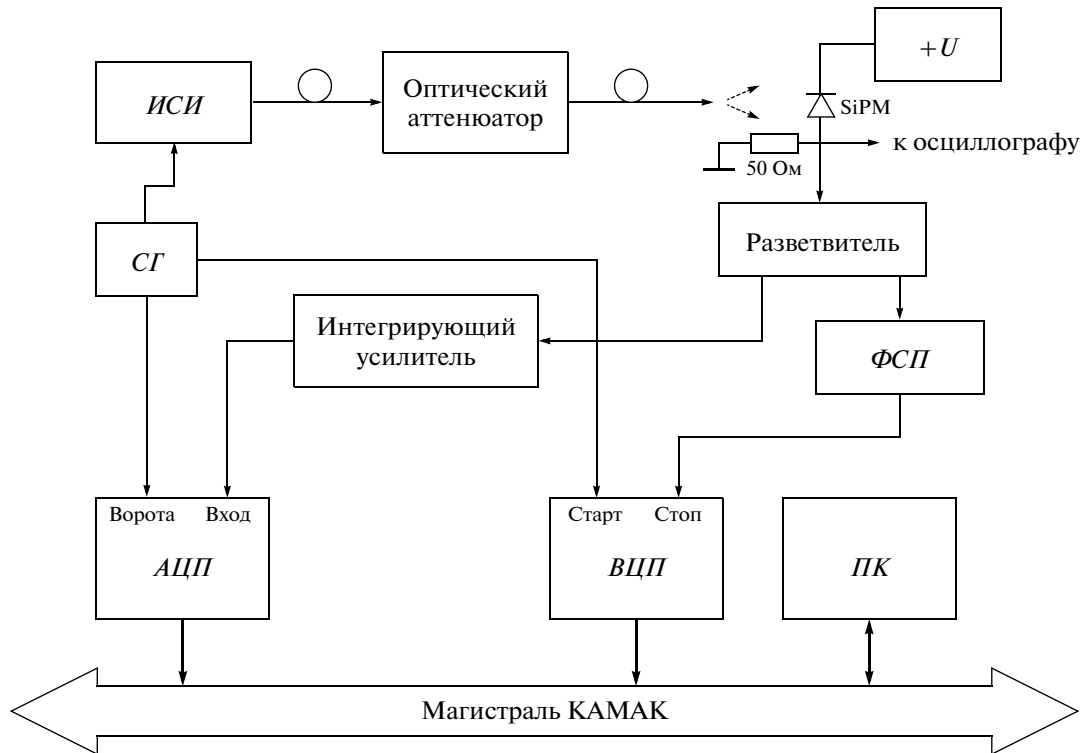
В данной работе использовались кремниевые фотоумножители, разработанные коллаборацией МИФИ–Пульсар [8] для регистрации света в голубой и ультрафиолетовой областях. Они оптимизированы для регистрации слабых световых импульсов и по сравнению с серийно выпускаемыми аналогами обладают лучшей квантовой эффективностью (до 60% для голубого и ближнего ультрафиолетового света).

Измерения проводились с приборами двух типов: однопиксельным SiPM с одиночной ячейкой размером  $100 \times 100$  мкм и многопиксельным SiPM с чувствительной площадью  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>, состоящим из 64 ячеек. Сравнение результатов позволяет оценить различие характеристик их выходных сигналов.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И СХЕМА УСТАНОВКИ

Схема установки для амплитудных и временных измерений с SiPM представлена в упрощенном виде на рис. 2. Для исследования формы световых импульсов от светодиода и анализа собственного временного разрешения изучавшихся SiPM, как наиболее точный, был применен однофотонный метод. Этот метод заключается в измерении интервалов времени от момента возбуждения источника световых импульсов (*ИСИ*) коротким электрическим импульсом от стартового генератора (*СГ*) до момента регистрации фотодетектором (SiPM) единственного фотона из ослабленной оптическим attenuатором вспышки. Регистрация преимущественно одиночных фотонов в SiPM достигалась подбором нейтральных фильтров-поглотителей в оптическом attenuаторе так, чтобы отношение числа срабатываний SiPM от *ИСИ* к полному числу вспышек *ИСИ* составляло  $\leq 0.05$ . При этом доля вклада мешающих многофотонных событий и шумовых импульсов в измеренном распределении не превышала 3%.

Техника измерения временных и амплитудных параметров сигналов заключалась в использовании импульса от *СГ* в качестве сигнала *Start* времяцифрового преобразователя (*ВЦП*). Этот же сигнал использовался для формирования импульса, поступающего на вход управления (“Ворота”) аналого-цифрового преобразователя (*АЦП*) для запуска измерения амплитуды проинтегрированного в усилителе выходного импульса тока SiPM. Сигналом *Stop* для *ВЦП* служил выходной импульс формирователя временной отметки со следящим порогом (*ФСП*), фиксирующий момент срабатывания SiPM. Таким образом, установка позволяла наблюдать на осциллографе форму вы-



**Рис. 2.** Упрощенная схема установки для амплитудных и временных измерений с SiPM. *ИСИ* – источник световых импульсов; *СГ* – стартовый генератор;  $+U$  – источник напряжения смещения для SiPM; *ФСП* – формирователь со следящим порогом; *ВЦП* – времяцифровой преобразователь; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь; *ПК* – персональный компьютер.

ходных импульсов SiPM и измерять их амплитудное распределение. Кроме того, в режиме однофотонной засветки можно было регистрировать распределение интервалов времени от момента запуска *ИСИ* до появления выходного импульса SiPM (т.е. временной отклик SiPM при его возбуждении лазером либо кинетику световой вспышки от светодиода).

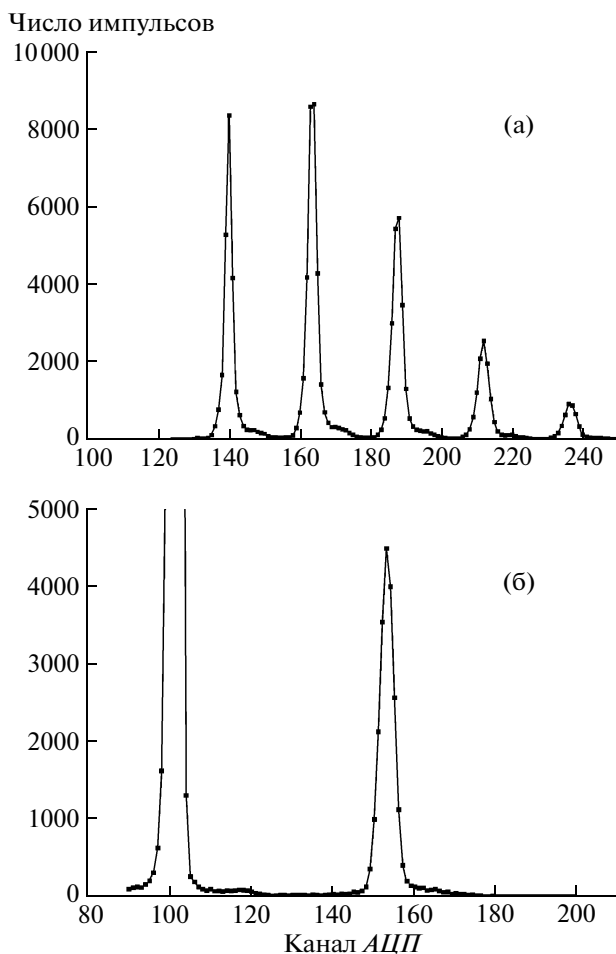
Для изучения временного отклика SiPM в качестве *ИСИ* использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 405 нм и длительностью светового импульса на полувысоте  $\sim 30$  пс. При однофотонной засветке лазерным импульсом такой малой длительности форма регистрируемого временного спектра определялась, в основном, разбросом времен задержки формирования выходного импульса SiPM (существенно более медленного, чем использованный лазер). Вклад длительности светового импульса лазера и флуктуаций его задержки в измеренное таким образом временное разрешение SiPM был небольшим и не учитывался.

Импульсным световым источником *ИСИ* в измерениях со светодиодом являлся сам исследуемый светодиод. В качестве стартового генератора *СГ* для возбуждения светодиода в прямом направлении использовался формирователь короткого

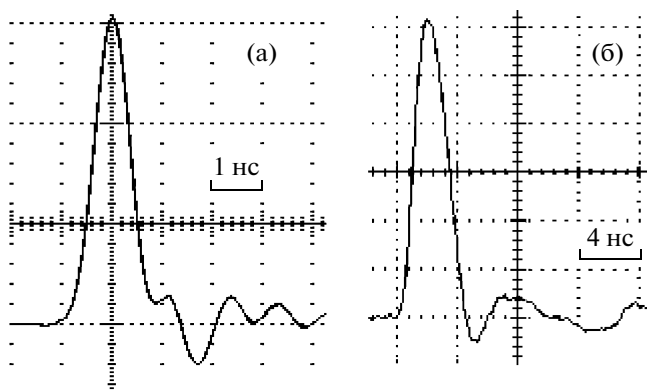
( $\leq 1$  нс) импульса на основе лавинного транзистора. При однофотонной засветке SiPM вспышкой от светодиода форма полученного таким образом распределения (временного спектра) практически совпадает с усредненной формой вспышек (кинетикой свечения) *ИСИ*, поскольку длительность свечения исследованных светодиодов многократно превышала временное разрешение SiPM вместе с *СГ* и *ВЦП*.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 3 представлены амплитудные спектры сигналов с многопиксельного и однопиксельного SiPM при слабой световой засветке, когда в среднем регистрируется меньше двух фотонов за вспышку. В левый пик на каждом из спектров попадают события при отсутствии сигнала с ячеек SiPM во время вспышки (т.е. в среднем с нулевой амплитудой), и его ширина задана уровнем шума на входе усилителя. Второй пик соответствует амплитуде сигнала только от одной ячейки, следующий пик – от двух одновременно и т.д. Хорошее амплитудное разрешение позволяет при необходимости надежно выделять события, соответствующие регистрации фотонов от вспышки только в одной ячейке либо одновременно в заданном



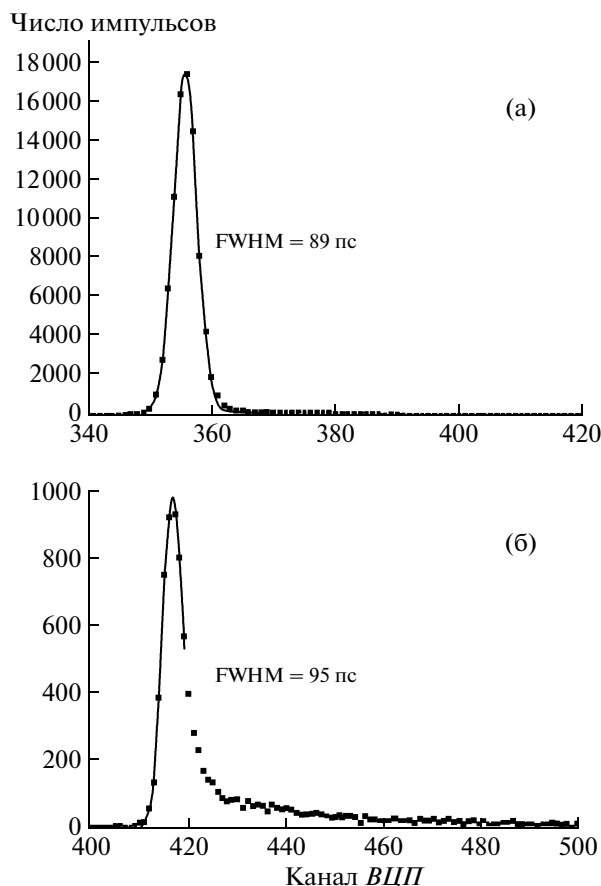
**Рис. 3.** Амплитудные спектры сигналов от многопиксельного (а) и однопиксельного (б) SiPM при слабой засветке.



**Рис. 4.** Типичные осциллограммы выходного импульса однопиксельного (а) и многопиксельного (б) SiPM.

числе ячеек (до нескольких десятков) без существенного перекрытия соседних пиков.

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы выходных импульсов SiPM. Длительность им-



**Рис. 5.** Временные спектры сигналов, измеренные в однофотонном режиме, при засветке коротким лазерным импульсом для однопиксельного (а) и многопиксельного (б) SiPM.

пульса на полувысоте составляла около 1 нс для однопиксельного и 4 нс для многопиксельного SiPM.

Типичные распределения флуктуаций задержки срабатывания SiPM, измеренные в однофотонном режиме при засветке импульсом лазера, показаны на рис. 5 для однопиксельного и многопиксельного SiPM. Собственное временное разрешение для одной ячейки при регистрации момента вспышки (с учетом небольших вкладов в ширину пика длительности лазерного импульса света  $\sim 30$  пс и ширины канала ВЦП – 20 пс), как видно из рисунка, меньше 89 пс (для оценки ширины спектра используется полная ширина на половине высоты – FWHM). Многопиксельный SiPM показал лишь незначительное ухудшение временного разрешения – оно не превышало 95 пс.

Полученные результаты: хорошее временное разрешение и малый амплитудный разброс однофотонных импульсов при большом усилении – демонстрируют большие возможности применения SiPM при проведении измерений однофотонным методом.

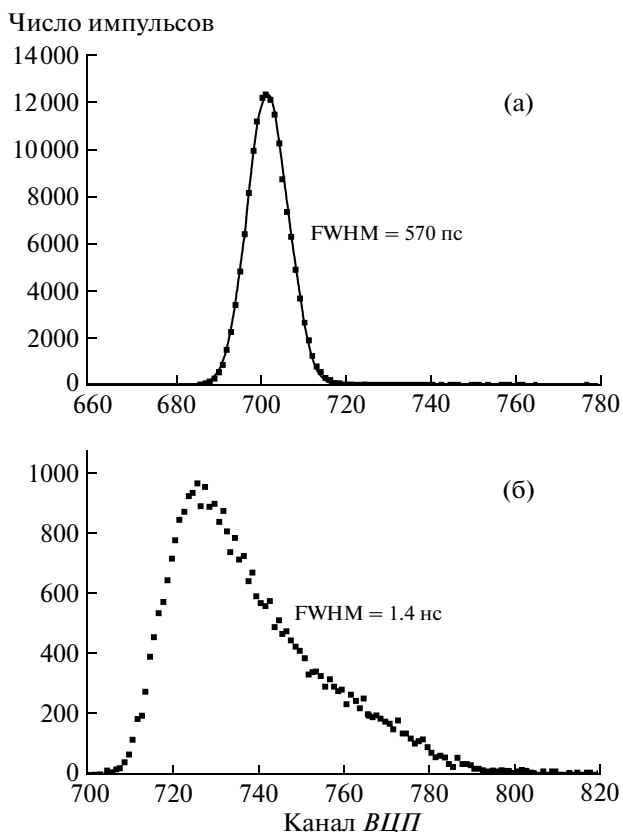


Рис. 6. Формы световых импульсов светодиода RLU 395-8-30 для разной интенсивности вспышки: а – при вспышке слабой интенсивности, б – при увеличении интенсивности приблизительно в 100 раз.

На рис. 6 представлены измеренные однофотонным методом формы световых импульсов светодиода RLU 395-8-30 для разных интенсивностей световой вспышки. Короткий импульс получался при малой амплитуде импульсов от *СГ* и соответственно при небольшом числе фотонов во вспышке. При увеличении интенсивности вспышки коэффициент ослабления оптического attenuатора подбирался таким, чтобы отношение числа срабатываний SiPM к числу вспышек *ИСИ* оставалось неизменным ( $\leq 0.05$ ). Относительное изменение интенсивности вспышки оценивалось по коэффициенту ослабления оптического attenuатора. Необходимо отметить, что увеличение амплитуды импульсов *СГ* приводило, по-видимому, не только к росту интенсивности свечения, но также к увеличению длительности воздействия на светодиод управляющего импульса от *СГ*.

Измеренная зависимость длительности свечения светодиода RLU 395-8-30 от интенсивности вспышки представлена на рис. 7. Интенсивность вспышки варьировалась (ориентировочно от  $10^5$  до  $10^8$  фотонов) изменением амплитуды импульса на выходе *СГ* в пределах от 3 до 35 В при непосредственном подключении светодиода к кабелю с

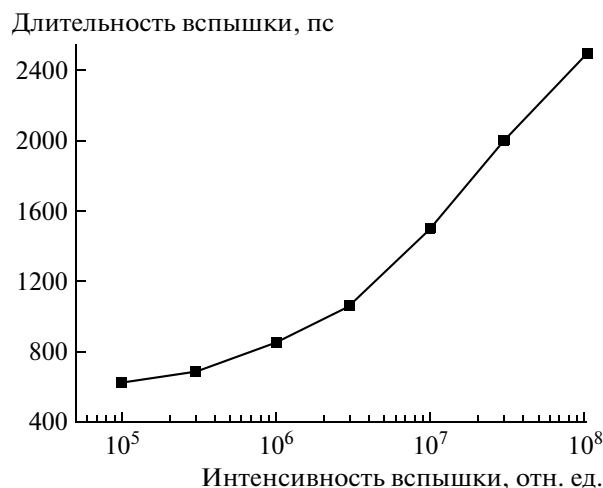


Рис. 7. Зависимость длительности свечения светодиода от интенсивности вспышки.

волновым сопротивлением 50 Ом. Наиболее короткий световой импульс от светодиода с длительностью на полувысоте  $\sim 330$  пс при числе фотонов во вспышке порядка  $10^3$  удалось получить при использовании дополнительного короткозамкнутого отрезка кабеля длиной 2 см, включенного параллельно светодиоду для укорачивания импульса от *СГ*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что характеристики новых кремниевых фотоумножителей, такие как большое усиление, малый амплитудный разброс однофотонных импульсов, хорошее временное разрешение, позволяют успешно использовать их в измерениях формы и длительности субнаносекундных световых импульсов, в том числе и от светодиодов. Следует отметить, что при использовании SiPM настройка аппаратуры оказывается значительно проще, чем при использовании вакуумных фотоумножителей (не требуется отбор ф.э.у. по шумам и выбор режима регистрации одноэлектронных импульсов). Кремниевые фотоумножители можно использовать также для измерения кинетики свечения сцинтилляторов и в качестве фотоприемников в сцинтилляционных детекторах. Однако для эффективного светосбора необходимы SiPM с большей чувствительной площадью. При этом увеличение шума можно частично компенсировать амплитудной дискриминацией выходных импульсов, оптимизацией схемы сбора света и размеров чувствительной области, а также охлаждением SiPM.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bondarenko G., Buzgan P., Dolgoshein B. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. 2000. V. A442. P. 187.
2. *Buzgan P., Dolgoshein B., Filatov L. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. 2003. V. A504. P. 48.
3. *Dolgoshein B., Balagura V., Buzgan P. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. 2006. V. A563. P. 368.
4. *Adloff C., Dolgoshein B., Popova E. et al.* // J. of Instrumentation (JINST). 2010. 5 P05004.
5. Hamamatsu Technical Data Sheet; [http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/tech/mppc\\_technical\\_information\\_e.pdf](http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/tech/mppc_technical_information_e.pdf)
6. *Andreev V., Balagura V., Bobchenko B. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. 2005. V. A540. P. 368.
7. *Buzgan P., Dolgoshein B., Filatov L. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. 2006. V. A567. P. 78.
8. *Клемин С., Кузнецов Ю., Филатов Л. и др.* // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 8. С. 80.