

ВЫБОР НАПРЯЖЕНИЙ ОБРАТНЫХ СМЕЩЕНИЙ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ ФЭУ S10931-050P И S10931-100P

А.В. Дудник^{1,2}, Е.В. Курбатов¹, Э. Валтонен²

¹*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина,
E-mail: Oleksiy.V.Dudnik@univer.kharkov.ua;*

²*Лаборатория космических исследований, кафедра физики и астрономии,
Университет, Турку, Финляндия
E-mail: eino.valtonen@utu.fi; oleksiy.dudnik@utu.fi*

Представлены результаты исследования зависимости максимально возможных и однофотозлектронных сигналов кремниевых фотозлектронных умножителей с размерами ячеек 50×50 и 100×100 мкм производства «Hamamatsu Photonics К.К.» от напряжений обратного смещения. Показано, что ФЭУ с меньшими ячейками имеет более широкий диапазон амплитуд выходных аналоговых сигналов, в то время как эффективность регистрации фотонов ФЭУ с большими размерами ячеек имеет более быстрый рост с увеличением напряжений обратных смещений за счет лучшей геометрической эффективности. Показана принципиальная возможность использования кремниевого ФЭУ размерами активной площади (3×3) мм² со сцинтилляционными детекторами на основе ортосиликата гадолиния, активированного церием, для спектрометрии гамма-излучения от естественных и искусственных радионуклидов.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в качестве фотоприемников слабого свечения, возникающего в сцинтилляционных детекторах заряженных частиц высоких энергий, конкурентоспособными по сравнению с вакуумными фотозлектронными умножителями (ФЭУ) становятся полупроводниковые ФЭУ. Этот тип ФЭУ представляет собой матрицу – набор многоэлементных лавинных фотодиодов, расположенных на одной подложке. Все фотодиоды работают в режиме ограниченного гейгеровского разряда при напряжениях, несколько выше пробойного, называемых перенапряжением [1-4]. Новый тип фотоприемников описывается под различными наименованиями: кремниевый ФЭУ (silicon photomultiplier – Si PM); твердотельный ФЭУ (solid-state photomultiplier – SSPM); фотодиод, работающий в режиме гейгеровского разряда (Geiger mode photodiode – GMPD); фотодиод с множеством ячеек, работающий в режиме гейгеровского разряда (multi-pixel Geiger mode photodiode – MGPD); счетчик фотонов с множеством ячеек (multi-pixel photon counter – MPPC).

Поскольку коэффициент усиления и шумовые параметры Si PM сильно зависят от перенапряжения, выбор рабочей точки напряжения обратного смещения конкретного типа ФЭУ для различных целей становится актуальной задачей. В данной работе исследуются некоторые характеристики двух типов MPPC производства «Hamamatsu Photonics К.К.» [5]: S10931-050 и S10931-100. Основное внимание уделено выбору конкретных значений перенапряжений для обоих ФЭУ, при которых данные устройства могут быть оптимально применены для исследования однофотозлектронных режимов и при работе со сцинтилляционными детекторами.

Учитывая очень хорошее временное разрешение MPPC, в работе рассмотрена возможность их применения в сочетании со сцинтилляционным детектором на основе ортосиликата гадолиния, активированного церием (Gd₂SiO₅:Ce – GSO(Ce)). Данный

тип кристаллов является великолепным материалом для электромагнитных калориметров и обладает отличной радиационной стойкостью [6-8]. Незначительный световой выход (~20% относительно сцинтиллятора NaI(Tl)), несовпадение спектров испускания кристалла и фоточувствительности приемника, а также малая величина постоянной времени спада светового импульса детекторов на основе кристаллов GSO(Ce) [8] не позволяют в полной мере использовать их с обычными фотодиодами большой площади (large area photodiodes – LAPD). В данной работе исследуются некоторые аспекты включения кремниевых ФЭУ производства «Hamamatsu Photonics К.К.» в однофотозлектронном режиме и спектрометрические характеристики детектора стандартной формы на основе кристалла GSO(Ce) с использованием в качестве фотоприемника MPPC S10931-050P.

1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ MPPC

Общий вид кремниевых ФЭУ, используемых в данной работе, показан на Рис.1.

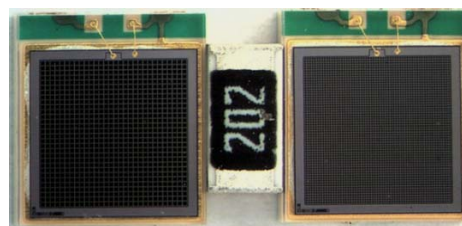


Рис.1. Общий вид MPPC S10931-100P (слева) и S10931-050P (справа), посередине представлен вид SMD-резистора типоразмера 1206 номиналом 2 кОм

Основные параметры MPPC серии S10931, данные производителем [9], показаны в Табл.1. Оба прибора имеют одинаковые размеры, но отличаются количеством ячеек, размерами одной ячейки, коэффициентами усиления и геометрическими эффективностями. Эффективность регистрации фотонов кремниевым ФЭУ S10931-050P приведена для длины волны излучения света лазерным диодом, ис-

пользуемым в настоящей работе. Максимальная эффективность регистрации составляет не более 51 % в диапазоне длин волн $\Delta\lambda=430\dots470$ нм. Для МРРС S10931-100P зависимость эффективности регистрации фотонов от длины волны производителем не представлена.

Таблица 1

Основные характеристики кремниевых ФЭУ серии S10931 производства "Hamamatsu Photonics K.K.", используемых в настоящей работе

Тип Si ФЭУ S10931-	-050 P	-100 P
Эффективная активная площадь, мм	3×3	
Число пикселей	3600	900
Размер 1 пикселя, мкм	50×50	100×100
Область спектральной чувствительности, нм	320...900	
Максимум спектральной чувствительности, нм	440	
Усиление	$7,5 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^6$
Геометрическая эффективность*	61,5	78,5
Эффективность регистрации фотонов P_{DE} на длине волны $\lambda=635$ нм**	27 %	-
Рабочее напряжение, В	70±10	
Рабочий диапазон температур, °С	0...40	

* Отношение активной площади пикселя к его общей площади.

** P_{DE} приведена с учетом типа лазерного диода, используемого в настоящей работе.

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНЫХ АМПЛИТУД

2.1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

Схема проведения эксперимента с лазерным диодом в качестве источника фотонов в видимом диапазоне длин волн представлена на Рис.2.

Для измерения амплитуд сигналов на выходе МРРС использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS 3014B с полосой пропускания $\Delta f=100$ МГц. Источником света служил лазерный диод SDL4038-011, характеристики которого приведены в Табл.2. Диод, излучающий свет в красно-оранжевом цвете, помещен в стандартную упаковку диаметром 9 мм.

От генератора сигналов Г5-67 на лазерный диод подавались прямоугольные импульсы длительностью $\tau \approx 10$ нс и частотой следования 1 кГц. Амплитуда на выходе генератора подбиралась такой величины $U_{лд}$, чтобы в результате на выходе обоих МРРС регистрировались максимально возможные амплитуды. Таким способом на все ячейки кремниевых ФЭУ попадали оптические фотоны от лазерного диода и, соответственно, все ячейки принимали участие в формировании выходных сигналов. При этом величины $U_{лд}$ для обоих Si ФЭУ оказались разными: для S10931-050P $U_{лд}=3,75$ В; для S10931-100P эта величина несколько меньше и составляет $U_{лд}=3,56$ В. С целью наименьших искажений вы-

ходной формы быстрых сигналов были выбраны следующие номиналы резисторов: $R1=10$ кОм, $R2=50$ Ом.

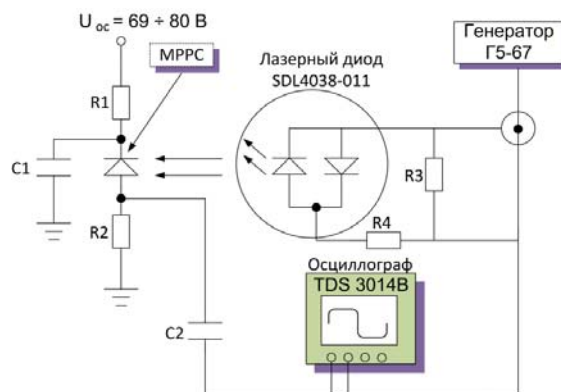


Рис.2. Схема проведения эксперимента с лазерным диодом в качестве источника оптических фотонов

Таблица 2

Основные характеристики лазерного диода SDL4038-011

Длина волны высвечивания, нм	635
Расхождение луча, град:	
вертикальное	35×33
горизонтальное	8×8
Выходная мощность, мВт	10
Пороговое напряжение, В	2
Пороговый ток, мА	80
Диапазон рабочих температур, °С	-10 +40

Величины максимально возможных амплитуд сигналов $U_{\text{вых}}^{i \text{ аэп}}$ измерялись в диапазоне рабочих напряжений обратного смещения, указанных производителем. Эксперимент проводился в лабораторных условиях при температуре $T=29,5^\circ\text{C}$.

2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость максимально возможных выходных амплитуд сигналов на выходах обоих Si ФЭУ от напряжения обратного смещения (Рис.3) показывает достаточно узкий диапазон перенапряжений гейгеровского режима при выбранных значениях резисторов R1 и R2.

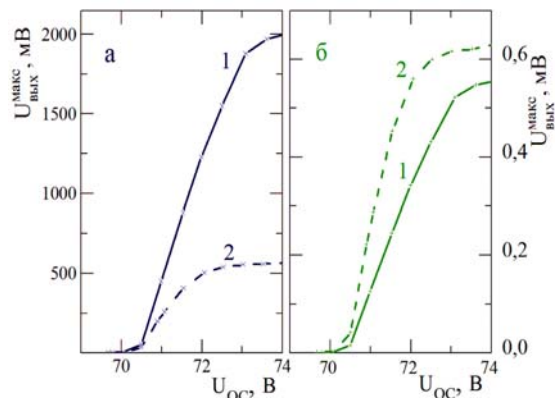


Рис.3. Зависимость максимальных амплитуд сигналов на выходах кремниевых ФЭУ S10931-050P (1) и S10931-100P (2) от напряжений обратного смещения по результатам измерений с помощью осциллографа (а) и в пересчете измеренных величин на одну ячейку (б)

Для МРРС S10931-050P этот диапазон составляет $\Delta U_{OC} \approx 2,7$ В, в то время как для МРРС S10931-100P этот диапазон еще уже и составляет $\Delta U_{OC} \approx 1,7$ В. Как видно из Рис.3,а, динамический диапазон амплитуд выходных сигналов для МРРС S10931-050P гораздо шире, чем для МРРС S10931-100P почти в 4 раза. Однако оба этих недостатка МРРС с размерами каждого пикселя 100×100 мкм компенсируются двумя преимуществами: большими значениями геометрической эффективности и коэффициента усиления. В итоге, амплитуда сигнала, полученного от каждой ячейки МРРС S10931-100P, выше амплитуды сигнала от ячейки МРРС S10931-050P в 1,13-1,8 раза (см. Рис.3,б).

Из Рис.3 видно, что насыщение максимально возможных амплитуд выходных сигналов для этого устройства наступает при $U_{OC} \approx 72$ В за счет большего коэффициента усиления и, очевидно, за счет более быстрого роста эффективности регистрации фотонов P_{DE} при увеличении перенапряжения.

Последнее обстоятельство подтверждается разными наклонами линейных участков кривых в диапазоне $\Delta U_{OC} \approx 70,5 \dots 72$ В: для МРРС S10931-100P он круче, чем для МРРС S10931-050P. Подобное различие в разных темпах нарастания P_{DE} было отмечено в работе [10], где показано, что кремниевые ФЭУ того же производителя, что и исследуемые в данной работе, с количеством ячеек 100 имеют лучшие величины P_{DE} в сравнении с МРРС, имеющими количество ячеек 400 и 1600.

Рабочими напряжениями обратного смещения для МРРС S10931-050P при его использовании с минимальными искажениями формы выходных сигналов могли бы быть значения второй половины линейного участка кривой 1 на Рис.3, где значения коэффициента усиления и P_{DE} максимальны. Однако на этом участке максимальны также и вероятности возникновения перекрестных наводок между ячейками и скорости счета шумовых импульсов [10]. Поэтому, учитывая изначально большие коэффициенты усиления устройств, в качестве рабочих участков можно выбрать напряжения обратного смещения для МРРС S10931-050P $\Delta U_{OC} \approx 70,7 \dots 72,5$ В; для МРРС S10931-100P $\Delta U_{OC} \approx 70,7 \dots 71,7$ В.

3. ИЗМЕРЕНИЯ ОДНОФОТОЭЛЕКТРОННЫХ СИГНАЛОВ

3.1. СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА С ШИРОКОПОЛОСНЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

С целью подтверждения результатов, полученных в разд.2, была проведена серия экспериментов без использования источников оптических фотонов. В качестве метода исследований были выбраны измерения амплитуд сигналов от одного случайно возникшего в чувствительном к оптическим фотонам слое электрона, или от одной сработавшей ячейки. Причинами появления таких электронов являются тепловая генерация свободных носителей, генерация носителей в сильном электрическом поле или освобождение носителей, захваченных ловушками в запрещенной зоне при прохождении предыдущих разрядов.

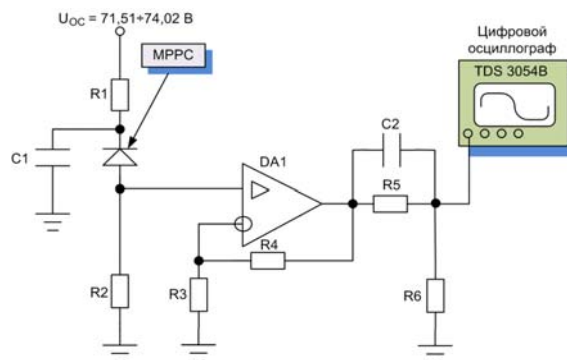


Рис.4. Схема проведения эксперимента по измерению амплитуд сигналов в однофотозлектронном режиме

На Рис.4 показана схема проведения эксперимента по измерению амплитуд в однофотонном режиме в зависимости от перенапряжения для обоих МРРС. Отличительной особенностью схемы, в сравнении с представленной на Рис.2, было ее дополнение усилителем с низкими искажениями DA1 типа AD8009AR с полосой пропускания $\Delta f = 700$ МГц для малых амплитуд сигналов при коэффициенте усиления $K_v = +2$. Вместо осциллографа Tektronix TDS3014B был использован более широкополосный цифровой осциллограф того же производителя – TDS3054B с полосой пропускания $\Delta f = 500$ МГц.

3.2. ФОРМА ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ

На Рис.5 показаны формы выходных сигналов от одной и нескольких сработавших ячеек, полученные для двух значений напряжений обратного смещения с выходов обоих кремниевых ФЭУ. Заметна разница между амплитудами сигналов от одного фотозлектрона в обоих кремниевых ФЭУ: для S10931-100P она выше, чем для S10931-050P.

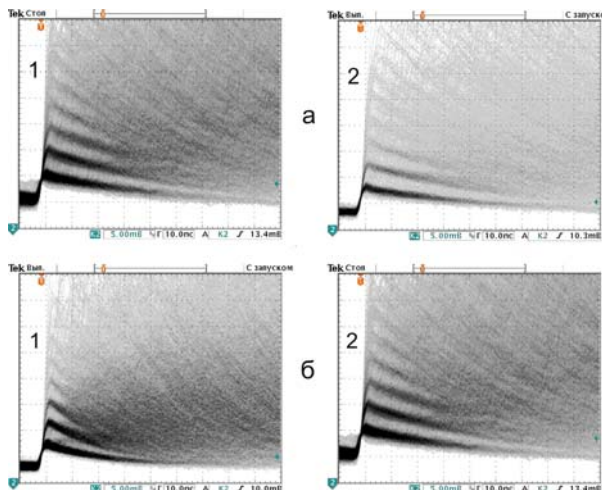


Рис.5. Формы однофотозлектронных и суперпозиций нескольких сигналов, полученные с выходов МРРС S10931-050P (1) и S10931-100P (2) при двух значениях напряжений обратного смещения: $U_{OC}^1 = 73,00$ В (а), и $U_{OC}^2 = 74,02$ В (б)

С повышением перенапряжения увеличивается не только амплитуда выходного сигнала, но и число различных на осциллографе сработавших ячеек: если при $U_{OC}^1 = 73$ В это число составляет $n \approx 6 \dots 8$, то при $U_{OC}^2 = 74$ В число различных ячеек составляет

$n \approx 8 \dots 10$. При еще больших перенапряжениях увеличиваются шумы и вероятность появления перекрестных между соседними ячейками наводок, в результате чего число различимых на экране осциллографа сработавших ячеек уменьшается.

3.3. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис.6 представлены зависимости амплитуд сигналов, полученных в однофотозлектронном режиме на выходах обоих кремниевых ФЭУ, от напряжения обратного смещения с учетом предварительного усиления сигналов с помощью широкополосного усилителя с малыми искажениями.

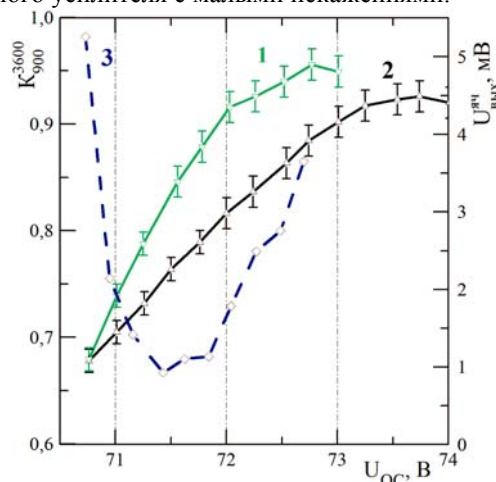


Рис.6. Зависимость амплитуд однофотозлектронных сигналов от одной ячейки MPPC S10931-100P (1) и S10931-050P (2) (правая шкала оси OY), и их обратных отношений (3) (левая шкала оси OY), от напряжения обратного смещения U_{OC}

Так же, как и в случае регистрации максимально возможных амплитуд сигналов от лазерного источника оптических фотонов (см. Рис.3), наблюдается гораздо более узкий диапазон линейной части зависимости амплитуд сигналов для MPPC S10931-100P. Повторяется также более быстрый рост амплитуд с увеличением перенапряжения для ФЭУ с меньшим количеством ячеек и большими размерами каждой из них. Как было сказано выше, это происходит из-за более быстрого роста эффективности регистрации фотонов P_{DE} для MPPC с размерами ячейки 100×100 мкм при увеличении перенапряжения. Зависимость отношений амплитуд сигналов, полученных от ячеек для обоих ФЭУ (см. Рис.6, кривая 3), показывает граничные значения напряжений обратного смещения, при которых наступает ограничение в росте P_{DE} для MPPC S10931-100P. Однако для MPPC S10931-050P линейный участок увеличения амплитуд все еще продолжается после $U_{OC} \approx 70,7 \dots 71,7$ В. Учитывая высокую чувствительность однофотозлектронных сигналов к колебаниям напряжений обратного смещения и узкий диапазон линейной части зависимости амплитуд выходных сигналов от перенапряжения, использование формирующей цепи в схемах Рис.2 и Рис.4 со значениями $R1=10$ кОм и $R2=50$ Ом необходимо преимущественно для исследования однофотозлектронных режимов кремниевых ФЭУ.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ MPPC S10931-050P В КАЧЕСТВЕ ФОТОПРИЕМНИКА С GSO(Ce)-ДЕТЕКТОРОМ

Учитывая, что у кремниевого ФЭУ производства «Hamamatsu Photonics К.К.» с числом ячеек 3600 диапазон амплитуд выходных сигналов значительно шире, чем у кремниевого ФЭУ с числом ячеек 900, был проведен эксперимент по определению возможности использования MPPC S10931-050P для регистрации γ -излучения с помощью детектора на основе кристалла GSO(Ce). Короткое время высвечивания сцинтиллятора, составляющее $30 \dots 60$ нс [11], превышает временное разрешение кремниевых ФЭУ, составляющее $0,2 \dots 0,4$ нс [12]. Дополнительным благоприятным обстоятельством является почти полное совпадение спектров испускания сцинтиллятора и спектральной чувствительности фотоприемника.

Для проведения эксперимента был изготовлен GSO(Ce)-детектор размерами $10 \times 10 \times 10$ мм, все поверхности которого были покрыты светоотражающим диффузным материалом tetrakel. Непокрытой осталась только центральная часть одной из граней площадью (3×3) мм² для перехода световых вспышек в активную площадь кремниевого ФЭУ.

Энергетические спектры от радиоактивного источника ^{137}Cs с энергией γ -квантов $E_\gamma=662$ кэВ получены с помощью 12-разрядного спектрометрического аналого-цифрового преобразователя (АЦП), характеристики которого приведены в работе [13]. Для усиления аналоговых сигналов, необходимого для нормальной работы АЦП, использовался усилитель-формирователь с формированием выходного сигнала квазигауссового типа длительностью $\tau_{ПШПВ} = 0,372$ мкс на уровне половины высоты от максимума его временного распределения. Выбранное время формирования превышает длительность световой вспышки сцинтиллятора в $5 \dots 10$ раз, и обусловлено неадекватным отображением амплитуд сигналов длительностями $\tau_{RC} < 1$ мкс пиковым детектором АЦП [13]. При выбранном для данного эксперимента $\tau_{ПШПВ} = 0,372$ мкс коэффициент отображения амплитуд АЦП составляет $K_{АЦП} = 0,787$. При меньших же значениях $\tau_{ПШПВ}$ величина $K_{АЦП}$ стремительно уменьшается.

Выбор значения $\tau_{ПШПВ} = 0,372$ мкс повлек за собой изменения величины резисторов $R1$ и $R2$ (см. Рис.2, 4), обеспечивающих формирование выходных сигналов длительностью не более 100 нс (см. Рис.5). Поскольку длительность импульса на входе усилителя-формирователя должна превышать длительность выходного сформированного импульса с целью его правильного формирования в квазигауссову форму, резисторы по схемам, изображенным на Рис.2, 4, были заменены на другие, имеющие величины сопротивлений $R1=500$ кОм и $R2=10$ кОм, для соблюдения этого условия.

Результаты измерений приведены на Рис.7 для двух значений напряжений обратного смещения: $U_{OC}=71,53$ В и $U_{OC}=72,46$ В. Для обоих случаев отчетливо видны типичные распределения энергетической линии $E_\gamma=662$ кэВ, далеко отстоящие от шумов системы: детектор, фотоприемник, электроника. Номер канала АЦП максимума в распределении линии $E_\gamma=662$ кэВ в первом случае составил

$N_m^{71,53} = 512$, во втором $N_m^{72,46} = 870$. Таким образом, при увеличении напряжения смещения на величину $\Delta U_{OC} = 0,93$ В амплитуда сигнала от сцинтиллятора и МРРС S10931-050P увеличилась в 1,7 раза, что накладывает особые требования к стабильности работы вторичного источника перенапряжений. Данные измерения выполнены на начальном участке линейной части зависимости амплитуды выходных сигналов от перенапряжения, где скорость счета шумов и вероятность перекрестных наводок минимальны.

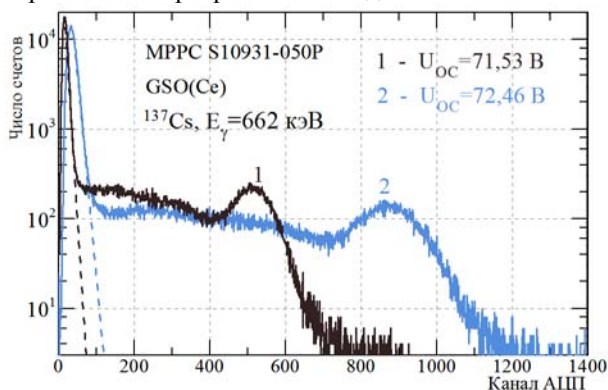


Рис. 7. Энергетические спектры γ -квантов от радиоактивного источника ^{137}Cs , полученные с помощью GSO(Ce)-детектора размерами $10 \times 10 \times 10$ мм и МРРС S10931-050P при двух напряжениях обратного смещения

Относительное энергетическое разрешение R_{662} γ -квантов с энергией $E_\gamma = 662$ кэВ составило: а) при $U_{OC} = 71,53$ В $R_{662}^1 = 23,7\%$; б) при $U_{OC} = 72,46$ В $R_{662}^2 = 22,5\%$. Оценка энергетических эквивалентов шумов системы $\Delta E_{ш}$, определяемых как экстраполяции шумовых частей энергетических спектров до пересечений с осью ОХ, дает величины: а) при $U_{OC} = 71,53$ В $\Delta E_{ш}^1 \approx 97$ кэВ; б) при $U_{OC} = 72,46$ В $\Delta E_{ш}^2 \approx 91$ кэВ. Из полученных результатов видно, что с увеличением перенапряжения наблюдается тенденция к улучшению энергетического разрешения и уменьшению энергетического эквивалента шумов системы: сцинтилляционный детектор, кремниевый ФЭУ, усилитель-формирователь. Такое поведение связано с ростом коэффициента усиления и эффективности регистрации фотонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование кремниевых ФЭУ производства «Hamamatsu Photonics K.K.» с размерами ячеек 50×50 и 100×100 мкм для наблюдения и исследования однофотозлектронных сигналов, перекрестного влияния соседних ячеек, послеимпульсов и шумов возможно в достаточно узком диапазоне перенапряжений: для МРРС S10931-050P этот диапазон составляет $\Delta U_{OC} \approx 2,7$ В, для МРРС S10931-100P диапазон еще уже и составляет $\Delta U_{OC} \approx 1,7$ В. С целью уменьшения коэффициента усиления, расширения диапазона рабочих напряжений обратных смещений, снижения зависимости амплитуд выходных сигналов от пульсаций перенапряжений, а также для использования кремниевых ФЭУ с целью сцинтилляционной спектроскопии необходимы увеличение

и тщательный подбор номиналов резисторов цепи включения МРРС. Эксперименты со сцинтилляционным детектором объемом 1 см^3 на основе кристалла ортосиликата гадолиния, активированного церием, показали принципиальную возможность использования МРРС с размерами активной площади приема вспышек света $(3 \times 3) \text{ мм}^2$ для практических целей регистрации гамма-квантов с энергиями $E_\gamma \geq 90$ кэВ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- G. Bondarenko, P. Buzhan, B. Dolgoshein, et al. Limited Geiger-mode microcell silicon photodiode: new results // *Nucl. Instrum. & Methods A*. 2000, v.442, iss.1-3, p.187-192.
- D. Renker. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems // *Nucl. Instrum. & Methods A*. 2006, v.567, iss.1, p.48-56.
- W.G. Lawrence, C.J. Stapels, F.L. Augustine, J.F. Christian. Development of a solid-state photomultiplier based on an array of Geiger mode CMOS avalanche photodiodes // *Proc. of SPIE. Semiconductor Photodetectors III*. 2006, v.6119
- J. Habar. Status and perspectives of pixilated photon detector (PPD) // *Nucl. Instrum. & Methods A*. 2008, v.595, iss.1, p.154-160.
- <http://hamamatsu.com>
- H. Ishibashi, K. Shimizu, K. Susa, S. Kubota. Cerium doped GSO scintillators and its application to position sensitive detectors // *IEEE Trans. on Nucl. Sci*. 1989, v.36, iss.1, p.170-172.
- M. Kobayashi, M. Ishii. Excellent radiation-resistivity of cerium-doped gadolinium silicate scintillators // *Nucl. Instrum. & Methods B*. 1991, v.61, iss.4, p.491-496.
- M. Kobayashi, M. Ieiri, K. Kondo, et al. Radiation hardness of cerium-doped gadolinium silicate $\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ against high energy protons, fast and thermal neutrons // *Nucl. Instrum. & Methods A*. 1993, v.330, iss.1-2, p.115-120.
- Multi-Pixel Photon Counter*: Brochure. Hamamatsu Photonics K.K. September 2010, http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/high_resolution_mppc_kapd0002e08.pdf.
- S. Gomi, H. Hano, T. Iijima, et al. Development and study of the multi pixel photon counter // *Nucl. Instrum. & Methods A*. 2007, v.581, iss.1-2, p.427-432.
- M. Kobayashi, M. Ishii, Y.Usuki, H.Yahagi. Cadmium tungstate scintillators with excellent radiation hardness and low background // *Nucl. Instrum. & Methods A*. 1994, v.349, iss.2-3, p.407-411.
- O. Mineev, A. Afanasjev, G. Bondarenko, et al. Scintillator counters with multi-pixel avalanche photodiode readout for the ND280 detector of the T2K experiment // *Nucl. Instrum. & Methods A*. 2007, v.577, iss.3, p.540-551.
- O.V. Dudnik, E.V. Kurbatov, V.A. Tarasov, et al. Response and noise characteristics of small-sized inorganic and organic scintillation detectors measured with vacuum and solid-state photodetectors // *Nucl. Instrum. & Methods A*. 2012, v.664, iss.1, p.148-153.

Статья поступила в редакцию 14.03.2012 г.

CHOICE OF BIAS VOLTAGES FOR SILICON PHOTOMULTIPLIERS S10931-050P AND S10931-100P

O.V. Dudnik, E.V. Kurbatov, E. Valtonen

The results of investigation of maximal and single photo-electron signals of Hamamatsu Photonics K.K. silicon photomultipliers (PM) with pixel sizes 50×50 and 100×100 μm as a function of bias voltage are presented. It is shown that the PM with smaller pixels has a wider range of analog signal output amplitudes, while the photon detection efficiency of the PM with large pixel sizes increases more rapidly with increasing bias voltages due to better geometric efficiency. The principal possibility of using silicon photomultipliers with an active area of (3×3) mm^2 with scintillation detectors based on cerium-doped gadolinium silicate crystals for gamma-ray spectrometry from natural and artificial radio nuclides is demonstrated.

ВИБІР НАПРУГ ЗВОРОТНИХ ЗМІЩЕНЬ ДЛЯ КРЕМНІЄВИХ ФЕП S10931-050P і S10931-100P

О.В. Дудник, Е.В. Курбатов, Е. Валтонен

Представлені результати дослідження залежності максимально можливих і однофотоелектронних сигналів кремнієвих фотоелектронних помножувачів з розмірами комірок 50×50 і 100×100 мкм виробництва «Hamamatsu Photonics K.K.» від напруг зворотного зміщення. Показано, що ФЕП з меншими комірками має більш широкий діапазон амплітуд вихідних аналогових сигналів, проте ефективність реєстрації фотонів ФЕП з більшими розмірами комірок зростає швидше зі збільшенням напруги зворотних зміщень за рахунок кращої геометричної ефективності. Показана принципова можливість використання кремнієвого ФЕП розмірами активної площі (3×3) mm^2 зі сцинтиляційними детекторами на основі ортосилікату гадолінія, активованого церієм, для спектрометрії гамма-випромінювання від природних і штучних радіонуклідів.