

УДК 539.1.074:621.383.523

## АМПЛИТУДНЫЕ И СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОПИКСЕЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ ФОТОНОВ S10931-050P и S10931-100P ПРОИЗВОДСТВА “НАМАМАТСУ PHOTONICS”

**А.В. Дудник<sup>\*,\*\*</sup>, Е.В. Курбатов<sup>\*</sup>, Э. Валтонен<sup>\*\*</sup>**

*\*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина  
 г. Харьков, пл. Свободы, 4, 61022 Украина*

*E-mail: [Oleksiy.V.Dudnik@univer.kharkov.ua](mailto:Oleksiy.V.Dudnik@univer.kharkov.ua); [Eugen.V.Kurbatov@univer.kharkov.ua](mailto:Eugen.V.Kurbatov@univer.kharkov.ua)*

*\*\*Лаборатория космических исследований, кафедра физики и астрономии  
 Университет г. Турку, Турку, Финляндия*

*E-mail: [ino.valtonen@utu.fi](mailto:ino.valtonen@utu.fi); [oleksiy.dudnik@srl.utu.fi](mailto:oleksiy.dudnik@srl.utu.fi)*

Received 18 January 2012, accepted 23 February 2012

Представлены результаты изучения амплитудных характеристик выходных сигналов от кремниевых фотоэлектронных умножителей с размерами ячеек  $50 \times 50 \text{ мкм}^2$  и  $100 \times 100 \text{ мкм}^2$  производства «Hamamatsu Photonics К.К.» разными методами. Показано, что эффективность регистрации фотонов кремниевым ФЭУ с большими размерами ячеек имеет более быстрый рост с увеличением напряжений обратных смещений за счет лучшей геометрической эффективности. В то же время динамический диапазон линейной части зависимости выходных амплитуд от перенапряжений для этого ФЭУ гораздо уже, чем у ФЭУ с меньшими размерами ячеек. Представлены рекомендации по выбору рабочих точек напряжений обратного смещения для обоих кремниевых ФЭУ. Измерены максимальные темпы счета ФЭУ при разных интенсивностях падающего света в экспериментах с применением лазерного диода в качестве источника оптических фотонов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** фотоэлектронный умножитель, эффективность регистрации фотонов, однофотоэлектронный режим, операционный усилитель, кремниевый ФЭУ, темп счета, осциллограф, сцинтилляционный детектор.

### AMPLITUDE AND COUNT RATE CHARACTERISTICS OF “HAMAMATSU PHOTONICS” MULTI PIXEL PHOTON COUNTERS S10931-050P AND S10931-100P

**O.V. Dudnik<sup>\*,\*\*</sup>, E.V. Kurbatov<sup>\*</sup>, E. Valtonen<sup>\*\*</sup>**

*\*Kharkiv National University named after V.N. Karazin  
 Kharkiv, Svobody Square, 4, 61022 Ukraine*

*\*\*Space Research Laboratory, Department of Physics and Astronomy  
 University of Turku, Turku, Finland*

Results of studies of output signal amplitude characteristics of “Hamamatsu Photonics К.К.” silicon photomultipliers with pixel sizes  $50 \times 50 \text{ }\mu\text{m}^2$  and  $100 \times 100 \text{ }\mu\text{m}^2$  using various methods are presented. It is shown that the photon detection efficiency of the PM with larger pixel size increases more rapidly with increasing bias voltage due to better geometric efficiency. At the same time the range of overvoltage producing linear output signals for this PM is much narrower than for the PM with smaller pixel size. Recommendations on the choice of operational bias voltages for both silicon PMs are presented. Maximal count rates of the silicon PMs are measured at various light intensities with a laser diode as the source of optical photons.

**KEY WORDS:** photomultiplier, photon detection efficiency, single photoelectron mode, operational amplifier, silicon PM, count rate, oscilloscope, scintillation detector.

### АМПЛІТУДНІ І ШВИДКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАГАТОПІКСЕЛЬНИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ФОТОНІВ S10931-050P І S10931-100P ВИРОБНИЦТВА “НАМАМАТСУ PHOTONICS”

**О.В. Дудник<sup>\*,\*\*</sup>, Е.В. Курбатов<sup>\*</sup>, Е. Валтонен<sup>\*\*</sup>**

*\*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
 м. Харків, пл. Свободи, 4, 61022 Україна*

*\*\*Лабораторія космічних досліджень, кафедра фізики і астрономії  
 Університет м. Турку, Турку, Фінляндія*

Представлені результати досліджень амплітудних характеристик вихідних сигналів від кремнієвих фотоелектронних помножувачів з розмірами комірок  $50 \times 50 \text{ мкм}^2$  і  $100 \times 100 \text{ мкм}^2$  виробництва «Hamamatsu Photonics К.К.» різними методами. Показано, що ефективність реєстрації фотонів ФЕП з більшими розмірами комірок має більш швидкий темп зростання з підвищенням напруг зворотного зміщення за рахунок кращої геометричної ефективності. У той же час динамічний діапазон лінійної частини залежності вихідних амплітуд від перенапружень для цього ФЕП значно вузьчий, ніж для ФЕП з меншими розмірами комірок. Представлені рекомендації з вибору робочих точок напруг зворотного зміщення для обох кремнієвих ФЕП. Виміряні максимальні темпи рахунку ФЕП при різних інтенсивностях падаючого світла в експериментах з застосуванням лазерного діоду у якості джерела оптичних фотонів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** фотоелектронний помножувач, ефективність реєстрації фотонів, одно фотоелектронний режим, операційний підсилювач, кремнієвий ФЕП, темп рахунку, осцилограф, сцинтиляційний детектор.

В сцинтиляційних детекторах заряджених частиц високих енергій в качестве фотоприемников в последнее время все чаще применяются полупроводниковые фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Обладая небольшими размерами, весом и значительно меньшими в сравнении с вакуумными ФЭУ напряжениями обратно-

го смещения, они в сочетании со сцинтилляторами дают возможность получить энергетическое разрешение и отношение сигнал-шум очень близкие к параметрам сборки вакуумный ФЭУ—сцинтиллятор. Недавние исследования спектрометрических характеристик малогабаритных сцинтилляционных детекторов кубической формы на основе кристаллов стильбена, паратерфенила, CsI(Tl) и пластмассового сцинтиллятора в сочетании с такими фотоприемниками, как вакуумный и кремниевый ФЭУ (Si-ФЭУ) с числом пикселей 3600, кремниевый PIN фотодиод с активной площадью  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  фирмы “Hamamatsu Photonics” показали, что Si-ФЭУ можно применять со всеми исследованными типами сцинтилляторов, в том числе и с пластмассовыми, имеющими световой выход на уровне  $\approx 5$  фотонов/кэВ поглощенной энергии [1].

Новый тип фотоприемников вполне может найти применение в астрономии, физике космических лучей и высоких энергий, биолюминесценции и других направлениях, где необходимы сенсоры сверхслабых и очень коротких вспышек света. Так, в настоящее время активно идут разработка и испытания серии Si-ФЭУ размерами активной площади  $1,3 \times 1,3$ ,  $3 \times 3$ , и  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  группами Института физики Макса Планка (Мюнхен, Германия) и Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт» (Москва, Россия) [2] для экспериментов MAGIC (The Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescopes) [3] и EUSO (The Extreme Universe Space Observatory) [4].

Исследованию характеристик кремниевых ФЭУ посвящено множество работ [5-10]. В большинстве работ измерения проводятся при однофотонном режиме включения ФЭУ, когда на высокоскоростном осциллографе четко видны импульсы не только от одной или нескольких одновременно сработавших ячеек, но и послеимпульсы, а также импульсы наводок от соседних сработавших ячеек. Однако для целей сцинтилляционной спектрометрии схема включения может изменяться в зависимости от соотношения длительности импульса от Si-ФЭУ и длительности высвечивания выбранного типа сцинтиллятора. В последнем случае изменяются распределения токов в цепях гасящих резисторов и резисторов цепи напряжения обратного смещения, в результате чего изменяются зависимости коэффициентов усиления и эффективности регистрации фотонов от напряжения обратного смещения.

В данной работе исследуются амплитудные характеристики двух типов Si-ФЭУ – MPPC (Multi Pixel Photon Counter) производства “Hamamatsu Photonics К.К.” [11] S10931-050 и S10931-100 двумя разными методами. Основное внимание уделено выбору конкретных значений перенапряжений для обоих ФЭУ, при которых данные устройства могут быть оптимально применены для исследования однофотозлектронных режимов. Целью работы является также определение максимальных темпов счета Si-ФЭУ при различных уровнях падающих световых потоков с использованием лазерного диода.

### ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ MPPC

Общий вид кремниевых ФЭУ, используемых в данной работе, показан на рис.1. Основные параметры MPPC серии S10931, данные производителем [12], показаны в таблице 1.

Таблица 1.

Основные характеристики MPPC серии S10931 производства “Hamamatsu Photonics”

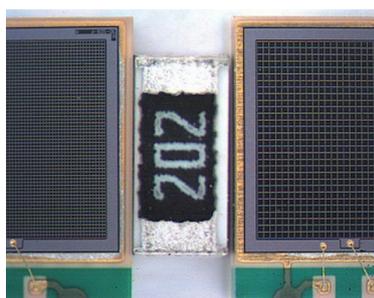


Рис.1. Общий вид MPPC S10931-050P (слева) и S10931-100P (справа), посередине представлен вид SMD-резистора типоразмера 1206 номиналом 2 кОм

Тип Si ФЭУ S10931-	-050P	-100P
Эффективная активная площадь, $\text{мм}^2$	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	$7,5 \times 10^5$	$2,4 \times 10^6$
Геометрическая эффективность	61,5	78,5
Эффективность регистрации фотонов $P_{DE}$ на длине волны $\lambda=635 \text{ нм}$	27%	-
Рабочее напряжение, В	70±10	
Рабочий диапазон температур, °C	0÷40	

Оба прибора имеют одинаковые размеры, но отличаются количеством ячеек, размерами одной ячейки, коэффициентами усиления и геометрическими эффективностями. Эффективность регистрации фотонов MPPC S10931-050P приведена для длины волны излучения света лазерным диодом, используемым в настоящей работе. Геометрическая эффективность определяется как отношение активной площади пикселя к его общей площади. Максимальная эффективность регистрации составляет не более 51% в диапазоне длин волн  $\Delta\lambda = 430-470 \text{ нм}$ . Для MPPC S10931-100P зависимость эффективности регистрации фотонов от длины волны производителем не представлена.

### ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ДИАПАЗОНОВ ТЕМПОВ СЧЕТА МРРС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

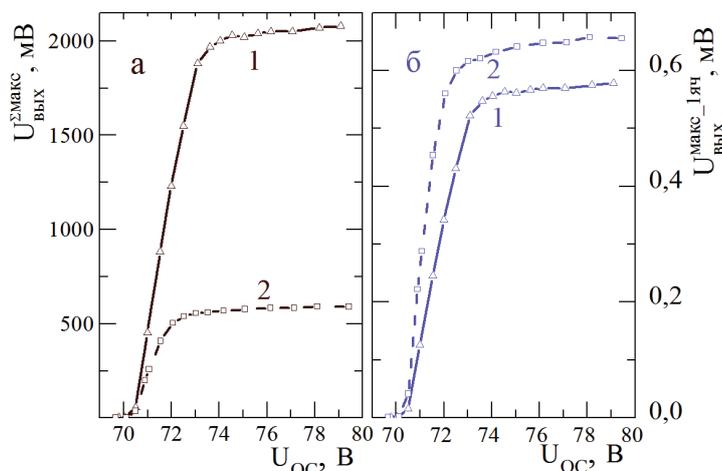


Рис.2. Зависимость максимальных амплитуд сигналов на выходах кремниевых ФЭУ S10931-050P (1) и S10931-100P (2) по результатам измерений с помощью осциллографа (а) ( $U_{\text{ВЫХ}}^{\Sigma \text{макс}}$ ) и в пересчете измеренных величин на одну ячейку (б) ( $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{макс-1яч}}$ )

на все ячейки Si-ФЭУ попадали оптические фотоны от лазерного диода, и, соответственно, все ячейки МРРС принимали участие в формировании выходных сигналов. При этом величины  $U_{\text{ЛД}}$  для обоих Si ФЭУ оказались разными: для S10931-050P  $U_{\text{ЛД}}^{\text{макс}} = 3,75$  В; для S10931-100P эта величина несколько меньше и составляет  $U_{\text{ЛД}}^{\text{макс}} = 3,56$  В. Величины максимальных амплитуд сигналов  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{макс}}$  измерялись в диапазоне рабочих напряжений обратного смещения, указанных производителем.

Зависимость максимальных амплитуд выходных сигналов на выходах обоих Si ФЭУ от напряжения обратного смещения (рис.2) показывает достаточно узкий диапазон перенапряжений линейного нарастания при выбранных значениях резисторов цепи напряжения обратного смещения ( $R_1 = 10$  кОм,  $R_2 = 50$  Ом). Для МРРС S10931-050P этот диапазон составляет  $\Delta U_{\text{OC}} \approx 2,7$  В, в то время как для МРРС S10931-100P этот диапазон еще уже и составляет  $\Delta U_{\text{OC}} \approx 1,7$  В. Как видно из рис.2а, диапазон линейного нарастания амплитуд выходных сигналов для МРРС S10931-050P гораздо шире, чем для МРРС S10931-100P почти в 4 раза. Однако оба этих недостатка Si-ФЭУ с размерами каждого пикселя  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> 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  $1,13 \div 1,8$  раза (рис.2б). Насыщение максимальных амплитуд выходных сигналов для этого устройства наступает при  $U_{\text{OC}} \approx 72$  В за счет большего коэффициента усиления и, очевидно, за счет более быстрого роста эффективности регистрации фотонов  $P_{\text{ДЕ}}$  при увеличении перенапряжения.

Последнее обстоятельство подтверждается разными наклонами линейных участков кривых в диапазоне  $\Delta U_{\text{OC}} \approx 70,5 \dots 72$  В: для МРРС S10931-100P он круче, чем для МРРС S10931-050P. Подобное различие в разных темпах нарастания  $P_{\text{ДЕ}}$  было отмечено в работе [13], где показано, что кремниевые ФЭУ того же производителя, что и исследуемые в данной работе, с количеством ячеек 100 имеет лучшие величины  $P_{\text{ДЕ}}$  в сравнении с МРРС, имеющими количество ячеек 400 и 1600. Само же насыщение максимальных выходных сигналов на выходах кремниевых ФЭУ происходит ввиду достижения  $P_{\text{ДЕ}}$  максимальных значений и невозможности дальнейшей генерации вторичных носителей зарядов в зоне размножения ввиду избранной конструкции ФЭУ.

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.2, где значения коэффициента усиления и  $P_{\text{ДЕ}}$  максимальны. Однако на этом участке максимальны также и вероятности возникновения перекрестных наводок между ячейками и скорости счета шумовых импульсов [13]. Поэтому, учитывая изначально большие коэффициенты усиления устройств, в качестве рабочих участков можно выбрать напряжения обратного смещения для МРРС S10931-050P  $\Delta U_{\text{OC}} \approx 70,7 \dots 72,5$  В; для МРРС S10931-100P  $\Delta U_{\text{OC}} \approx 70,7 \dots 71,7$  В.

На рис.3 представлено семейство кривых – зависимостей амплитуд сигналов на выходе МРРС S10931-050P от частоты следования прямоугольных импульсов разной амплитуды, подаваемых на лазерный диод от генератора Г5-67. При этом длительность генераторного импульса оставалась неизменной и составляла  $\tau \approx 10$  нс, а напряжение обратного смещения было выбрано  $U_{\text{OC}} = 76,01$  В, т.е. на таком участке, когда коэффициент усиления перестал нарастать, а величина  $P_{\text{ДЕ}}$  незначительно изменялась с ростом  $U_{\text{OC}}$ . Нижняя штрихпунктирная прямая отражает максимальные значения шумовых импульсов от ФЭУ.

Для измерения амплитуд сигналов на выходе МРРС от лазерного диода в качестве источника фотонов в видимом диапазоне длин волн использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS 3014B с полосой пропускания  $\Delta f = 100$  МГц. Источником света служил лазерный диод SDL4038-011, излучающий свет в красно-оранжевом цвете. От генератора сигналов Г5-67 на лазерный диод подавались прямоугольные импульсы длительностью  $\tau \approx 10$  нс и частотой следования 1 кГц.

В эксперименте по измерению амплитудных характеристик МРРС амплитуда на выходе генератора сигналов подбиралась такой величины  $U_{\text{ЛД}}$ , чтобы в результате на выходе обоих МРРС регистрировались максимально возможные амплитуды. Т.е., при увеличении  $U_{\text{ЛД}}^{\text{макс}}$  амплитуда на выходах МРРС более не возрастала. Таким способом

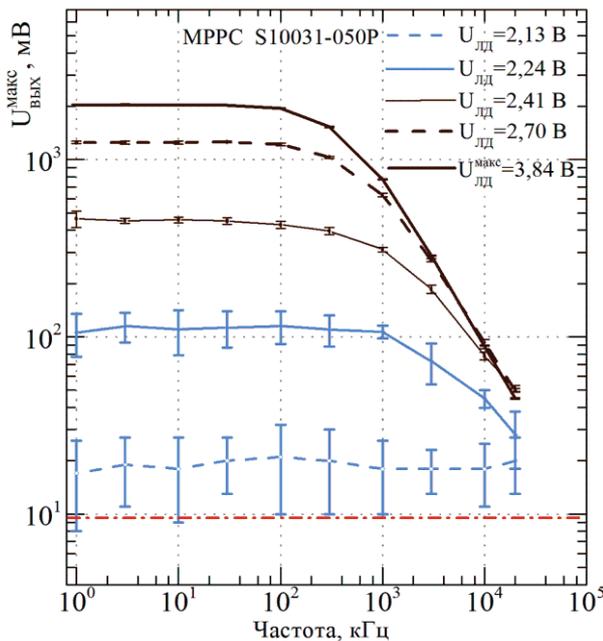


Рис.3. Зависимости амплитуд сигналов на выходе MPPC S10931-050P от частоты следования световых вспышек от лазерного диода для пяти значений амплитуд импульсов с генератора Г5-67.

от максимальных значений при низких частотах следования сигналов.

### ОДНОФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ РЕЖИВ РАБОТЫ Si-ФЭУ

Зависимости амплитуд от напряжения обратного смещения были получены другим способом без использования источников оптических фотонов. В качестве метода исследований был выбран метод измерения амплитуд сигналов от одного случайно возникшего в чувствительном к оптическим фотонам слое электрона. 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.

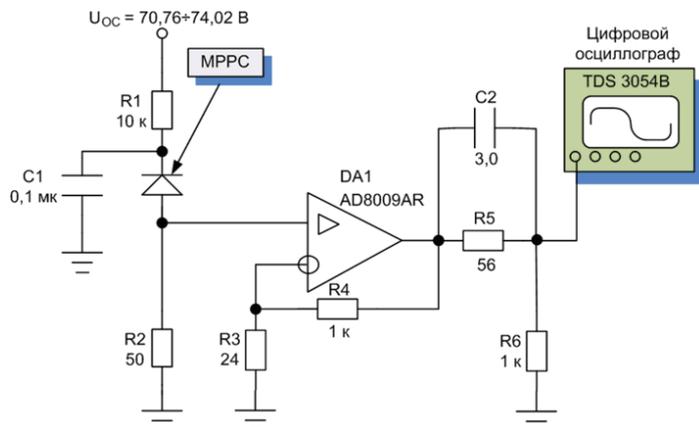


Рис.4. Схема проведения эксперимента по измерению амплитуд сигналов в однофотонном режиме

менно сработавших ячеек, полученные с выходов обоих кремниевых ФЭУ при одинаковых напряжениях смещения  $U_{OC} = 73,0$  В. Заметна разница между амплитудами сигналов от одного фотозлектрона в обоих кремниевых ФЭУ: для S10931-100P она выше, чем для S10931-050P. С повышением перенапряжения увеличивается не только амплитуда выходного сигнала, но и число различимых на осциллографе сработавших ячеек. При еще больших перенапряжениях увеличиваются шумы и вероятность появления перекрестных между соседними ячейками наводок, в результате чего число различимых на экране осциллографа одновременно сработавших ячеек уменьшается. Видно также гораздо более длительное время спада однофотонного импульса у ячейки с большими размерами, связанное, очевидно, с большим временем рекомбинации вторичных зарядов, число которых больше, чем у ячейки с размерами  $50 \text{ мкм} \times 50 \text{ мкм}$ . Ввиду этого MPPC S10931-100P в сборке с одним из

Из рис.3 видно, что при слабых вспышках света от лазерного диода ( $U_{ЛД} \leq 2,2$  В) ФЭУ регистрирует их без потерь в амплитуде выходных сигналов при даже очень больших темпах следования световых вспышек, превышающих 10 МГц. Однако при увеличении количества падающих на активную площадь Si-ФЭУ фотонов и участии все большего количества ячеек MPPC в формировании выходного сигнала частотный диапазон регистрации начинает сужаться. На линейном участке роста амплитуд выходных сигналов этот диапазон уменьшается с  $\sim 20$  МГц до  $\sim 330$  кГц на уровне  $-3$  dB от максимальных значений при низких частотах следования сигналов.

Быстрые сцинтилляторы с небольшим световым выходом [1] будут испускать незначительное количество фотонов, соответствующее, скорее всего, семействам кривых с  $U_{ЛД} \leq 2,24$  В на рис.3. В таком случае можно оценить граничные частоты темпов счета в случае применения исследуемого MPPC с такими сцинтилляторами, как стильбен, паратерфенил, GSO(Ce) и пластмассовый сцинтиллятор на основе полистирола. Верхняя граничная частота при самых слабых световых вспышках соответствует максимальному значению частоты следования сигналов от генератора импульсов Г5-67 и составляет  $f_{\text{макс}} \approx 20$  МГц, нижняя граничная частота для  $U_{ЛД} = 2,24$  В составляет  $f_{\text{мин}} \approx 2,2$  МГц на уровне  $-3$  dB

На рис.4 показана схема проведения эксперимента по измерению амплитуд в однофотонном режиме в зависимости от напряжения обратного смещения для обоих MPPC. Отличительными особенностями схемы в сравнении со схемой измерений с использованием лазерного диода были ее дополнение усилителем с низкими искажениями DA1 AD8009AR с полосой пропускания  $\Delta f = 700$  МГц для малых амплитуд сигналов при коэффициенте усиления  $K_y = +2$ . Вместо осциллографа Tektronix TDS3014B был использован более широкополосный цифровой осциллограф того же производителя — TDS3054B с полосой пропускания  $\Delta f = 500$  МГц.

На рис.5 показаны примеры форм выходных сигналов от одной и нескольких одновременно

быстрых сцинтилляторов будет иметь более низкие значения темпов счета частиц в сравнении с указанными на рис.3.

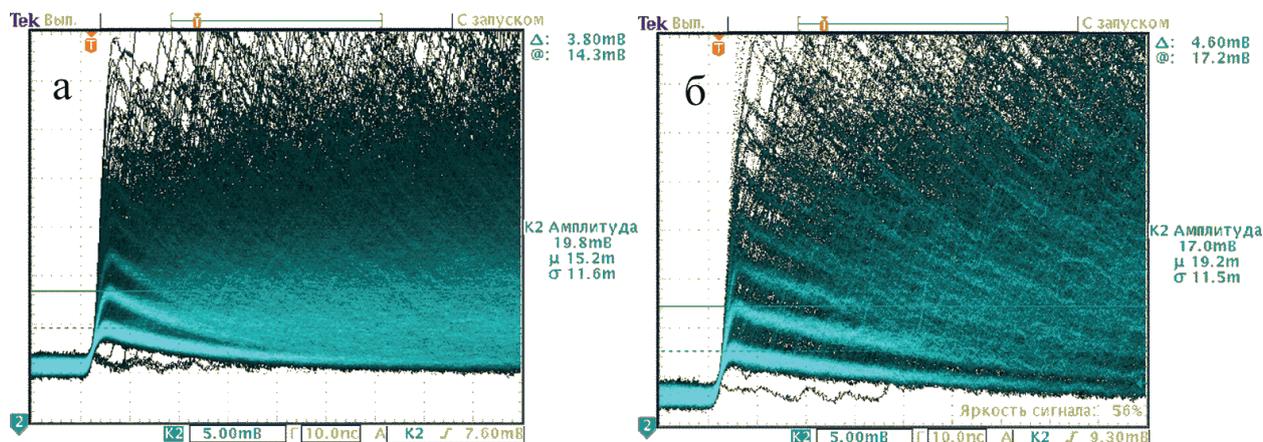


Рис.5. Формы однофотозлектронных и суперпозиций нескольких сигналов, полученные с выходов MPPC S10931-050P (а) и S10931-100P (б) при напряжении обратного смещения:  $U_{OC}=73,0$  В.

Из форм, представленных на рис.5, получены усредненные значения амплитуд однофотозлектронных сигналов  $U_{ВЫХ}^{OF}$  при разных значениях напряжения обратного смещения путем измерения амплитуд от одной сработавшей ячейки (0-1), разности между амплитудой от двух сработавших ячеек и одной ячейки (1-2), от трех ячеек и двух ячеек (2-3) и т.д. Результаты измерений для MPPC S10931-050P представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты измерений амплитуд от одной и суперпозиции нескольких одновременно сработавших ячеек MPPC S10931-050P при разных напряжениях обратного смещения

№ п.п.	$U_{OC}, В$	Амплитуды однофотозлектронных сигналов, мВ					$U_{ВЫХ}^{OF}, мВ$
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	
1	71,01	1,68	1,6	-	-	-	1,60
2	71,32	2,48	2,28	-	-	-	2,28
3	71,51	2,92	2,76	2,76	-	-	2,76
4	71,76	3,44	3,32	3,24	-	-	3,28
5	72,03	3,9	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
6	72,31	4,2	4,1	4	4,1	4,1	4,08
7	72,5	4,3	4,2	4,3	4,2	4,1	4,2
8	72,73	4,5	4,4	4,3	4,3	4,3	4,33
9	73,0	4,7	4,5	4,5	4,5	4,5	4,50
10	73,38	4,8	4,5	4,6	4,4	4,5	4,50
11	73,57	4,8	4,7	4,6	4,5	4,5	4,56
12	73,71	4,7	4,7	4,5	4,5	4,5	4,54

На рис. 6 представлены зависимости усредненных значений амплитуд однофотозлектронных сигналов, полученных на выходах обоих кремниевых ФЭУ, от напряжения обратного смещения с учетом предварительного усиления сигналов с помощью широкополосного усилителя с малыми искажениями. На левой шкале оси ОУ показана величина  $K_{900}^{3600}$ , представляющая собой отношение амплитуд однофотозлектронных сигналов от MPPC S10931-050P с 3600 ячейками и от MPPC S10931-100P с 900 ячейками.

Так же, как и в случае регистрации максимальных амплитуд сигналов от лазерного источника оптических фотонов (рис.2) наблюдается гораздо более узкий диапазон линейной части зависимости амплитуд сигналов для MPPC S10931-100P от напряжения обратного смещения. Повторяется также более быстрый рост амплитуд с увеличением перенапряжения для Si-ФЭУ с меньшим количеством ячеек и большими размерами каждой из них. Как уже было сказано, это происходит из-за более быстрого роста эффективности регистрации фотонов  $P_{DE}$  для MPPC с размерами ячейки  $100 \times 100$  мкм при увеличении перенапряжения. Зависимость отношений амплитуд однофотозлектронных сигналов  $K_{900}^{3600}$  (кривая 3 на рис.6) показывает граничные значения напряжений обратного смещения, при которых рост величины  $P_{DE}$  для MPPC S10931-100P прекращается. Однако для MPPC S10931-050P линейный участок увеличения амплитуд все еще продолжается после  $U_{OC} \approx 71,7$  В. Учитывая значительную зависимость амплитуд однофотозлектронных сигналов от степени стабильности источника вторичного питания напряжения обратного смещения и узкий диапазон линейной части зависимости амплитуд выходных сигналов от перенапряжения, использование формирующей цепи в схеме рис.4 со значениями

$R1 = 10$  кОм и  $R2 = 50$  Ом необходимо преимущественно для исследования однофотоэлектронных режимов работы кремниевых ФЭУ.

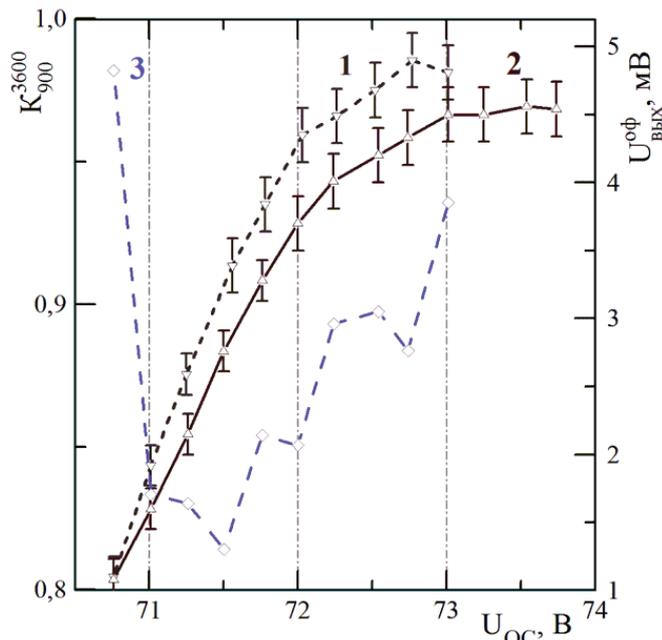


Рис.6. Зависимость усредненных значений амплитуд однофотоэлектронных сигналов МРРС S10931-100P (1) и S10931-050P (2) (правая шкала оси OY), и их обратных отношений (3) (левая шкала оси OY), от напряжения обратного смещения  $U_{OC}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кремниевые фотоэлектронные умножители производства «Hamamatsu Photonics» с размерами ячеек  $50 \times 50$  мкм и  $100 \times 100$  мкм можно применять для исследования однофотоэлектронных сигналов, перекрестного влияния соседних ячеек, послеимпульсов и шумов 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. Использование многопиксельных счетчиков фотонов со сцинтилляционными детекторами, имеющими короткое время высвечивания, имеет ограничения по максимальным темпам счета. Для электронов, гамма-квантов и легких ионов, имеющих низкую энергию и регистрируемых сцинтилляторами с небольшим световыходом, максимальный темп счета составляет не более 20 МГц. Для тяжелых ядер и других ускоренных до больших энергий частиц, составляющих значительные ионизационные потери в указанных сцинтилляторах, максимальный темп счета составляет не более 2 МГц.

Авторы выражают благодарность кандидату физико-математических наук, старшему научному сотруднику кафедры экспериментальной ядерной физики физико-технического факультета ХНУ имени В.Н. Каразина В.В. Черному и ведущему инженеру Института проблем безопасности АЭС НАН Украины И.Л. Зайцевскому за полезные консультации и помощь в работе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Dudnik O.V., Kurbatov E.V., Tarasov V.A., Andryushenko L.A., Valtonen E. Definition of relative scintillation detector light yields with the usage of vacuum and solid-state photo receivers // The Journal of Kharkiv National University, Physical series: Nuclei, Particles, Fields. – 2010. – Vol.933. – Is.4. – P.49-58.
- Mirzoyan R., Dolgoshein B., Holl P., et al. SiPM and ADD as advanced detectors for astro-particle physics // Nucl. Instrum. & Methods A. – 2000. – Vol.442. – Is.1-3. – P.187-192.
- Albert J., Aliu E., Anderhub V. et al. Discovery of VHE gamma-ray emission from 1ES1218+30.4 // Astrophys. Journ. Lett. – 2006. – Vol.642. – №.2. – P.119-122.
- Teshima M., Lipari P., Santangelo A. EUSO (The Extreme Universe Space Observatory) - Scientific Objective - // Proceedings of 28th ICRC. – Tsukuba. – 2003. – P.1069-1072.
- Antich P.P., Tsyganov E.N., Malakhov N.A., Sadygov Z.Y. Avalanche photo diode with local negative feedback sensitive to UV, blue and green light // Nucl. Instrum. & Methods A. – 1997. – Vol.389. – Is.3. – P.491-498.
- Golovin V., Saveliev V. Novel type of avalanche photodetector with Geiger mode operation // Nucl. Instrum. & Methods A. – 2004. – Vol.518. – Is.1-2. – P.560-564.
- Andreev V., Balagura V., Bobchenko B. et al. A high-granularity scintillator calorimeter readout with silicon photomultipliers // Nucl. Instrum. & Methods A. – 2005. – Vol.540. – Is.2-3. – P.368-380.
- Renker D. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems // Nucl. Instrum. & Methods A. – 2006. – Vol.567. – Is.1. – P.48-56.
- Haba J. Status and perspectives of pixilated photon detector (PPD) // Nucl. Instrum. & Methods A. – 2008. – Vol.595. – Is.1. – P.154-160.
- Korpar S., Krizan P., Pestotnik R. Timing and cross-talk properties of BURLE multi-channel MCP PMTs // Nucl. Instrum. & Methods A. – 2008. – Vol.595. – Is.1. – P.169-172.
- <http://www.hamamatsu.com>
- Hamamatsu Photonics K.K. // Multi-Pixel Photon Counter – Brochure, September 2010, [http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts\\_S/high\\_resolution\\_mppc\\_kapd0002e08.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/high_resolution_mppc_kapd0002e08.pdf)
- Gomi S., Hano H., Iijima T. et. al. Development and study of the multi pixel photon counter // Nucl. Instrum. & Methods A. – 2007. – Vol.581. – Is.1-2. – P.427-432.