

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.089.5+53.089.2

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ МАТРИЦ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ ПРИ КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

© 2023 г. А. Е. Бондарь^{a,b}, Е. О. Борисова^{a,b,*}, А. Ф. Бузулуцков^{a,b}, В. В. Носов^{a,b},
В. П. Олейников^{a,b}, А. В. Соколов^{a,b}, Е. А. Фролов^{a,b}

^aИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11

^bНовосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

*e-mail: E.O.Shemyakina@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 24.11.2022 г.

После доработки 27.12.2022 г.

Принята к публикации 29.12.2022 г.

Исследована работа матриц Si-ФЭУ MPPC S13360-6050PE с параллельным и последовательным подключением элементов в условиях эксперимента с двухфазным детектором, а также выполнены теоретические расчеты характеристик сигналов таких матриц. Показано, что длительность сигнала при последовательном соединении Si-ФЭУ с хорошей точностью не изменяется, а при параллельном соединении увеличивается с увеличением числа Si-ФЭУ в матрице. В пределах ошибок интегральная амплитуда сигнала при параллельном соединении не зависит от числа элементов в матрице, а при последовательном соединении наблюдается ее ожидаемое падение, обратно пропорциональное числу элементов в матрице. По результатам данной работы для дальнейшего использования в двухфазном криогенном детекторе темной материи выбрана матрица Si-ФЭУ, состоящая из четырех элементов, соединенных параллельно, так как для такой матрицы продемонстрирована надежная регистрация однофотоэлектронных импульсов, при этом длительность сигнала остается приемлемой.

DOI: 10.31857/S0032816223030035, EDN: IRHOGC

ВВЕДЕНИЕ

Двухфазные детекторы на основе конденсированных благородных газов применяются для поиска темной материи и регистрации редких событий, таких как когерентное рассеяние нейтрино на ядрах. В таких детекторах поиск частиц темной материи осуществляется по наблюдению событий их предполагаемого упругого рассеяния на атомных ядрах в жидкой фазе детектора [1, 2]. В настоящее время слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMP – Weakly Interacting Massive Particle) остаются ведущими кандидатами на роль частиц темной материи [3].

При рассеянии WIMP на ядрах детектирующего вещества образуются ядра отдачи, которые генерируют сигналы первичной сцинтилляции и первичной ионизации. Сигнал первичной сцинтилляции регистрируется при помощи фотодетекторов, просматривающих детектирующий объем. Регистрация первичной ионизации осуществляется следующим образом: электроны первичной ионизации вытягиваются из жидкости в газовую фазу, где под действием электрического

поля производят электролюминесценцию, которая, как и первичная сцинтилляция, регистрируется фотодетекторами [2]. Ожидается, что при регистрации WIMP сцинтилляционный и электролюминесцентный сигналы будут достаточно слабыми, поэтому для детектирования образующегося света требуется фотодетектор, способный работать в режиме счета одиночных фотонов.

В качестве таких детекторов для регистрации первичных сцинтилляций и электролюминесценции в двухфазных детекторах на основе благородных газов до недавнего времени традиционно использовались фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Однако в последнее время намечается мировая тенденция к замене ФЭУ более компактными кремниевыми фотоэлектронными умножителями (Si-ФЭУ). Так, например, в проекте DarkSide-20k, который является продолжением единственного на данный момент в мире эксперимента по поиску темной материи на основе двухфазного аргона, предложено использовать Si-ФЭУ для регистрации сцинтилляционного и электролюминесцентного сигналов [4, 5]. Si-ФЭУ также рассматриваются как альтернатива ФЭУ в

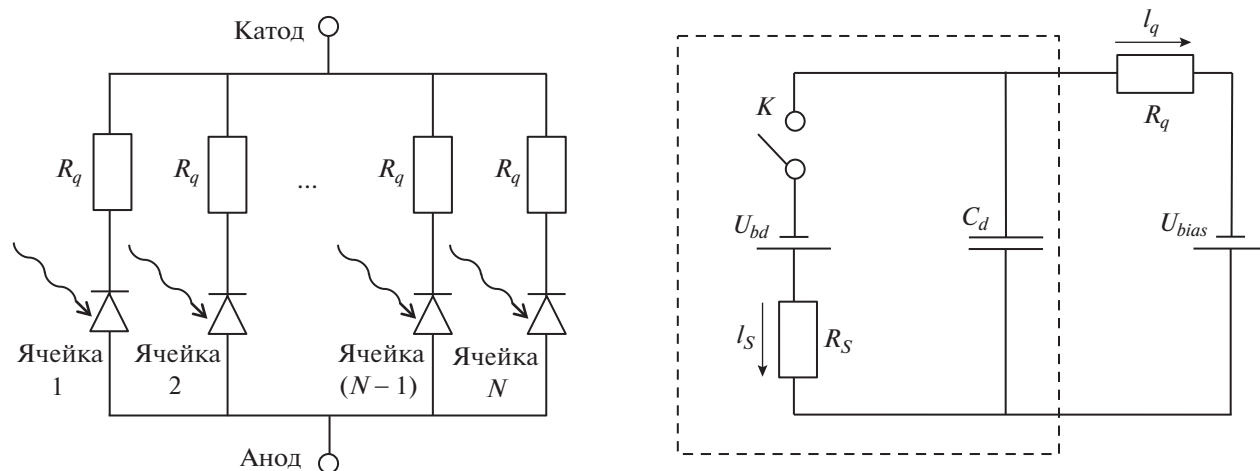


Рис. 1. Электрическая схема Si-ФЭУ (слева) и его отдельной ячейки (справа).

экспериментах по поиску темной материи на основе конденсированного ксенона [6].

Более того, Si-ФЭУ быстро захватывают лидерство среди множества фотонных детекторов, чувствительных в диапазонах от ближнего ультрафиолета до ближнего инфракрасного, во многих областях [7, 8]: от физики высоких энергий [9] и астрофизики [10] до приложений в биологии [11, 12] и медицине [13]. Такое широкое применение Si-ФЭУ связано с тем, что они как фотосенсоры нового поколения при конкурентоспособной цене имеют множество преимуществ по сравнению с традиционными ФЭУ: гораздо более низкие рабочие напряжения, более низкий радиоактивный фон, более высокую эффективность регистрации фотонов, компактный размер и более широкий спектральный диапазон [14, 15].

Однако Si-ФЭУ обычно имеют достаточно малые по сравнению с ФЭУ размеры активной области (порядка квадратного сантиметра), и их применение в крупномасштабных детекторах, в частности в детекторах темной материи, ведет к резкому возрастанию количества необходимых кремниевых фотоумножителей. Последнее обстоятельство в свою очередь требует увеличения числа каналов электроники и приводит к возрастанию теплопритока в криогенную камеру за счет увеличения числа проводов.

Одним из возможных способов решения описанной проблемы является объединение нескольких Si-ФЭУ в матрицы. В настоящее время различными группами ведутся активные исследования в данном направлении [16, 17]. Однако исследований матриц из Si-ФЭУ, используемых нами в двухфазном криогенном детекторе (MPPC S13360-6050PE производства Hamamatsu), до настоящего времени не проводилось. Таким образом, важными задачами являются изучение работы различных конфигураций матриц Si-ФЭУ

MPPC S13360-6050PE при температуре жидкого аргона и выбор типа матрицы с максимальным числом Si-ФЭУ, при котором сохраняется возможность работы в режиме счета одиночных фотонов. Стоит отметить, что данная работа является продолжением работ, в которых мы изучали работу Si-ФЭУ при криогенных условиях [18, 19].

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Случай одной ячейки

Кремниевый фотоэлектронный умножитель, электрическая схема которого изображена на рис. 1 (слева), состоит из параллельно соединенных ячеек, каждая из которых представляет собой лавинный фотодиод, работающий в гейгеровском режиме, с подключенным к нему гасящим сопротивлением R_q . Между катодом и анодом прикладывается напряжение смещения U_{bias} и считывается сигнал.

На рис. 1 (справа) изображена упрощенная эквивалентная схема одиночной ячейки Si-ФЭУ. Такая схема не учитывает паразитные емкости, входное сопротивление электроники и влияние остальных ячеек. Здесь лавинный фотодиод схематически ограничен штриховой линией, C_d — его емкость, R_s — его сопротивление во время пробоя. Чтобы обеспечить образование электронной лавины, напряжение смещения должно превышать напряжение пробоя U_{bd} — минимальное рабочее напряжение, при котором возникает гейгеровский пробой. При попадании фотона в ячейку возникает пробой, который моделируется замыканием ключа K , добавляющего в цепь источник напряжения U_{bd} [20].

На примере данной упрощенной схемы вычислим форму сигнала Si-ФЭУ при пробое, ис-

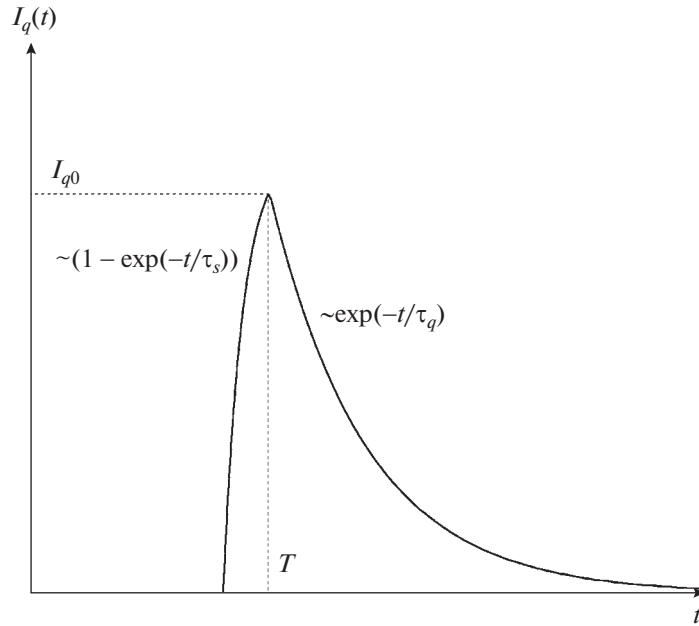


Рис. 2. Форма сигнала одиночной ячейки Si-ФЭУ, рассчитанная в идеальном случае.

пользуя методы расчета переходных процессов в электрических цепях. После замыкания ключа происходит переходный процесс разрядки конденсатора C_d , описываемый системой уравнений:

$$\begin{cases} U_{bd} = I_s R_s + u_d; \\ U_{bias} = I_q R_q + u_d; \\ C_d \dot{u}_d = I_s + I_q, \end{cases} \quad (1)$$

где u_d — напряжение на конденсаторе C_d .

Нас интересует выходной ток I_q , поэтому с помощью дифференцирования первых двух уравнений по времени и линейных преобразований получим:

$$\frac{C_d \Delta U}{\tau_s \tau_q} = \frac{1}{\tau} I_q + \dot{I}_q, \quad (2)$$

где $\Delta U = U_{bias} - U_{bd}$ — перенапряжение; $\tau_{s,q} = R_{s,q} C_d$ — времена релаксации; $\tau = \tau_s \tau_q / (\tau_s + \tau_q)$ — приведенное время релаксации.

С учетом граничного условия $R_q I_q(+0) = U_{bias} - u_d(+0) = 0$ решение уравнения (2) выглядит следующим образом:

$$I_q(t) = \frac{C_d \Delta U}{\tau_s + \tau_q} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (3)$$

Через некоторое характерное время T электронная лавина угасает [21], что соответствует размыканию ключа. Последующий процесс описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} C_d \dot{u}_d = I_q; \\ U_{bias} = I_q R_q + u_d. \end{cases} \quad (4)$$

Решение системы (4) дает выражение:

$$I_q(t) = I_{q0} e^{-(t-T)/\tau_q}, \quad (5)$$

где $I_{q0} = I_q(T) = \frac{C_d \Delta U}{\tau_s + \tau_q} (1 - e^{-T/\tau})$. $R_s \ll R_q$ [22],

следовательно, $\tau_s \ll \tau_q$, а $\tau \approx \tau_s$. С учетом этого на рис. 2 представлена форма сигнала, описываемая выражениями (3) и (5). Таким образом, сигнал имеет быстрый фронт и длинную спадающую часть. В действительности форма сигнала Si-ФЭУ будет отличаться из-за влияния других ячеек, а также из-за наличия паразитной емкости между ячейкой и кремниевой подложкой. Кроме того, наблюдаемая форма сигнала также будет зависеть от аппаратной функции электроники.

Матрицы Si-ФЭУ

Как было отмечено выше, для того чтобы уменьшить число каналов в детекторе, Si-ФЭУ предложено объединять в матрицы. На рис. 3 представлены схемы подключения Si-ФЭУ для последовательного и параллельного соединения элементов. Для краткости здесь и далее приняты следующие обозначения: буквами S (от serial, последовательное) или P (от parallel, параллельное) обозначен тип соединения, затем указывается число соединенных таким образом Si-ФЭУ. Например, $P2$ — матрица из двух Si-ФЭУ, соединен-

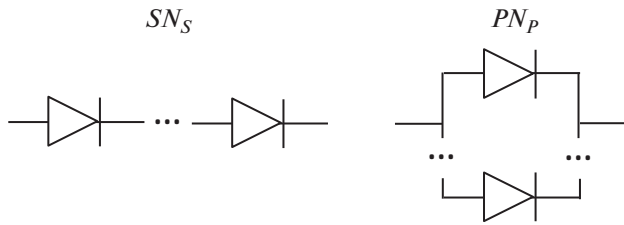


Рис. 3. Схемы подключений исследуемых типов соединения Si-ФЭУ: последовательного SN_s (слева) и параллельного PN_p (справа).

ных параллельно, а $S3$ — матрица из трех Si-ФЭУ, соединенных последовательно. Одиночный Si-ФЭУ будем обозначать как S (от single).

Стоит отметить, что при последовательном подключении Si-ФЭУ на матрицу необходимо подавать напряжение, равное рабочему напряжению одиночного Si-ФЭУ, умноженному на количество элементов в матрице (N_s), так как при таком соединении сопротивление цепи возрастает в N_s раз. Рабочее напряжение при параллельном соединении соответствует напряжению одиночного Si-ФЭУ.

Форма сигнала для матриц будет отличаться от формы сигнала одиночной ячейки. В этом случае упрощенная схема (см. рис. 1, справа) не годится для расчетов, поскольку не позволяет учесть влияния остальных ячеек, что существенно при рассмотрении матриц. Если модифицировать схему, изображенную на рис. 1 (справа), добавив в нее остальные ячейки и входное сопротивление электроники, то решение системы уравнений значительно усложняется, поэтому сделаем несколько упрощающих предположений. Будем рассматривать только спадающую часть сигнала (т.е. время на $t \geq T$, см. рис. 2), поскольку именно она вно-

сит основной вклад в длительность сигнала. Процессы зарядки или разрядки конденсаторов происходят с одинаковым временем релаксации вне зависимости от приложенного напряжения, поэтому исключим источник U_{bias} из цепи, а емкость сработавшей ячейки будем считать заряженной в начальный момент времени до некоторого напряжения $U(0) = U_0 \leq \Delta U$, где $\Delta U = U_{bias} - U_{bd}$.

На рис. 4 изображены эквивалентные схемы, построенные с учетом вышеописанных предположений, для одиночного Si-ФЭУ (рис. 4а), для матрицы с параллельным соединением N_p Si-ФЭУ (рис. 4б) и для матрицы с последовательным соединением N_s Si-ФЭУ (рис. 4в). Случаи $N_p = 1$ и $N_s = 1$ соответствуют одиночному Si-ФЭУ. Здесь R_e — входное сопротивление электроники, R_q — гасящее сопротивление пикселя, C_d — емкость фото диода, N — число ячеек в Si-ФЭУ; мы пренебрегли разницей между общим числом ячеек Si-ФЭУ (N) и числом несработавших ячеек ($N - 1$), так как $N \gg 1$.

Исходная система уравнений для матрицы с параллельным соединением выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} x \frac{R_q}{N} I_e + R_q I_q + \frac{1}{C_d} \int I_q(t) dt = 0; \\ x \frac{R_q}{N} I_e + \frac{R_q}{NN_p} I_N + \frac{1}{C_d NN_p} \int I_N(t) dt = 0; \\ I_e = I_q + I_N, \end{cases} \quad (6)$$

где $x = \frac{R_e}{R_q} N$, а I_e , I_q , I_N — токи через резисторы R_e , R_q и $R_q/(NN_p)$ соответственно (см. рис. 4б).

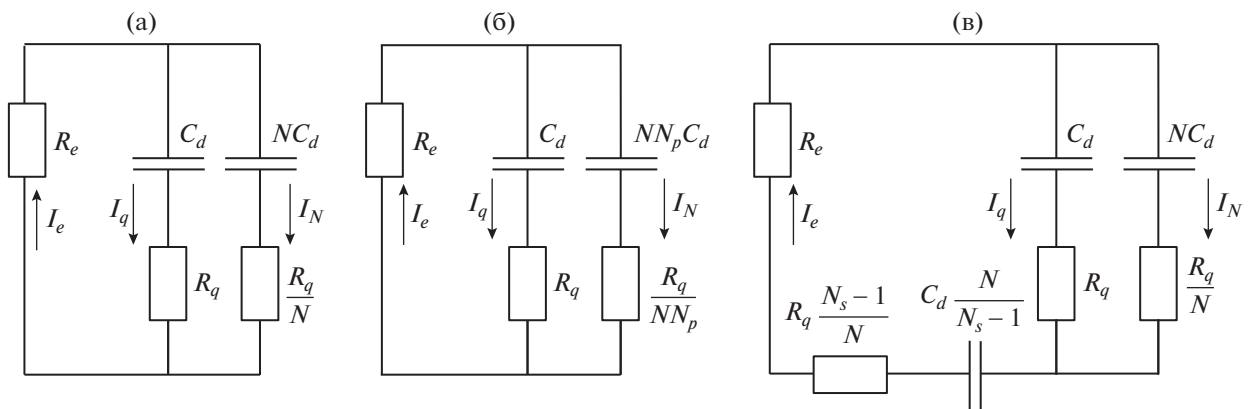


Рис. 4. Электрические схемы различных конфигураций: а — одиночный Si-ФЭУ; б — матрица с параллельным соединением N_p Si-ФЭУ; в — матрица с последовательным соединением N_s Si-ФЭУ.

Таблица 1

Тип соединения элементов в матрице	Амплитуда тока I_0	Время релаксации τ	Интегральная амплитуда A_i
Одиночный Si-ФЭУ (S)	$\propto (1+x)^{-1}$	$\propto 1+x$	const
Параллельное (PN_p)	$\propto (1+xN_p)^{-1}$	$\propto 1+xN_p$	const
Последовательное (SN_s)	$\propto (x+N_s)^{-1}$	$\propto 1+x/N_s$	$\propto 1/N_s$

Так как мы рассматриваем только спадающую часть сигнала, искомая величина тока через резистор электроники имеет вид: $I_e(t) = I_0 e^{-t/\tau}$, где I_0 – амплитуда и τ – время спада. Пропустив объемные расчеты, получим для параллельного соединения:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_q(1+xN_p)}, \quad \tau = \tau_q(1+xN_p), \quad (7)$$

где $\tau_q = R_q C_d$.

Система уравнений для матрицы с последовательным соединением имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{R_q}{N}(x+N_s-1)I_e + \frac{N_s-1}{NC_d} \int I_e(t) dt + \\ + R_q I_q + \frac{1}{C_d} \int I_q(t) dt = 0; \\ \frac{R_q}{N}(x+N_s-1)I_e + \frac{N_s-1}{NC_d} \int I_e(t) dt + \\ + \frac{R_q}{N} I_N + \frac{1}{NC_d} \int I_N(t) dt = 0; \\ I_e = I_q + I_N. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь I_N – ток через резистор R_q/N (см. рис. 4в).

Решение системы в случае последовательного соединения ищем также в виде $I_e(t) = I_0 e^{-t/\tau}$, при этом значения параметров I_0 и τ оказываются следующими:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_q(x+N_s)}; \quad \tau = \tau_q \left(1 + \frac{x}{N_s}\right). \quad (9)$$

Системы (6) и (8) при $N_p = 1$ и $N_s = 1$ сводятся к случаю одиночного Si-ФЭУ, для которого значения параметров I_0 и τ следующие:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_q(1+x)}; \quad \tau = \tau_q(1+x). \quad (10)$$

В решениях (7), (9), (10) возникает параметр $x = \frac{R_e}{R_q} N$, который влияет на характеристики сигнала. Физический смысл параметра x – это отно-

шение входного сопротивления электроники R_e к полному сопротивлению Si-ФЭУ $R_{tot} = R_q/N$.

Чтобы оценить величину параметра x , было измерено полное сопротивление Si-ФЭУ MPPC S13360-6050PE, используя метод, описанный в работе [19]. Измерения проводились в условиях, аналогичных условиям реального эксперимента с двухфазным криогенным детектором, т.е. при криогенной температуре, близкой к температуре кипения аргона. Было получено $R_{tot} \approx 12$ кОм. Учитывая, что входное сопротивление электроники $R_e = 50$ Ом, получаем $x \approx 4 \cdot 10^{-3} \ll 1$. Полученное значение параметра x мало по сравнению с единицей, поэтому амплитуда и длительность сигнала одиночного Si-ФЭУ (см. выражение (10)) совпадают со значениями, полученными в случае одиночной ячейки (см. выражение (5)).

В экспериментах с двухфазным криогенным детектором при обработке сигналов с Si-ФЭУ для дальнейшего анализа вычисляется интегральная амплитуда A_i фотоэлектронного сигнала Si-ФЭУ. Интегральная амплитуда фотоэлектронного сигнала определяется как площадь под сигналом: $A_i = \int U(t) dt$, где интегрирование проводится по некоторой окрестности сигнала. Амплитуда A_i пропорциональна числу зарегистрированных фотонов (фотоэлектронов).

Поскольку основной вклад в сигнал дает спадающая часть сигнала $I_e(t) = I_0 e^{-t/\tau}$, а его возрастающая часть дает значительно меньший вклад (см. рис. 2), то интегральная амплитуда сигнала с хорошей точностью описывается следующим выражением: $A_i = \int U_e(t) dt = R_e I_0 \tau$, где U_e – напряжение на резисторе R_e . Сравним значения параметров сигнала для матриц с параллельным (7) и последовательным (9) соединением со значениями параметров для одиночного Si-ФЭУ (10). Для наглядности результаты вычислений сведены в табл. 1.

Согласно табл. 1, мы ожидаем увеличения длительности сигнала и постоянства интегральной амплитуды при увеличении числа Si-ФЭУ для параллельного соединения элементов в матрице, а

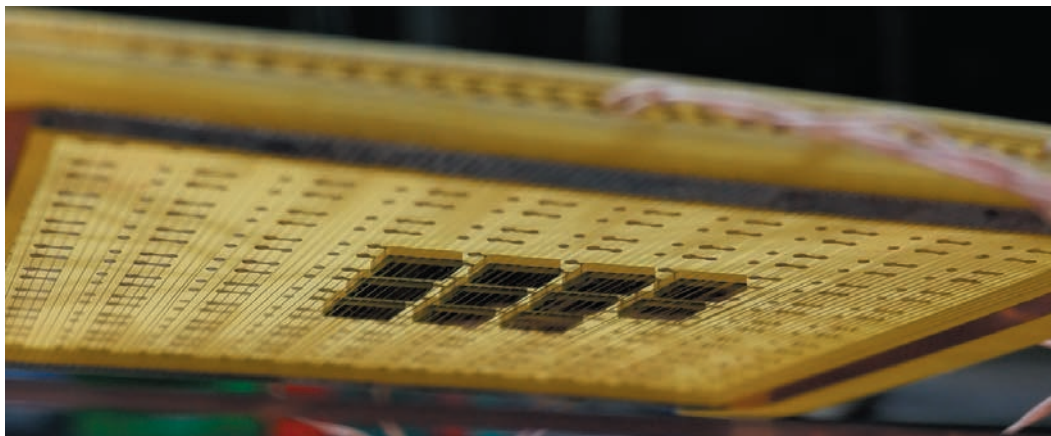


Рис. 5. Фотография матрицы исследуемых Si-ФЭУ.

также уменьшения длительности сигнала и понижения интегральной амплитуды при увеличении числа Si-ФЭУ для последовательного соединения. Так как для исследуемых Si-ФЭУ S13360-6050PE $x \ll 1$, согласно теоретическим расчетам, при увеличении числа Si-ФЭУ в матрице длительность сигнала изменяется слабо независимо от типа соединения элементов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В работе исследуются Si-ФЭУ S13360-6050PE производства Hamamatsu [23] (рис. 5), которые используются в двухфазном детекторе темной материи, разрабатываемом в лаборатории 3-3 ИЯФ СО РАН [24–28]. Приведем их основные параметры: активная область $6 \times 6 \text{ мм}^2$, число пикселей 14400, спектральный диапазон чувствительности от 320 до 900 нм [23]. При температуре жидкого аргона и напряжении смещения 48 В скорость счета шумов составляет менее 0.1 Гц/мм^2 , максимум эффективности регистрации фотонов — около 54% при длине волны 460 нм [28], а напряжение пробоя при температуре жидкого аргона — $42.3 \pm 0.5 \text{ В}$.

Экспериментальная установка выполнена на основе криогенной камеры, охлаждаемой при помощи жидкого азота (рис. 6). Камера заполнена аргоном; термодинамические условия повторяют условия реального эксперимента: внутри камеры поддерживается двухфазный режим, температура жидкого аргона равна его температуре кипения и составляет 87.3 К, давление в камере равно 1 атм. В жидкой фазе располагается матрица, состоящая из 11-ти Si-ФЭУ.

Питание Si-ФЭУ осуществляется при помощи модуля A1510 в составе универсальной системы низковольтного питания CAEN SY4527. Сигнал с Si-ФЭУ усиливается при помощи усилителя

NAICAM N410 со временем формирования 40 нс и коэффициентом усиления 56. Между усилителем и Si-ФЭУ располагается макетная плата, позволяющая коммутировать Si-ФЭУ. Усиленные сигналы с Si-ФЭУ оцифровываются при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП) CAEN V1740 и передаются на компьютер для визуализации и записи.

При температуре жидкого аргона собственные шумы изучаемых Si-ФЭУ практически отсутствуют, поэтому для получения амплитудных спектров осуществлялась засветка матрицы Si-ФЭУ при помощи светодиода с длиной волны 565 нм. Внутри камеры был заведен световод, а сам светодиод был расположен снаружи камеры, это позволило минимизировать уровень электрических наводок на Si-ФЭУ.

На светодиод при помощи генератора импульсов подавалось напряжение в виде прямоугольных импульсов длительностью 60 мкс. Амплитуда импульсов подбиралась таким образом, чтобы число зарегистрированных Si-ФЭУ фотонов было достаточно малым, что позволяло избежать сильных искажений базовой линии сигнала и наложения однофотонных импульсов друг на друга. Сигнал от генератора разветвлялся и подавался также на осциллограф, который выдавал триггерный сигнал для АЦП.

Измерения проводились в диапазоне напряжений смещения от 44 до 50 В с шагом 1 В: верхняя граница определялась появлением самоподдерживающегося пробоя Si-ФЭУ, нижняя — возможностью зарегистрировать однофотонные пики на фоне внешней наводки. Наиболее интересным для нас является напряжение смещения 46 В, поскольку оно является оптимальным рабочим напряжением для двухфазного детектора темной материи, используемого в нашей лаборатории: усиление при таком напряжении достаточно для надежной регистрации однофотонных

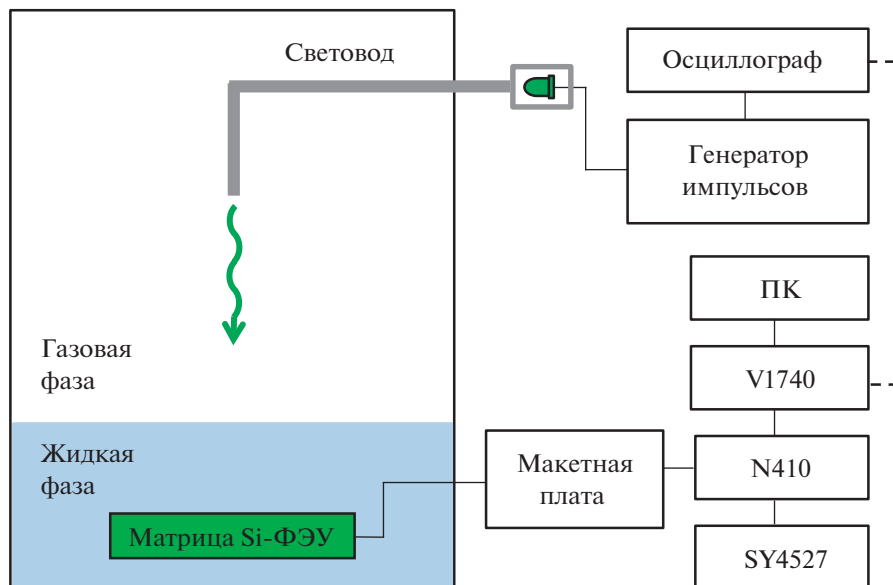


Рис. 6. Схема экспериментальной установки. Штриховой линией показана линия передачи триггерного сигнала.

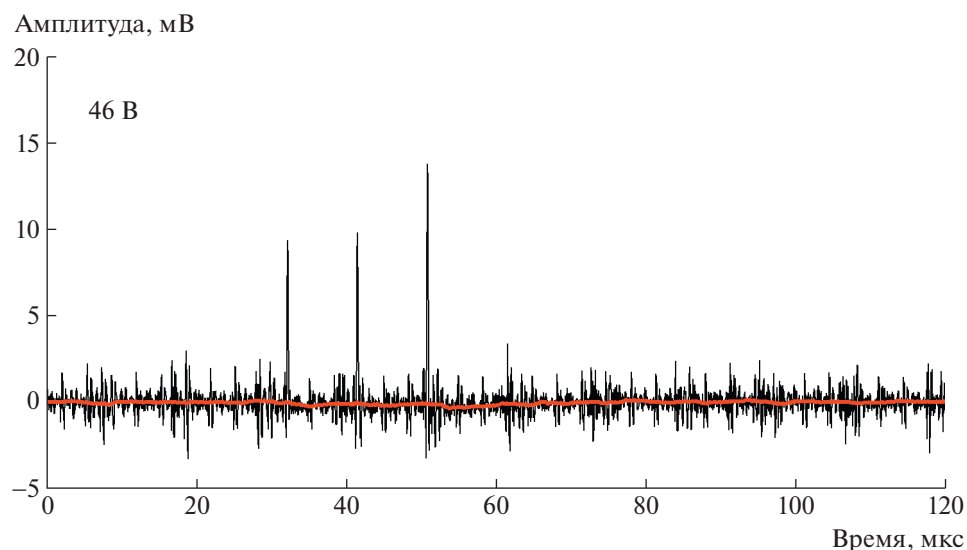


Рис. 7. Пример осциллограммы сигнала с Si-ФЭУ при напряжении смещения 46 В. Толстой красной линией показана базовая линия, полученная при помощи медианного фильтра, который использовался при обработке сигналов для учета смещения базовой линии, связанного с работой усилителей.

сигналов, а вероятность оптических перекрестных наводок еще не слишком высока.

Сигнал записывался на ПК в виде событий длительностью 160 мкс. На рис. 7 изображен пример осциллограммы сигнала с Si-ФЭУ при напряжении смещения 46 В. Во временном интервале от 15 до 75 мкс, где светодиод включен, видны фотоэлектронные пики, вызванные регистрацией фотонов. Пики достаточно редки, что позволяет сделать вывод о том, что вероятность наложения пиков не слишком велика. Толстой красной ли-

нией на рис. 7 показана базовая линия, полученная при помощи медианного фильтра, который использовался при обработке сигналов для учета смещения базовой линии, связанного с работой усилителей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Форма сигналов

При изучении формы сигналов отбирались пики, амплитуда которых была выше уровня на-

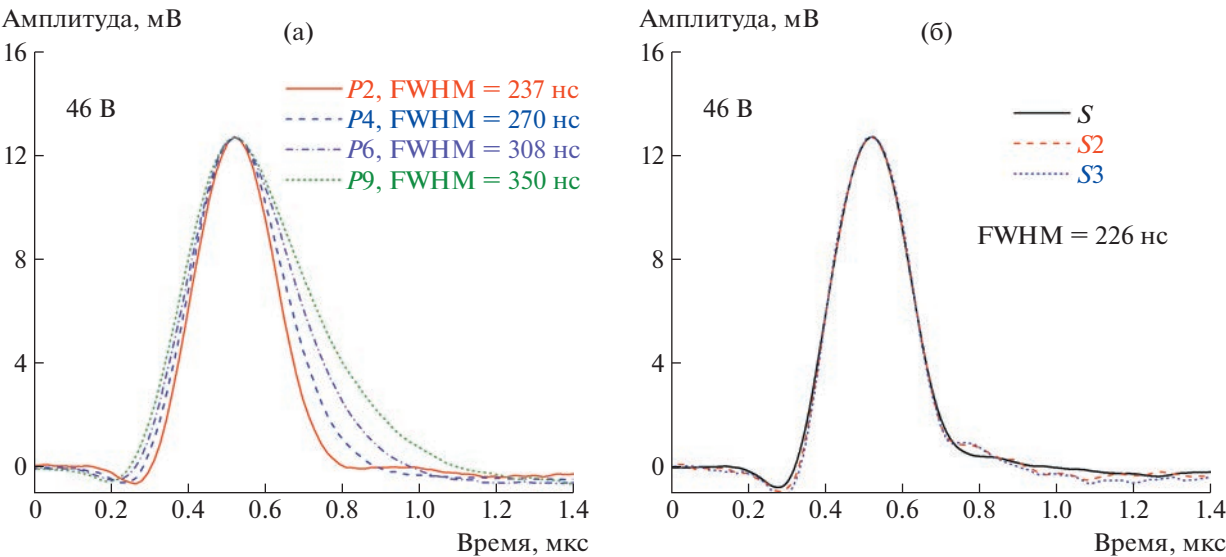


Рис. 8. Усредненные по событиям и нормированные на сигнал одиночного Si-ФЭУ формы сигнала при напряжении смещения 46 В: **а** – для матриц с параллельным соединением Si-ФЭУ ($P2-P9$) и **б** – с последовательным соединением ($S2$ и $S3$), для сравнения показана форма сигнала одиночного Si-ФЭУ (S).

водки и меньше определенного порога, соответствующего границе между однофотоелектронным и двухфотоелектронным сигналами. Центры найденных пиков совмещались, после чего проводилось усреднение по выборке из 1000 пиков.

На рис. 8 представлены усредненные по событиям и нормированные на амплитуду одиночного Si-ФЭУ формы сигнала при напряжении смещения 46 В для матриц с параллельным соединением элементов ($P2-P9$, рис. 8а) и с последовательным ($S2$ и $S3$, рис. 8б). Для сравнения показана форма сигнала одиночного Si-ФЭУ (S). Кривые совмещены в точках максимума. Видно, что длительность сигнала при увеличении числа Si-ФЭУ остается постоянной для последовательного соединения, как и ожидалось. Однако при параллельном соединении длительность сигнала возрастает. Вероятнее всего, это связано с работой усилителя: при увеличении числа Si-ФЭУ в матрице с параллельным соединением растет общая емкость на входе зарядочувствительного усилителя, из-за чего усилитель сильнее искажает сигнал, так как представленные формы сигналов определяются не только типом подключения элементов,

но и аппаратной функцией усилителей. В табл. 2 приведены абсолютные значения ширины на полувысоте (FWHM) сигналов, а также относительное увеличение (Δ) данной величины по сравнению с одиночным Si-ФЭУ для матриц с параллельным соединением элементов ($P2-P9$).

Амплитудные спектры

При изучении амплитудных характеристик вычислялась интегральная амплитуда каждого пика, превышающего заданный порог, который выбирался таким образом, чтобы зарегистрировать все однофотоелектронные пики. Интегральная амплитуда пика вычислялась как его площадь в той части, где сигнал выше базовой линии, восстановленной при помощи медианного фильтра. Затем строилась гистограмма полученных значений амплитуд.

На рис. 9 представлены полученные таким образом амплитудные спектры одиночного Si-ФЭУ (для первого канала) при различных напряжениях смещения. Левый пик соответствует внешней наводке, его наличие связано с тем, что часть сиг-

Таблица 2. Характеристики длительности сигналов для матриц с параллельным соединением Si-ФЭУ: ширина на полувысоте (FWHM), а также относительное увеличение (Δ) данной величины по сравнению с одиночным Si-ФЭУ

Характеристики	Конфигурация матрицы Si-ФЭУ								
	S	$P2$	$P3$	$P4$	$P5$	$P6$	$P7$	$P8$	$P9$
FWHM, нс	226	237	255	270	293	308	327	337	350
Δ , %	0	5	13	19	30	36	45	49	55

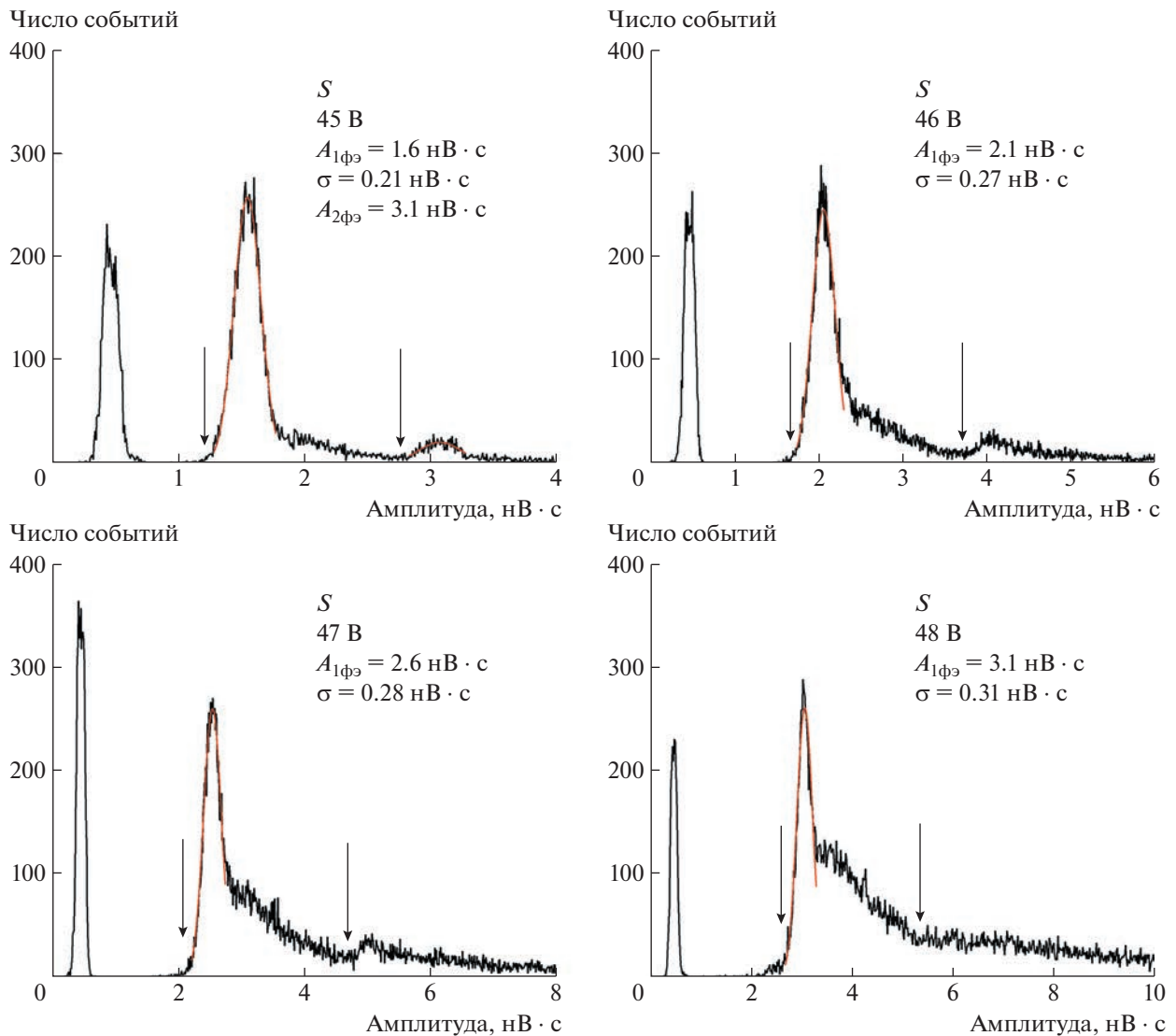


Рис. 9. Амплитудные спектры одиночного Si-ФЭУ при различных напряжениях смещения.

налов, связанных с внешней наводкой, оказываются выше заданного порога, при этом площадь таких сигналов мала. Следующий, хорошо отделяемый от него центральный пик соответствует регистрации одного фотона при помощи Si-ФЭУ. При достаточно низких напряжениях смещения (до 47 В) также отчетливо виден пик, соответствующий двухфотоэлектронному сигналу, наличие которого, в частности, связано с оптическими перекрестными наводками Si-ФЭУ [29]. С увеличением напряжения смещения интегральные амплитуды увеличиваются, а пики становятся все более несимметричными, что связано с увеличением вероятности возникновения послеимпульсов [29]; второй пик при этом становится слабо различим.

На рис. 10 представлены амплитудные спектры матриц с параллельным соединением различ-

ного числа Si-ФЭУ ($P2-P5$) при напряжении смещения 46 В. Согласно рис. 10, средняя интегральная амплитуда однофотоэлектронного сигнала ($A_{1фэ}$) для матриц с параллельным соединением элементов сравнима с амплитудой одиночного Si-ФЭУ. Кроме того, увеличение числа Si-ФЭУ в матрице приводит к уширению и размытию спектров. Это связано с тем, что увеличение числа Si-ФЭУ в матрице при параллельном соединении ведет к увеличению входной емкости зарядочувствительного усилителя, что, в свою очередь, приводит к повышению шумов [30].

На рис. 11 представлены амплитудные спектры матрицы с последовательным соединением двух Si-ФЭУ ($S2$). Слева показан спектр, полученный при напряжении 46 В на Si-ФЭУ; видно, что пик внешней наводки и спектр сигналов с Si-ФЭУ слива-

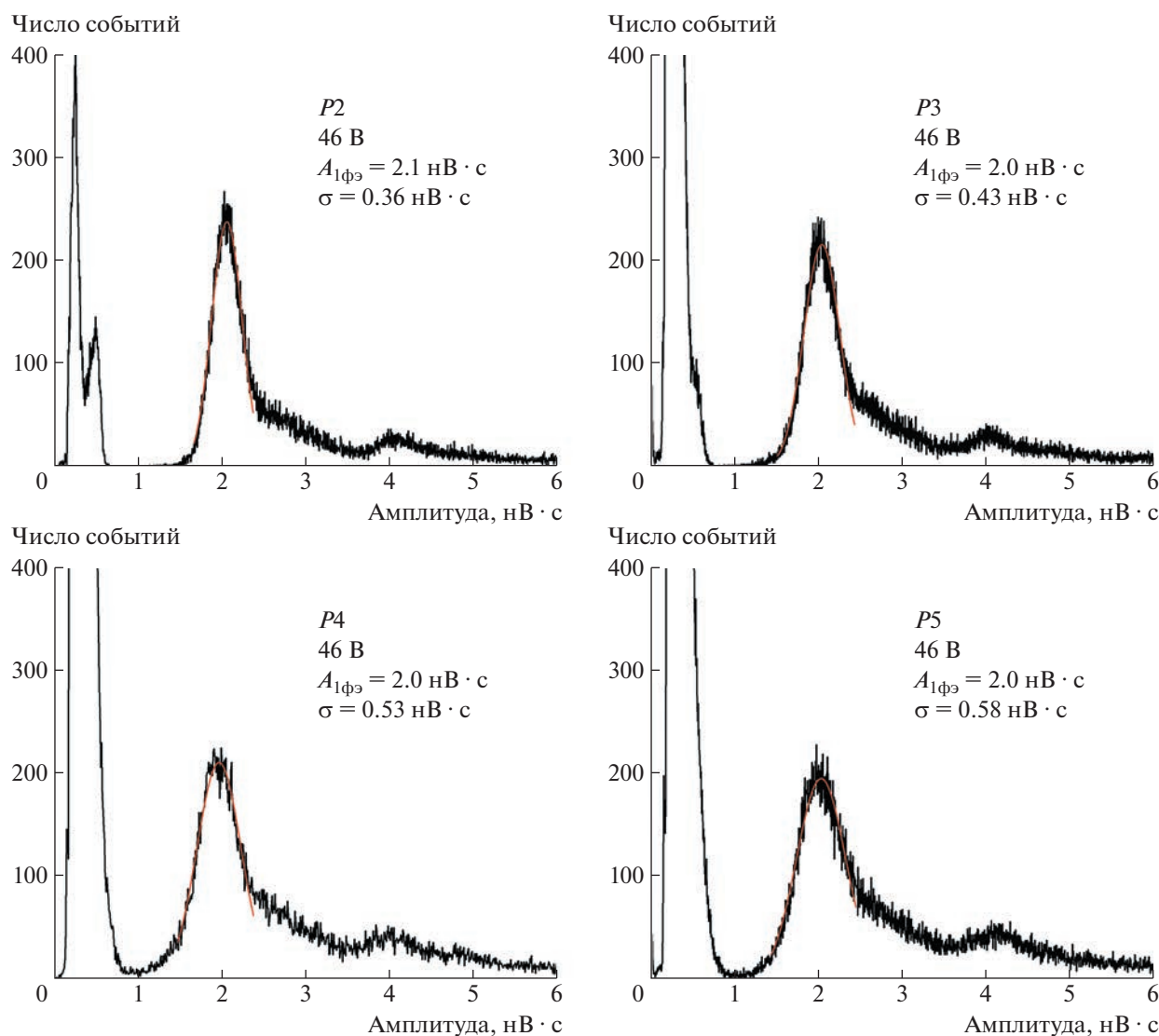


Рис. 10. Амплитудные спектры матриц с параллельным соединением различного числа Si-ФЭУ (P2–P5) при напряжении смещения 46 В.

ются, что затрудняет понимание, чему соответствует каждая часть спектра. Справа показан спектр, полученный при напряжении 48 В на Si-ФЭУ; здесь пик внешней наводки отделяется от сигнального спектра. Это позволяет не только оценить амплитуду однофотозлектронного сигнала Si-ФЭУ при напряжении 48 В, но и понять взаимное расположение пика наводки и сигнального спектра при более низких напряжениях на Si-ФЭУ, в частности при 46 В. Видно, что средняя интегральная амплитуда однофотозлектронного сигнала при равных напряжениях смещения для матрицы S2 гораздо ниже, чем для одиночного Si-ФЭУ (см. рис. 9), а сам спектр выглядит более размытым; пик, соответствующий регистрации двух фотоэлектронов, практически не виден. Последнее обстоятельство может быть связано, в частности,

с тем, что при достаточно редких сигналах ток, текущий через цепочку соединенных последовательно Si-ФЭУ, оказывается мал, что приводит к неравномерному распределению напряжения между Si-ФЭУ.

Амплитудные характеристики

При описании работы Si-ФЭУ часто используют зависимость средней интегральной амплитуды однофотозлектронного сигнала от напряжения смещения, так как она после соответствующей калибровки позволяет определить усилительную характеристику Si-ФЭУ, которая описывается линейной функцией [23]. Средняя интегральная амплитуда однофотозлектронного сигнала определяется при этом как разница средних значений

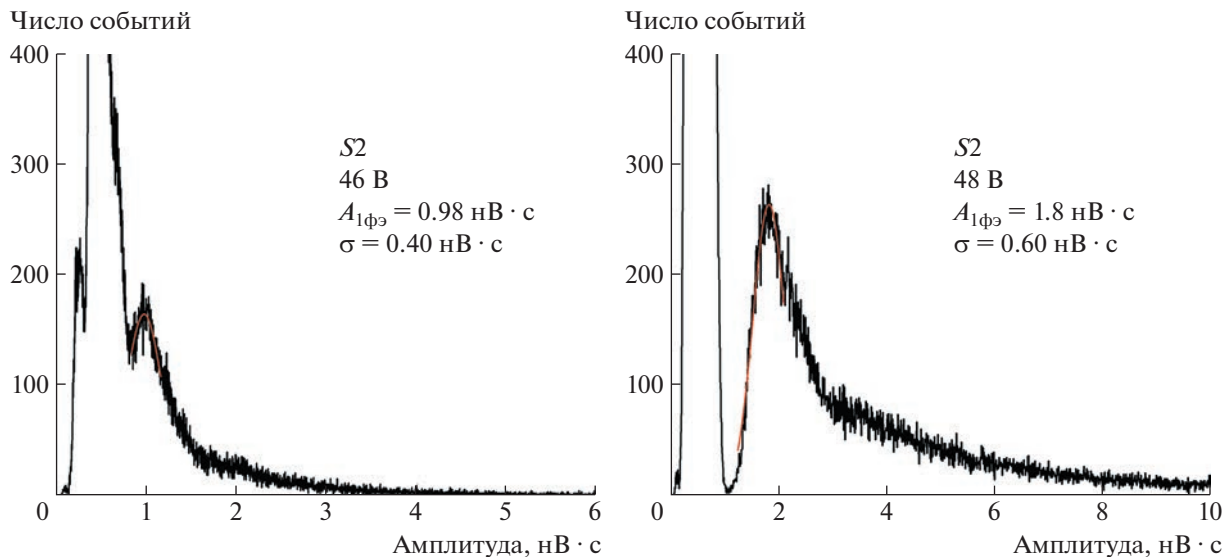


Рис. 11. Амплитудные спектры матрицы с последовательным соединением ($S2$) при напряжениях смещения 46 В (слева) и 48 В (справа).

амплитуды соседних пиков амплитудного распределения или как положение первого пика относительно нуля. Стоит отметить, что такой метод применим, когда пики распределения симметричны, как, например, в [31]. Однако, как видно из рис. 9–11, особенностью работы исследуемого Si-ФЭУ является наличие правого хвоста у фотоэлектронных пиков, связанного с послеимпульсами. В такой ситуации актуальным становится вопрос о методе определения средней интегральной амплитуды однофотоэлектронного сигнала.

Авторы видят два возможных метода. В первом предлагается оценивать среднюю амплитуду по той части спектра, которая включает в себя правый “хвост” (на рис. 9 эти области выделены стрелками). Во втором методе предлагается рассматривать только симметричную часть пика, отбросив “хвост”, аппроксимировать эту часть функцией Гаусса (см. линии аппроксимации на рис. 9–11) и таким образом получить оценки среднего значения и стандартного отклонения.

На рис. 12 представлены зависимости средней амплитуды однофотоэлектронного сигнала для одиночных Si-ФЭУ, полученные описанными методами. Данные усреднены по 11-ти имеющимся каналам. В качестве ошибок взято максимальное отклонение от среднего. Темными точками показаны данные, полученные с использованием симметричной части пика, сплошной линией показана линейная аппроксимация этих точек. Светлыми квадратами показаны данные, полученные с учетом правого “хвоста”, штриховой линией — линейная аппроксимация, проведенная через первые три точки.

Согласно рис. 12, чем выше напряжение смещения, тем сильнее отличие между амплитудами, определенными разными методами. Этот факт связан с увеличением вероятности послеимпульсов с повышением напряжения смещения. В отличие от данных, полученных с учетом правого “хвоста”, точки, полученные с использованием симметричной части пика, хорошо описываются линейной зависимостью, как и ожидалось, в связи с линейностью усилительной характеристики. Следовательно, далее для вычисления амплитудных зависимостей будем использовать метод, где учитывается только симметричная часть пика.

На рис. 13 представлены зависимости средней амплитуды однофотоэлектронного сигнала от напряжения для матриц с параллельным соединением элементов ($P2-P5$) и для матриц с последовательным соединением ($S2$). В пределах ошибок зависимости описываются линейными функциями. Кроме того, в пределах ошибок данные для матриц $P2-P5$ совпадают. Как и ожидалось, амплитуда однофотоэлектронного сигнала для матрицы $S2$ меньше, чем амплитуда для одиночного Si-ФЭУ, причем в пределах ошибок зависимость амплитуды от числа Si-ФЭУ в матрице описывается как $A_i^{SN_s}/A_i^S = 1/N_s$. В табл. 3 представлены коэффициенты линейных параметризаций $A_i = (V - U_{bd})G$, описывающих зависимости средней амплитуды однофотоэлектронного сигнала от напряжения для различных матриц.

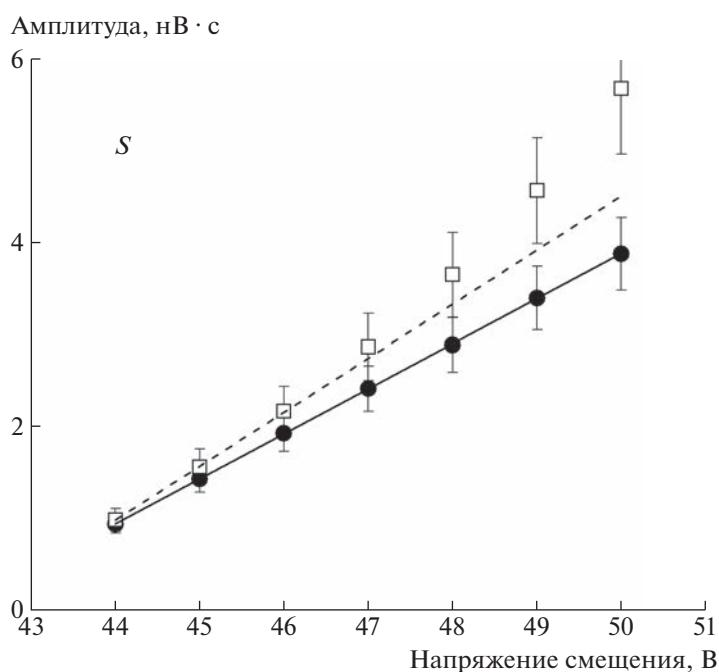


Рис. 12. Зависимость средней амплитуды однофотоелектронного сигнала, вычисленной как среднее по части спектра, включающей “хвост”, (светлые квадраты) и как среднее по симметричной части спектра (темные точки), от напряжения для одиночного Si-ФЭУ. Данные усреднены по 11-ти имеющимся каналам.

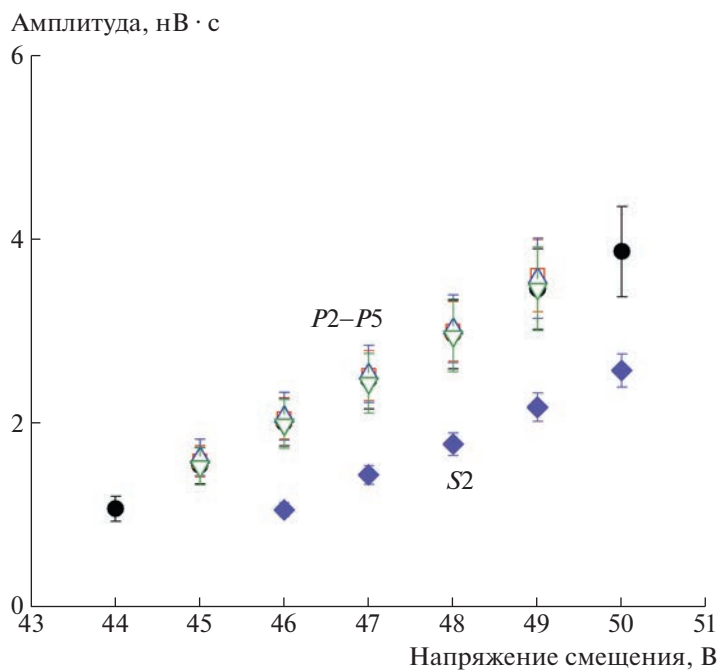


Рис. 13. Зависимость средней амплитуды однофотоелектронного сигнала от напряжения для матриц с параллельным соединением различного числа Si-ФЭУ ($P2-P5$) и с последовательным соединением Si-ФЭУ ($S2$).

Таблица 3. Коэффициенты линейных функций, описывающих зависимости средней амплитуды однофотозлектронного сигнала от напряжения для различных матриц

Константа параметризации	Конфигурация Si-ФЭУ					
	S	$P2$	$P3$	$P4$	$P5$	$S2$
G , нс	0.49	0.47	0.49	0.48	0.47	0.37
U_{bd} , В	42.1	41.7	41.8	41.6	41.8	43.1

Уровень наводок

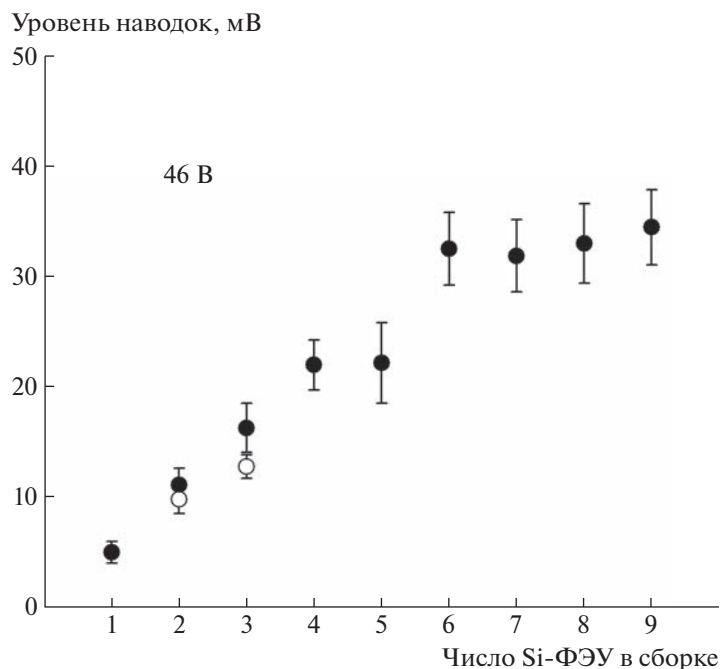
Помимо параметров фотозлектронных сигналов, для различных матриц Si-ФЭУ были исследованы уровни внешних наводок. С этой целью для каждого канала вычислялось среднеквадратичное отклонение от среднего значения среди совокупности y -координат каждой точки в диапазоне времен, где события не содержат фотозлектронных пиков (от 90 до 160 мкс, см. рис. 7). Полученные значения усреднялись по всем каналам (для всех матриц, кроме $P6$ – $P9$, в которых был только один канал), а затем — по выборке из 1000 событий; среднеквадратичное отклонение значений в данной выборке принималось за ошибку.

На рис. 14 представлена зависимость уровня наводок от числа Si-ФЭУ в матрице при напряжении смещения 46 В. Видно, что уровень наводок сначала растет с увеличением числа Si-ФЭУ в матрице, а при соединении больше шести Si-ФЭУ выходит на плато.

Обсуждение результатов

Результаты, полученные другими группами, на первый взгляд, несколько противоречат полученным нами результатам [16, 17, 32, 33]. В частности, в [32] сказано, что при последовательном соединении Si-ФЭУ сигнал с матрицы оказывается более быстрым, чем сигнал одиночного Si-ФЭУ. По-видимому, это связано с тем, что в данных работах параметр x не являлся малым, в отличие от нашей работы. В нашем же случае измерения проводились при криогенной температуре, когда гасящее сопротивление возрастает в 10–100 раз [19] по сравнению с комнатной температурой, что приводит к уменьшению параметра x .

Остановимся подробнее на достоинствах и недостатках исследованных типов соединения. Одним из достоинств последовательного соединения считается автоматическая регулировка перенапряжения [32], которая избавляет от необходимости подбора Si-ФЭУ с одинаковыми напряжениями

**Рис. 14.** Зависимость уровня наводок (среднеквадратического отклонения) от числа Si-ФЭУ в матрице при напряжении смещения 46 В. Темные точки — одиночный Si-ФЭУ и матрицы с параллельным соединением различного числа Si-ФЭУ ($P2$ – $P9$); светлые точки — матрицы с последовательным соединением Si-ФЭУ ($S2$ и $S3$).

пробоя, что особенно важно в экспериментах, где количество каналов Si-ФЭУ велико. С другой стороны, при достаточно редких сигналах (в частности, при криогенных температурах, когда скорость счета шумов Si-ФЭУ невелика) ток, текущий через цепочку соединенных последовательно Si-ФЭУ, оказывается мал, что препятствует автоматической регулировке перенапряжения. Другим достоинством последовательного соединения является более быстрый по сравнению с параллельным соединением сигнал [32]. В то же время последовательное соединение имеет и минусы, в частности: необходимость прикладывать большее рабочее напряжение (пропорционально числу Si-ФЭУ в матрице) и более низкая амплитуда по сравнению с одиночными Si-ФЭУ.

Что касается параллельного соединения, в качестве плюсов можно указать, что для матриц с таким типом соединения амплитуда сигнала практически не изменяется с увеличением числа Si-ФЭУ, а рабочее напряжение остается таким же, как для одиночного Si-ФЭУ. Однако при работе с матрицей с параллельным соединением Si-ФЭУ длительность сигнала увеличивается, пусть и незначительно, что является минусом при быстрых измерениях. Кроме того, при параллельном соединении необходимо подбирать Si-ФЭУ с близкими напряжениями пробоя [33], чтобы получить схожие рабочие характеристики каждого Si-ФЭУ в матрице, в частности: близкие однофотонные амплитуды и вероятности оптических перекрестных наводок. Так как используемые нами Si-ФЭУ MPPC S13360-6050PE имеют небольшой разброс по напряжению пробоя, в нашем случае отдельный подбор Si-ФЭУ не требуется.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена изучению работы матриц Si-ФЭУ MPPC S13360-6050PE с параллельным и последовательным подключением элементов при температуре жидкого аргона для применения в двухфазном криогенном детекторе темной материи, разрабатываемом в ИЯФ СО РАН.

В работе проведены теоретические расчеты характеристик сигнала (амплитуды и длительности) для одиночного Si-ФЭУ и для матриц с параллельным и последовательным соединением элементов. В результаты вычислений входит параметр $x = \frac{R_g}{R_q} N$, от которого зависит характер изменения сигнала при объединении Si-ФЭУ в матрицы. Для оценки величины данного параметра было измерено полное гасящее сопротивление $R_{tot} = R_q / N$ Si-ФЭУ при криогенной температуре. Оказалось, что $x \approx 4 \cdot 10^{-3} \ll 1$. При таком малом параметре x ожидается, что длительность

сигнала при последовательном и параллельном соединениях будет с хорошей точностью совпадать с длительностью сигнала одиночного Si-ФЭУ. Ожидается также, что интегральная амплитуда будет оставаться постоянной с увеличением числа элементов при параллельном соединении и уменьшаться обратно пропорционально числу элементов при последовательном соединении.

Экспериментально исследованы следующие матрицы Si-ФЭУ: с параллельным соединением элементов ($P2-P9$) и с последовательным ($S2, S3$). Длительность сигнала при последовательном соединении Si-ФЭУ с хорошей точностью не изменяется, что согласуется с теорией. Длительность сигнала при параллельном соединении увеличивается с числом Si-ФЭУ в матрице, что противоречит проведенным оценкам. Вероятнее всего, это связано с работой усилителя: с увеличением числа Si-ФЭУ в матрице с параллельным соединением элементов растет общая емкость на входе зарядочувствительного усилителя, из-за чего усилитель сильнее искажает сигнал.

Что касается интегральной амплитуды сигнала, эксперимент подтвердил отсутствие в пределах ошибок влияния на данную величину числа элементов в матрице при параллельном соединении. При этом в матрицах с последовательным соединением наблюдается ожидаемое падение интегральной амплитуды, обратно пропорциональное числу элементов в матрице в пределах ошибки.

Уровень наводок сначала растет с увеличением числа Si-ФЭУ в матрице, причем это верно для любого типа соединения элементов, а при большем числе Si-ФЭУ зависимость выходит на плато. Для матриц с последовательным соединением уровень наводок оказывается сопоставим с сигналом, что затрудняет определение амплитуды однофотонного сигнала по спектру. То же касается и матриц с параллельным соединением с количеством элементов более 5.

Таким образом, по результатам данной работы для дальнейшего использования в двухфазном криогенном детекторе темной материи выбрана матрица Si-ФЭУ, состоящая из четырех элементов, соединенных параллельно ($P4$), так как для такой матрицы продемонстрирована надежная регистрация однофотонных импульсов на фоне внешней наводки, а длительность сигнала увеличивается по сравнению с одиночным Si-ФЭУ не слишком сильно — на 20%. Кроме того, четыре элемента удобно расположить в виде квадрата, получив фотосенсоры размером 1.2×1.2 см.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа частично поддержана Российским научным фондом (проект № 21-72-00014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akimov D.Y., Bolozdynya A.I., Buzulutskov A.F., Chepel V. Two-phase Emission Detectors. World Scientific, 2021. P. 1.332.
<https://doi.org/10.1142/12126>
2. Chepel V., Araujo H. // JINST. 2013. V. 8. P. R04001.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/04/R04001>
3. Arcadi G., Dutra M., Ghosh P., Lindner M., Mambrini M., Pierre M., Profumo S., Queiroz F. S. // Eur. Phys. J. C. 2018. V. 78. P. 203.
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5662-y>
4. DarkSide Collaboration. Aalseth C.E. et al. // Eur. Phys. J. Plus. 2018. V. 133. P. 129.
<https://doi.org/10.1140/epjp/i2018-11973-4>
5. DarkSide Collaboration. Aalseth C.E. et al. // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81. P. 163.
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08801-2>
6. Baudis L., Galloway M., Kish A., Marentini C., and Wulf J. // JINST. 2018. V. 13. P. 10022.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/10/P10022>
7. Acerbi F., Paternoster G., Capasso M., Marcante M., Mazzi A., Regazzoni V., Zorzi N., Gola A. // Instruments. 2019. V. 3. P. 15.
<https://doi.org/10.3390/instruments3010015>
8. Yamamoto K., Nagano T., Yamada R., Ito T., Ohashi Y. // JPS Conference Proceedings. 2019. V. 27. P. 011001.
<https://doi.org/10.7566/JPSCP.27.011001>
9. Garutti E. // JINST. 2011. V. 6. P. C10003.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/10/C10003>
10. Anderhub H., Backes M., Biland A., Boccone V., Braun I., Bretz T., Bu J., Cadoux F., Commichau V., Djambazov L., Dornier D., Einecke S., Eisenacher D., Gendotti A., Grimm O. et al. // JINST. 2013. V. 8. P. P06008.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/06/P06008>
11. Mora A.D., Martinenghi E., Contini D., Tosi A., Boso G., Durduran T., Arridge S., Martelli F., Farina A., Torricelli A., Pifferi A. // Optics Express. 2015. V. 23(11). P. 13937.
<https://doi.org/10.1364/OE.23.013937>
12. Modi M.N., Daie K., Turner G.C., Podgorski K. // Optics Express. 2019. V. 27(24). P. 35830.
<https://doi.org/10.1364/OE.27.035830>
13. Otte A.N., Barral J., Dolgoshein B., Hose J., Klemm S., Lorenz E., Mirzoyan R., Popova E., and Teshima M. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2005. V. 545(3) P. 705.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.02.014>
14. Renker D. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2006. V. 567. P. 48.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.05.060>
15. Ozaki K., Kazama S., Yamashita M., Itow Y. and Moriyama S. // JINST. 2021. V. 16. P. P03014.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/03/P03014>
16. Cervi T., Babicz M.E., Bonesini M., Falcone A., Kose U., Nessi M., Menegolli A., Pietropaolo F., Raselli G.L., Rossella, M. Torti M., Zani A. // JINST. 2017. V. 12. P. C03007.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/C03007>
17. D'Incecco M., Galbiati C., Giovanetti G.K., Korga G., Li X., Mandarano A., Razeto A., Sablone D., Savarese C. // IEEE Trans. on Nucl. Science. 2017. V. 65. P. 591.
<https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2774779>
18. Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Shemyakina E., Sokolov A. // JINST. 2015. V. 10. P04013.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/04/P04013>
19. Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Shekhtman L., Shemyakina E., Sokolov A., Breskin A., Thers D. // JINST. 2014. V. 9. P. P08006.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/08/P08006>
20. Popova E.V., Buzhan P.Zh., Stifutkin A.A., Ilyin A.L., Mavritskii O.B., Egorov A.N., Nastulyavichius A.A. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 737. P. 012041.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012041>
21. Cova S., Ghioni M., Lacaita A., Samori C., Zappa F. // Applied Optics. 1996. V. 35. No. 12. P. 1956.
<https://doi.org/10.1364/AO.35.001956>
22. <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mpcc-sipms/what-is-a-SiPM-and-how-does-it-work.html>
23. <https://www.hamamatsu.com/>
24. Bondar A., Buzulutskov A., Grebenuk A., Pavlyuchenko D., Snopkov R., Tikhonov Y., Kudryavtsev V.A., Lightfoot P.K., Spooner N.J.C. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2007. V. 574. P. 493.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.01.090>
25. Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Nosov V., Shekhtman L., Shemyakina E., Sokolov A. // Europhysics Letters. 2015. V. 112. P. 19001.
<https://doi.org/10.1209/0295-5075/112/19001>
26. Bondar A., Borisova E., Buzulutskov A., Frolov E., Sokolov A. // JINST. 2020. V. 15. P. C06064.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/C06064>
27. Buzulutskov A., Frolov E., Borisova E., Nosov V., Oleynikov V., Sokolov A. // Eur. Phys. J. C. 2022. V. 82. P. 839.
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10792-1>
28. Aalseth C.E., Abdelhakim S., Agnes P., Ajaj R., Albuquerque I.F.M., Alexander T., Alici A., Alton A.K., Amundruz P., Ameli F., Anstey J., Antonioli P., Arba M., Arcelli S., Ardito R. et al. // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81. P. 153.
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08801-2>
29. Rosado J., Hidalgo S. // JINST. 2015. V. 10. P. P10031.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/10/P10031>
30. Horowitz P., Hill W. The art of electronics. 3rd edition. Cambridge University Press, 2015. Chapters 8.5.7. P. 497–499 и 8.11.3. P. 538–539.
31. Bondar A., Buzulutskov A., Grebenuk A., Sokolov A., Akimov D., Alexandrov I. and Breskin A. // JINST. 2010. V. 5. P. P08002.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/08/p08002>
32. Collazuol G. // The 15th Vienna Conference on Instrumentation VCI-2019. 18–22 Feb 2019. Vienna University of Technology. P 86, <https://indi.to/DyMp5>
33. Cervi T., Babicz M., Bonesini M., Falcone A., Menegolli A., Raselli G.L., Rossella M., Torti M. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2018. V. 912 P. 209.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.038>