



НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Кафедра физики твердого тела и наносистем

О.Б. Маврицкий, Д.Б. Бучный

# **КРЕМНИЕВЫЙ ФОТОУМНОЖИТЕЛЬ (SiPM)**

**Лабораторный практикум  
по основам фотоприемных устройств в рамках  
курса физики конденсированного состояния**

*Рекомендовано УМО «Ядерная физика и технологии»  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание .....	2
Список используемых аббревиатур .....	3
Введение .....	4
1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ SiPM .....	7
1.1. ЛФД/ГЛФД, физика лавин.....	7
1.2. МДП-структура SiPM.....	9
1.3. Основные характеристики SiPM .....	11
2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ $V_0$ И КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ $K$ .....	13
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ .....	15
3.1. Описание установки .....	15
3.2. Задание 1. Измерение напряжения пробоя.....	20
3.2.1. Калибровка генератора световых импульсов .....	20
3.2.2. Оценка напряжения пробоя $V_0$ SiPM .....	21
3.3. Задание 2. Измерение коэффициента усиления .....	21
3.3.1. Наблюдение перехода SiPM в режим насыщения .....	21
3.3.2. Измерение коэффициента усиления $K$ для образца SiPM в режиме насыщения .....	21
3.4. Задание 3 ( <i>дополнительное</i> ) .....	22
3.4.1. Наблюдение влияния длительности слабого светового импульса на сигнал SiPM .....	22
3.4.2. Наблюдение отклика SiPM на задержанные друг относительно друга два короткие световых импульсы .....	23
Контрольные вопросы .....	23
Литература, использованная при подготовке пособия.....	24
Приложение 1 .....	25

## Список используемых аббревиатур

<i>Русский вариант</i>	<i>Английский аналог</i>
<b>ЛФД</b> – лавинный фотодиод	<b>APD</b> – avalanche photodiode
<b>ГЛФД</b> – лавинный фотодиод, работающий в гейгеровском режиме, также известен как однофотонный фотодиод	<b>GAPD</b> – Geiger mode avalanche photodiode (или <b>SAPD</b> – single photon avalanche photodiode)
<b>ЭРФ</b> – эффективность регистрации фотонов	<b>PDE</b> – photon detection efficiency
<b>SiPM</b> или <b>Si-ФЭУ</b> (используется редко) – кремниевый фотоумножитель	<b>SiPM</b> – silicon photomultiplier
<b>СФВК</b> – счет одиночных фотонов с временной корреляцией (экспериментальный метод оптической рефлектометрии)	<b>TCSPC</b> – time correlated single photon counting
<b>МДП</b> – металл-диэлектрик-полупроводник, тип структур, используемых в SiPM и прочих полупроводниковых фотодетекторах нового поколения	<b>MIS</b> – Metal-Insulator-Semiconductor
<b>ФЭУ</b> – фотоэлектронный умножитель, преобразующий оптический сигнал в электрический ток.	<b>PMT</b> – photomultiplier tube

**Цель работы:** *ознакомление с одним из высокочувствительных быстродействующих фотоприёмных устройств – кремниевым фотумножителем. Основные рабочие характеристики исследуемого образца SiPM определяются по результатам наблюдения электрического отклика на короткие световые импульсы.*

## Введение

Детектирование световых импульсов с энергетическим разрешением на уровне отдельных фотонов является приоритетной задачей в области разработки фотоприемников уже более полувека. Первыми приемниками оптического излучения, способными регистрировать излучение в масштабе нескольких фотонов, были фотоэлектронные устройства такие как классические вакуумные фотоэлектронные умножители (ФЭУ)<sup>1</sup>, появившиеся еще в первой половине XX века и получившие широкое распространение в начале 50-х годов благодаря возникшей со стороны ядерной физики потребности в регистраторах излучения с низким порогом чувствительности и высоким быстродействием.

В дальнейшем развитие технологий полупроводников и стремление обойти основные недостатки классических ФЭУ, такие как крупные габариты и чувствительность к внешним магнитным полям, привели к появлению таких полупроводниковых фотоэлектрических приемников как фотодиоды (ФД) на основе  $p-n$  перехода, лавинные фотодиоды (ЛФД) и однофотонные или гейгеровских фотодиоды (ГЛФД).



**Рис. 1.1** Габаритное сравнение стандартного SiPM (слева) и классического ФЭУ (справа)

---

<sup>1</sup> Под этим термином, как правило, подразумеваются классические вакуумные ФЭУ, работа которых в основана на явлении вторичной электронной эмиссии.

Важно отметить, что все эти устройства не способны полностью решить проблему определения числа отдельных фотонов при комнатной температуре. Для достоверного обнаружения отдельных фотонов, амплитуда электрической реакции детектора на отдельный фотон должна превышать амплитуду электронного шума используемой схемы собирания заряда.

Оценочные расчеты показывают, что для достижения необходимой амплитуды, количество порожденных светом электронов требуется умножить на очень высокий коэффициент размножения порядка и более  $10^5$ , чтобы получить временную достоверность обнаружения около 1 нс. Для вакуумных ФЭУ и ЛФД механизмы усиления сигнала изначально зашумлены, создавая из одного электрона на входе случайное количество электронов на выходе и затрудняя подсчет отдельных фотонов. В случае ГЛФД умножение сигнала можно считать условно бесшумным, однако ГЛФД является бинарным прибором и не дает возможности регистрировать многофотонные импульсы – сигнал с него свидетельствует о факте регистрации одного или нескольких фотонов, а не об их количестве. Объединение многих ГЛФД в массив для детектирования нескольких фотонов сопряжено с проблемой низкой эффективности регистрации для такого устройства.

Новое поколение полупроводниковых фотодетекторов появилось благодаря исследованиям лавинных процессов в структурах типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), проводившимся под руководством В. Шубина в ФИАНе с середины 1970-х годов. По базовому принципу работы эти МДП-фотоприемники эквиваленты массивам GPAD, но при этом компактны и обладают гораздо большей эффективностью регистрации. Наиболее популярными полупроводниковыми фотодетекторами нового поколения является разработанные в научной группе профессора МИФИ Бориса Анатольевича Долгошеина<sup>2</sup> кремниевые фотоумножители (SiPM), конструктивно-технологическая база которых получила широкое развитие за последние два десятилетия как в России, так и за рубежом.

Помимо ключевой возможности регистрации многофотонных световых импульсов с разрешением на уровне отдельных фотонов, основными преимуществами SiPM по сравнению с классическим ФЭУ являются:

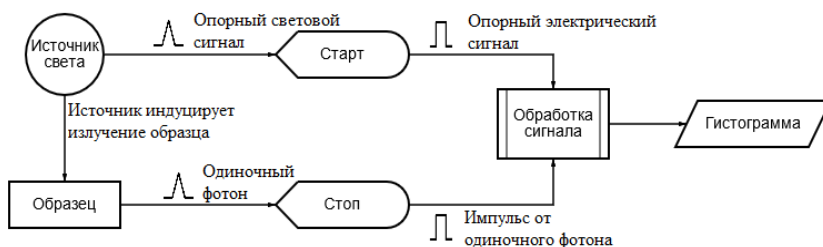
---

<sup>2</sup> Подробнее см. Приложение 2.

- небольшое рабочее напряжение;
- слабая чувствительность к внешним электромагнитным полям;
- стабильный отклик, линейный по отношению к числу зарегистрированных фотонов;
- высокое временное разрешение;
- компактность;

Благодаря этим свойствам SiPM особенно эффективны для решения задач, требующих точный подсчет фотонов в сочетании с синхронизированным временем прихода ожидаемого светового сигнала.

Наглядным примером решения подобной задачи служит метод счета одиночных фотонов с временной корреляцией СФВК<sup>3</sup>, используемый в оптической рефлектометрии и при измерениях времени люминесценции материалов. СФВК позволяет обнаруживать одиночные фотоны от образца и измерять времена их прихода по отношению к эталонному сигналу, в роли которого обычно выступает источник света, подаваемого на образец. Метод является статистическим и требует источник с высокой повторяемостью для накопления достаточного количества фотонных событий с целью достижения необходимой точности статистических данных. На рисунке 1.2 приведена схема, иллюстрирующая суть метода.



**Рис 1.2** Упрощенная схема СФВК-установки

Помимо TCSPC в настоящее время SiPM нашли широкое применение, во-первых, в традиционных для ФЭУ сферах – позитронно-

<sup>3</sup> метод счета одиночных фотонов с временной корреляцией СФВК (TCSPC - time correlated single photon counting) требует высокого временного разрешения фотоприемника и возможности счета фотонов.

эмиссионной томографии и калориметрии, в частности, сцинтилляционных детекторах где особенно актуальна необходимость фотонной регистрации излучения сцинтилляторов из-за низкой эффективности светосбора в сочетании с необходимостью регистрации фотонов невысоких энергий. Во-вторых, SiPM активно используются в недавно появившихся и развивающихся областях науки и технологий – таких как ЛИДАРы и биофотоника, недавний прогресс в которых обусловлен в том числе и развитием технологий кремниевых фотоумножителей.

Важно отметить, что наряду со всеми перечисленными преимуществами традиционная конструкция SiPM имеет и характерные недостатки, например, необходимость балансировать между плотностью ячеек ГЛФД-массива (динамический диапазон) и коэффициентом заполнения (эффективность обнаружения), а также множественный компромисс «площадь ячейки / усиление / ширина импульса / время восстановления / перекрестные помехи / афтерпалсинг». Некоторые из недостатков стандартных SiPM могут быть сглажены, другие же являются неотъемлемыми. В связи с этим в настоящее время активно ведутся разработки, посвященные различным вариациям конструкции SiPM.

## 1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ SiPM

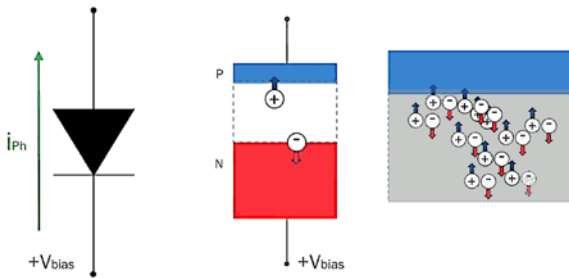
SiPM представляет собой МДП-структуру, эквивалентную матрице лавинных фотодиодов в гейгеровском режиме (ГЛФД) с пассивным гашением, размеры которых составляют единицы или десятки микрометров. Число отдельных ГЛФД-ячеек в матрице каждого SiPM варьируется в пределах  $10^3$ - $10^5$ .

### 1.1. ЛФД/ГЛФД, физика лавин

Поглощение фотонов на границе *p-n* перехода может индуцировать появление электронно-дырочных пар. При приложении достаточного обратного напряжения смещения  $V_{bias}$  возникшие носители заряда соответствующего знака перетекают в *p* и *n* области полупроводника, приводя к возникновению фототока  $i_{ph}$  (Рис. 2.1). Устройство, использующее данный процесс для преобразования оптического излучения в электрический заряд называется фотодиод. Стан-

дартные фотодиоды работают в линейном режиме, поскольку протекающий через них фототок  $i_{ph} \sim n_{ph}$  – пропорционален количеству поглощенных в  $p-n$  переходе фотонов.

Существуют, однако, фотодиоды, которые не только преобразуют свет в электрический сигнала, но и усиливают его. В данном случае речь идет о лавинных фотодиодах – ЛФД. При превышении  $V_{bias}$  некоторого критического значения – напряжения пробоя  $V_0$  – разлетающиеся под действием электрического поля заряды в  $p-n$  переходе набирают достаточную кинетическую энергию для порождения вторичных носителей заряда в результате ударной ионизации. Последние также ускоряются полем и могут индуцировать появление еще большего числа новых носителей. Данный процесс называется лавиной: при поглощении единственного фотона через фотодиод начинает течь лавинный ток  $i_{av} \gg i_{ph}$ . В этом случае говорят, что фотодиод работает в лавинном или гейгеровском режиме – ГЛФД (Geiger-mode avalanche photodiode) – попадание хотя бы одного фотона приводит к возникновению относительно высокого тока, не зависящего от изначального числа попавших в область лавины фотонов  $n_{ph}$ .



**Рис. 1.1** Стандартный лавинный фотодиод (справа изображено образование лавины в результате ударной ионизации)

В данном режиме работает любой отдельно взятый элемент матрицы SiPM, где в результате каждой лавины появляется  $10^5$ - $10^6$  носителей заряда, т.е. коэффициент усиления  $K$  сопоставим с классическим ФЭУ, при этом:

$$K = Q/q = C(V_{bias} - V_0)/q \quad (2.1)$$

где  $Q$  – заряд, накопленный на емкости ячейки матрицы  $C_j$ ;  $(V_{bias}-V_0)$  – перенапряжение, т.е. величина превышения напряжения смещения над напряжением пробоя;  $q$  – заряд электрона.

В аналоговом<sup>4</sup> SiPM ГЛФД-ячейки подключены параллельно и импульты тока с них суммируются (Рис. 1.2).

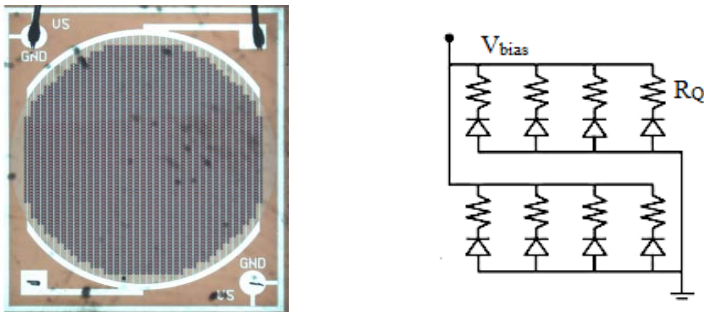


Рис 1.2 Матрица SiPM и ее эквивалентная схема

## 1.2. МДП-структура SiPM

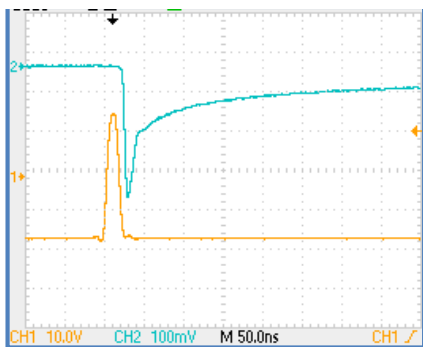


Рис. 1.3 Короткий 16-ти наносекундный импульс светодиода (1) и характерный электрический сигнал SiPM (2 – резкий фронт – развитие лавины, плавный спад – пассивное гашение).

При возникновении лавины необходимо остановить ток через ГЛФД, чтобы позволить устройству восстановить емкость  $p-n$  перехода  $C_j$  и вернуться в гейгеровский режим для регистрации последующих фотонов (для этого напряжение на  $C_j$  должно сравняться с  $V_{bias}$ ). Для стандартных ГЛФД обычно используется активное гашение в виде отдельной (от светочувствительного элемента) электронной схемы. МДП-

структура SiPM позволяет интегрировать в матрицу ГЛФД в каждую

<sup>4</sup> В настоящее время также существуют *цифровые* SiPM, в которых сигнал с каждой ячейки обрабатывается отдельно, в данной работе они не рассматриваются. [S. Gundacker, E. Auffray et al. // Nucl. Inst. Methods 787 \(2015\), P. 6-11.](#)

ячейку гасящие сопротивления  $R_Q$ , которые формируют из лавины спадающий по экспоненциальному закону электрический импульс (Рис. 1.3). Данный механизм называется *пассивным гашением*.

На рисунке 1.4 строение SiPM рассмотрено подробнее. Для стандартного SiPM в МДП-структуре роль изолятора берет на себя слой  $\text{SiO}_2$  над  $p$ - $n$  переходом, а роль проводника – напыленный на него резистивный слой ( $R_Q$  – сопротивление, приходящееся на одну ГЛФД-ячейку). Во время лавины носители заряда накапливаются на границе полупроводник-изолятор и обеспечивают самогашение пробоя с самокалибровкой лавинного заряда за счет экранирования электрического поля в области лавины. Высокое по сравнению с уровнем шума напряжение пробоя (15...30 В) также снижает флуктуации заряда, проходящего через ГЛФД. Ячейки SiPM разделены обедненными областями полупроводника (на рисунке они обозначены как  $n$ ).

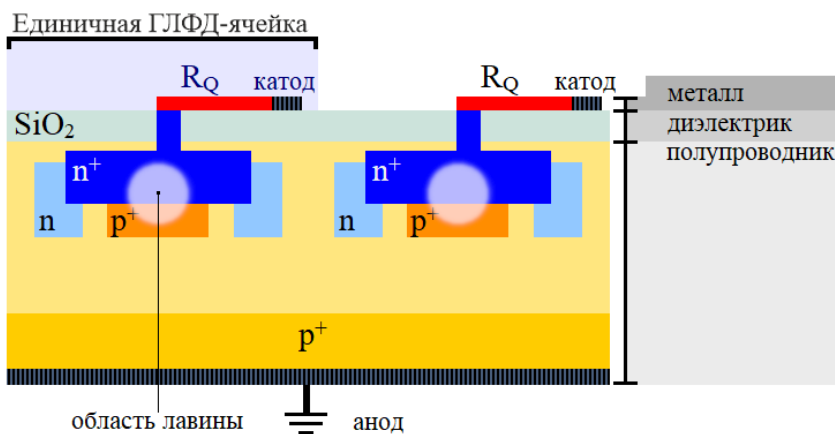
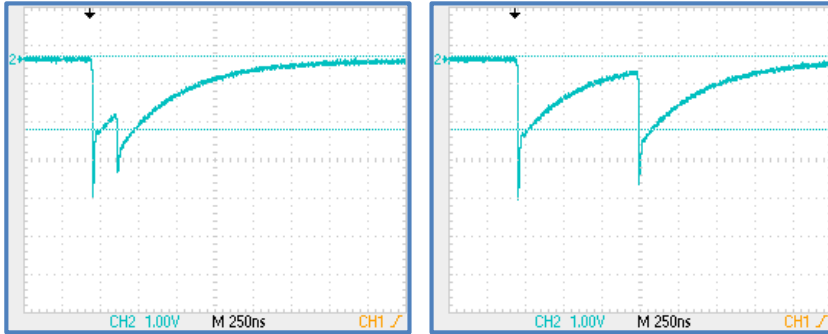


Рис 1.4 МДП-структура SiPM в поперечном сечении:

Отклик каждой ячейки матрицы SiPM на попадание в  $p$ - $n$  переход одного или нескольких фотонов имеет вид одиночного импульса тока. Повышение сопротивления гашения  $R_Q$  уменьшает длительность импульса, повышая временное разрешение SiPM, однако при этом возрастает время зарядки ГЛФД после лавины, спустя которое он может снова зафиксировать факт поглощения фотона на  $p$ - $n$  переходе.

На рисунке 1.5 представлен пример реакции SiPM на два коротких световых импульса, испущенных с временной задержкой двумя светодиодами (по отдельности вызывающими отклики одинаковой амплитуды). При малой задержке (порядка нескольких характерных времен зарядки ГЛФД) хорошо видно, что амплитуда электрического отклика на второй импульс заметно ниже из-за меньшего числа активных ячеек на момент второго оптического сигнала.



**Рис. 1.5** Электрическая реакция матрицы SiPM на две одинаковые сдвинутые по времени световые вспышки светодиодов на 150 нс (слева) и 800 нс (справа).

Коэффициент усиления каждой ячейки и всей матрицы SiPM в первом приближении растет по линейному закону в зависимости от приложенного напряжения смещения  $V_{bias}$ , однако, это также приводит к экспоненциальному росту амплитуды шумов.

### 1.3. Основные характеристики SiPM

Итак, можно выделить несколько ключевых параметров, характеризующих работу SiPM:

- напряжение пробоя  $V_0$ , при котором фотодиоды матрицы SiPM становятся ГЛФД и начинают порождать лавины при поглощении фотонов;
- отношение коэффициента усиления ( $K$ ) к перенапряжению ( $V_{bias} - V_0$ ), определяющее амплитуду электрических сигналов со всех ГЛФД
- эффективность регистрации фотонов ( $\mathcal{E}P\Phi$ ):

$$\mathcal{E}P\Phi = K \mathcal{E}_G \times \Gamma \mathcal{E}, \quad (1.2)$$

где  $KЭ$  – квантовая эффективность, определяемая длиной волны фотона и структурой поперечного сечения SiPM, практически не зависит от  $V_{bias}$ ;  $\varepsilon_G$  – гейгеровская эффективность, характеризующая вероятность того, что попавший в ГЛФД фотон породит лавину (растет вплоть до 100% с увеличением напряжения),  $ГЭ$  – геометрическая эффективность, определяемая долей светочувствительной зоны SiPM по отношению к его полной площади;

- темновой шум;
- вероятность самоиндуцированных сигналов – перекрестных помех (в зарубежных работах используется термин *cross-talk*. – индуцирование лавиной в одной ячейке лавин в соседних) и повторного появления лавины в одной и той же ячейке после ее срабатывания (*afterpulsing*).

Пик спектральной чувствительности SiPM, как правило, приходится на область 400-500 нм. Размеры активной области матрицы обычно лежат в пределах от 1 до 6 мм<sup>2</sup>. На выходе SiPM сумма сигналов от всех ячеек его матрицы имеет вид набора острых пиков, высота которых в первом приближении пропорциональна количеству сработавших единичных ГЛФД.

Таким образом, предельный детектируемый SiPM поток фотонов соответствует срабатыванию всех ячеек матрицы за короткий промежуток времени и определяется плотностью ячеек ГЛФД и временем их релаксации. В общем же случае для импульсных источников света достаточной интенсивности число сработавших ячеек SiPM может быть вычислено согласно следующей формуле:

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \times \left[ 1 - \exp \left( - \frac{N_{\text{photon}} \times PDE}{N_{\text{total}} \times (P_w / t_d)} \right) \right], \quad (1.3)$$

в которой использованы обозначения:

$N_{\text{total}}$  – число ячеек матрицы SiPM;

$N_{\text{photon}}$  – число фотонов светового импульса, попавших на чувствительную площадку SiPM;

$P_w$  – длительность регистрируемого светового импульса;

$t_d$  – время релаксации ГЛФД;

$PDE$  – эффективность регистрации фотонов SiPM ( $ЭРФ$ ).

## 2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ $V_0$ И КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ $K$

Метод основан на измерении заряда (или амплитуды) импульсного сигнала отклика.

Для работы с SiPM прежде всего необходимо знать его напряжение пробоя  $V_0$ , которое (наряду с однофотонным откликом ячейки) можно экспериментально вычислить по спектру пришедших из SiPM зарядов при засветке короткими (порядка 20 нс) **импульсами малой интенсивности** (такой, чтобы за время импульса SiPM регистрировал один или несколько фотонов). Зафиксировав массив осциллограмм пришедших от SiPM импульсов, можно объединить полученные данные в зарядовый спектр, представленный на рисунке 4.1.

В данном случае ось абсцисс на осциллограмме соответствует суммарному заряду, переносимому импульсом (интеграл силы тока по времени импульса), а ось ординат – числу **зарегистрированных осциллограмм, на которых появился импульс с таким зарядом**. Поскольку сигналы из всех ячеек SiPM складываются линейно, полученный спектр будет иметь вид набора пиков, каждый из которых соответствует срабатыванию дополнительной ячейки (1-й пик слева обусловлен темновым шумом, 2-й пик соответствует срабатыванию **одиночной** ячейки SiPM, 3-й – срабатыванию 2 ячеек и т.д.). Следовательно, расстояние между пиками соответствует заряду, генерируемому при поглощении одной ячейкой SiPM фотона т.е. численно равен коэффициенту усиления, умноженному на заряд электрона  $K \times q$ . Ширина пиков определяется как шумами внутри SiPM, так и различным временем срабатывания ячеек во время регистрации непродолжительного импульса.

Погрешность расстояния между пиками  $\Delta A$  можно вычислять как статистическую погрешность косвенного измерения  $\Delta A_{stat}$ , при этом также учитывается систематическая погрешность  $\Delta A_{cism}$  неодинакового расстояния между пиками, равная максимальному отклонению расстояния от среднего:

$$\Delta A^2 = \Delta A_{stat}^2 + \Delta A_{cism}^2. \quad (2.1)$$

Важно отметить, что в случае, когда шумы, создаваемые осциллографом и схемой подключения фотоумножителя, превышают сигнал от одной ячейки SiPM получить картину дискретных сигналов,

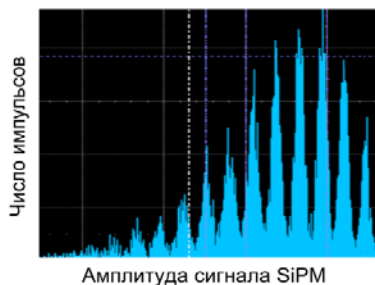
сходную с рисунком 4.1 становится проблематично. Альтернативным подходом к оценке коэффициента усиления  $K$  является измерения заряда, генерируемого SiPM при регистрации короткого светового импульса, интенсивности которого достаточно для насыщения матрицы ГЛФД. В этом случае можно с некоторым приближением утверждать, что общий заряд  $Q$ , пришедший от SiPM сформирован единовременным срабатыванием подавляющего большинства ячеек его матрицы (>90% от общего их числа). Тогда коэффициент усиления одиночной ячейки можно приближенно определить как:

$$K = Q(qN)^{-1}, \quad (2.2)$$

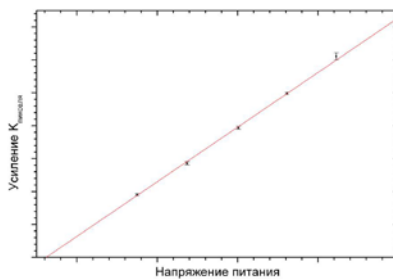
где  $q$  – заряд электрона;  $N$  – число ячеек в матрице SiPM;  $Q$  – заряд, пришедший при насыщенном срабатывании SiPM, пропорциональный интегралу напряжения по времени импульса на осциллограмме.

Дополнительными источниками погрешности такого измерения служат как неопределенность точного числа сработавших ячеек, так и возможность неоднократного срабатывания одних и тех же ячеек SiPM за время регистрации светового импульса. Дополнительную погрешность можно частично оценить, используя формулу (2.1).

Поскольку в первом приближении коэффициент усиления, а, следовательно, и однофотонный отклик SiPM линейно зависит от перенапряжения  $(V_{bias}-V_0)$ , для вычисления напряжения пробоя  $V_0$  достаточно экспериментально найти и построить зависимость  $Q$  или  $K$  от подаваемого на SiPM напряжения  $V_{bias}$ , которое аппроксимируется прямой (Рис. 2.2). Искомое напряжение пробоя  $V_0$  фотоумножителя соответствует точке, в которой



**Рис. 2.1** Зарядовый спектр отклика SiPM на лазерные импульсы длительностью 20 нс



**Рис. 2.2** Зависимость коэффициента усиления SiPM от подаваемого напряжения

$K(V_{bias}=V_0)=0$  или  $A(V_{bias})=0$ . При напряжении ниже данного значения ячейки SiPM перестают работать в гейгеровском режиме.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

В ходе данной лабораторной работы проводится измерение напряжения пробоя (Задание 1) и коэффициента усиления (Задание 2) стандартного SiPM. В качестве источника микро- и наносекундных световых импульсов выступает система из двух синих светодиодов, подключенных к синхронизированным генераторам электрических импульсов.

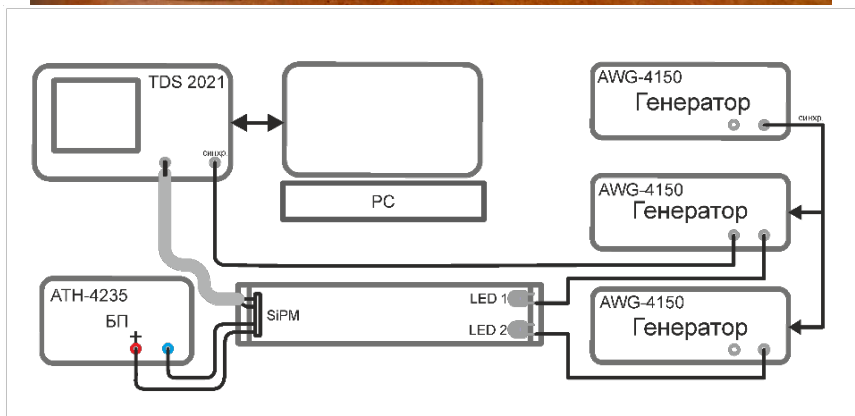
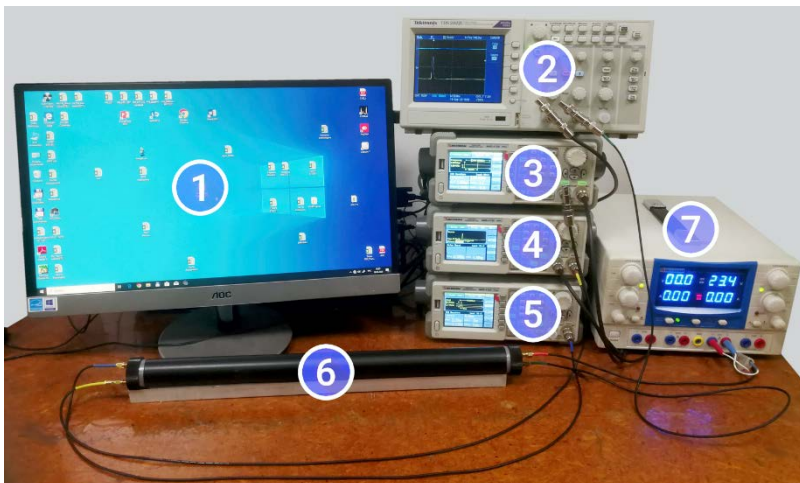
В дополнительном задании также качественно исследуется влияние времени релаксации ГЛФД-ячеек SiPM на форму получаемого от него сигнала.

#### 3.1. Описание установки

На рисунке 3.1 и представлены фотография и блок-схема установки, предназначенной для данного практикума. Исследуемый SiPM помещен в один из торцов цилиндрической светоизолирующей камеры. На SiPM подается напряжение  $V_{bias}$  от регулируемого источника, а его выход подключен к одному из каналов осциллографа (Рис. 3.2). На противоположной стороне камеры закреплены два светодиода, питание на которые подается от универсальных двухканальных генераторов импульсов АКТАКОМ AWG-4150.

Генераторы имеют OLED-дисплей, на котором могут быть отображены задаваемая пользователем форма сигнала и его численные характеристики. На рисунке 3.4 подробно рассмотрены элементы управления генератором.

Выходные каналы каждого из генераторов обозначены как CH1 и CH2. Данные каналы синхронизированы друг с другом и предоставляют одинаковые возможности при настройке частотных и фазовых характеристик сигнала, однако имеют различный передел амплитуды напряжения выходного сигнала. CH2 не дает необходимого для работы светодиодов напряжения, поэтому последние следует подключать к CH1, а CH2 использовать для запуска осциллографа. Данные с осциллографа по USB интерфейсу передаются на ПК, где могут быть сохранены для дальнейшей обработки в виде электронной таблицы.



**Рис. 3.1** Фотография лабораторной установки (*сверху*) и ее схематический вид (*снизу*)

- 1– монитор ПК;
- 2– осциллограф, подключенный к ПК;
- 3– генератор синхроимпульса;
- 4– генератор импульсов первого светодиода;
- 5– генератор импульсов второго светодиода;
- 6– светоизолированная камера с SiPM и двумя светодиодами;
- 7– источник регулируемого напряжения на SiPM



**Рис. 3.2** Элементы светоизолированной камеры с SiPM и ее схематическое изображение

- 1 - вход для подачи импульсов  $V_{\text{диод-1}}$  на диод 1 (подключается к CH1 генератора 1);
- 2 - вход для подачи импульсов  $V_{\text{диод-2}}$  на диод 2 (подключается к CH1 генератора 2);
- 3 - вход для подачи напряжения смещения  $V_{\text{bias}}$  на SiPM от источника напряжения;
- 4 - выход сигнала SiPM (подключается к одному из каналов осциллографа).



**Рис 3.3** Источник напряжения для SiPM

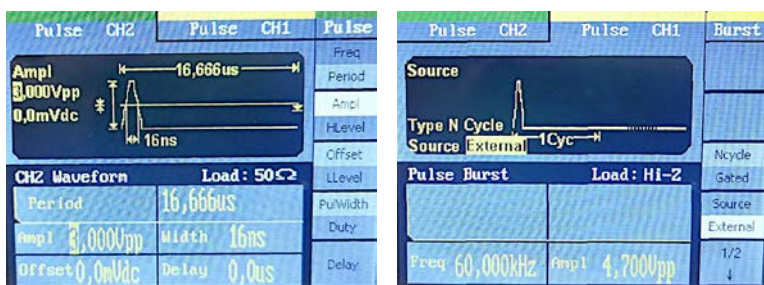
- 1 – кнопка включения/отключения всех каналов источника;
- 2 – кнопка переключения отображения напряжений на каналах;
- 3 – валкодер напряжения на канале 1;
- 4 – канал 1, подключаемый к SiPM



**Рис. 3.4** Элементы управления генератором AWG-4150

- 1 – кнопка переключения канала для отображения на дисплее;
- 2 – кнопки взаимодействия с элементами бокового меню дисплея;
- 3 – панель выбора формы сигнала;
- 4 – панель ввода числовых данных;
- 5 – панель системного меню;
- 6 – валкодер для ввода числовых данных;
- 7 – кнопки перемещения курсора при редактировании числовых данных;
- 8 – независимые кнопки включения (*светится зелёным*) / выключения (*не светится*) выходных сигналов каналов CH1 и CH2.

Поскольку в данном практикуме ведется работа с импульсами длиной порядка наносекунд и каждый из генераторов в состоянии подать необходимое напряжение только на один из диодов, необходима синхронизация генераторов как по фазе генерируемого импульса, так и по тактовой частоте. С этой целью генераторы 4 и 5 на рисунке 3.1. синхронизируются сигналом с генератора синхроимпульса 3. Для точной синхронизации генераторы импульсов светодиодов работают в режиме генерации пачек импульсов (Burst) с числом импульсов в пачке, равном 1. Для входа в меню настроек режима Burst необходимо нажать соответствующую кнопку на панели системного меню (номер 5 на рис. 3.3).



**Рис. 3.5** Меню параметров импульса (слева) и генерации пачек импульсов (справа) генераторов AWG-4150

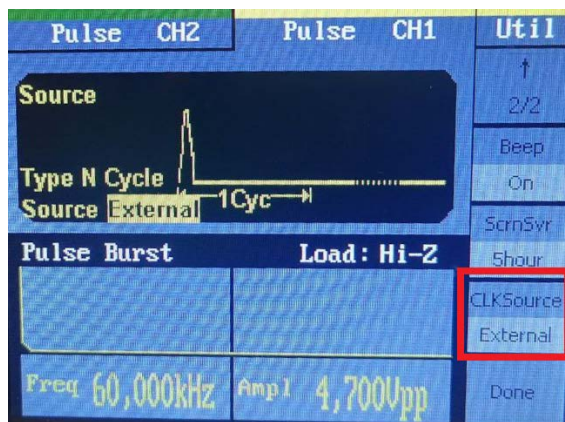
Генераторы импульсов для светодиодов должны быть настроены на форму сигнала Pulse, в то время как для синхронизирующего генератора рекомендован сигнал формы Square. Входы для синхросигнала AWG-4150 расположены на тыльной стороне прибора.

SiPM имеет матрицу размером 3×3 мм, на которую приходится 1600 ГЛФД-ячеек. Рекомендуемый диапазон напряжения, подаваемого на фотоумножитель от источника составляет 25...30 В. Рекомендуемая амплитуда напряжения импульсов, подаваемых на светодиоды – 3...10 В.

## 3.2. Задание 1. Измерение напряжения пробоя

### 3.2.1. Калибровка генератора световых импульсов

Подключите выходы CH2 каждого из генераторов импульсов (4 и 5 на рис. 3.1) к осциллографу, убедитесь, что разность фаз между импульсами постоянна. Даже при правильном соединении генераторов 4 и 5 с генератором синхросигнала 3 на осциллографе вы можете заметить незначительную нестабильность задержки между сигналами. Причиной такой нестабильности может являться несовпадение внутренних тактовых частот двух используемых для создания импульсов тока светодиодов генераторов. В этом случае необходимо зайти в их системное меню и перезапустить синхронизацию тактовой частоты каждого их генераторов по внешнему сигналу. Для этого необходимо нажать кнопку Utility на панели системного меню (номер 5 на рисунке 3.4) и перевести пункт меню CLK Source в режим Internal, а затем обратно в External (Рис. 3.6).



**Рис. 3.6** Системное меню генератора AWG-4150, через которое выполняется сброс синхронизации тактовой частоты

Подключить выход SiPM к осциллографу вместо CH2 генератора импульсов, который запаздывает, включить источник напряжения SiPM. Регулируя Delay импульсов, подаваемых на светодиоды, добиться минимального временного различия между пиками осциллограмм с SiPM, реагирующего на каждый из двух светодиодов, когда

другой светодиод выключен. После этого следует выключить оба светодиода и измерить амплитуду темнового шума на осциллограмме от SiPM.

### **3.3.2. Оценка напряжения пробоя $V_0$ SiPM**

Включить подачу импульсов от генератора AWG-4150 на один из светодиодов. Плавно изменяя подаваемое на SiPM напряжение смещения  $V_{bias}$  от источника валкодером (номер 3 на рисунке 3.3) зафиксировать усредненные амплитуды осциллограмм при различных его значениях в электронной таблице. По полученным данным построить зависимость, подобную представленной на рисунке 2.2.

Зависимость амплитуды сигналов с SiPM от подаваемого на него напряжения  $I_{ampl}(V_{bias})$  следует линейно аппроксимировать, после чего найти точку  $I_{ampl}(V_0) = 0$ , соответствующую напряжению пробоя  $V_0$ .

## **3.3. Задание 2. Измерение коэффициента усиления**

### **3.3.1. Наблюдение перехода SiPM в режим насыщения**

Включить только светодиод 1 и плавно увеличивать амплитуду подаваемых на него импульсов. Наблюдать за осциллограммой от SiPM, записывая значения ее амплитуд в электронную таблицу.

Повторить для светодиода 2, а также для обоих светодиодов с максимально близкой фазой импульсов, подключенных одновременно. Построить графики зависимости амплитуды полученных импульсов от напряжения на светодиодах при подключении светодиодов вместе и по отдельности. Чем может быть обусловлена форма данной зависимости? Достигнут ли режим насыщения для SiPM?

### **3.3.2. Измерение коэффициента усиления $K$ для образца SiPM в режиме насыщения**

Получить на осциллографе сигнал с SiPM в режиме насыщения, зарегистрировать полученные данные в компьютере.

Для этого необходимо, запустить на лабораторном ПК программу Excel и открыть «пустую книгу». Используя верхнюю закладку «Надстройки», выбрать заранее установленную «надстройку

Excel для прямой передачи данных цифровых осциллографов Tektronix в электронную таблицу». Пользуясь всплывающими подсказками, выберите кнопку «Waveform», поставьте галочку «Построить график» и зарегистрируйте на компьютере данные осциллограммы в режиме насыщения в электронную таблицу.

**Внимание!** Если все кнопки надстройки в Excel не активны, то связь с осциллографом не была установлена. Попробуйте выключить и повторно включить осциллограф при работающем компьютере и немного подождать (завершения процессов инициализации) пока кнопки в надстройке для Tektronix не станут активными. Если этого не произойдет – обратитесь к преподавателю.

Для нахождения заряда, пришедшего от SiPM, пользуясь возможностями электронных таблиц, проинтегрируйте полученную осциллограмму и воспользуйтесь формулой 2.2. Рассчитайте приближенную оценку коэффициента усиления фотоумножителя  $K$ , принимая во внимание, что используемый в работе SiPM имеет  $N=1600$  ячеек. Поместите результаты расчета в отчет.

**Замечание.** При интегрировании реакции SiPM на короткий световой импульс *рекомендуется* по-отдельности проинтегрировать осциллограмму с короткой временной разверткой, содержащую в основном фронт и максимум амплитуды импульса, и осциллограмму с временной разверткой, вмещающей экспоненциальный “хвост” затухающего импульса. Также необходимо учесть, что при данных измерениях напряжения с помощью осциллографа, на его вход установлена дополнительная нагрузка, сопротивление которой составляет 50 Ом.

### 3.4. Задание 3 (дополнительное)

#### 3.4.1. *Наблюдение влияния длительности слабого светового импульса на сигнал SiPM*

Для этого подать на светодиоды напряжение, не приводящие к насыщению SiPM в соответствии с предыдущим заданием, включить только один из светодиодов. Далее увеличивая длительность

подаваемого на светодиод импульса с шагом (50-100 нс), наблюдать за поведением осциллограммы SiPM. Обработать полученные осциллограммы. Занести результаты определения амплитуды и длительности на полувысоте импульсов реакции SiPM в электронную таблицу.

### **3.4.2. *Наблюдение отклика SiPM на задержанные друг относительно друга два короткие световых импульсы***

Установите минимально возможную для данной установки длительность электрических импульсов (16 нс) обоих генераторов (см. Рис. 3.5 *слева*), что обеспечит получение световых импульсов светодиодов порядка 20 нс. Включите оба светодиода. Используя настройку задержки генерации импульса относительно синхроимпульса Delay в меню Burst (Рис. 3.5), получите на осциллографе электрическую реакцию матрицы SiPM на две одинаковые сдвинутые по времени световые вспышки светодиодов, аналогичную представленной на Рис. 1.5.

Наблюдайте изменение амплитуды сигнала от второго светодиода, сдвинутого во времени относительно первого, при разных значениях задержки. Зарегистрируйте также наблюдаемые на осциллограммах изменения при включении/выключении опережающего по времени первого светодиода.

Включите все полученные в этом задании осциллограммы и качественное объяснение результатов наблюдений в отчет.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем отличается SiPM от стандартных лавинных фотодиодов?
2. Назовите практические применения SiPM. Каковы его преимущества по сравнению с вакуумными ФЭУ?
3. Опишите твердотельную структуру ячеек матрицы кремниевого фотоумножителя.
4. Каким образом формируется электрический сигнал с одиночной ячейки аналогового SiPM и со всей его матрицы?
5. Перечислите основные рабочие характеристики SiPM.

## Литература, использованная при подготовке пособия

1. Патент на изобретение RU 2524917-C1, Опубликовано: 10.08.2014 Бюл. No 22; Авторы: Б.А. Долгошеин и др.
2. [Collazuol G. The SiPM physics and technology-a review //LAL Orsay. – 2012.](#)
3. Saveliev V., Golovin V. Silicon avalanche photodiodes on the base of metal-resistor-semiconductor (MRS) structures //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2000. – Т. 442. – №. 1-3. – С. 223-229.
4. [Corsi F. et al. Modelling a silicon photomultiplier \(SiPM\) as a signal source for optimum front-end design //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2007. – Т. 572. – №. 1. – С. 416-418.](#)
5. Malass I. et al. Efficiency improvement of high rate integrated time correlated single photon counting systems by incorporating an embedded FIFO //2015 IEEE 13th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS). – IEEE, 2015. – С. 1-4.
6. Lecoq P., Gundacker S. SiPM applications in positron emission tomography: toward ultimate PET time-of-flight resolution //The European Physical Journal Plus. – 2021. – Т. 136. – №. 3. – С. 292.
7. Agishev R. et al. Lidar with SiPM: Some capabilities and limitations in real environment //Optics & Laser Technology. – 2013. – Т. 49. – С. 86-90.
8. Caccia M. et al. Silicon Photomultipliers and SPAD imagers in biophotonics: Advances and perspectives //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. – Т. 926. – С. 101-117
9. Bychkova O. V. et al. Study of the SiPM double component recovery time //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1390. – №. 1. – С. 012108.
10. Guoqing Z., Lina L., Hanchen L. Demonstration of the over dynamic range of MPPC by high intensity pulsed light illumination //Optik. – 2016. – Т. 127. – №. 5. – С. 2936-2938.

## Приложение 1

### *Памяти профессора МИФИ Б.А. Долгошеина*

Борис Анатольевич Долгошеин родился 26 апреля 1930 года в Казани (Татария), в 1954 году окончил Московский инженерно-физический институт, с которым не расставался до последних дней жизни. Он стал крупнейшим специалистом в области экспериментальной ядерной физики. Даже далеко не полный перечень пионерских работ, проводимых под научным руководством профессора Б.А. Долгошеина, позволяет представить широкий диапазон и актуальность проведенных исследований:



Долгошеин Борис Анатольевич

- разработка **искровых камер**;
- создание **стримерной камеры**, за которую А.И. Алиханян, Т.Л. Асатиани, Б.А. Долгошеин, Б.И. Лучков, В.Н. Ройнишвили и Г.Е. Чиковани получили Ленинскую премию;
- создание **6- и 8-метровых стримерных камер** и их применение в исследованиях на установках РИСК и "W-бозон" на пучках ускорителя У-70.

В плане сотрудничества с ведущими ускорительными центрами мира можно назвать развитие методики дрейфовых камер и тонкостенных дрейфовых трубок и создание на их основе детекторов переходного излучения и/или трекеров, примененных для исследований на установках HELIOS и ATLAS (ЦЕРН), ZEUS и HERA-B (DESY).

В последние годы он и руководимая им группа занимались разработкой кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiPM) и на их основе – адронных калориметров для Международного линейного коллайдера (ILC) совместно с CALICE Collaboration (DESY, Германия).

Обучение и воспитание студентов и аспирантов на руководимой Б.А. Долгошеиным кафедре физики элементарных частиц (сейчас кафедра 40 МИФИ) привело к созданию научной школы, выходцы из которой работают во всех крупных мировых физических центрах, являются там ведущими специалистами.

