



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Кафедра физики твердого тела и наносистем

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ОСНОВАМ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ**

Лабораторная работа ФП2

Кремниевый фотоумножитель (SiPM)

Москва 2022

Оглавление

- **Введение**
- **Принцип работы SiPM**
APD/GAPD, физика лавин
МДП-структура SiPM
Основные характеристики SiPM
- **Измерение времени релаксации**
- **Измерение V_0 и однофотонного отклика**
- **Описание установки**
- **Контрольные вопросы**
- **Словарь сокращений**
- **Дополнительная литература**

Введение

Детектирование световых импульсов с разрешением на уровне одиночных фотонов является приоритетной задачей в области разработки фотоприемников уже более полувека. Первыми подобными устройствами можно считать вакуумные ФЭУ, появившиеся еще в первой половине XX века и получившие широкое распространение в начале 50-х годов благодаря возникшей со стороны ядерной физики потребности в фотоприемниках 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 внешнему магнитному полю, привели к появлению их аналогов на основе p-n переходов: полупроводниковых лавинных фотодиодов (APD) и однофотонных или гейгеровских фотодиодов (GAPD).

Важно отметить, что все эти устройства не могут полностью решить проблему определения числа фотонов при комнатной температуре. Для обнаружения одиночных фотонов, детектор должен производить измеримый электрический сигнал выше электронного шума схемы сбора. Таким образом, помимо преобразования фотонов в электроны требуется умножение электронов с очень высоким коэффициентом усиления ($>10^5$), чтобы получить временную достоверность обнаружения около 1 нс. Для вакуумных ФЭУ и APD механизмы усиления сигнала изначально зашумлены, создавая из одного электрона на входе случайное количество электронов на выходе и затрудняя подсчет отдельных фотонов. В случае GAPD умножение сигнала можно считать условно бесшумным, однако GAPD является бинарным прибором и не дает возможности регистрировать многофотонные импульсы - сигнал с него свидетельствует о факте регистрации одного или нескольких фотонов, но не их количестве. Объединение многих GAPD 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 в ФИАНе под руководством В. Шубина 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 популярным полупроводниковым фотодетектором нового поколения является разработанный Б. А. Долгошеиным кремниевый фотоумножитель (SiPM), технология которого активно развивается последние два десятилетия в 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:

- небольшое рабочее напряжение
- слабая чувствительность к внешним ЭМ полями

- слабо варьируемый отклик, линейный по отношению к числу зарегистрированных фотонов
- высокое временное разрешение

Благодаря этим свойствам SiPM особенно эффективны для решения задач, требующих точный подсчет фотонов в сочетании с синхронизированным временем прихода ожидаемого светового сигнала. Наглядным примером подобной задачи служит коррелированный по времени подсчет одиночных фотонов (TCSPC), использующийся в оптической рефлектометрии и при измерениях времени люминесценции материалов [Malass I. et al.]. На рисунке 1 приведена схема, иллюстрирующая суть метода.

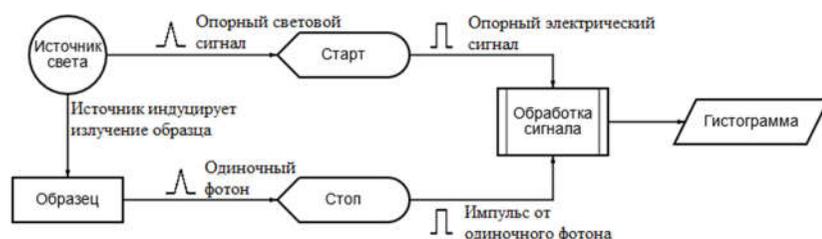


Рис 1. Принцип TCSPC

TCSPC 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.

В настоящее время кремниевые фотоумножители нашли широкое применение, во-первых, в традиционных для ФЭУ сферах - позитронно-эмиссионной томографии [Lecoq P., Gundacker S.] и калометрии, в частности, сцинтилляционных детекторах где особенно актуальна необходимость пофотонной регистрации излучения сцинтилляторов из-за низкой эффективности светосбора в сочетании с необходимостью регистрации фотонов невысоких энергий. Во-вторых, кремниевые фотоумножители активно используются в недавно появившихся и развивающихся областях - таких как ЛИДАРы [Agishev R. et al.] и

бифотоника [Caccia M. et al.], недавний прогресс в которых обусловлен в том числе и развитием технологий SiPM.

Важно отметить, что наряду со всеми перечисленными преимуществами традиционная конструкция SiPM имеет и характерные недостатки, например, необходимость балансировать между плотностью ячеек GAPD-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 SiPM могут быть сглажены, другие же являются неотъемлемыми. В связи с этим в настоящее время активно ведутся разработки, посвященные различным вариациям конструкции SiPM.

Целью данной работы является ознакомление с классическим кремниевым фотоумножителем и измерение некоторых его рабочих характеристик.

Устройство и принцип работы SiPM

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

APD/GAPD, физика лавин

Поглощение фотонов на границе p-n перехода фотодиода индуцирует появление электронно-дырочных пар. При приложении достаточного обратного напряжения смещения V_{bias} возникшие носители заряда перетекают в p и n области фотодиода, приводя к возникновению фототока i_{ph} (Рис. 2). В этом случае говорят, что фотодиод работает в линейном режиме, поскольку $i_{ph} \sim n_{ph}$ - количеству поглощенных в p-n переходе фотонов. Этот режим используется в APD (avalanche photodiode).

При превышении V_{bias} некоторого критического значения - напряжения пробоя V_0 - разлетающиеся под действием электрического поля заряды 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 - GAPD (Geiger-mode avalanche photodiode) - попадание хотя бы одного фотона приводит к возникновению относительно высокого тока, не зависящего от n_{ph} .

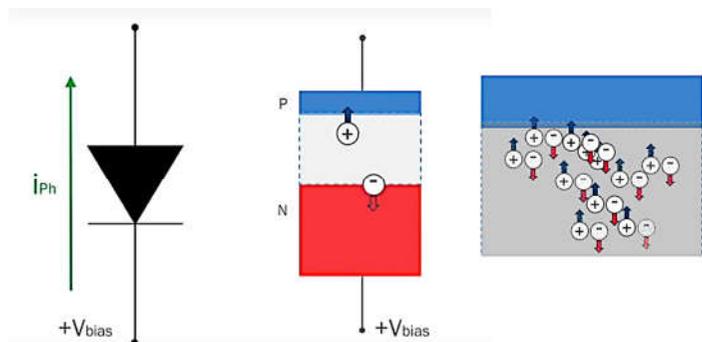


Рис. 2 Стандартный лавинный фотодиод (справа изображено образование лавины в результате ударной ионизации)

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

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

где Q - заряд накопленный на емкости ячейки матрицы C величина $V_{bias} - V_0$, т.е. превышение напряжения смещения над напряжением пробоя также называется перенапряжением q - заряд электрона.

В аналоговом¹ SiPM GAPD-ячейки подключены параллельно - импульсы тока с них суммируются (Рис. 3).

¹ В настоящее время также существуют цифровые SiPM, в которых сигнал с каждой ячейки обрабатывается отдельно [S. Gundacker, E. Auffray et al.] (в данной работе они не рассматриваются)

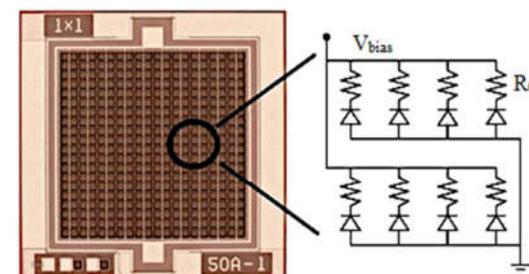


Рис. 3. Матрица SiPM и ее эквивалентная схема

МДП-структура SiPM

При возникновении лавины ток через GAPD необходимо остановить, 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}). Обычные GAPD (однофотонные фотодиоды) используют отдельную от диода электронную схему, что называется активным гашением. МДП-структура SiPM позволяет интегрировать гасящее сопротивление R_Q в каждую ячейку матрицы, которое формирует из лавины спадающий по экспоненциальному закону электрический импульс. Данный механизм называется пассивным гашением. На рисунке 4 подробнее рассмотрено строение SiPM.

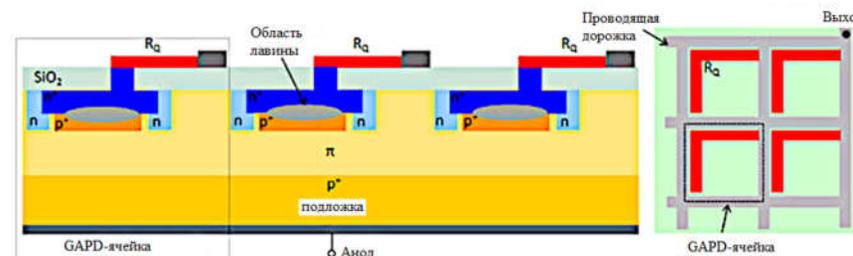


Рис. 4. МДП-структура SiPM

В стандартном SiPM для МДП-структуры роль изолятора берет на себя слой SiO_2 над p-n⁺ переходом, а роль проводника - напыленный на него резистивный слой (R_Q приходится на одну 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 область лавины. Высокое по сравнению с уровнем шума напряжение пробоя (15...30 В) также снижает флуктуации заряда. Ячейки SiPM разделены обедненными областями полупроводника.

Отклик каждой ячейки матрицы SiPM на попадание в p-n переход одного или нескольких фотонов имеет вид одиночного импульса тока. Повышение R_Q уменьшает длительность импульса, повышая временное разрешение SiPM, однако при этом возрастает время зарядки диода после лавины, спустя которое он может снова зафиксировать факт поглощения фотона на p-n переходе. Коэффициент усиления фотодиода растет по линейному закону в зависимости от приложенного напряжения смещения V_{bias} , однако, это также приводит к экспоненциальному росту шумов.

Основные характеристики SiPM

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

- напряжение пробоя V_0 , при котором фотодиоды матрицы SiPM становятся GAPD и начинают порождать лавины при поглощении фотонов
- отношение коэффициента усиления (K) к перенапряжению ($V_{bias}-V_0$), определяющее амплитуду электрических сигналов со всех GAPD
- эффективность обнаружения фотонов (PDE):

$$PDE = QE * \epsilon_G * GE$$

где QE - квантовая эффективность, определяемая длиной волны фотона и структурой поперечного сечения SiPM, практически не зависит от V_{bias} , ϵ_G - гейгеровская эффективность, характеризующая вероятность того, что попавший в GAPD фотон породил лавину, растет вплоть до 100% с увеличением напряжения, GE - геометрическая эффективность, определяемая долей чувствительной зоны SiPM по отношению к его полной площади.

- темновой шум
- вероятность самоиндуцированных сигналов - перекрестные помехи/cross-talk (индуцирование лавиной в одной ячейке лавин в

соседних) и афтерпалсинг/afterpulsing (повторное появление лавины в одной и той же ячейке после ее срабатывания).

Пик спектральной чувствительности SiPM, как правило, приходится на область 400-500 нм, активная область матрицы имеет размер от 1 до 6 мм². На выходе SiPM сумма сигналов от всех ячеек его матрицы имеет вид набора острых пиков, высота которых в первом приближении пропорциональна количеству сработавших единичных фотодиодов. Таким образом, предельный детектируемый SiPM поток фотонов соответствует срабатыванию всех фотодиодов матрицы за короткий промежуток времени и определяется плотностью GAPD-ячеек и временем их релаксации. В общем же случае для импульсных источников света достаточной интенсивности число сработавших ячеек фотоумножителя имеет может быть вычислено согласно следующей формуле:

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

где N_{total} - число ячеек матрицы фотоумножителя

N_{photon} - число фотонов светового импульса, попавших на фотоумножитель

P_w - длительность регистрируемого светового импульса

t_d - время релаксации GAPD

Двухимпульсный метод измерения релаксации (убрать?)

Одним из стандартных подходов к оценке времени релаксации SiPM является двухимпульсный метод измерения релаксации [Bychkova O. V. et al.]. На фотоумножитель подаются два ультракоротких световых импульса, задержка между приходом которых составляет порядка 10^1 - 10^2 нс, например, за счет разделения исходного одиночного импульса и прохождения его части по задерживающему оптоволокну. В результате импульс тока на выходе SiPM имеет вид, показанный на рис. 4.

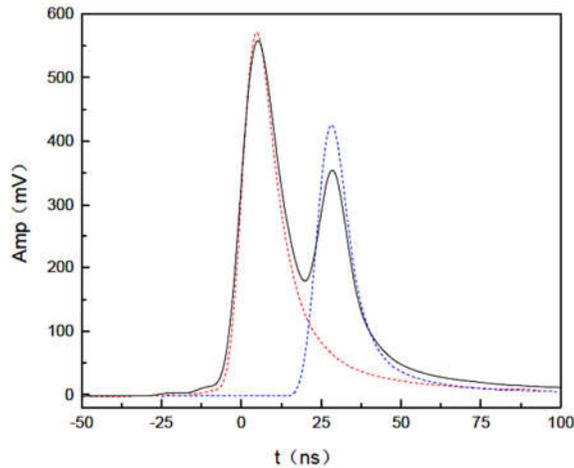


Рис. 4. Импульс тока от SiPM при попадании на него двух коротких световых сигналов с малой временной задержкой (пунктиром показаны амплитуды таких же сигналов, пришедших поотдельности)

Данный импульс можно аппроксимировать функцией:

$$A(t) = A_0 \left(1 - \left(1 - \frac{n}{N} \right) e^{-\frac{t-t_0}{t_1}} - \frac{n}{N} e^{-\frac{t-t_0}{t_2}} \right) + b$$

где A_0 - постоянная масштабирования

n - число сработавших GAPD

N - общее число GAPD

t_1 и t_2 - короткое и длинное времена релаксации SiPM

соответственно

t_0 - время прихода импульса

b - фоновый шум (ток при $t \leq t_0$)

Как можно видеть, при малом числе сработавших ячеек матрицы фотоумножителя ($n/N \rightarrow 0$) время его релаксации определяет параметр t_1 , пропорциональный времени релаксации отдельного фотодиода. Если же SiPM близок к состоянию насыщения ($n/N \sim 1$), основной вклад в его время релаксации вносит параметр t_2 , определяющийся особенностями уже всей матрицы SiPM как единого целого, при этом, как правило, $t_1 < t_2$.

Измерение V_0 и однофотонного 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). Поскольку сигналы из всех ячеек SiPM складываются линейно, спектр полученных зарядов, определяемых как интеграл амплитуды тока за время импульса, будет иметь вид, представленный на рисунке 5.

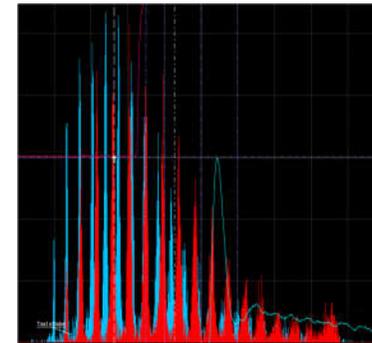


Рис. 5. Зарядовый (голубой) и амплитудный (красный) спектры отклика SiPM на лазерные импульсы длиной 20 нс

Каждый последующий пик соответствует срабатыванию еще одной ячейки SiPM (1-й пик обусловлен темновым шумом, 2-й пик соответствует срабатыванию 1 ячейки SiPM, 3-й - уже 2 ячеек и т.д.). Следовательно, расстояние между пиками соответствует заряду, генерируемому при поглощении ячейкой SiPM фотона т.е. численно равен коэффициенту усиления, деленному на заряд электрона K/q .

Ширина пиков определяется как шумами внутри SiPM так и различным временем срабатывания ячеек во время регистрации непродолжительного импульса. Погрешность расстояния между пиками ΔA можно вычислять как статистическую погрешность косвенного измерения $\Delta A_{\text{стат}}$, при этом также учитывается систематическая погрешность $A_{\text{сист}}$ неодинакового расстояния между пиками, равная максимальному отклонению расстояния от среднего:

$$\Delta A^2 = \Delta A_{\text{стат}}^2 + \Delta A_{\text{сист}}^2$$

Поскольку в первом приближении коэффициент усиления, а, следовательно, и однофотонный отклик SiPM линейно зависят от перенапряжения ($V_{bias}-V_0$), для вычисления V_0 достаточно экспериментально найти и построить зависимость Q или K от подаваемого на SiPM напряжения V , которое аппроксимируется обычной прямой. Искомое V_0 соответствует точке, в которой $K(V)=0$ или $A(V)=0$.

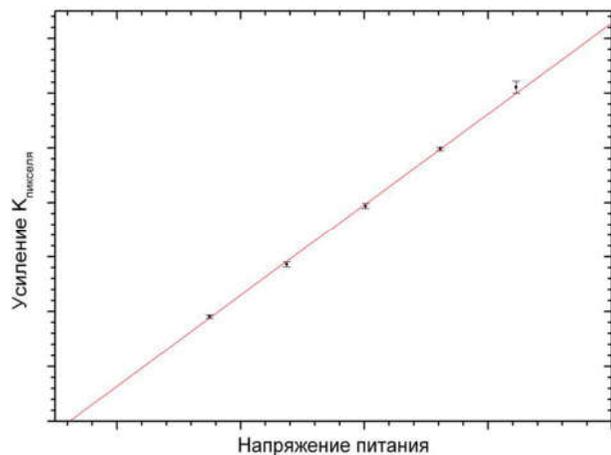


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления SiPM от подаваемого на него напряжения

Описание установки

На рисунке 7 представлена блок-схема используемой в данном практикуме установки. Исследуемый SiPM помещен в один из торцов цилиндрической светоизолирующей камеры. На SiPM подается напряжение от регулируемого источника, а его выход подключен к одному из каналов осциллографа. На противоположной стороне камеры закреплены 2 светодиода, питание на которые подается от двухканальных генераторов импульсов, которые синхронизируются посредством третьего генератора. Один из каналов генератора импульсов диода 1 также подключен к осциллографу. Данные с осциллографа можно сохранять и обрабатывать посредством ПК.

SiPM имеет размер матрицы размером 3x3 мм, на которую приходится 1600 GAPD-ячеек. Напряжение, подаваемое источником на фотоумножитель должно находиться в диапазоне 25-30 В. Рекомендуемая

амплитуда напряжения импульсов, подаваемых на диоды - 3..10 В. Канал 2 (CH2) каждого из генераторов импульсов не дает необходимого напряжения, поэтому диоды следует подключать к каналу 1 (CH1).

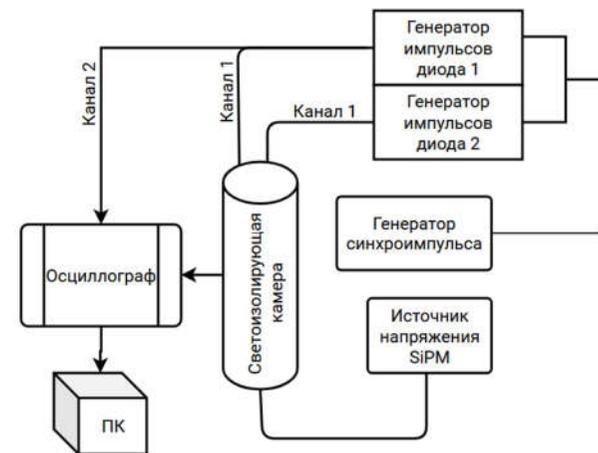


Рис. 7. Блок-схема установки

Порядок выполнения работы

1. Откалибровать экспериментальную установку
 - подключить CH2 каждого из генераторов импульсов диодов к осциллографу, убедиться, что разность фаз между импульсами постоянна
 - подключить выход SiPM к осциллографу вместо CH2 генератора импульсов, который запаздывает
 - регулируя задержку между импульсами (Delay в меню режима генерации последовательности импульсов (Burst), подаваемых на диоды, добиться минимального временного различия между пиками осциллограмм с SiPM, реагирующего на каждый из двух диодов, когда другой выключен
 - выключить оба диода и измерить темновой шум на осциллограмме SiPM

2. Построить зависимость амплитуды сигналов с SiPM от подаваемого на него напряжения $I_{\text{ampl}}(V_{\text{SiPM}})$ для оценки напряжения пробоя V_0 фотоумножителя
 - включить подачу импульсов на любой из диодов
 - плавно изменяя подаваемое на SiPM напряжение в пределах от 22 до 27 вольт, зафиксировать усредненные амплитуды осциллограмм при различных его значениях в excel-файле
 - линейно аппроксимировать полученную зависимость, найти точку $I_{\text{ampl}}(V_{\text{SiPM}}) = 0$, соответствующую напряжению пробоя
3. Наблюдать переход SiPM в режим насыщения, оценить коэффициент усиления K
 - включить только диод 1 и плавно увеличивать амплитуду подаваемых на него импульсов. Наблюдать за осциллограммой от SiPM.
 - повторить для диода 2, а также для обоих диодов, подключенных одновременно.
 - измерить амплитуду сигнала с SiPM в режиме насыщения
 - дать приближенную оценку коэффициента усиления фотоумножителя K , при условии, что используемый в работе SiPM имеет 1600 ячеек. Для этого необходимо занести данные с осциллограммы в режиме насыщения в excel и проинтегрировать ее.
4. Наблюдать влияние формы световых импульсов на сигнал с SiPM
 - подать на диоды невысокое напряжение, не приводящие к насыщению SiPM, выключить один из диодов
 - увеличивать длительность подаваемого диод импульса с шагом (50-100 нс), наблюдать за поведением осциллограммы SiPM
 - установить длительность импульсов по умолчанию (16 нс), включить второй диод, при помощи Delay сдвинуть по времени сигнал от второго диода
 - наблюдать изменение амплитуды сигнала от сдвинутого во времени диода при разных значениях Delay и включении/выключении первого диода
 - объяснить результаты наблюдений

Контрольные вопросы

1. Чем отличается SiPM от классических 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

1. [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.](#)
2. [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.](#)
3. [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.](#)
4. [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.](#)
5. [Agishev R. et al. Lidar with SiPM: Some capabilities and limitations in real environment //Optics & Laser Technology. – 2013. – Т. 49. – С. 86-90.](#)
6. [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](#)
7. [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.](#)
8. [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.](#)