



МОДУЛИ СЧЕТА ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ

М. Ходжес, С. Граберг,
Laser Components GmbH, info@lasercomponents.com

25 лет назад мало кто из нас мог бы предсказать ту важную роль, которую будет играть в XXI веке счет одиночных фотонов. Этот метод незаменим, когда требуется зарегистрировать настолько слабые световые сигналы, что традиционные фотодетекторы не в состоянии отличить полезный сигнал от шума.

Метод счета фотонов применяется в различных научных и промышленных областях: в телекоммуникации, в решении конкретных задач квантовой криптографии, спектроскопии, лидарных исследованиях космоса, флуоресцентной микроскопии, в определении размеров частиц, разработке лекарственных препаратов, анализе ДНК, регистрации молекул и многих-многих других. Глядя на уровни сигналов, которые должны быть зарегистрированы в таких задачах, становится очевидным, почему этот метод называют счетом одиночных фотонов. Число фотонов в секунду, соответствующее конкретному значению оптической мощности, может быть определено как

$$N(\lambda) = 5,03 \cdot 10^{15} \cdot \lambda \cdot P,$$

где P – оптическая мощность, выраженная в ваттах, и λ – длина волны в нанометрах. Так, например, видно, что 1 фВт при длине волны 405 нм соответствует примерно 2000 фотонов/с, тогда как скорость счета 100 фотонов/с при длине волны 670 нм соответствует уровню оптической мощности всего 30 аВт (рис.1). Несмотря на то, что в случае конкретных условий требования могут значительно отличаться друг от друга, все они обладают одной общей чертой – необходимостью высокоэффективного счета одиночных фотонов с низким уровнем шума. Рассмотрим несколько технологических решений, выполненных на основе различных фотоприемников, пригодных для счета фотонов.

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ

Традиционный фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) представляет собой особую форму вакуумной трубки, преобразующую поступающие фотоны в электрический сигнал, который усиливается

с помощью так называемого внутреннего электронного умножителя. Фотон попадает на фотокатод ФЭУ, вызывая появление электрона, который затем фокусируется в электронном умножителе. Электронный умножитель, состоящий из ряда вторичных электродов (системы динодов), каждый из которых излучает дополнительные электроны при поглощении входящих электронов, в свою очередь сам создает эффект лавинного умножения. На динодах поддерживается определенный электрический потенциал, который увеличивается последовательно от одного динода к другому для ускорения электронов, пролетающих через фотоэлектронный умножитель в направлении анода. В аноде они поглощаются, генерируя выходной сигнал в виде электрического импульса. Такой процесс требует подачи на фотоэлектронный умножитель высокого напряжения, обычно 1-3 кВ. На рис.2 показано схематическое изображение традиционного фотоэлектронного умножителя.

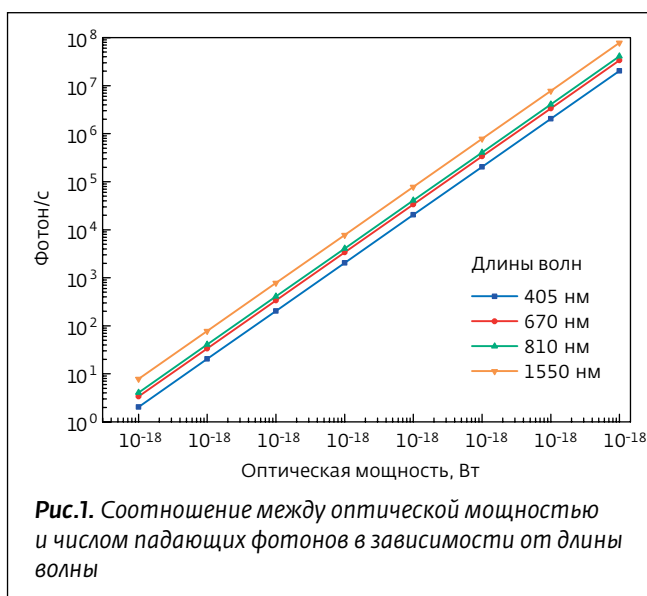


Рис.1. Соотношение между оптической мощностью и числом падающих фотонов в зависимости от длины волны

Фотоэлектронный умножитель для обнаружения одиночных фотонов также может работать в режиме счетчика Гейгера. Однако очень высокий внутренний ток фотоэлектронного умножителя требует электрического сброса после регистрации каждого фотона, что приводит к "мертвому" времени, в течение которого фотоны не могут наблюдаться. Для изготовления фотокатодов с различными спектральными характеристиками разработаны и существуют несколько видов материалов, которые могут быть использованы в зависимости от диапазона длин волн для регистрации фотонов. Несмотря на такое разнообразие, чувствительность традиционных вакуумных ФЭУ обычно лучше в более коротковолновой области спектра – длины волн синего и УФ-диапазона. Также следует иметь в виду, что ФЭУ, как правило, имеют относительно большие активные области (несколько миллиметров в диаметре). Но это часто приводит к высокому уровню темнового шума и склонности к появлению послеимпульсов, эффект которых заключается в появлении ложных импульсов на выходе ФЭУ, несмотря на то, что ни один фотон не обнаружен.

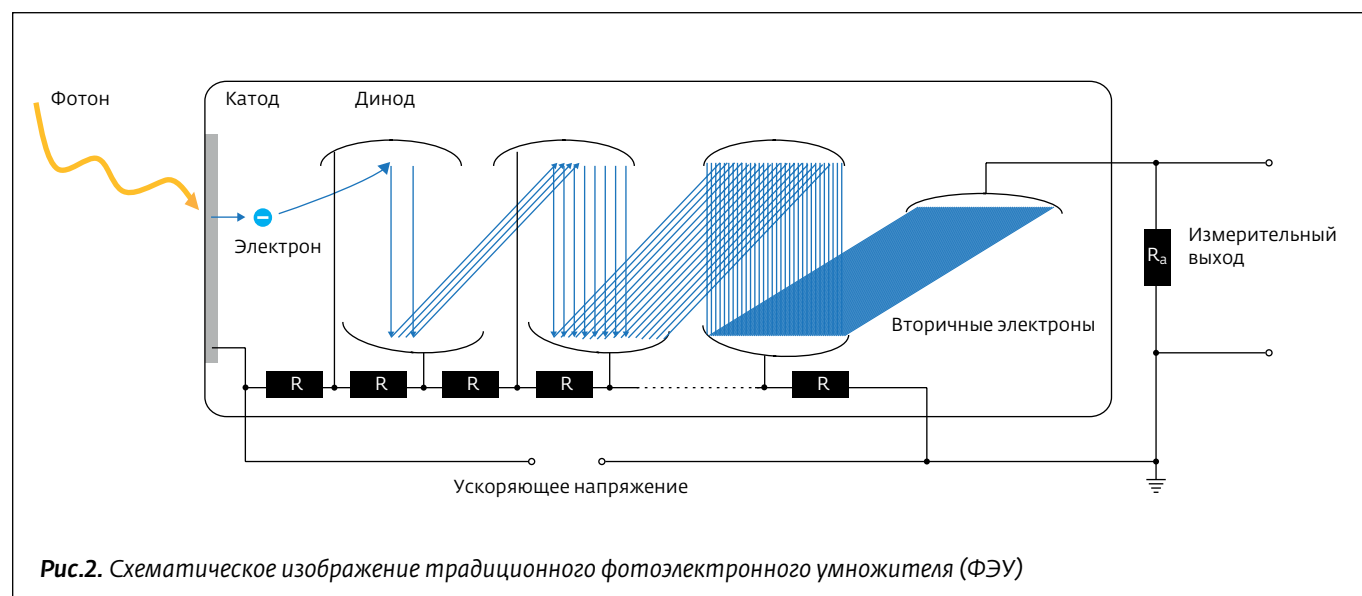
КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОУМНОЖИТЕЛИ

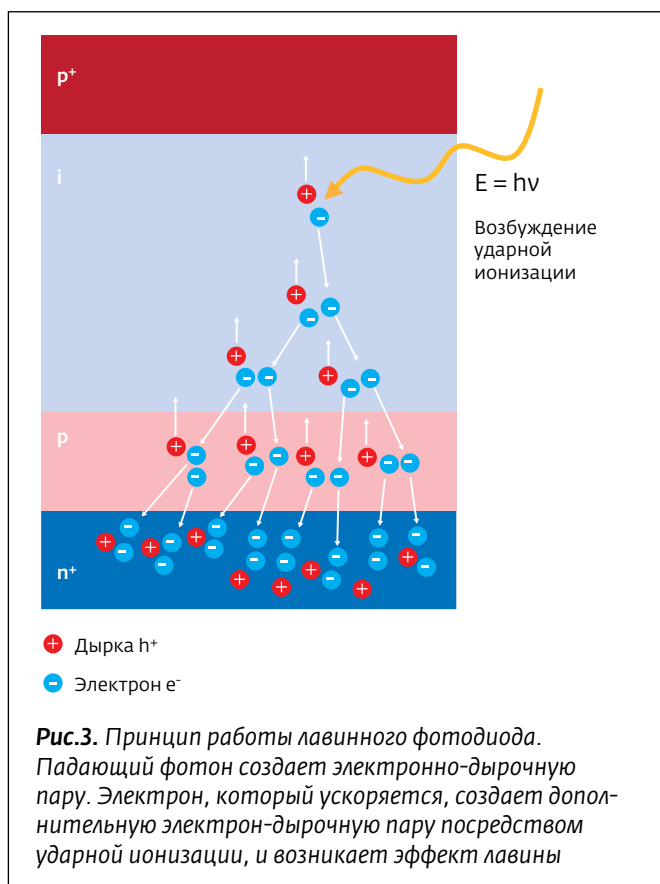
Совсем недавно на рынке появились новые разработки – кремниевые фотоумножители. Это многопиксельные кремниевые лавинные фотодиоды, работающие в гейгеровском режиме. Они изготавливаются по КМОП-технологии, обладающей значительными преимуществами перед другими: относительно низкой себестоимостью

фотоприемников, низким рабочим напряжением, компактными размерами с большой общей активной областью и хорошим временным разрешением. КМОП-технология представляется весьма перспективной, однако на сегодняшний день она не лишена некоторых недостатков: темновой шум в кремниевых фотоумножителях на несколько порядков выше, чем в обычном SPAD-диоде (лавинный фотодиод для регистрации одиночных фотонов), а квантовая эффективность на более длинных волнах – низкая. Поэтому эти устройства значительно уступают одноэлементным SPAD-диодам в применениях, связанных со счетом одиночных фотонов.

ЛАВИННЫЕ ФОТОДИОДЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ (SPAD-ДИОДЫ)

Лавинные фотодиоды (APD) представляют собой фотодиоды с высокой чувствительностью и с очень быстрым временем отклика. В отличие от обычных PIN-диодов, лавинные фотодиоды используют внутреннее усиление для создания лавины электронно-дырочных пар под действием ударной ионизации. Высокое напряжение смещения расширяет область поглощения лавинного фотодиода, что обеспечивает появление достаточного количества электронов/дырок при ионизации (рис.3). При работе ниже напряжения пробоя лавина очень скоро гасит себя из-за фрикционных потерь внутри полупроводника. Специально сконструированный лавинный фотодиод также может быть использован в режиме Гейгера, где напряжение смещения устанавливается выше





Результатом такого процесса является относительно малое "мертвое" время (как правило, около 50 нс), после чего напряжение смещения возвращается на прежний уровень. Это позволяет зарегистрировать следующий фотон. Таким образом, можно легко достигнуть максимальной скорости счета фотонов – 10 МГц и выше. В настоящее время лучшие модули счета фотонов на основе SPAD-диодов позволяют получить скорости темнового счета менее 10 импульсов/с, что соответствует динамическому диапазону свыше 10^6 . Коммерчески доступные модули SPAD имеют термоэлектрическое охлаждение, оптимизированную схему активного гашения и компактный корпус, что позволяет пользователю достигать максимальной производительности фотоприемника. На рис.4 показана блок-схема модуля счета фотонов марки COUNT® фирмы Laser Components (Германия) с разъемом для крепления оптического волокна.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ФОТОНОВ – ПУТЬ К ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

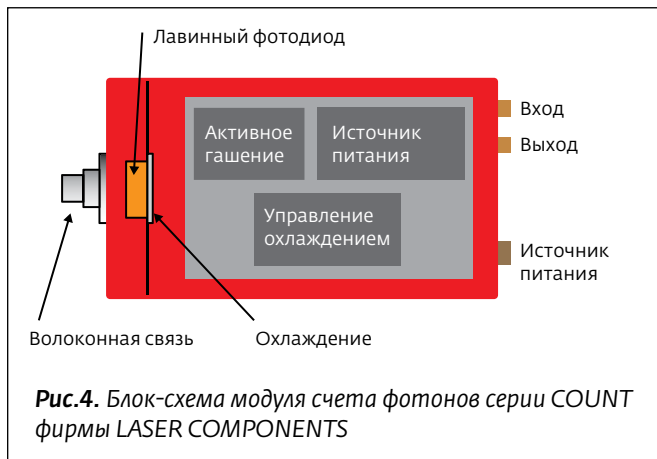
Для наглядности рассмотрим некоторые параметры, чтобы сравнить пригодность различных детекторов для работы в режиме счета фотонов. Такие параметры, как темновой шум, вероятность послеимпульсов и мертвое время очень важны, но для большинства применений эффективность регистрации фотонов имеет первостепенное значение. По этой причине SPAD-диоды часто считаются предпочтительнее традиционных ФЭУ из-за их очень высокой квантовой эффективности в широком спектральном диапазоне от 300 нм до ближней инфракрасной области спектра. Как правило, чувствительность модуля счета фотонов представляется как квантовая эффективность – отношение возникших электронов к числу поглощенных фотонов, выраженное в процентах. Производители некоторых фотоприемников предпочитают указать чувствительность (в А/Вт), которая связана с квантовой эффективностью соотношением:

$$QE = (R_0 \cdot 1240) / \lambda \cdot 100\%,$$

где R_0 – чувствительность (А/Вт); λ – длина волны (нм). При сравнении фотоприемников с аналогичным уровнем шума и вероятностью послеимпульсов, детектор с самой высокой квантовой эффективностью, как правило, будет лучше всего подходить для счета фотонов. Следует

напряжение пробоя, что позволяет поддерживать лавину и достигать внутреннего усиления до 10^8 . Такие лавинные фотодиоды, как правило, называют лавинными фотодиодами для регистрации одиночных фотонов (SPAD-диоды).

Но Гейгеровский режим работы при таком высоком коэффициенте усиления неизбежно приводит к очень высокому значению тока, протекающего в SPAD-диоде. Оно должно постоянно находиться под контролем, чтобы успеть с помощью соответствующей схемы гашения предотвратить повреждение фотоприемника. В своей простейшей форме, схема гашения может быть реализована на токоограничивающем резисторе, расположенном последовательно с лавинным фотодиодом, который будет гасить лавину, если значение резистора достаточно велико. Однако такие схемы обычно имеют долгое время восстановления, а оно ограничивает максимальную скорость счета. По этой причине большинство коммерчески доступных модулей счета фотонов на основе SPAD-диодов имеют активную схему гашения. Она регистрирует возникновение лавины, а затем снижает в течение нескольких наносекунд напряжение смещения на лавинном фотодиоде ниже напряжения пробоя.



отметить, что квантовая эффективность является выражением эффективности только самого лавинного фотодиода, тогда как на квантовую эффективность самого модуля счета фотонов на основе SPAD-диода влияет ряд других факторов, например, электроника может также незначительно влиять на общую производительность. По этой причине документация на модули SPAD часто ссылается на эффективность регистрации фотонов (PDE) или вероятность, которая представляет собой процентную вероятность падающего фотона, генерирующего электрический импульс на выходе модуля счета фотонов.

При проектировании модуля SPAD важно иметь в виду, что и эффективность регистрации фотона и темновая скорость счета зависят от напряжения смещения лавинного фотодиода. Как уже бсуждалось выше, лавинный фотодиод работает в режиме Гейгера при напряжении смещения, превышающем напряжение пробоя. Разница между этими значениями напряжений известна как перенапряжение. Величина перенапряжения может быть изменена для оптимизации в каждом конкретном случае (см. таблицу). Тем не менее, такая оптимизация может быть успешной только в случае, если базовая конструкция лавинного фотодиода сделана достаточно качественно, чтобы достичь максимальной квантовой эффективности при сохранении минимального К-фактора полупроводника (отношение ионизационных свойств дырок к электронам) для снижения уровня шума. Компания Laser Components специально разработала лавинный фотодиод, предназначенный для счета фотонов, на основе которого можно изготавливать модули SPAD с недостижимыми ранее параметрами производительности, такими как скорость темнового счета менее

10 импульсов/с с эффективностью регистрации фотонов более 80% при длине волны 670 нм.

Традиционно выбор фотоприемника для счета фотонов делался в пользу SPAD-диодов при регистрации фотонов красной и ближней ИК-области спектра. Традиционные ФЭУ использовали при регистрации фотонов синей области и ближней к УФ-области спектра из-за их превосходной квантовой эффективности на более коротких волнах. Однако последние разработки SPAD-диодов показывают, что сегодня модули счета фотонов на основе этих фотоприемников могут быть эффективно использованы в области спектра от УФ до ближнего ИК. Одним из таких примеров является модуль счета фотонов серии COUNT BLUE производства компании Laser Components, разработанный в начале 2011 года на основе улучшенной версии УФ-лавинного фотодиода для счета одиночных фотонов. Модуль счета фотонов COUNT BLUE демонстрирует типовую эффективность регистрации фотонов 55% при 405 нм и 70% при 532 нм. Существуют также улучшенные модули SPAD для ближнего ИК-диапазона длин волн, например модуль серии COUNT NIR от компании Laser Components, который был специально разработан для применения в квантовой оптике и квантовой криптографии. Этот модуль обладает эффективностью регистрации фотонов около 60% при 810 нм (рис.5). Дополнительными преимуществами модулей счета фотонов на основе SPAD-диодов являются простота работы с низким напряжением питания (обычно +5 или +12 В), а также дополнительный разъем для крепления оптического волокна, которое по запросу может быть оптимизировано для конкретного диапазона длин волн.



Эффективность регистрации фотонов и скорость темного счета относительно рабочего напряжения для модулей счета фотонов серии Count фирмы Laser Components

| Рабочее напряжение, В | Перенапряжение, В | PDE при 405 нм, % | PDE при 670 нм, % | PDE при 810 нм, % | Скорость темного счета, импульсы/с | Вероятность послеимпульсов, % | Мертвое время, нс |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| 346,3 | 2,0 | 30 | 55 | 32 | 15,4 | 0,04 | 61 |
| 348,4 | 4,1 | 36 | 69 | 43 | 31,4 | 0,11 | 55 |
| 350,6 | 6,3 | 40 | 79 | 51 | 57,4 | 0,24 | 51 |
| 352,3 | 8,0 | 43 | 85 | 55 | 91,4 | 0,42 | 50 |
| 355,0 | 10,7 | 45 | 90 | 60 | 138,2 | 0,89 | 49 |

Несмотря на то, что большинство усилий было сконцентрировано на разработку SPAD-диодов на основе кремния, возрастающий интерес к счету одиночных фотонов при больших длинах волн привел к появлению лавинных фотодиодов на основе InGaAs, работающих в гейгеровском режиме. Эти InGaAs- лавинные фотодиоды могут работать с эффективностью регистрации фотонов до 20% или более, хотя и со значительно более высокой скоростью темного счета, чем аналогичные фотоприемники на основе кремния. Их разработка началась в основном благодаря достижениям в области квантовых методов криптографии, где необходима передача данных на большие расстояния по оптическому волокну. В этом применении высокая эффективность регистрации фотонов кремниевых фотоприемников компенсируется большими потерями при передаче данных по волокну при

более коротких волнах, в то время как превосходная передача данных по волокну на длине волны 1550 нм компенсирует более низкую квантовую эффективность детектора на основе InGaAs.

Для таких применений в компании Laser Components был специально разработан новый модуль счета фотонов на основе InGaAs- SPAD-диода (рис.5). Он обладает регулируемой эффективностью регистрации фотонов (до 20%, уже с поправкой на темновую скорость счета и вероятность послеимпульсов) и перестраиваемым мертвым временем, что позволяет заказчику настроить фотодетектор для решения любой задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Растет число задач, сопровождающихся возникновением одиночных фотонов, чья длина волны лежит в спектральном диапазоне от УФ до ближней ИК-области. Их решение накладывает повышенные требования к фотоприемникам, которые должны обнаружить эти одиночные фотоны. Тенденции будущих технологий создания устройств регистрации одиночных фотонов – сочетание в себе преимуществ недорогой КМОП-технологии с эффективными и маломощными SPAD-детекторами.

ЛИТЕРАТУРА

- **Stipcevic M., Skenderovic H., Gracin D.** Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range. – Optics Express, 2010, v. 18, p.17448–17459.
- **Webb, P.P. et al.** Properties of Avalanche Photodiodes. – RCA Review, June 1974, v. 35, p. 234–278.



Рис.6. Модуль счета фотонов серии COUNT с выходом под оптическое волокно

