

СВЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ШУМ

РУКОВОДСТВО ПО ВЫБОРУ ФОТОДЕТЕКТОРОВ

Фотоника используется для диагностики заболеваний, охраны собственности, воспроизведения музыки, в системах связи и для других приложений. В каждой области ее применения требуется фотодетектор, преобразующий оптический сигнал в электрический. Требования к детектору зависят от области его применения. Автор статьи в общедоступной форме дает советы по выбору детектора.

ТРИ ТИПА ДЕТЕКТОРОВ

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), фотодиод (ФД) и лавинный ФД (ЛФД) являются тремя наиболее часто применяемыми типами детекторов. Ясно, что тип детектора зависит от конкретной области применения. Более того, в одной и той же области применения можно использовать различные типы детекторов в зависимости от конкретной задачи. Поэтому утверждать, что какой-то один из детекторов всегда лучше, было бы неверно.

ФЭУ (рис.1) – это вакуумный прибор, использующий фотоэлектрический эффект для преобразования оптических фотонов в электроны. Эти фотоэлектроны затем усиливаются каскадом динодов. Диноды могут обеспечить усиление сигнала, практически без помех, более чем в 10^6 раз в полосе шириной более 1 ГГц.

Благодаря такому усилению ФЭУ могут работать при уровнях излучения всего в несколько фотонов в секунду или, наоборот, при очень интенсивном излучении в миллиард фотонов в секунду. ФЭУ особенно полезен для измерений, которые нужно сделать быстро или на высокой частоте, применительно к слабым сигналам, то есть там, где нельзя использовать внешние усилители или где требуемый динамический диапазон слишком широк ($\sim 10^5$).

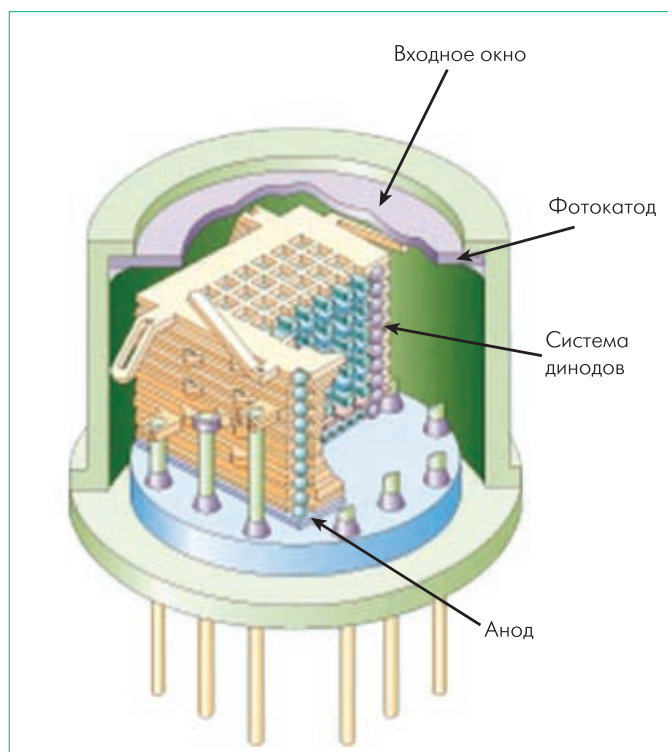


Рис. 1 ФЭУ каскадно создает поток фотоэлектронов из нескольких фотонов, эффективно усиливая слабый свет с очень низким уровнем шума

Фотокатод определяет спектральный диапазон ФЭУ. В серийном производстве выпускаются фотокатоды обеспечивающие спектральный диапазон от 100 до 1700 нм. Квантовая эффективность фотокатода обычно составляет 10–20%, хотя для новых полупроводниковых (п/п) фотокатодов она может быть выше 40%. Рабочая поверхность фотокатода может быть более 5000 см². В условиях рассеянного света это играет очень важную роль.

ФД (рис.2) представляет собой п/п устройство. Когда свет с энергией, превышающей запрещенную зону материала полупроводника, падает на ФД, он возбуждает электроны в зоне проводимости. В результате в валентной зоне образуется дырка. Электрическое поле в запирающем слое направляет электроны к слою с электронной проводимостью (п-слою), а дырки – к слою с дырочной проводимостью (р-слою). При этом в цепи внешней нагрузки возникает ток, то есть электроны возвращаются в р-слой, где они объединяются с дырками.

ФД не обладает внутренним усилением, и его сигнал в обычных условиях настолько слаб, что требует присутствия внешнего усилителя. Поскольку усилитель является источником шума, ФД используются для измерений при относительно высоких уровнях освещенности – когда шум, вызванный фотонами, сильнее шума внешнего усилителя. ФД достигают самого высокого отношения "сигнал-шум" (С/Ш) при работе с высокими уровнями освещенности, поскольку это отношение ограничивается только шумом исходящих фотоэлектронов. Для снижения шума усилителя ФД используются на частотах, значительно меньших, чем ФЭУ.

Преимущество ФД в том, что они могут работать с такими уровнями освещенности, которые во много раз превышают рабочие уровни освещенности ФЭУ. Кроме того, они много прочнее и значительно дешевле. Спектральный диапазон ФД лежит в диапазоне 180–2600 нм в зависимости от материала полупроводника.

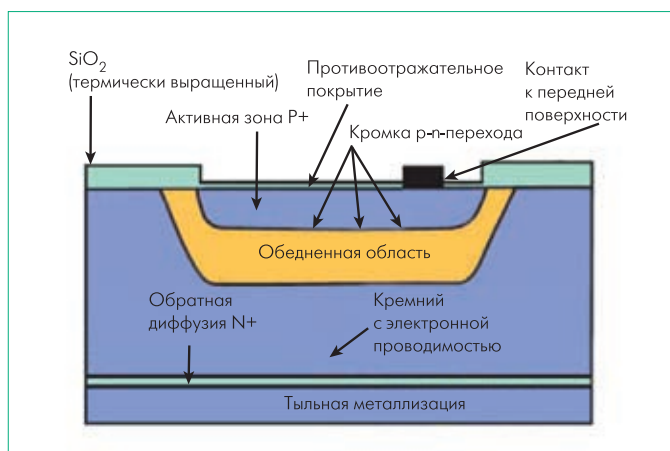


Рис. 2 ФД превращает фотоны в электроны, но требует наличия внешнего усилителя, что снижает отношение С/Ш детекторной системы

ЛФД (рис.3) обладает свойствами как ФД, так и ФЭУ. Это твердотельное устройство, генерирующее электронно-дырочные пары при падении на него света. К р-п-переходу прикладывается обратное напряжение 100–1000 В, благодаря чему возникает внутреннее электрическое поле, достаточное, чтобы ускорить электроны. При столкновении электронов с кристаллической решеткой генерируются электронно-дырочные пары. Этот процесс последовательно нарастает, усиливая начальный сигнал в 50 и более раз.

Случайные флуктуации при столкновениях и образование электронно-дырочных пар создают больший шум, чем дырки в ФЭУ, но меньший, чем внешний усилитель ФД. Таким образом, лавинные ФД часто применяются тогда, когда уровень излучения света слишком высок для ФЭУ, но ниже требуемого для ФД.

В некоторых случаях лавинные ФД неприменимы. Например, если жизненный цикл источника фотонов слишком короток, и измерение нужно проводить очень быстро, поскольку до детектора доходят лишь несколько фотонов или они рассеяны на большой площади. В таких случаях обычно используются ФЭУ.

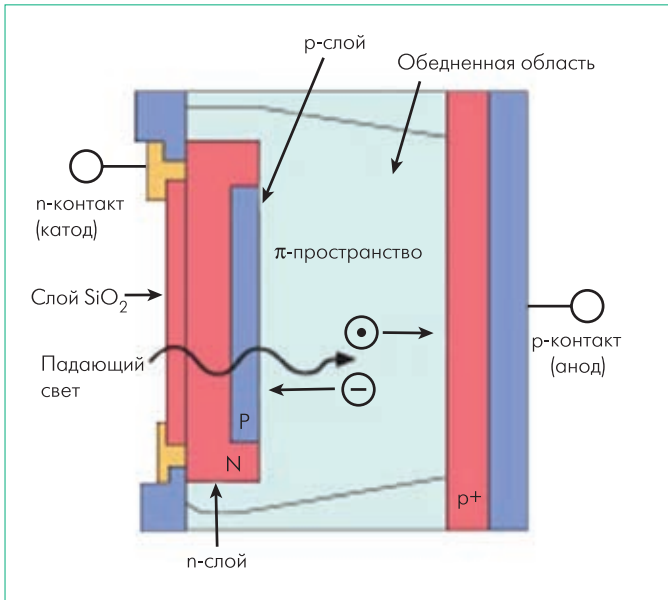


Рис. 3 Лавинный ФД обладает внутренним усилением и, следовательно, меньшим уровнем шума, чем ФД, но не настолько высоким усилением и быстродействием, как ФЭУ

СРАВНЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ

Для выбора детектора пользователь должен проанализировать требования к полосе пропускания, чувствительности, отношению "сигнал-шум" и стоимости. Лучший способ сделать правильный выбор – совместить анализ и практические испытания. Помочь составить мнение о том, как начать процесс принятия решения, смогут примеры решений в похожих случаях применения, где используются разные типы детекторов.

В банкоматах ФД применяют для решения нескольких задач. Например, задачи выдачи нужного количества денежных купюр. На пути подачи купюр друг против друга устанавливаются светодиод (СД) и ФД. Детектор измеряет, сколько света проходит через купюру. Если света слишком мало, тогда, вероятно, произошло слипание двух купюр, и они отправляются машиной в отдельную стопку.

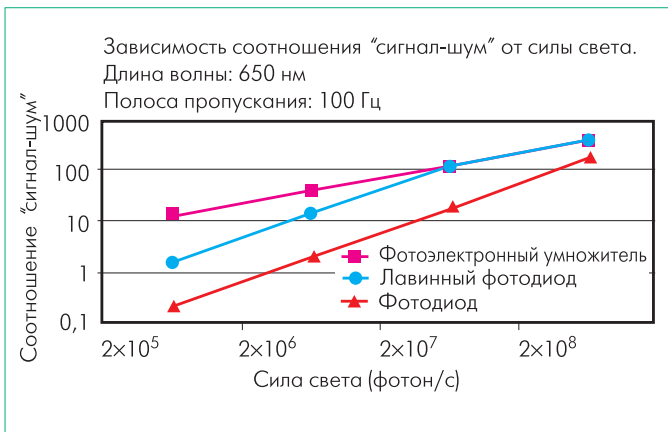


Рис. 4 Лавинные ФД заполняют нишу между ФД и ФЭУ в плане отношения С/Ш и возможности работы при высокой или низкой степени освещенности; с изменением длины волны или полосы пропускания эти кривые будут также меняться

ФД применяются также при хранении данных на таких носителях, как CD-ROM, цифровые видеодиски и в оптических накопителях. Шестиэлементная матрица ФД регистрирует сигнал, поддерживает фокусировку считывающего луча лазера и удерживает считывающую головку на дорожке.

Четыре внутренних элемента измеряют форму считывающего луча, отражающегося на детектор. Если она круглая, то расстояние между считывающей головкой и диском оптимальное; если форма круга нарушается, то детектор передает сигнал на механическую систему о корректировке расстояния. Эти четыре элемента могут также одновременно считывать данные с диска.

Заметим, что при увеличении скорости передачи данных увеличивается и полоса пропускания канала данных, а значит, растет влияние шума усилителя. В таком случае ФД можно использовать для дистанционного управления, но для считывания данных нужно будет использовать лавинный ФД. При увеличении полосы пропускания шум, возникающий в процессе работы лавинного ФД, будет все еще меньше шума, возникающего в процессе работы усилителя обычного ФД.

Оптическая связь также широко применяет ФД с усилителями и лавинные ФД. Поставщики телекоммуникационных услуг наращивают пропускную способность своих сетей в основном за счёт увеличения числа длин волн, передаваемых по волокну. ФД стали предпочтительными детекторами в сфере оптической связи благодаря необходимости получать максимальное отношение С/Ш при минимальных затратах.

Скорости передачи данных выросли с 2,5 до 40 Гбит/с, что затрудняет получение необходимого усиления в заданной полосе пропускания внешнего предусилителя. На таких скоростях (частотах) усилитель становится главным источником шума. Поэтому, несмотря на высокую стоимость систем связи, работающих на скорости 10 Гбит/с, предпочтительно выбирать лавинные ФД. Это же справедливо и для оптического диска, где шум внутреннего усиления лавинного ФД при широкой полосе пропускания ниже, чем у внешнего усилителя. В последнем случае применяется кремниевый лавинный ФД, так как его работа происходит в видимом спектральном диапазоне (630 или 400 нм), тогда как для оптической связи ЛФД изготавливается из InGaAs и работает в ИК-диапазоне (1310 или 1550 нм).

Наибольшие требования к ФД предъявляет компьютерная томография (КТ). В ней применяется источник рентгеновского излучения, вращающийся вокруг пациента по спиральной траектории, и сцинтиллятор, преобразующий фотоны рентгеновского излучения в видимый свет (с усилением от 10 до 40), обнаруживаемый с помощью ФД. Детекторный модуль формирует трехмерное изображение объекта, учитывая разный коэффициент ослабления рентгеновских лучей различными частями тела. Таким образом, врач имеет возможность получить видимое изображение органов человека.

Качество получаемого изображения прямо зависит от отношения S/W при регистрации рентгеновских лучей. В ранних сканерах, применяемых в КТ, для достижения необходимого отношения S/W использовались ФЭУ, работающие при высоких уровнях освещенности. Однако ФД с низким емкостным сопротивлением имеют меньшее значение темного тока (и шума), и могут давать изображения значительно лучшего качества при небольшом увеличении дозы излучения.

Подобным же образом применяются гамма-камеры и камеры позитрон-эмиссионной томографии, которые также обнаруживают различные заболевания организма. Данный метод использует радиоактивные контрастные вещества, избирательно накапливающиеся в определенных типах ткани. Эти радиоактивные вещества излучают гамма-излучение во всех направлениях. В этом случае применяется матрица детекторов. Чтобы охватить такую большую площадь излучения, экономически целесообразно применять ФЭУ.

ФД могут использоваться и в абсорбционных спектрометрах для измерения спектров химических соединений. При очень высоких уровнях освещенности с помощью ФД можно измерять небольшие изменения коэффициентов поглощения и, следовательно, низкие концентрации, что применяется в жидкостной хроматографии или капиллярном электрофорезе.

В области определения химического состава веществ, где имеют место более высокие требования, применяются ФЭУ.

Например, обнаружить заболевание позволяет иммунохимический анализ. Сыворотка крови пациента помещается на поверхность, к которой "прикрепляется" антиген вируса или бактерия. К антигену притягиваются соответствующие заболеванию антитела. Добавляется антиген-репортер. Этот антиген привязан к флуоресцентному или хемилюминесцентному элементу. Если появляется антитело, антиген-репортер ("сообщающий" об этом факте) примыкает к поверхности. Флуоресцентная проба возбуждается источником света или (для инициации реакции хемилюминесценции) добавляется химическое вещество. И в том, и в другом случае чувствительность тем выше, чем выше способность к обнаружению света у оптического детектора. В этом случае свет нужно обнаружить при максимальной чувствительности в течение короткого промежутка времени, так как химическая реакция протекает очень быстро. ○

ОБ АВТОРЕ

Кеннет Кауфманн (Kenneth J. Kaufmann) – маркетинг-менеджер компании Hamamatsu в г. Бриджуотер, шт. Нью-Джерси, США. Получил степень доктора физической химии в Технологическом Институте (шт. Массачусетс, США).

Перепечатано и переведено компанией Hamamatsu из журнала Photonics Spectra ©, июль 2000, с разрешения Laurin Publishing Co., Inc.