МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И СРАВНЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

И.Иванов, АЗИМУТ ФОТОНИКС

Решение множества задач регистрации единичных фотонов зависит от чувствительности и эффективности детектора. По многим параметрам кремниевые фотоумножители превосходят традиционные фотоэлектронные умножители. Статья подсказывает, на что необходимо обратить внимание при выборе SiPM-детекторов.

Кремниевый фотоумножитель (SiPM) представляет собой детектор, чувствительный к единичным фотонам, который сочетает в себе эксплуатационные характеристики, превосходящие традиционные фотоэлектронные умножители (ФЭУ), с практическими преимуществами твердотельного сенсора. Кремниевый фотоумножитель изготовлен на основе множества микроячеек, представляющих собой плотно упакованные лавинные фотодиоды, работающие в гейгеровском режиме (SPAD сенсоры), со встроенными шунтирующими резисторами, которые преобразуют двоичный сигнал с этих микроячеек в единый аналоговый сенсор.

SiPM-детекторы впервые стали коммерчески доступными в 2005 году. С тех пор множество различных параметров прошли улучшение, и все больше и больше производителей выпускают эти детекторы для продажи. Выбор оптимального датчика для конкретной задачи может оказаться достаточно сложной задачей из-за доступа к широкой линейке аналогичных детекторов, представленных на рынке. В этой статье рассматриваются некоторые из основных факторов, которые необходимо учитывать при выборе подходящего сенсора для конкретного применения. Обсуждаются вопросы производительности, однородности параметров и надежности, а также техническая поддержка продукта в эксплуатации. Более глубокое введение в технологию можно найти в работе [1], а вопросам измерения параметров SiPM-детекторов росвящены работы [2–6].

ПАРАМЕТРЫ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Чувствительность и эффективность регистрации фотонов (PDE)

Для большого количества прикладных задач эффективность регистрации фотонов (Photon Detection Efficiency – PDE) – основной параметр. PDE является мерой чувствительности датчика и определяется как процент от числа падающих фотонов, которые будут усилены высоким внутренним коэффициентом усиления для создания измеряемого сигнала. Лучшие в своём классе SiPM-детекторы сейчас приближаются к значению PDE, равным 50%, а в случае с SiPM-детекторов компании SensL, PDE > 50%. Кривая PDE является функцией длины волны (рис.1) и также зависит от напряжения смещения (рис.2). Значение эффективности регистрации фотонов SiPM-детекторов разных производителей существенно различаются даже между несколькими датчиками одного производителя в зависимости от типа прибора (см. раздел, посвященный микроячейкам в SiPM в статье [1]). Важно также учитывать чувствительность датчика, которая показана на рис.3. Из-за высокого внутреннего усиления чувствительность SiPM остается высокой в широком спектральном диапазоне.

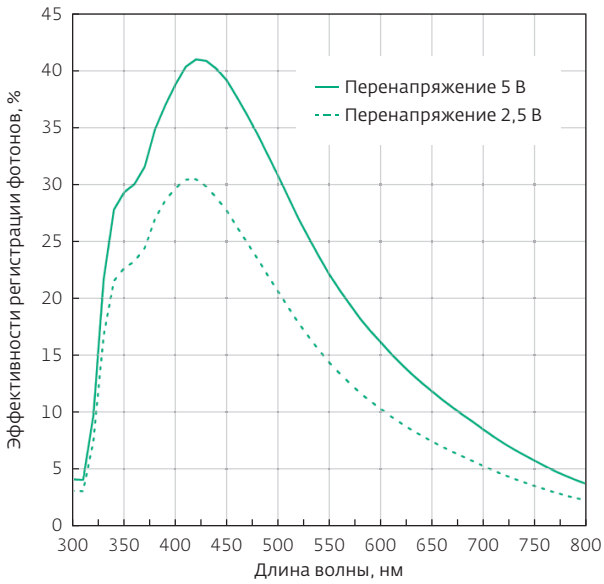


***Рис.1.** Зависимость эффективности регистрации фотонов (PDE) от длины волны и напряжения смещения*

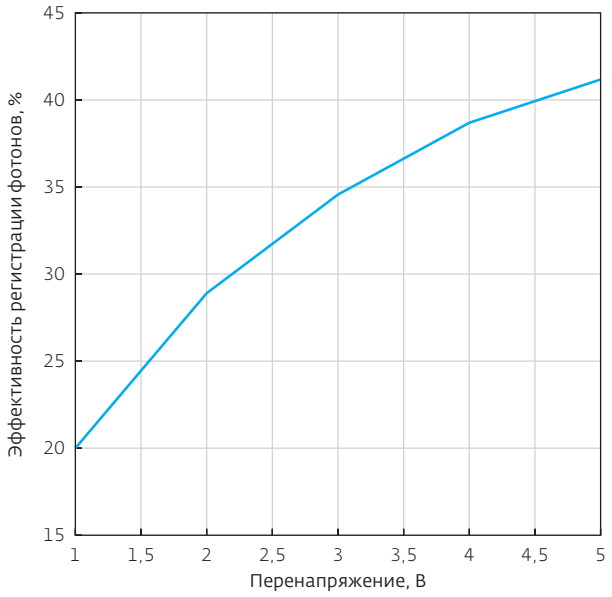


Рис. 2. *Зависимость эффективности регистрации фотонов от перенапряжения*

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- имеет ли SiPM-детектор достаточную чувствительность на необходимых для применения длинах волн? Оптимальная производительность детектора будет на длине волны, где находится пик чувствительности/PDE, но благодаря высокой чувствительности SiPM также хорошо регистрирует фотоны вне области пика;
- какое перенапряжение необходимо приложить к SiPM-для достижения максимального значения PDE и как это влияет на другие параметры производительности?

Скорость темнового счёта (DCR)

Скорость темнового счёта (Dark current rate – DCR) является основным источником шума в SiPM-детекторах. Она определяется как скорость счёта на уровне одного фотона, которая создается тепловой генерацией электронов в активной области кремния, а не за счёт падающего на SiPM источника света. Параметр скорости темнового счета является особенно важным при регистрации слабого свечения или в задачах с длительным временем интегрирования. Тем не менее, в любом применении скорость темнового счета влияет на соотношение сигнал-шум. Типовое значение скорости темнового счета для SiPM-детекторов SensL составляет 30 кГц/мм^2. Важно отметить, что скорость счёта будет расти при увеличении размера сенсора. На рис.4 показана зависимость скорости темнового счета от перенапряжения и температуры.

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- Указана ли скорость темнового счета на 1 мм^2 активной области или для всей площади SiPM-детектора?

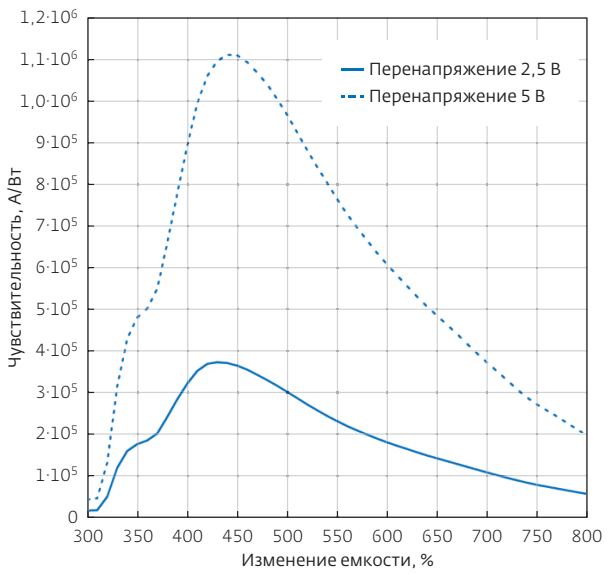


Рис.3. *Зависимость чувствительности от длины волны и напряжения смещения*

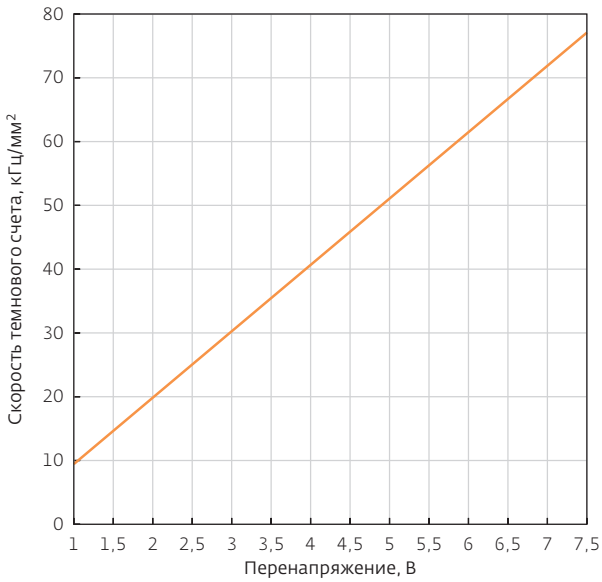


Рис. 4. *Скорость темнового счета в зависимости от приложенного перенапряжения*

- Является ли скорость темнового счета SiPM-детектора достаточно низкой, чтобы достичь требуемого соотношения сигнал-шум?
- Скорость темнового счета меняется в зависимости от приложенного к SiPM перенапряжения и температуры – проверьте значение этих параметров, когда они принимаются во внимание.
- Параметр DCR указан для самых дорогих SiPM-детекторов или он одинаков для всей линейки продукции производителя SiPM-детекторов?

Эффекты кросс-ток и послеимпульсы

Эффекты кросс-ток (cross-talk) и послеимпульсы (afterpulsing) представляют собой два вида помех, которые вызывают возникновение нежелательного шума. Объяснения этих эффектов можно найти в работе [1]. Оба явления указываются в процентах вероятности их возникновения для каждого зарегистрированного SiPM-детектором фотона. Измерения слабых световых сигналов могут быть ухудшены, если значения этих параметров слишком высоки, хотя это сильно зависит от применения. Недавние исследования показывают, что эффект кросс-ток может оказывать минимальное влияние на определение значения временного разрешения схемы совпадений (CRT-coincidence resolving time) в позитронно-эмиссионной томографии, но они имеют важное значение для использования SiPM-детекторов в новом большом телескопе для регистрации черенковского излучения.

Как эффект кросс-ток, так и послеимпульсы увеличиваются с ростом перенапряжения и размером микроячейки в SiPM-детекторе [1]. Существуют большие различия в этих параметрах у SiPM-детекторов разных производителей. Некоторые производители добились определенного успеха в реализации "канавочной" технологии (trench technology), представляющая собой нанесенные канавки между отдельными микроячейками в SiPM-детекторе. Раньше эта технология считалась лучшим способом для снижения эффекта кросс-ток. Тем не менее на сегодняшний день одни из самых низких значений эффекта кросс-толк достигнуты у представленных на рынке SiPM-детекторов, которые не имеют канавок между микроячейками.

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- Важны ли эффекты кросс-ток и послеимпульсы для вашей задачи?
- Не считайте, что наличие канавок между микроячейками гарантирует лучшие параметры для снижения эффекта кросс-ток.

Время нарастания и восстановления

Время нарастания в микроячейке SiPM-детектора очень короткое, однако в наблюдаемом выходном сигнале преобладает импеданс общего массива SiPM. Производители оптимизируют данный параметр, чтобы обеспечить быстрый временной сигнал. Типовые времена нарастания для быстрых SiPM составляют единицы наносекунд.

Время восстановления или время затухания импульса определяется в первую очередь периодом сброса заряда микроячейки, который определяется эффективной ёмкостью мироячейки и значением шунтирующего резистора. Поскольку ёмкость микроячейки зависит от её площади, то время сбрасывания заряда микроячейки будет различаться для разных размеров микроячеек. Дополнительным фактором, влияющим на время восстановления, является последовательное сопротивление от остальной части SiPM-детектора, которое будет более значительным для детекторов большой площади.

Для обеспечения наилучших временных характеристик компания SensL добавила третий электрод (в дополнение к аноду и катоду), который обеспечивает специальный быстрый

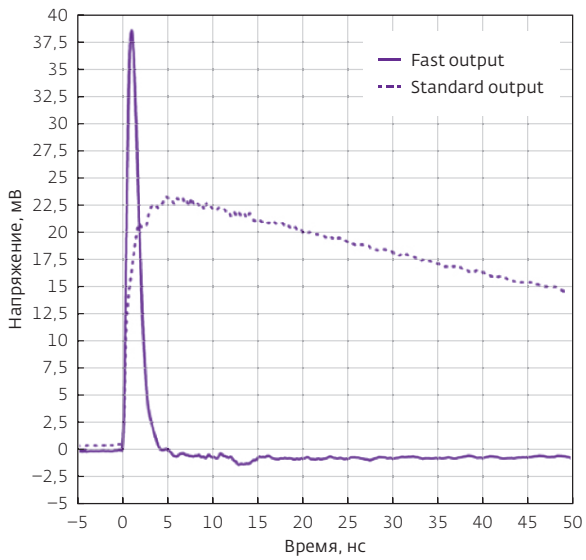


Рис. 5. *Формы выходного сигнала с быстрого и стандартного выхода с SiPM-детектора SensL*

выход для достижения лучшего времени нарастания сигнала (рис. 5). Быстрый выход имеет ёмкостную связь с каждой микроячейкой, в то время как выходной сигнал является производной от внутреннего быстрого переключения микроячейки в ответ на регистрацию единичных фотонов. Эти быстрые выходные сигналы обычно имеют времена нарастания от 300 пс до 1 нс и длительность импульса от 600 пс до 3 нс (в зависимости от размера SiPM-детектора).

Типовые сигналы с быстрого и стандартного выхода SiPM-детектора SensL можно увидеть на рис.5. Этот сигнал может быть применен при проведении сверхбыстрых временных измерений, используя способность четко отличать время прибытия первого фотона в импульсе, а также обеспечивать высокую скорость счета или возможности для регистрации времени прихода второго фотона. Помимо улучшения временных характеристик быстрый выход имеет значительно более низкую емкость, которая может быть полезна при создании схем считывания для SiPM-детекторов. Быстрый выход SiPM-детектора с активной областью 1 мм имеет собственную емкость 1 пФ, в то время как считывание сигнала с анода или катода будет иметь емкость около 100 пФ.

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- являются ли требования к временным параметрам или скорости счета критически важными для вашей задачи? Нужно иметь в виду использование быстрого выхода. Если нет, тщательно изучите различные размеры SiPM-детекторов и/или размеры микроячеек.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМЫ

Напряжение пробоя и рабочее напряжение смещения

Напряжение пробоя (V_{BR}) – это точка смещения, при которой напряжённость электрического поля генерируемая в обеднённом слое SiPM-детектора, является достаточной, чтобы создать гейгеровский разряд. Типовое напряжение пробоя в SiPM-детекторах SensL составляет около 24.5 В. Компания SensL рекомендует выбирать напряжение смещения (Vbias) между 1 В и 5 В выше напряжения пробоя. Поэтому для SiPM-детекторов SensL Vbias составляет <30 В, контрастирующее с некоторыми SiPM-

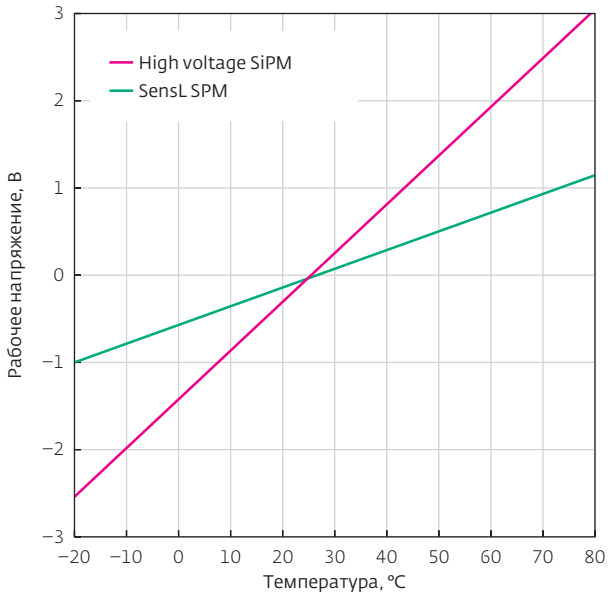


Рис.6. *Изменение рабочего напряжения в зависимости от температуры (сравнение для низковольтного SiPM-детектора SensL и высоковольтного SiPM-другого производителя)*

детекторами других производителей, которые имеют Vbias примерно от 50 В до более чем 100 В. Преимущество низкого напряжения смещения заключается в том, что SiPM-детектор соответствует директиве "сенсоров с низким рабочим напряжением". Ещё одним фактором, относящимся к напряжению смещения, является возможный разброс типового значения напряжения смещения. Эта однородность значения напряжения смещения может быть жестко ограничена при серийном производстве SiPM-детекторов, как например в случае компании SensL, все изготавливаемые SiPM-детекторы которой имеют разброс напряжения смещения не превышающий ±250 мВ [5]. Это особенно важно при использовании большого количества SiPM-детекторов в одной системе, например в калориметре или годоскопе. Если напряжение смещения Vbias изменяется слишком сильно от детектора к детектору, то потребуется индивидуальная настройка смещения.

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- Есть ли преимущество использовать SiPM-детектор с низким напряжением смещения?
- Где могут быть подключены от общего напряжения смещения несколько датчиков, которые используете в единой системе ?
- Если производитель согласится предоставить датчики в пределах узкого диапазона разброса напряжения пробоя Vbr, это повлияет на выбор? А если это увеличит стоимость SiPM-детектора?
- Принимаются ли во внимание напряжение питания и потребляемая мощность?

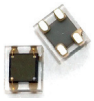
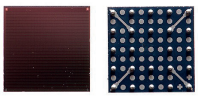
Температура

Температура влияет как на напряжение пробоя, так и на скорость темнового счета SiPM-детектора. В SiPM-детекторах компании SensL используется тонкий обедненный слой и малые уровни залегания легирующей примеси, которые позволяют получить в детекторах низкие значения напряжения пробоя V_{br}. Температура, как известно, влияет на напряжение пробоя кремниевых диодов, и детекторы с меньшим значением V_{br} гораздо менее чувствительны к изменению температуры, чем датчики с высоким значением V_{br}. Все SiPM-детекторы компании SensL имеют температурную зависимость только 21.5 мВ/°C, тогда как высоковольтные SiPM-детекторы с большим напряжением пробоя будут иметь большее изменение температуры, как показано на рис.6. Поскольку скорость темнового счета непосредственно связана с тепловой генерацией электронов, этот шум также увеличивается с ростом температуры и является одним из лимитирующих факторов использования датчиков в задачах, где SiPM-детекторы работают при повышенных температурах. Наоборот, охлаждение SiPM-детектора снижает скорость темнового счета таким образом, что каждое понижение температуры на 20 °C обеспечивает снижение этого фактора в 10 раз (один порядок величины). Некоторые недавние исследования показали, что при температуре жидкого аргона скорость темнового счета SiPM-детектора составила <10 Гц/мм^2 при напряжении V_{br}, равном +5 В [2].

Схемы температурной компенсации могут быть использованы для корректировки изменения напряжения смещения SiPM-детектора с изменением температуры, но увеличение скорости темнового счета может быть снижено только с помощью активного охлаждения детектора.

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

Характеристики различных корпусов SiPM-детекторов

Параметры	Корпус, залитый эпоксидной смолой	Прозрачный MLP (SMT) корпус	TSV-корпус
Внешний вид			
Коэффициент заполнения при изготовлении матрицы	Хороший	Хороший	Наилучший
Оптическое пропускание	Низкое	Хорошее	Наилучшее
Выходной импеданс	Низкий	Хороший	Наилучший (тема для дальнейших исследований)
Рабочая температура, °C	–20 – 40	–40 – 85	–40 – 95
Надёжность	Механическая обработка: снижение надежности	Хорошая	Наилучшая (тема для дальнейших исследований)
Срок службы	Пожелтение эпоксидного покрытия плохо контролируется	Хороший	Наилучший (тема для дальнейших исследований)
Однородность и воспроизводимость	Плохая	Хорошая	Хорошая (тема для дальнейших исследований)
Стоимость	Не рекомендуется для серийного производства. Подходит для научных исследований и тестирования прототипа	Низкая	Низкая, но выше, чем для MLP (SMT) корпуса на единицу площади при использовании в матрицах с высокой плотностью SiPM-детекторов с использованием минимальной мертвой зоны

- Колебания температуры в вашей задаче требуют схемы компенсации напряжения смещения?
- При более высоких рабочих температурах является ли увеличение скорости темнового счета допустимым?

Применение в конкретной задаче

Выбор конкретного SiPM-детектора может в конечном счете сводиться к параметру производительности, который является характерным для данной задачи.Вот некоторые примеры:

Временное разрешение схемы совпадений (CRT) важно для задач в позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ). Значение CRT влияет на общее качество получаемого изображения системы и становится наиболее важным параметром в коммерческих конструкциях ПЭТ-систем. Величины PDE и SPTR (однофотонное временное разрешение – Single Photon Timing Resolution) являются параметрами SiPM-детектора, которые в данном конкретном случае имеют наибольшее влияние.

Энергетическое разрешение гамма-излучения важно в спектроскопических задачах, таких как радиационные портальные мониторы и гамма-спектрометры для обнаружения угроз в системах безопасности. Более высокое энергетическое разрешение детектора позволяет точно идентифицировать различные изотопы. Хорошее энергетическое разрешение зависит в первую очередь от наличия высокого PDE SiPM-детектора, однако в области низких температур эффект кросс-ток может также иметь большое значение для этого применения.

В таких прикладных задачах, как ЛИДАР и распознавание жестов, требуются исключительные временные параметры для достижения наилучшего пространственного разрешения с целью определения дальности до исследуемого объекта. В этих задачах число отраженных от объекта фотонов может быть очень небольшим, поэтому низкий уровень шума и высокое значение однофотонного временного разрешения являются основными факторами.

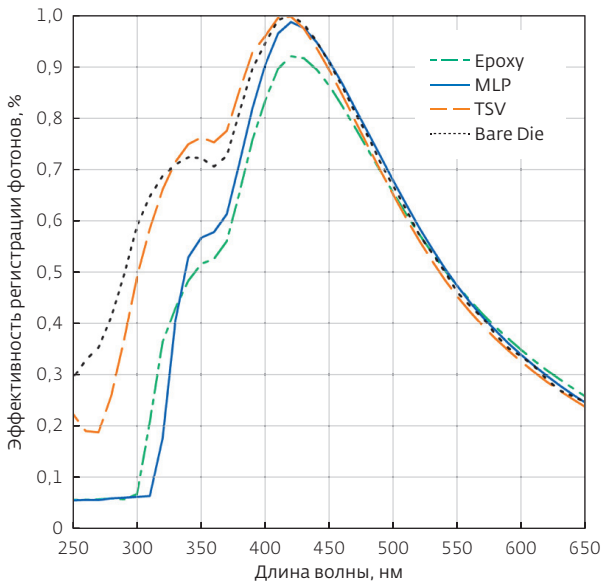


Рис. 7. *Кривая эффективности регистрации фотонов для SiPM-детекторов с различными типами корпусов*

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

существуют ли какие-либо параметры, которые важны для вашего конкретного применения и какие рабочие характеристики кремниевого фотоумножителя влияют на производительность всей системы?

КОРПУСИРОВАНИЕ

Корпусирование кремниевого фотоумножителя, а именно тип корпуса, в который монтируется чип SiPM-детектора, и соединение его контактов, также имеют важные особенности при использовании в некоторых задачах. Некоторые характеристики различных корпусов приведены в таблице.

Форм-фактор

Самой очевидной особенностью при обсуждении типа корпуса SiPM-детектора является его форм-фактор (форма и размер), а также тип контактов входных/выходных сигналов (штырьки или контактные площадки).

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- Должен ли кремниевый фотоумножитель быть компактным, чтобы поместиться в миниатюрной системе?
- Должна ли быть сведена мёртвая зона между гранями активной области чипа к минимуму, чтобы позволить сформировать плотноупакованный массив (матрицу) из SiPM-детекторов [3]?
- Есть ли предпочтение к штырьковому разъему, к которому обычно припаиваются ручным паяльником или к контактным площадкам, которые припаиваются методом пайки расплавления дозированного припоя?

Оптическое пропускание/поглощение света

Прозрачный материал, используемый для инкапсуляции (корпусирования) SiPM-детектора, может оказывать влияние на кривую PDE, как показано на рис.7. Стекло используемое в новом TSV корпусе кремниевых фотоумножителей SensL имеет значительное преимущество по сравнению с MLP (SMT) корпусом регистрации света в ультрафиолетовой области спектра. Это расширение в УФ область спектра стало возможным без использования силиконовой резины или тонких пленок, которыми покрывают различные корпуса фотодиодов.

Момент, который необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- Используются ли в вашем применении длины волн, которые могут поглощаться материалом входного окна корпуса кремниевого фотоумножителя?

Магнитная совместимость

В некоторых задачах наличие в корпусе детектора магнитных материалов может стать проблемой. Одной из таких задач является позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с магнитно-резонансной томографией (ПЭТ-МРТ), где используются магнитные поля индуктивностью до 3 Тл. Было показано, что сами кремниевые фотоумножители не подвержены влиянию магнитного поля [5], но в некоторых случаях ферромагнитные металлы на основе сплавов железа, используемые в корпусах SiPM-детекторов, могут нарушить магнитное поле, вызывая незначительные искажения получаемого изображения. Однако TSV корпус SiPM-детекторов компании SensL имеет преимущество, заключающееся в отсутствии каких-либо ферромагнитных металлов, например никеля.

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM:

- Существуют ли в вашем применении какие-либо магнитные поля, которые могут быть

затронуты ферромагнитными материалами, содержащимися в корпусе SiPM-детектора?

Радиационная чистота

Материалы, используемые для создания корпуса кремниевого фотоумножителя, могут содержать следы радиоактивных элементов, таких как U_{238}, Ra_{226} и Th_{232}, которые стабильно дают небольшое количество фонового счета в определенных условиях низкой освещенности, например в исследовательских задачах, таких как обнаружение темной материи. Это может стать значительной проблемой для измерений. В недавней работе [4] показано, что кремниевые фотоумножители SensL в MLP (SMT) корпусе обладают очень высокой степенью радиационной чистоты, что соответствует стандартам, необходимым для таких применений, как обнаружение темной материи и регистрация двойного бета-распада. Стоит отметить, что параметры радиационной чистоты не являются проблемой для большинства традиционных применений кремниевых фотоумножителей.

Момент, который необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- Будет ли влиять наличие следов радиоактивных элементов в корпусе кремниевого фотоумножителя на проведение эксперимента?

Чувствительность к влажности

Существуют практические соображения, связанные с тем, в каком виде кремниевые фотоумножители поставляются заказчикам и хранятся до своего фактического использования. Эти вопросы обычно важны при поставке SiPM-детекторов в больших объемах. Кремниевые фотоумножители в MLP (SMT) и TSV корпусе компании SensL поставляются на ленте в катушках (3000 детекторов), которые подходят для использования в стандартных системах для автоматизированной пайки. Такой параметр, как MSL (Moisture Sensitivity Level – уровень чувствительности к влаге), определяет, как долго кремниевые фотоумножители могут храниться в оригинальной запечатанной упаковке, прежде чем они потребуют дополнительной процедуры выпекания предшествующей автоматизированной пайке. Кремниевые фотоумножители SensL в корпусе MLP (SMT) имеют MSL-рейтинг № 3 (из 5 возможных уровней), который является отраслевым стандартом для интегральных схем. SiPM-детекторы SensL в TSV корпусе имеют наивысший возможный рейтинг № 1 для поверхностного монтажа. Стоит отметить, что корпуса кремниевых фотоумножителей, которые заливают эпоксидной смолой, не имеют MSL рейтинга, поэтому не могут использоваться для автоматизированной пайки.

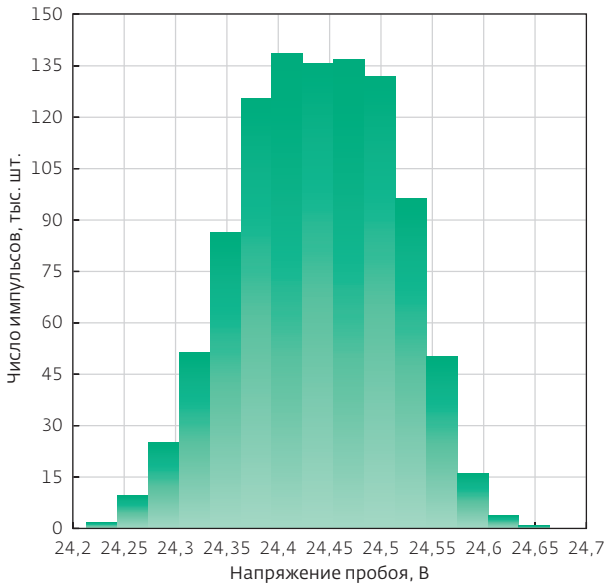


Рис.8. Однородность напряжения пробоя (измерения проведены для числа SiPM-детекторов SensL более чем 100 000)

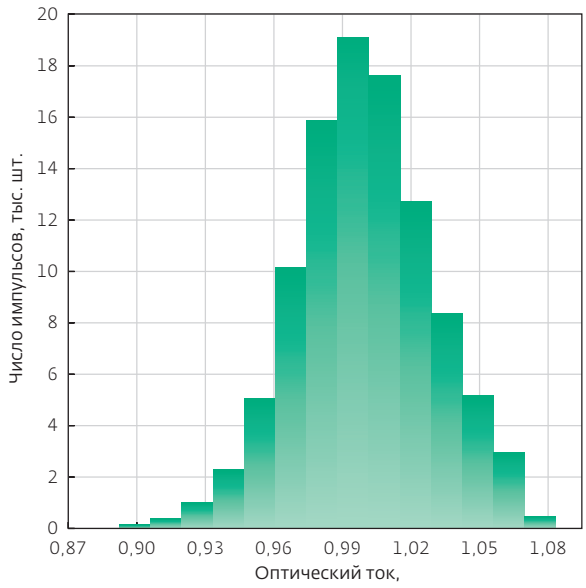


Рис.9. Однородность оптического тока (измеренная проведены для числа SiPM-детекторов SensL более чем 100 000)

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- Имеет ли контрактный производитель определённые требования к хранению кремниевых фотоумножителей перед сборкой, которые могут повлиять на выбор типа корпуса для SiPM-детектора?

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ, НАДЁЖНОСТЬ И ОДНОРОДНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ

Производственные возможности и тестирование

Производственные возможности влияют на качество и надёжность кремниевых фотоумножителей, тестирование определяет вероятность отличия параметров детекторов от заданной производителем спецификации. Компания SensL использует производственную и упаковочную линию, которые обеспечивают 100%-ное тестирование кремниевых фотоумножителей. Обработка кремниевых пластин осуществляется на КМОП-фабрике с использованием стандартного КМОП-процесса на 8-дюймовых пластинах. С целью обеспечения качества выпускаемой продукции проводится тестирование мониторинга контроля технологических процессов, при этом выполняется 1 000 000 различных тестов для каждой партии SiPM-детекторов. Любые отбракованные при тестировании детекторы не допускаются до стадии корпусирования.

Процесс корпусирования кремниевых фотоумножителей разработан для осуществления серийного производства большого объема детекторов и также включает в себя 100%-ное тестирование конечных изделий посредством измерения темнового тока и проведения оптического контроля. Все SiPM-детекторы, не прошедшие эти тесты, удаляются из партии и уничтожаются. Все SiPM-детекторы, удовлетворяющие результатам тестов и спецификации на изделия, поставляются компанией SensL на ленте в катушках.

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- Обеспечивает ли имеющийся производитель кремниевых фотоумножителей высококачественный продукт?
- Имеющийся производственный процесс соответствует объёму производства и удовлетворяет требованиям применения заказчика к однородности параметров SiPM-детекторов, когда продукт вышел на полную производственную мощность?

Однородность напряжения пробоя и оптического тока

Результатом производства высокого качества и 100%-ное тестирования является кремниевый фотоумножитель с высокой однородностью (воспроизводимостью) параметров, как с точки зрения разброса напряжения пробоя, так и оптического тока при заданном уровне освещения. Гистограммы (рис. 8 и 9) демонстрируют результаты тестирования более чем 100 000 кремниевых фотоумножителей компании SensL. Напряжение пробоя показывает однородность ±221 мВ с оптической однородностью <±9%.

Моменты, которые необходимо учитывать при выборе SiPM-детектора:

- Является ли необходимым условием поставка кремниевых фотоумножителей с однородным напряжением пробоя и другими характеристиками от партии к партии?

Надежность

Тестирование кремниевого фотоумножителя на проверку надежности должно быть обязательным условием, интересующим любого покупателя, который намерен использовать SiPM-детектор в своей системе. Проблема в том, что не существует стандартной программы оценки надежности кремниевых фотоумножителей или других оптоэлектронных детекторов. Для тестирования собственных кремниевых фотоумножителей компания SensL решила применить отраслевые стандарты, которые используются в схеме последовательности работ при проведении испытаний, разработанных для тестирования интегральных схем. Схемы последовательности работ при проведении испытаний SiPM-детекторов описаны подробно в работе [6] и выполняются на предприятиях при производстве кремниевых пластин и корпусов для каждого типа продукта, создаваемого на базе кремниевых фотоумножителей SensL.

Моменты, которые необходимо учесть при выборе SiPM-детектора:

- Были ли кремниевые фотоумножители подвергнуты обширным испытаниям по надёжности согласно стандартам JEDEC, действующим для интегральных схем?

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА И ДОКУМЕНТАЦИЯ

Выбор оптимального кремниевого фотоумножителя должен опираться на все факторы, описанные в этой статье: производительность, тип корпуса, надёжность, однородность параметров. Однако для принятия окончательного решения стоит учесть помимо перечисленных факторов ещё и техническую поддержку предлагаемой производителем продукции. Компания SensL придерживается политики оказания технической поддержки заказчикам, использующим кремниевые фотоумножители SensL. Компания реализует ее различными путями – это и контакты с группой инженеров и разработчиков SiPM-детекторов, и предоставление разнообразной технической документации. Причем под документацией подразумеваются и справочные данные, и руководство пользователя, и заметки и интернет-статьи в академической научной библиографии, которая собирает все опубликованные журнальные статьи, где упомянуты применения кремниевых фотоумножителей SensL.

Моменты, которые необходимо учесть при выборе SiPM-детектора:

- Хорошо ли поддерживается техническая поддержка продукта в случае возникновения проблем?
- Если у меня есть вопрос, у меня есть канал технической поддержки?
- Я начинающий специалист/эксперт в области кремниевых фотоумножителей. Есть ли документация, соответствующая моему уровню знаний?

ЛИТЕРАТУРА

1. SensL Introduction to SiPM Tech Note.
2. **Catalanotti et al.** Performance of a SensL-30035-16P Silicon Photomultiplier array at liquid argon temperature.
3. **SensL Tech Note**. SMT Array Design.
4. **Cebrián S. et al.** Radiopurity assessment of the tracking readout for the NEXT double beta decay experiment. – Submitted to JINST, 2015.
5. **Vaquero J. J. et al.** Nuc. Inst. & Met. in Phy. Res. A, 2013, 702, p. 83–87.
6. **Jackson C. et al.** High-volume silicon photomultiplier production, performance and reliability. – Opt. Eng. 53 (8), 081909 (Aug 15, 2014).