

# Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации

## Часть 2.2. Показатели качества детекторов

В продолжение второй части обзора твердотельных детекторов рассматриваются обобщенные критерии и показатели качества детектирования, а также конкурентность разных типов детекторов на основе этих показателей. В обзоре сделаны акценты на вероятностное описание случайных процессов формирования сигнала и шума детектирования в твердотельных детекторах малофотонных оптических сигналов и радиации с лавинным умножением.

### **Ключевые слова:**

*фотодиод, лавинный фотодиод, кремниевый фотоумножитель, отношение сигнал/шум, разрешение, шум-фактор, порог чувствительности, квантовая эффективность детектирования.*

### **С.Л.Виноградов**

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
г. Москва  
НПП «Доза», г. Зеленоград

**О** показателях качества детекторов  
Показатели качества и критерии эффективности детектирования сигнала какими-либо датчиками, сенсорами, приемниками и детекторами так же разнообразны, как и задачи детектирования с точки зрения выделения полезной информации из регистрируемого сигнала. В зарубежной технической литературе для них употребляют термин «figures of merit» (FOM).

Показатели качества используются в основном для сравнения разных детекторов по эффективности, чувствительности, точности, производительности и другим важнейшим результатам детектирования. В разных прикладных областях для адекватного отображения результатов детектирования в качестве FOM могут быть выбраны самые разные параметры и характеристики детектора (определения терминов «параметр» и «характеристика» рассма-

тривалось в Части 2.1 обзора), а также их функциональные сочетания. Например, в обзорной статье «Как характеризовать показатели качества матричных фотодетекторов» [22], в качестве FOM обсуждаются темновой ток, ампер-ваттная чувствительность, порог чувствительности, удельная обнаружительная способность, полоса частот и времена роста и спада фотосигнала.

В нашем обзоре рассматриваются показатели качества, которые наиболее точно отражают цели и результаты детектирования импульсных оптических сигналов, а также частиц высоких энергий и радиационных потоков (через их конверсию в световую вспышку в сцинтилляторах или черенковских радиаторах). Эти показатели неразрывно связаны с вероятностными процессами детектирования и их ключевыми параметрами и характеристиками, которые были представлены в Части 2.1 обзора. Рассматривается формирование и применение универсального показателя качества в этой прикладной области – общей квантовой эффективности детектирования (detective quantum efficiency, *DQE*).

### Отношение сигнала к шуму и разрешение сигнала

Одним из наиболее важных и широко используемых показателей качества детектирования сигналов является отношение сигнала к шуму (signal-to-noise ratio, *SNR*). Также широко применяется обратное к *SNR* отношение шума к сигналу, для которого используют как термин разрешение (resolution, *RES*), так и термины коэффициент вариации или относительное стандартное отклонение. Детектирование импульсов света является случайным процессом, в котором случайное число фотонов *N*, падающих на фотоприемник, преобразуется в случайное число электронов *K* на выходе фотоприемника или электронной схемы считывания. При измерениях выходного сигнала в качестве меры сигнала используют его среднее значение  $\mu(K)$ . В качестве меры шума используют как среднеквадратичное отклонение  $\sigma(K)$ , так и ширину на половине высоты гистограммы случайных значений сигнала (full width at half maximum, *FWHM*). Соответственно, значения *SNR* и *RES* могут быть заданы как в единицах СКО, так и в единицах *FWHM*:

$$SNR_{\sigma}(K) = \frac{E(K)}{\sqrt{Var(K)}} = \frac{\mu(K)}{\sigma(K)}; \quad RES_{\sigma}(K) = \frac{1}{SNR(K)} = \frac{\sigma(K)}{\mu(K)}. \quad (1)$$

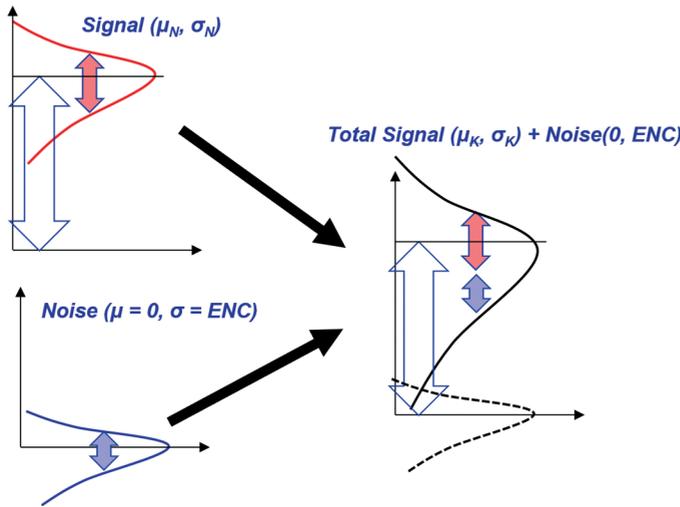
$$SNR_{FWHM}(K) = \frac{E(K)}{FWHM(K)} = \frac{\mu(K)}{FWHM(K)}; \quad RES_{FWHM}(K) = \frac{FWHM(K)}{\mu(K)}. \quad (2)$$

В случае нормального распределения случайной величины *K*, что достаточно часто бывает в экспериментах,  $FWHM(K) \cong 2,354 \cdot \sigma$ . Далее в качестве меры шума случайной величины *K* будут использоваться СКО  $\sigma(K)$  и соответствующие выражения (1) для *SNR* и *RES*, опуская индекс  $\sigma$ .

Схема вероятностного распределения выходного сигнала и шума представлена на рис.1.

При описании процесса детектирования нужно учитывать не только аддитивные шумы, как представлено на рис.1, но и мультипликативные шумы внутренних процессов преобразования входного сигнала. Рассмотрим общий случай линейного преобразования случайной величины со случайным коэффициентом умножения.

Для анализа изменения разрешения сигнала от входа к выходу детектора применяется теорема Берджеса о дисперсии [6], и случайный процесс преобразования часто описывается как усиление электронов со случайным коэффициентом *M* [5]. При расчете математического ожидания и дисперсии выходной случайной величины *K* по их известным значениям для входной случайной



**Рис.1.** Схема вероятностного распределения выходного сигнала и шума.

величины  $N$  предполагается, что каждый процесс усиления независим от других, и известны математическое ожидание и дисперсия выходной случайной величины  $M$  при детерминированном числе электронов на входе (как правило, при  $N = 1$ , т. е. для одиночного электрона):

$$E[N \equiv 1] = 1; \text{Var}[N \equiv 1] = 0; E[M|I] = \mu_M; \text{Var}[M|I] = \sigma_M^2. \quad (3)$$

По определению фактор избыточного шума (excess noise factor,  $ENF$ ) умножения одиночного электрона в этом случае равен:

$$ENF[M|I] = 1 + \frac{\sigma_M^2}{\mu_M^2}. \quad (4)$$

$ENF$ , заданный (4), является широко используемой мерой «шумности» процесса умножения единичного электрона в ЛФД и ФЭУ, как уже рассматривалось в Части 2.1. Согласно теореме Берджеса,  $N$  электронов на входе процесса с известными математическим ожиданием и дисперсией вида (5):

$$E[N] = \mu_N, \text{Var}[N] = \sigma_N^2 \quad (5)$$

порождают  $K$  электронов на выходе процесса с математическим ожиданием и дисперсией вида (6):

$$E[K|N] = \mu_M \cdot \mu_N, \text{Var}[K|N] = \mu_M^2 \cdot \sigma_N^2 + \mu_N \cdot \sigma_M^2. \quad (6)$$

Для определения избыточного шума процесса умножения случайного числа электронов  $N$  необходимо рассмотреть другое определение  $ENF$ , обычно используемое в электронике для анализа шумности усилителя, которое учитывает шум на входе усилителя – дисперсию числа  $N$ :

$$ENF[K|N] = \frac{RES(K)^2}{RES(N)^2} = \frac{\frac{\sigma_K^2}{\mu_K^2}}{\frac{\sigma_N^2}{\mu_N^2}}. \quad (7)$$

Применяя результаты (6) к (7), получаем  $ENF$  всего процесса:

$$ENF[K|N] = 1 + \frac{\sigma_M^2}{\mu_M^2} \cdot \frac{1}{Fano[N]}, \text{Fano}[N] = \frac{\sigma_N^2}{\mu_N}, \quad (8)$$

где  $Fano[N]$  – фактор Фано случайной величины  $N$ . Для случайных величин с распределением Пуассона фактор Фано равен 1.

Выражение (8) означает, что  $ENF$  процесса умножения  $N$  электронов с распределением, отличным от распределения Пуассона, отличается относительно  $ENF$  процесса умножения одиночного электрона, но для входного сигнала с пуассоновской статистикой  $ENF$  по выражениям (4) и (8) совпадают:

$$ENF[K|N]_{Fano[N]=1} = ENF[M|I]. \quad (9)$$

В большинстве практических случаев число фотонов в импульсе, а также в некотором интервале времени имеет распределение Пуассона.

Выражения (8) и (9) позволяют комбинировать результаты поэтапных процессов преобразований как произведение специфических  $ENF$  каждого процесса, приводящих к ухудшению разрешения на каждом этапе преобразования, и может быть дополнительно упрощено, если фактор Фано для некоторого конкретного процесса равен или близок к 1:

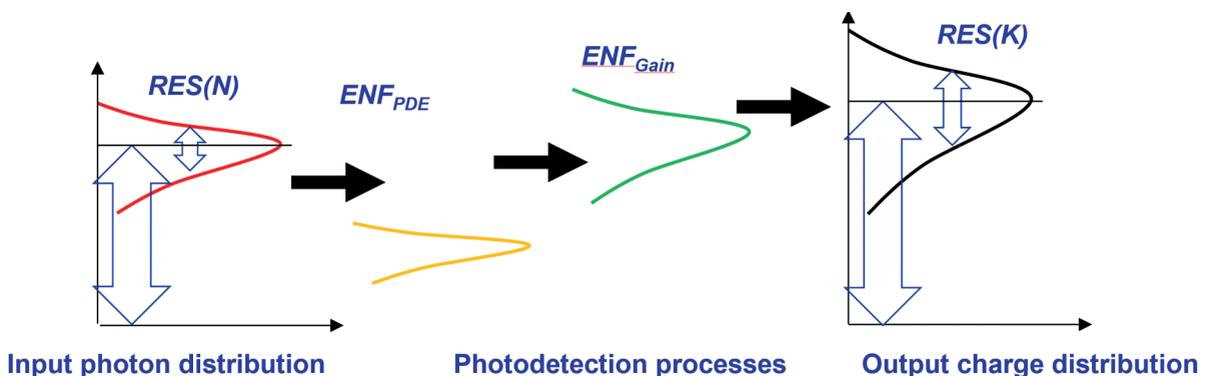
$$RES(K) = RES(N) \cdot \sqrt{EVF_{process1} \cdot ENF_{process2} \dots} = RES(N) \cdot \sqrt{EVF_{total}}. \quad (10)$$

Таким образом, результаты детектирования сигнала определяются общим шум-фактором процесса детектирования  $ENF_{total}$ , и на этой основе может быть построен анализ качества детектирования по критерию разрешения числа фотонов по выражению (10).

Схема поэтапного преобразования вероятностного распределения и разрешения сигнала от входа к выходу представлена на рис.2.

В общем шум-факторе  $ENF_{total}$  учитываются вклады всех ключевых процессов детектирования: фотоэлектрического эффекта преобразования фотонов в электроны, темновой генерации электронов, шума умножения электронов, коррелированных эффектов (кроссток, послеимпульсы), а также от нелинейности преобразования входного сигнала в выходной сигнал, как рассматривается в работах [2,3,16,17,18,23]. Сводная таблица результатов этих работ в части специфических шум-факторов указанных процессов представлена в табл.1.

Итак, с учетом шума электронной схемы регистрации, выраженном в единицах СКО шума – эквивалентного шумового заряда  $ENC$  – энергетическое разрешение (как и отношение сигнал/шум) для фотодетекторов всех видов при регистрации светового сигнала с Пуассоновским распределением числа фотонов может быть представлено в общем виде [15]:



**Рис.2.** Схема поэтапного преобразования вероятностного распределения и разрешения сигнала  $RES$  от входа со случайным числом фотонов  $N$  к выходу со случайным числом электронов  $K$ . Для примера представлены два внутренних процесса: преобразование фотонов в электроны с шум-фактором  $ENF_{PDE}$  и умножение электронов с шум-фактором  $ENF_{Gain}$ .

$$RES(K) = \frac{I}{SNR(K)} = \frac{I}{\sqrt{\mu(N)}} \cdot \sqrt{ENF_{total} + \frac{ENC^2}{\mu(K)^2}}. \quad (11)$$

**Табл.1.** Аналитические выражения для специфических шум-факторов  $ENF$  случайных процессов детектирования и их вклады в общий шум фактор детектирования  $ENF_{total}$  (на примере кремниевых фотумножителей).

Случайный процесс	Параметры процесса	Типичные значения	Специфический шум-фактор процесса
Конверсия фотона в регистрируемый выходной импульс	Эффективность детектирования фотона $PDE$	5%-50%	$ENF_{PDE} = \frac{I}{PDE}$
Темновая генерация носителей	Частота счета $DCR$	$10^5 - 10^7$ Гц	$ENF_{DCR} = 1 + \frac{DCR \cdot T_{det}}{N_{ph} \cdot PDE}$
Лавинное умножение	Средний коэффициент $\mu(M)$ , СКО $\sigma(M)$	$\mu(M) \approx 10^6$ $\sigma(M) \approx 10^5$	$ENF_M = 1 + \frac{\sigma^2(M)}{\mu^2(M)}$
Оптический кроссток	Вероятность $P_{CT}$	1%-40%	$ENF_{CT} = \frac{I}{I + \ln(1 - P_{CT})}$
После-импульсы	Вероятность $P_{AP}$	1%-20%	$ENF_{AP} = 1 + P_{AP}$
Шум-фактор в диапазоне линейности SiPM			$ENF_{LIN} = ENF_{PDE} \cdot ENF_M \cdot ENF_{CT} \cdot ENF_{AP} \cdot ENF_{DCR}$
Нелинейность из-за ограниченного числа пикселя	Загрузка пикселя $n$ (среднее число фотонов $N_{ph}$ на пиксель из $N_{pix}$ )		$ENF_{NL_{pix}} = \frac{\exp(n) - 1}{n}, \quad n = \frac{N_{ph} PDE}{N_{pix}}$
Нелинейность из-за мертвого времени пикселя	Частота загрузки пикселя $\lambda$ за мертвое время $T_{rec}$		$ENF_{NL_{rec}} = 1 + \lambda T_{rec}, \quad \lambda = \frac{n}{T_{rec}}$
Общий шум-фактор детектирования			$ENF_{Total} = ENF_{LIN} \cdot \left\{ \begin{array}{l} ENF_{NL_{pix}}, T_{det} < T_{rec} \\ ENF_{NL_{rec}}, T_{det} > T_{rec} \end{array} \right\}$

Для детекторов частиц высоких энергий, особенно в задачах калориметрии, энергетическое разрешение является важнейшей общепринятой характеристикой.

В частности, для вакуумных фотоэлектронных умножителей это отражено в ГОСТ 11612.8-85 «Фотоумножители. Метод измерения энергетического разрешения» 1986 года, в котором задано определение энергетического разрешения  $RES_{FWHM}$  по выражению (2).

В случае детекторных систем на основе сцинтилляторов, число фотонов во вспышке которых имеет супер-Пуассоновское распределение, в подкоренном выражении (11) учитывается внутреннее разрешение сцинтиллятора  $R_{sci}$ :

$$RES(K) = 1/SNR(K) = \frac{1}{\sqrt{\mu(N)}} \cdot \sqrt{ENF_{total} + \frac{ENC^2}{\mu(K)^2} + R_{sci}^2}. \quad (12)$$

### Порог чувствительности и обнаружительная способность

В системе российских стандартов в области фотоэлектрических полупроводниковых приемников излучения и фотоприемных устройств (ГОСТ Р 59605-2021, ГОСТ Р 59606-2021, ГОСТ Р 59607-2021) достаточно подробно представлены электрические, геометрические, спектральные, временные характеристики одноэлементных и матричных фотодетекторов, в том числе характеристики чувствительности. Однако в виде показателей качества, которые относятся к комбинации параметров и сигнала, и шума, фигурируют только порог чувствительности и обнаружительная способность.

Порог чувствительности (noise equivalent power,  $NEP$ ) определяется интенсивностью светового потока, при котором  $SNR = 1$  или, что то же самое,  $RES = 1$ .

Обнаружительная способность (detectivity,  $D$ ) определяется как величина, обратная порогу чувствительности ( $D = 1/NEP$ ).

Удельный порог чувствительности (specific  $NEP$ ) определяется как порог чувствительности в единичной полосе частот (1 Гц) на единицу активной площади детектора.

Удельная обнаружительная способность (specific detectivity,  $D^*$ ) определяется как величина, обратная удельному порогу чувствительности.

Эти показатели качества детектирования в основном ориентированы на фотоприемные устройства, предназначенные для непрерывной и динамичной регистрации интенсивности светового потока, например, ПЗС-матрицы с заданной частотой кадра. При детектировании импульсных сигналов эти показатели можно адекватно обратить на пороговое число фотонов в импульсе при  $SNR = 1$  или  $RES = 1$ , а также при любом другом пороговом уровне, адекватном для данной прикладной задачи.

При этом пороговое число фотонов  $\mu(N)$ , заданное выражением (11) или (12) при  $RES=1$ , оказывается неявной функцией, у которой может не быть аналитического выражения, поскольку и относительный вклад шума электроники, и общий шум-фактор  $ENF_{total}$  зависят от  $\mu(N)$ . Для современных кремниевых фотоумножителей с  $PDE \approx 50\%$  и вероятностью кросстолка  $P_{ct} \approx 10\%$  при детектировании малофотонных световых импульсов наносекундного диапазона (шум электроники, темновой шум, шум умножения и нелинейность пренебрежимы) выражение для порогового числа фотонов в импульсе при  $RES = 1$  согласно (11) можно представить в упрощенном виде:

$$\mu(N) = ENF_{PDE} \cdot ENF_{ct} = \frac{1 + P_{ct}}{PDE} \approx \frac{1,1}{0,5} = 2,2. \quad (13)$$

### Общий шум-фактор и квантовая эффективность детектирования

Сигнал и шум на выходе фотодетектора зависит от сигнала и шума случайного числа фотонов на его входе (6), а разрешение сигнала на выходе определяется разрешением сигнала на входе и его ухудшением за счет внутренних шумов детектора (10) и считывающей электроники (11). Поэтому анализ качества или эффективности собственно детектора в передаче информации о сигнале более нагляден, если рассматривать относительную величину деградации *SNR* или *RES* от входа к выходу. Именно этот подход представлен определением *ENF* через выражение (7). А возможность представления общего шум-фактора *ENF<sub>total</sub>* в виде произведения специфических шум-факторов внутренних процессов (10) дает удобную сравнительную оценку роли каждого из них в деградации *SNR* или *RES* выходного сигнала (табл.1).

Таким же, по существу, показателем качества детектора, как *ENF<sub>total</sub>*, является квантовая эффективность детектирования (detective quantum efficiency, *DQE*). Эта характеристика была введена в 1970-х гг. как показатель качества детекторов рентгеновских изображений [21], получила широкое распространение [14] и вошла в международный стандарт IEC 62220-1-3 2008 года [10]).

Для одноэлементного детектора *DQE* определяется отношением *SNR* на выходе фотоприемника к *SNR* на его входе и обратна общему шум-фактору:

$$DQE[K|N] = \frac{SNR_K^2}{SNR_N^2} = \frac{\frac{\mu_K^2}{\sigma_K^2}}{\frac{\mu_N^2}{\sigma_N^2}} = 1/ENF_{total}. \quad (14)$$

Таким образом, для расчета *DQE* по (14) могут быть использованы аналитические выражения для специфических шум-факторов внутренних процессов детектирования, представленные в табл.1.

В частности, идеальный детектор будет иметь *DQE* = 1 или 100% для сигнала с любым числом фотонов, а детектор с квантовой эффективностью *QE* и без других видов внутренних шумов будет иметь *DQE* = *QE* в диапазоне его линейности.

### Сравнение фотодетекторов на основе показателя *DQE*

На основе показателя качества детектирования *DQE* достаточно удобно проводить сравнение как детекторов одного типа, так и разных типов, в том числе по их эффективности относительно идеального детектора. Это позволяет выбирать наиболее конкурентные типы и модели детекторов для конкретных применений. А при разработке детекторов показатель *DQE* показывает, насколько может быть повышена их эффективность, и за счет каких специфических шум-факторов это может быть достигнуто.

#### Сравнение фотодетекторов разных типов

Рассмотрим одну из типичных задач применения фотодетекторов со сцинтилляторами для детектирования короткого светового импульса длительностью  $T_{pulse} = 10$  нс с временем интегрирования выходного сигнала  $t_{int} = 100$  нс, при этом шум электроники  $ENC = 3 \cdot 10^4$  (что типично

для полосы частот около 1 ГГц). В зависимости от числа фотонов в импульсе такую задачу могут решать вакуумные ФЭУ (PMT), кремниевые фотоумножители (SiPM), лавинные фотодиоды (APD), а также р-і-п-фотодиоды (PIN). Для оценки максимальной  $DQE$  предполагаем, что каждый прибор используется в спектральном диапазоне с его максимальной квантовой эффективностью  $QE$  или  $PDE$ .

Зададим типичные параметры специфических внутренних шум-факторов для этих типов фотодетекторов:

SiPM:  $M = 10^6$ ,  $ENF_M = 1,01$ ,  $PDE = 55\%$ ,  $P_{ct} = 10\%$ ,  $DCR = 1 \text{ Мсps}$ ,  $N_{pix} = 5676$ ;

PMT:  $M = 10^6$ ,  $ENF_M = 1,2$ ,  $PDE = 25\%$ ,  $DCR = 100 \text{ cps}$ ,  $N_{sat} = 10^3$  электронов;

APD:  $M = 10^2$ ,  $ENF_M = 2$ ,  $PDE = 85\%$ ,  $DCR = 10 \text{ Ксps}$ ,  $N_{sat} = 10^6$  электронов;

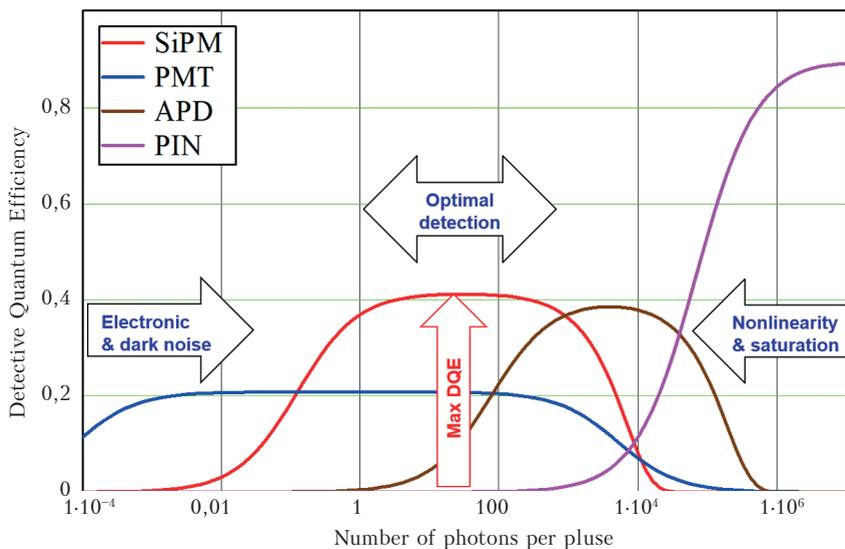
PIN:  $M = 1$ ,  $ENF_M = 1$ ,  $PDE = 90\%$ ,  $DCR = 10 \text{ Ксps}$ ,  $N_{sat} = 10^9$  электронов.

Результаты расчета по формуле (11) с учетом табл.1 представлены на рис.3.

Все типы детекторов имеют выраженное плато оптимального детектирования с максимальной  $DQE$ . Нижняя граница плато связана с шумами электроники (для APD и PIN) и темновой генерации (для PMT и SiPM), которые начинают преобладать над сигналом при малом числе фотонов. Верхняя граница определяется нелинейностью и насыщением отклика детектора (для PIN она составляет около  $10^9$  фотонов и выходит за шкалу графика). Диапазон между нижней и верхней границей плато можно определить как диапазон оптимального детектирования. Для идеального детектора  $DQE = 1$  при любом числе фотонов по определению.

### Сравнение кремниевых фотоумножителей разных типов

Также представляет интерес сравнение квантовой эффективности детектирования ряда современных SiPM с разной конструкцией. В частности, наиболее широкое и массовое применение в мире получили кремниевые фотоумножители компании Hamamatsu Photonics (Япония), известные как Multi-Pixel Photon Counter (MPPC). Конструкция MPPC во многом повторяет и развивает подход на основе планарного лавинного р-п-перехода, заложенный в первые



**Рис.3.** Зависимость квантовой эффективности детектирования для вакуумных ФЭУ (PMT), кремниевых фотоумножителей (SiPM), лавинных фотодиодов (APD) и р-і-п-фотодиодов (PIN) от среднего числа фотонов в импульсе по формулам табл.1.

российские SiPM разработки МИФИ/Пульсар [7,8] и включает в себя межпиксельные канавки (трени) для подавления оптического кросстолка, также впервые примененные в российских SiPM [1,11] (подробно рассматривается в Части 1.1 Обзора). Разработан ряд линеек или серий MPPC, одним из существенных различий между которыми является размер пикселя – гейгеровской ячейки ЛФД. С размером пикселя связано одно из наиболее существенных противоречий в оптимизации параметров SiPM – противоречие между эффективностью и динамическим диапазоном детектирования, которое подробно обсуждается в работах [2,3,18]. Поэтому в сравнительный анализ включены два наиболее характерных представителя SiPM с большим и с малым размером пикселя и с площадью 1 мм<sup>2</sup>.

Принципиально другой подход к конструкции гейгеровской ячейки был представлен разработками MRS APD и Micro-Well APD [4,12,13] (подробно рассматривается в Части 1.1 Обзора). Лавинный пробой в них был локализован вокруг изолированных друг от друга p<sup>+</sup> областях размером в несколько микрон в эпитаксиальном слое p-типа. Хотя разработки MRS APD и Micro-Well APD были остановлены, в развитие этого подхода была предложена концепция ЛФД на эффекте лавинного пробоя на острие (Tip APD, TAPD), и кремниевый фотоумножитель непланарной конструкции на основе заглубленного сферического p-n-перехода микронного размера был успешно разработан автором обзора в сотрудничестве с коллегами из НИЯУ МИФИ и КЕТЕК в 2021 г. [9,19,20,24]. Образцы TAPD показали рекордную квантовую эффективность  $PDE_{max} = 73\%$ , быстродействие (время восстановления 4 нс), широкий спектральный диапазон (400–800 нм при  $PDE > 45\%$ ) и широкий динамический диапазон (размер пикселя 15 мкм). Поэтому такая конструкция представляется серьезным конкурентом для современных планарных SiPM.

Для сравнения общей квантовой эффективности современных кремниевых фотоумножителей рассмотрим два типичных варианта планарной конструкции SiPM (Hamamatsu MPPC с разной специализацией за счет больших и малых размеров ячеек) и вариант непланарной конструкции SiPM (TAPD с широким динамическим диапазоном).

*Вариант 1:* MPPC-50 с размерами пикселя 50 мкм, все параметры соответствуют спецификации серии S14160-3050HS High detection efficiency MPPC for PET scanners. Эта серия оптимизирована на достижение наилучшего энергетического разрешения при детектировании вспышек сцинтилляторов (например, для PET сканеров, для детекторов частиц высоких энергий), т. е. на максимальную PDE за счет больших ячеек (малые потери активной площади на границах) и с минимальным оптическим кросстолком между ячейками за счет специальных светопоглощающих тренчей на границах ([https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/s14160\\_s14161\\_series\\_kapd1064e.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s14160_s14161_series_kapd1064e.pdf)).

*Вариант 2:* MPPC-15 с размерами пикселя 15 мкм, все параметры соответствуют спецификации серии S14160-1315PS Wide dynamic range MPPC, оптимизированную на достижение широкого динамического диапазона за счет малых размеров ячеек (большого числа ячеек на единицу площади), при сохранении достаточной эффективности для широкого круга задач ([https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/s14160-1310ps\\_etc\\_kapd1070e.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s14160-1310ps_etc_kapd1070e.pdf)).

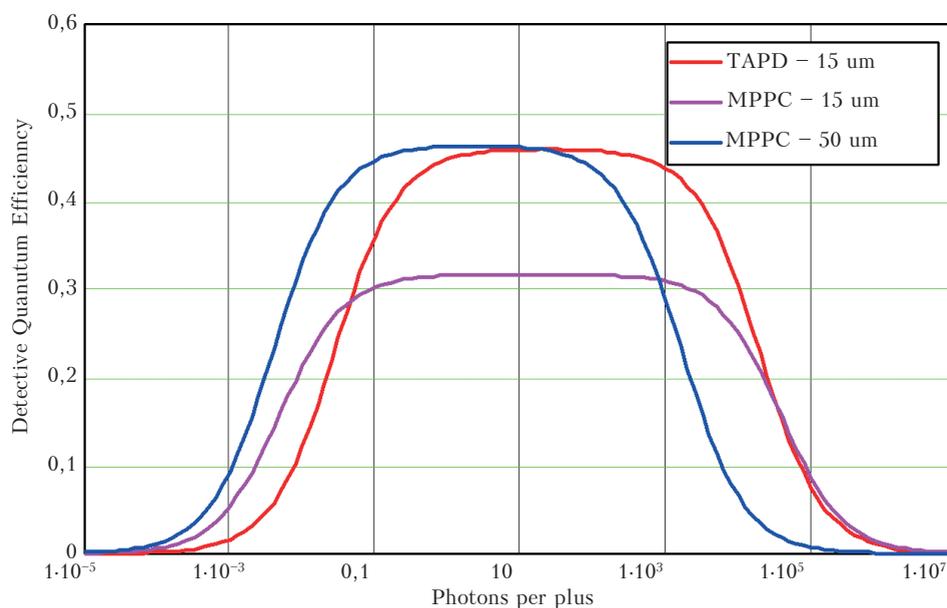
*Вариант 3:* TAPD-15 с размерами пикселя 15 мкм и площадью 1 мм<sup>2</sup>, все параметры соответствуют данным публикаций [9,19,20,24].

Параметры для расчета DQE современных SiPM собраны в табл.2.

**Табл.2.** Расчет общей эффективности детектирования  $DQE$  для современных SiPM на основе планарных  $p$ - $n$ -переходов и TAPD с заглубленными сферическими  $p$ - $n$ -переходами.

Тип SiPM	MPPC-50	MPPC-15	TAPD-15
Эффективность $PDE_{max}$	50%	32%	73%
Размер ячейки, мкм	50	15	15
Коэффициент умножения $M$	$2 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Вероятность кросстолка $P_{ct}$	7%	1%	30%
Темновой счет $DCR$ , Гц/мм <sup>2</sup>	$1 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^6$
Эффективность $DQE_{max}$	47%	31%	47%

Расчетные зависимости  $DQE$  от числа фотонов в импульсе по данным табл.2 представлены на рис.4.



**Рис.4.** Зависимость квантовой эффективности детектирования  $DQE$  для планарных SiPM (MPPC-50 и MPPC-15) и непланарной конструкции SiPM (TAPD-15) от среднего числа фотонов в импульсе по данным табл.2.

Расчетные графики показывают, что TAPD-15 имеет такой же уровень максимальной  $DQE$ , как и MPPC-50, то есть практически одинаковый уровень плато  $DQE$  в диапазоне оптимального детектирования от 1 до 100 фотонов. Это связано с более высокой вероятностью кросстолка в TAPD-15, шум-фактор которого нивелирует преимущества TAPD-15 перед MPPC-50 в более высокой эффективности  $PDE$ . При этом TAPD-15 примерно на порядок превосходит MPPC-50 по верхней границе динамического диапазона, что однозначно определяется на порядок более высокой плотностью ячеек (5000 ячеек TAPD-15 против 400 ячеек MPPC-50 на 1 мм<sup>2</sup>). Такой же динамический диапазон имеет MPPC-15, но с заметно пониженным уровнем плато  $DQE$ . Обе модели MPPC имеют преимущества на нижней границе динамического диапазона, что связано с их низким уровнем темнового счета благодаря более высокому технологическому уровню полупроводникового производства компании Hamamatsu по сравнению с компанией КЕТЕК.

## Заключение

В Части 2.2. Обзора рассматриваются показатели качества детекторов оптических сигналов и радиации, в которых одновременно учитываются сигнальные и шумовые характеристики случайных процессов преобразования входного сигнала, дается вероятностное описание таких показателей качества, как отношение сигнала к шуму и разрешения, порога чувствительности и обнаружительной способности. Отношение сигнала к шуму и разрешение – важные общепринятые показатели качества, удобные и необходимые в работе, однако они включают в себя статистику входного сигнала и потому не сосредоточены на оценке качества собственно детектора. Пороговые показатели недостаточно информативны, поскольку дают оценку работы детектора только в области пороговых сигналов. Общий шум-фактор  $ENF$  и общая квантовая эффективность детектирования  $DQE$  рассматриваются как универсальные показатели качества детектора в задачах регистрации числа фотонов в световых импульсах, типичных для этой прикладной области.

Применение разработанного подхода на основе  $ENF$  и  $DQE$  продемонстрировано в проведенном расчете и сравнительном анализе конкурентности различных типов фотодетекторов, а также современных моделей SiPM планарной и непланарной конструкции.

## Литература

1. В. Dolgoshein и др., «Large area UV SiPMs with extremely low cross-talk», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2012, Т. 695, pp. 40-43.
2. S. Vinogradov, E. Popova, «Status and perspectives of solid state photon detectors», *Nucl. Instruments Methods, Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2020, Т. 952, № 1, pp. 161752.
3. S. Vinogradov и др. «Efficiency of Solid State Photomultipliers in Photon Number Resolution», *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2011, Т. 58, № 1, pp. 9-16.
4. А.В. Akindinov и др. «New results on MRS APDs, Nucl. Instruments Methods», *Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 1997, Т. 387, № 1-2, pp. 231-234.
5. H. Barrett, K. Myers, «Poisson Statistics and Photon Counting, Foundations of Imaging Science.», New York, USA: Wiley-Interscience», 2003, pp. 1584.
6. R.E. Burgess, «Some topics in the fluctuations of photo-processes in solids», *J. Phys. Chem. Solids*, 1961, Т. 22, pp. 371-377.
7. P. Buzhan и др. «An advanced study of silicon photomultiplier», *ICFA Instrum.Bull.*, 2001, pp. 28-41.
8. P. Buzhan и др. «Silicon photomultiplier and its possible applications», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2003, Т. 504. № 1–3. pp. 48-52.
9. E. Engelmann и др. «Tip Avalanche Photodiode – A New Generation Silicon Photomultiplier Based on Non-Planar Technology», *IEEE Sens. J.*, 2021, Т. 21, № 5. pp. 6024-6034.
10. International Electrotechnical Commission (IEC). International Standard: Medical electrical equipment – Characteristics of digital X-ray imaging devices – Determination of the detective quantum efficiency (IEC 62220-1-3), под ред. IEC., 2008, pp. 1-72.
11. D. McNally, V. Golovin, «Review of solid state photomultiplier developments by CPTA and photonique SA» *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2009, Т. 610, № 1, pp. 150-153.
12. Z. Sadygov и др. «Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiodes: Their present status, maximum possibilities and limitations», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2006, Т. 567, № 1. pp. 70-73.
13. Z.Y. Sadygov и др., «Investigation of the possibility of creating a multichannel photodetector based on the avalanche MRS-structure», *SPIE Proc. Optical Memory and Neural Networks*, 1991, pp. 158-168.

14. J.E. Tkaczyk и др., «Detective quantum efficiency of an energy resolving photon counting detector», Proc. SPIE., 2008, Т. 6913, pp. 69130N-69130N-11.
15. S. Vinogradov и др., «Efficiency of solid state Photomultipliers in photon number resolution», 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC) : IEEE, 2009, pp. 1952-1958.
16. S. Vinogradov, «Probabilistic analysis of solid state photomultiplier performance», *Advanced Photon Counting Techniques VI.*, 2012a, pp. 83750S-83750S-9.
17. S. Vinogradov, «Analytical models of probability distribution and excess noise factor of solid state photomultiplier signals with crosstalk», Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.», 2012b, Т. 695, pp. 247-251.
18. S. Vinogradov, «Perfomance of Silicon Photomultipliers in photon number and time resolution», *Proceedings of International Conference on New Photo-detectors – PoS(PhotoDet2015). Trieste, Italy, IT: Sissa Medialab*, 2016, pp. 002.
19. S. Vinogradov и др., «Tip Avalanche Photodiode – A New Wide Spectral Range Silicon Photomultiplier», *Radiation Detection Systems. Boca Raton and London: CRC Press of Taylor & Francis Group*, 2021, 2nd Editio, pp. 257-288.
20. S. Vinogradov, «Tip Avalanche Photodiode – A spherical-junction SiPM concept», Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.» 2023, Т. 1045, pp. 167-596.
21. R.F. Wagner, E.P. Muntz, «Detective Quantum Efficiency (DQE) analysis of electrostatic imaging and screen-film imaging in mammography», SPIE Proc., под ред. J.E. Gray., 1979, pp. 162-167.
22. F. Wang и др., «How to characterize figures of merit of two-dimensional photodetectors» *Nat. Commun.*, 2023, Т. 14, № 1, pp. 1-9.
23. Виноградов С.Л. и др. Вероятностное распределение и шум-фактор сигналов твердотельных фотоэлектронных умножителей с учетом процессов кросс-толка // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. 2009. № 9. С. 3-13.
24. Виноградов С.Л. О разработке кремниевого лавинного фотоумножителя с рекордными параметрами. Наноиндустрия. 2023. Т. 16. № S9-2 (119). С. 457-462.

## Solid-State Detectors of Optical Signals and Radiation Part 2.2. Figures of Merit

Sergey Vinogradov (P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Scientific Production Company «Doza», Zelenograd, Moscow, Russia)

**Abstract.** In continuation of the second part of the review of solid-state detectors of optical signals and radiation, generalized figures of merit and competitiveness of different types of detectors are considered. The review emphasizes the probabilistic description of random detection processes in solid-state detectors with avalanche multiplication.

**Keywords:** photodiode, avalanche photodiode, silicon photomultiplier, signal-to-noise ratio, resolution, excess noise factor, threshold sensitivity, detective quantum efficiency.

С.Л. Виноградов (с.н.с., к.ф.-м.н.) – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва; НПП «Доза», г. Зеленоград

Контакты: +7 (499) 132-62-86; [vinogradovsl@lebedev.ru](mailto:vinogradovsl@lebedev.ru)