

ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ И ДРУГИЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**Повышение отношения сигнал/шум при лазерном измерении дальности путем подбора порога фотонного эквивалента мультипиксельного счетчика фотонов***

Г. Чзан, С. Янь

Для лазерного измерения дальности на основе мультипиксельного счетчика фотонов (МПСФ) предложен режим подбора порога фотонного эквивалента (ФЭ), продемонстрирован и проанализирован механизм влияния порога ФЭ на отношение сигнал/шум (ОСШ). Уникальная возможность регулировки порога ФЭ у МПСФ ведет к интересным для лазерного измерения дальности результатам. Экспериментальные результаты показывают, что ОСШ для лазерной системы измерения дальности существенно улучшается путем оптимизации порога ФЭ МПСФ, что полезно для вероятностей детектирования и ложной тревоги. Для некооперированных целей, находящихся на расстоянии в несколько метров, получено субмиллиметровое разрешение при определении дальности. Фотонное лазерное измерение дальности с наносекундным «мертвым временем» без стробирования удалось получить благодаря МПСФ с малой площадью пикселя. Определение дальности до многих целей одновременно достигается с одним МПСФ, а не с матрицей детекторов.

Ключевые слова: отношение сигнал/шум, мультипиксельный счетчик фотонов, порог фотонного эквивалента.

1. Введение

Лазерное измерение дальности важно во многих приложениях, таких как геоморфология, разведка, спорт, военное дело [1–3]. Для прямого измерения расстояний широко используется пролетное время (время распространения) лазерных импульсов [1–4]. Расширение возможностей измерения дальности было достигнуто с использованием сверхпроводящих однофотонных детекторов (ОФД) и лавинных фотодиодов (ЛФД) в качестве детекторов для лазерной дальнометрии [5–7]. При этом сверхпроводящие ОФД должны работать при криогенных температурах, что требует использования сравнительно сложных и громоздких установок [5, 6] и, таким образом, ограничивает их практическое применение в лазерной дальнометрии. ЛФД могут работать в двух режимах – линейном и режиме счетчика Гейгера. При работе в линейном режиме ЛФД имеют ограниченное усиление (обычно не более 1000), что затрудняет детектирование эхо-сигналов однофотонного уровня. Чувствительность приемников для лазерного измерения дальности была увеличена при использовании ЛФД в режиме счетчика Гейгера (в англоязычной литературе известно как SPAD – single photon avalanche photodiode) вследствие его экстремально высокой чувствительности [7–10]. Однако SPAD имеет ряд недостатков. Он действует как бинарный счетчик, не обладающий способностью к разрешению числа фотонов (РЧФ). С помощью SPAD можно определить, есть фотоны или нет, но нельзя выявить, сколько фотонов имеется в световом эхо-сигнале [11]. Более того,

интенсивность отраженного от цели импульсного светового сигнала, которая может быть важной для построения изображения при лазерной локации, не может быть точно реконструирована. Другим недостатком SPAD является наличие «мертвого времени», в течение которого он не функционирует, после обнаружения фотона [3]. Этот эффект может исказить истинное время прихода фотонов отраженного сигнала. В связи с этим необходимо использовать SPAD с меньшим «мертвым временем». К сожалению, ради сокращения «мертвого времени» приходится жертвовать чувствительностью, вероятностью возникновения послепулса и эффективностью детектирования фотона. Кроме того, для быстрого тушения лавины и минимизации влияния темновых отсчетов и послепульсных эффектов SPAD должен работать в режиме счетчика Гейгера со стробированием, когда к ЛФД приложено постоянное обратное смещение в комбинации с коротким электрическим отпирающим импульсом [12, 13]. В этом режиме работы SPAD не подходит для дальнометрии целей, находящихся на расстоянии, заранее не известном хотя бы приблизительно [8], т. к. нужно сканировать отпирающий импульс, синхронизуя его с отраженными от цели фотонами, что замедляет процесс определения дальности. Желательно, чтобы было можно измерять заранее не известное расстояние до цели без стробирования.

Для решения перечисленных выше проблем несколько исследовательских групп использовали в качестве детектора лазерного дальнометра новый тип фотонного счетчика, который в настоящее время находится в стадии разработки, а именно мультипиксельный счетчик фотонов (МПСФ) [10, 14]. Было достигнуто разрешение по дальности порядка 10 см для целей, удаленных на расстояние от десятков до сотен метров; «мертвое время» МПСФ составило ~100 нс. Однако факторы, влияющие на отношение сигнал/шум (ОСШ) для данной системы и определяющие вероятность детектирования и ложной тревоги у лазерного дальнометра или лидара, рассмотрены не были.

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

В настоящей работе предложена схема подбора порога фотонного эквивалента (ФЭ) для лазерной дальнометрии, продемонстрировано и проанализировано влияние порога ФЭ (Th) на ОСШ. Результаты показали, что ОСШ лазерной дальномерной системы заметно увеличивается при оптимизации Th для МПСФ.

2. Схема регулировки порога ФЭ для лазерной дальнометрии

МПСФ аналогичен фотонному умножителю, который может выдавать на выходе лавинные импульсы, пропорциональные числу фотонов, при условии, что поток фотонов находится в пределах области линейного отклика МПСФ, и в этом состоит его отличие от других лавинных детекторов. В области линейного отклика МПСФ является квазиидеальным приемником фотонов, в котором фотоны, детектируемые в определенные моменты времени, приближенно описываются известным распределением Пуассона. Это справедливо, если интенсивность отраженного от цели света постоянна в течение некоторого времени и M -фактор (произведение несущей частоты и длительности импульса) много больше единицы [15], что обычно выполняется при лазерном измерении дальности. Для реального детектора распределение Пуассона хорошо описывает также темновые отсчеты [9, 16]. Таким образом, вероятность импульса МПСФ, эквивалентного приходу k фотонов за некоторое время, выражается как

$$p_{ps}(k) = \frac{[(s+b)\eta + K_d]^k \exp[-(s+b)\eta - K_d]}{k!}, \quad (1)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$; $p_{ps}(k)$ – вероятность «детектирования k фотонов», или, точнее, события, эквивалентного приходу k фотонов (событие с фотонным эквивалентом k), применимость которой к МПСФ доказана во многих исследованиях [15, 17, 18]; s и b – среднее число фотонов эхосигнала и фона соответственно; η – эффективность регистрации фотона; K_d – число темновых отсчетов. Соответственно вероятность возникновения импульса МПСФ с фотонным эквивалентом k в отсутствие полезного эхосигнала есть

$$p_{ps}(k) = \frac{(b\eta + K_d)^k \exp[-(b\eta + K_d)]}{k!}. \quad (2)$$

При рассмотрении измерения дальности с использованием большого числа N лазерных импульсов ожидаемое число отсчетов $N_{with\ echo}$, для которых амплитуда ФЭ на выходе МПСФ превышает порог Th дискриминатора с учетом как эхо-фотонов, так и фоновых фотонов, а также темновых отсчетов, выражается как

$$\begin{aligned} N_{with\ echo} &= N \sum_{k=Th}^{\infty} p_{ps}(k) \\ &= N \sum_{k=Th}^{\infty} \frac{[(s+b)\eta + K_d]^k \exp[-(s+b)\eta - K_d]}{k!}. \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогичным образом ожидаемое число отсчетов с амплитудой выше Th в отсутствие эхо-сигнала есть

$$N_{no\ echo} = N \sum_{k=Th}^{\infty} \frac{(b\eta + K_d)^k \exp[-(b\eta + K_d)]}{k!}. \quad (4)$$

Величина Th часто устанавливается равной 0,5, 1,5, 2,5 ФЭ и т.д., чтобы избежать ошибки в определении числа детектируемых фотонов и таким образом исключить влияние электрического шума. ОСШ получается подстановкой (3) и (4) в формулу

$$SNR = \frac{N_{with\ echo} - N_{no\ echo}}{\sqrt{N_{with\ echo} + N_{no\ echo}}}. \quad (5)$$

Естественно ожидать, что, меняя Th , мы будем получать соответствующие изменения ОСШ. Как правило, фоновые фотоны и темновые отсчеты детектора распределены во времени случайно, а эхо-фотоны более сконцентрированы во времени, так что среднее число отсчетов, не связанных с эхом ($N_{no\ echo}$), за время счета должно быть значительно меньше числа отсчетов, вызванных эхо-фотонами. Таким образом, большая часть $N_{no\ echo}$ могла бы быть исключена при выборе Th равным нескольким ФЭ, и в результате ОСШ повысилось бы. В этом случае, конечно, пришлось бы пожертвовать определенным числом эхо-фотонов, но намного больше фотонов фона и темновых отсчетов были бы исключены, что будет доказано в разд.4. На практике для получения $N_{with\ echo}$ и $N_{no\ echo}$ нужно просто считать отсчеты в каждом временном интервале без использования формул (3) и (4).

3. Экспериментальная установка и метод исследования

Высказанная выше идея была апробирована, и характеристики предложенного режима были исследованы с использованием лазерной системы измерения дальности, включающей МПСФ и интегральную карту счета единичных фотонов с временной корреляцией (СЕФВК) SPC-150 (Becker & Hickl GmbH, Германия) со следующими параметрами: временная разрешающая способность 813 фс на один временной канал, насыщенная скорость счета 10 МГц. Схема установки показана на рис.1. МПСФ C11209-110 (Hamamatsu Photonics К.К., Япония) с площадью фоточувствительной поверхности 1×1 мм (10×10 мкм на каждый пиксель, всего 10^4 пикселей) с темновой скоростью счета (ТСС) 100 кГц при 25°C и рекомендованном напряжении смещения запускался отраженными фотонами пикосекундного лазерного источника PDL-800D (PicoQuant, Германия) (центральная длина волны 670 нм, длительность импульса на уровне половины максимума 44 пс, частота следования импульсов 31.125 кГц–80 МГц, максимальная средняя мощность излучения 0.7 мВт). Лазерные импульсы удлинялись расширителем пучка. Диффузно отраженный свет от некооперированной цели собирался системой линз и направлялся в МПСФ. Перед МПСФ был установлен узкополосный фильтр (центральная длина волны 670 нм, полоса пропускания 16 нм, оптическая плотность 4) для блокирования большей части фоновых фотонов. Лавинные сигналы отклика МПСФ сначала усиливались быстродействующим усилителем HSA-Y-2-40 (Femto Inc., США) (ширина полосы на уровне 3 дБ от 10 кГц до 1.9 ГГц, коэффициент шума 4.9 дБ, фиксированное усиление по напряжению 40 дБ, $100\times$), а затем сигнал подавался в канал «стоп» карты СЕФВК,

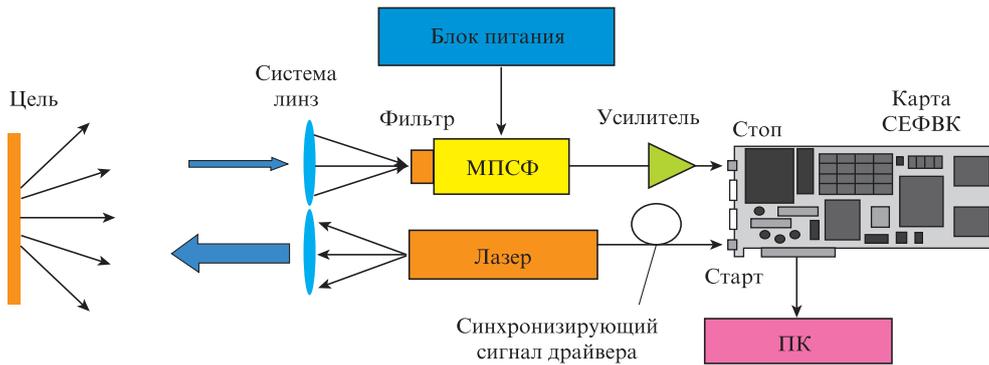


Рис.1. Схема лазерной установки для измерения дальности с МПСФ и интегральной картой SEFWK. Величина T_h устанавливается встроенным дискриминатором со следящим порогом (ДСП) карты SEFWK.

имеющий встроенный дискриминатор со следящим порогом (ДСП), который служил для установки величины T_h с целью оптимизации ОСШ при лазерном измерении дальности. Тем временем сигнал синхронизации от лазерного драйвера направлялся в канал «старт» карты SEFWK. Приняв сигнальный импульс в канале «старт», карта SEFWK записывала отметку времени и интервал времени, пока канал «стоп» не получал эффективный импульс от МПСФ. На карту SEFWK записывались десятки тысяч временных интервалов между импульсами двух каналов, после чего карта передавала данные статистической гистограммы этих временных интервалов на ПК. Затем получалась гистограмма кривой временного распределения с ясно выраженным пиком в случае приема эхо-сигнала от цели. Этот пик определял время прихода отраженных фотонов. При изменении T_h с помощью ДСП получалось множество гистограмм.

Расстояние между целью и так называемой эталонной целью определялось из следующего уравнения пролетного времени:

$$D = \frac{1}{2}c\Delta t = \frac{1}{2}c(t_t - t_{ref}), \quad (6)$$

где c – скорость света в атмосфере; t_t и t_{ref} – временные положения пиков излучения, отраженного от цели и от эталонной цели соответственно.

Кроме того, с помощью цифрового осциллографа DPO4102B-L (Tektronix Inc., США) с частотой дискретизации 5×10^9 выборок в секунду и шириной полосы 1 ГГц контролировались величина T_h и форма импульсов. Точность измерения дальности системой контролировалась с помощью портативного промышленного лазерного дальнометра SW-M-100 (Sndway Inc., Китай).

4. Результаты и их анализ

4.1. Анализ формы импульса и определение амплитуды T_h

Осциллограммы с синхронизирующим сигналом (сигнал «старт») и лавинным сигналом отклика МПСФ на приход единичных фотонов (сигнал «стоп») (рис.2) ясно демонстрируют множественные лавинные импульсы (1 ФЭ, 2 ФЭ, 3 ФЭ и т.д.) с хорошей разрешающей способностью МПСФ по числу фотонов. Благодаря этой способности, при относительно большом фоновом потоке фотонов было легко установить T_h с помощью ДСП так, чтобы оптими-

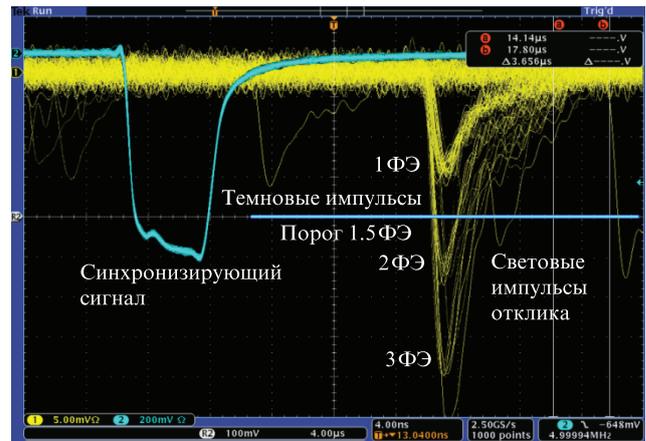


Рис.2. Экран осциллографа с синхронизирующим сигналом (сигнал «старт») и лавинным МПСФ-откликом на приход единичных фотонов (сигнал «стоп»).

зировать ОСШ лазерного дальнометра (см. п. 4.2). Указанная возможность установки T_h уникальна для МПСФ и непригодна для других детекторов на основе ЛФД. На рис.2 горизонтальная линия между 1 ФЭ и 2 ФЭ показывает уровень порога: $T_h = 1.5$ ФЭ. Кроме того, из рис.2 видно, что время нарастания лавинного импульса с амплитудой 1 ФЭ составляет ~ 500 пс, а длительность спада, определяющая «мертвое время», равна ~ 5 нс. Это гораздо меньше, чем даже у большинства промышленных SPAD с активным тушением [19, 20]. Столь малое «мертвое время» является следствием малой площади пикселя и, значит, малой его емкости, что способствует минимизации потерь при счете фотонов и повышению разрешения по дальности между двумя близкими целями.

4.2. Результаты дальнометрии множественных целей и влияние T_h на ОСШ дальнометра

Гистограммы кривых распределения для временных интервалов между импульсами «старт» и «стоп», построенные картой SEFWK в полдень солнечного дня, показали, что фоновая освещенность в лаборатории составляла около 1000 лк, тогда как наблюдаемые фоновые отсчеты были очень малы (рис.3). Это происходило потому, что величина T_h была установлена равной 3.5 ФЭ, и это позволяло исключить большую часть фона и темновых отсчетов. Сплошная кривая показывает распределение временных интервалов выходных импульсов от МПСФ,

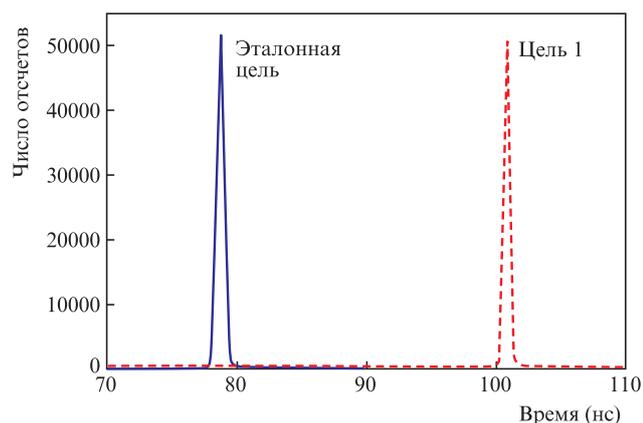


Рис.3. Гистограммы временных интервалов между импульсами «старт» и «стоп», приходящими на карту СЕФВК. Время накопления 60 с, частота следования лазерных импульсов 1 МГц; средняя мощность излучения установлена такой, чтобы избежать насыщения МПСФ.

запущенных фотонами, отраженными от эталонной цели (небольшая некооперированная пластина из пластика), или фоновыми фотонами, или темновыми носителями самого МПСФ. Штриховая кривая показывает распределение лавинных импульсов МПСФ, запущенных эхо-фотонами от цели 1 (стена). Расстояние между целью 1 и эталонной целью было рассчитано по формуле (6) с использованием разности времен между двумя пиками на рис.3, как показано ниже.

Три важных результата были получены при анализе трех пиков временного распределения импульсов от трех целей при различных уровнях Th ; цель 1 была самой дальней, а цель 3 – самой близкой (рис.4). Первый результат заключается в том, что ОСШ увеличивается при увеличении Th , поскольку число фоновых отсчетов, очевидно, намного меньше при $Th = 1.5 \Phi Э$, чем при $Th = 0.5 \Phi Э$. По данным на рис.3, с помощью формулы (5) было рассчитано ОСШ. Например, для цели 2 ОСШ составило 32 при Th , равном $0.5 \Phi Э$. При Th , равном $1.5 \Phi Э$, ОСШ достигало ~ 38.2 , хотя при этом приходилось жертвовать определенным числом полезных эхо-фотонов. Практически, оптимальный уровень Th должен быть результатом компромисса между стремлением исключить фоновые (ложные) отсчеты и избежать слишком большой потери фотонов эхо-сигнала. Данные результаты указывают на способ оптимизации вероятностей детектирования и ложной тревоги, являющихся ключевыми параметрами лазерных дальномеров и лидаров.

Второй результат состоит в достижении субмиллиметровой точности измерения дальности. Если временное положение пика каждого импульса рассматривать как истинное время прихода эхо-фотонов от целей, то расстояния между этими целями и эталонной целью вычисляются на основе данных рис.4 по формуле (6) и составляют 3318.3, 2641.1 и 1420.0 мм для целей 1, 2 и 3 соответственно. Поскольку временное разрешение карты СЕФВК равнялось 813 фс [21], что соответствует ошибке 0.24 мм в определении расстояния, то ожидался субмиллиметровый уровень точности измерения дальности. Для проверки этой точности нужно было сравнить наши результаты с полученными при использовании более точного лазерного дальномера. Однако доступный нам лазерный дальномер обладал точностью всего лишь ± 0.5 мм. Значения

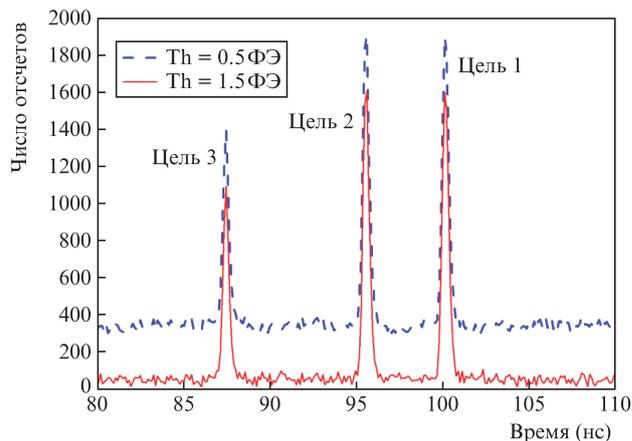


Рис.4. Временное распределение эхо-фотонов от трех целей при различных значениях Th . Цель 1 – стена лаборатории, цели 2 и 3 – две небольшие белые доски, частично перекрывающие пучок лазерного излучения. Время накопления данных 2 с.

дальности, полученные с помощью этого лазерного дальномера, составили 3318 ± 0.5 , 2641 ± 0.5 и 1419 ± 0.5 мм соответственно, что хорошо согласуется с результатами измерений с помощью предлагаемой системы.

Третий результат заключается в том, что измерение дальности многих целей сразу было осуществлено с одним МПСФ, а не с матрицей детекторов [10].

Стоит отметить, что в течение всего процесса измерений стробирование для исключения фоновых фотонов или для повышения ОСШ не применялось, что важно при лазерной дальнометрии, когда приблизительная дальность цели неизвестна. Это возможно, поскольку если один ЛФД-пиксель МПСФ «запустился» фоновым фотоном или темновым носителем и еще не восстановился, другие ЛФД-пиксели готовы зарегистрировать приходящие фотоны. Таким образом сокращается эффективное «мертвое время» и ослабляется нежелательное влияние фоновых фотонов и темновых отсчетов, а также послеимпульсов. Кроме того, РЧФ-способность МПСФ позволяет легко получать информацию об интенсивности отраженного сигнала и в то же время о дальности цели, что в равной степени полезно для формирования изображений при лазерной локации.

5. Заключение

Предложен способ установки Th при лазерном определении дальности на основе МПСФ. Продемонстрировано влияние значения Th на ОСШ и изучен его механизм. Величина ОСШ существенно увеличена путем оптимизации Th МПСФ, что положительно влияет на вероятности детектирования и ложной тревоги. Дальность нескольких целей одновременно удалось измерить одним МПСФ. Достигнуто субмиллиметровое разрешение по дальности для некооперированных целей, находящихся на расстоянии в несколько метров. При использовании МПСФ с малой площадью пикселя удалось достичь наносекундного «мертвого времени» и провести однофотонное лазерное измерение дальности без стробирования.

Финансирование осуществлялось Национальным фондом естественных наук Китая (№11405119 и 61405151) и Основным планом естественнонаучных исследований провинции Шэньси, Китай (грант № 2014 JQ8364).

1. Blais F. *J. Electron Imaging*, **13** (1), 231 (2004).
2. Warburton R.E., McCarthy A., Wallace A.M., Hernandez-Marin S., Hadfield R.H., Nam S.W., Buller G.S. *Opt. Lett.*, **32** (15), 2266 (2007).
3. Oh M.S., Kong H.J., Kim K.H., Jo S.E., Kim B.W., Park D.J. *J. Opt. Soc. Am. A*, **28**, 759 (2011).
4. McCarthy A., Collins R.J., Krichel N.J., Fernández V., Wallace A.M., Buller G.S. *Appl. Opt.*, **48** (32), 6241 (2009).
5. Warburton R.E., McCarthy A., Wallace A.M., Hernandez-Marin S., Hadfield R.H., Nam S.W., Buller G.S. *Opt. Lett.*, **32** (15), 2266 (2007).
6. Lobanov Y., Shcherbatenko M., Semenov A., Kovalyuk V., Kahl O., Ferrari S., Korneev A., Ozhegov R., Kaurova N., Voronov B.M., Pernice W.H.P., Gol'tsman G.N. *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, **27** (4), 2200705 (2017).
7. Albota M.A., Heinrichs R.M., Kocher D.G., Fouche D.G., Player B.E., O'Brien M.E., Aull B.F., Zayhowski J.J., Mooney J., Willard B.C., Carlson R.R. *Appl. Opt.*, **41** (36), 7671 (2002).
8. Oh M.S., Kong H.J., Kim T.H., Kim K.H., Kim B.W., Park D.J. *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 033109 (2010).
9. Ren M., Gu X.R., Liang Y., Kong W.B., Wu E., Wu G., Zeng H.P. *Opt. Express*, **19**, 13497 (2011).
10. Gatt P., Johnson S., Nichols T. *Appl. Opt.*, **48** (17), 3261 (2009).
11. Kyu Tak Son, Chin C. Lee. *IEEE Trans. Instrum. Measurement*, **59** (11), 3005 (2010).
12. Zhang J., Thew R., Barreiro C., Zbinden H. *Appl. Phys. Lett.*, **95** (9), 091103 (2009).
13. Zhang J., Eraerds P., Walenta N., Barreiro C., Thew R., Zbinden H. arXiv: 1002.3240v1 [quant-ph], (2010).
14. Adamo G., Busacca A. *AEIT Internat. Annual Conf.* (Capri, Naples, 2016).
15. Goodman J.W. *Statistical Optics* (New York: Wiley, 1985).
16. Renker D., Lorenz E. *J. Instrument.*, **4**, 1 (2009).
17. http://www.hamamatsu.com/us/en/community/optical_sensors/articles/measuring_characteristics_of_mppc/index.html, Accessed 19 June, 2017.
18. Acerbi F., Ferri A., Zappala G., Paternoster G., Picciotto A., Gola A., Zorzi N., Piemonte C. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **62** (3), 1318 (2015).
19. <http://www.idquantique.com/photon-counting/photon-counting-modules/id100/>, Accessed 19 June, 2017.
20. Ren M., Wu G., Wu E., Zeng H.P. *Laser Phys.*, **21** (4), 755 (2011).
21. <http://www.becker-hickl.com/spc150.htm>, Accessed 25 June, 2017.