

УДК 53.082.52

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В РЕЖИМЕ СЧЕТА ФОТОНОВ

*К.Р. Каримуллин, В.А. Зуйков, В.В. Самарцев*

### Аннотация

В статье обсуждается метод регистрации слабых оптических импульсов в режиме счета фотонов. Описываются основные принципы счета фотонов, приложения данного метода и блок-схемы соответствующих экспериментальных установок, а также основные характеристики фотоэлектронных умножителей. В данной статье нашли отражение существующие экспериментальные методики: синхронизированный счет фотонов с прерыванием, время-разрешенный счет фотонов и время-коррелированный счет фотонов. Рассматривается приложение данного метода, как наиболее точного, быстродействующего и удобного метода регистрации, для детектирования сигналов фотонного эха в экспериментальной установке «оптический эхо процессор». Описан счетчик фотонов (разработка Казанского государственного университета) и достигнутый экспериментально режим счета отдельных фотонов.

### Введение

В настоящее время все более популярными в разнообразных областях, включая физику, биологию, химию, медицину, анализ материалов, становятся низкоэнергетические методы неразрушающего контроля. Особое внимание уделяется технологиям обнаружения световых сигналов низкой интенсивности, так как они эффективны, высокоточны и очень чувствительны и не изменяют при этом свойства объектов. Биологические и биохимические исследования, например, используют измерения слабых оптических сигналов флуоресценции от помеченных краской клеток. В медицинской диагностике методики используются для исследования крови, подсчета кровяных телец, гормонального контроля, диагностики рака и различных инфекционных заболеваний [1]. В методах RIA (radioimmunoassay) [2] при иммунологических исследованиях, использующих радиоизотопы, радиоизлучение из образца преобразовывается в свет, который должен измеряться с высокой чувствительностью. В биологических приложениях важным является точное обнаружение гена рецептора. Гены помечаются флуоресцирующими или люминесцирующими субстанциями для того, чтобы, зарегистрировав свет, можно было отметить местоположение частицы. Фотоэлектронные умножители, фотодиоды и ФПЗС-сенсоры широко используются в качестве «глаз» при обнаружении света малой интенсивности. В большинстве приложений эти устройства преобразуют свет в аналоговые электрические сигналы, которыми легко оперировать. Однако, когда уровень световых импульсов становится настолько малым, что их можно считать отдельными фотонами, наиболее предпочтительно использовать фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Такой метод регистрации особенно эффективен, когда интервалы времени между сигнальными импульсами больше, чем временное разрешение ФЭУ. Метод счета фотонов при помощи высокочувствительных фотоэлектронных умножителей представляется сегодня наиболее предпочтительным методом регистрации оптических сигналов при решении широкого круга научных задач, в том числе и для

экспериментов в области оптической эхо-спектроскопии с точки зрения устойчивости, эффективности и высокого отношения сигнал-шум.

## 1. Метод счета фотонов

**1.1. ФЭУ в режиме счета фотонов.** Зарегистрировать один вышедший из фотокатода электрон практически невозможно (1 фотоэлектрон в секунду соответствует току  $1.6 \cdot 10^{-19}$  А). Принципиальным для техники наблюдений слабых оптических импульсов явилось изобретение фотоэлектронного умножителя – прибора, обладающего возможностью усиления фототока катода в миллионы раз.

Каждый фотоэлектрон вызывает лавину электронов, содержащую в момент прихода на анод ФЭУ в среднем  $G$  электронов ( $G$  – коэффициент усиления ФЭУ), с общим зарядом  $eG$  ( $e$  – заряд электрона). Следовательно, 1) число лавин электронов или, иначе, импульсов ФЭУ в единицу времени  $n$  пропорционально потоку фотонов  $n_{ph}$ , 2) полный заряд, приходящий на анод в секунду (или анодный фототок), составляющий  $eGhn_{ph}$ , также пропорционален  $n_{ph}$ .

Эти два обстоятельства и определяют два основных метода регистрации сигнала ФЭУ. Исторически первый называется методом измерения постоянного тока и заключается в измерении среднего значения протекающего через нагрузку  $R_L$  тока.

Второй способ может быть реализован при малых значениях постоянной времени  $t_e$  выходной цепи. В этом случае сигнал на сопротивлении  $R_L$  представляет собой последовательность отрицательных импульсов напряжением длительностью  $t$  со средней амплитудой  $h = eGR_L/\tau$ . Каждый такой импульс может быть отдельно обнаружен, а значит, подсчитано их общее число за единицу времени. Этот способ регистрации называется методом счета фотонов. Важной особенностью этого метода является неизбежное наличие критерия обнаружения импульса. Обычно это так называемая дискриминация, то есть сравнение электрического сигнала с неким пороговым уровнем  $T$ , превышение которого интерпретируется как наличие пригодного для дальнейшей регистрации импульса.

Метод счета фотонов обладает рядом преимуществ: линейность в большом диапазоне измеряемых интенсивностей, высокая точность (достижима точность, при которой ошибка измерения определяется только статистическими флуктуациями потока фотонов, поскольку все фотоны «считаются» с одинаковым статистическим весом), удобство для дальнейшей обработки и выдачи информации, возможность уменьшения темнового тока за счет отбора темновых импульсов по амплитуде.

Зависимость выходного сигнала (скорости счета  $n$ , имп/с) от напряжения питания  $U_{пит}$  называется счетной характеристикой фотоумножителя (рис. 1, а).

Другая важная характеристика ФЭУ – амплитудное распределение выходных импульсов  $n(A)$ , где  $n$  – число импульсов на выходе ФЭУ с амплитудой от  $A$  до  $A + \delta A$ . На рис. 1, б приведены типичные зависимости  $n(A)$  для сигнальных и темновых импульсов (кривые 1 и 2 соответственно). Поведение функции от 0 до  $A_1$  определяется импульсами, которые возникают в результате термоэмиссии электронов с динодов. Для  $A > A_1$  зависимость  $n_t(A)$  определяется в основном импульсами, которые возникают в результате усиления катодных термоэлектронов. В этом случае  $n_t(A)$  имеет вид распределения Пуассона со средней амплитудой  $A_2$ . Если установить на выходе ФЭУ пороговую схему (дискриминатор), которая не пропустит импульсы с амплитудой  $A < A_d = A_1$ , то можно избавиться от динодных импульсов. Амплитудное распределение импульсов  $n(A)$  является дифференциальной характеристикой, т. е.  $n(A)\delta A = N(A + \delta A) - N(A)$  или  $n(A) = dN/dA$ , где  $N(A)$  – число импульсов с амплитудой, меньшей чем  $A$ . Если измерить на выходе ФЭУ число импульсов, прошедших пороговую схему с уровнем дискриминации

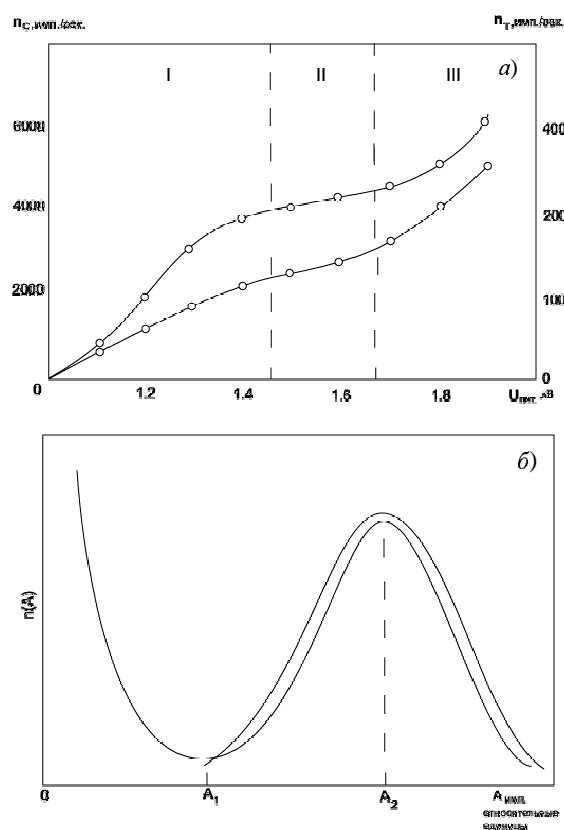


Рис. 1. Счетная характеристика и амплитудное распределение выходных импульсов ФЭУ

$A_d$ , то, изменяя  $A_d$ , можно получить  $N(A_d) \sim \int_{A_d}^{\infty} n(A) dA$ , весьма похожее по форме на зеркальное отражение счетной характеристики. При этом точка  $A_1$  будет соответствовать минимуму производной  $dN/dA$ , а точка  $A_2$  – максимуму.

Счетную характеристику можно считать аналогом амплитудного распределения. Счетная характеристика снимается при постоянном уровне дискриминации  $A_d = \text{const}$ , но при изменяющемся напряжении питания  $U_{\text{пит}}$ , а амплитудные распределения – наоборот: при  $U_{\text{пит}} = \text{const}$ , но при изменяющемся  $A_d$ . Амплитуды импульсов на выходе ФЭУ определяются средним коэффициентом усиления  $K_y$  ФЭУ. По счетным характеристикам (линейный участок II) выбирается рабочее напряжение питания ФЭУ  $U_p$ .

**1.2. Счетчик фотонов.** Кроме ФЭУ в состав счетчика фотонов входят также усилитель выходных импульсов ФЭУ, дискриминатор-формирователь выходных импульсов, который создает импульсы формы и амплитуды, необходимой для введения их в счетчик импульсов; счетчик импульсов, измеряющий число импульсов за установленный промежуток времени и выдающий результат в удобном для обработки виде (на табло, на перфоратор, на цифropечать или непосредственно в ЭВМ), блоки питания ФЭУ, усилителя, дискриминатора (см. рис. 2).

Существуют два метода обработки сигнала в режиме счета фотонов: первый использует счетчик фотонов, а другой – многоканальный анализатор импульсов (МСА) [3]. На рис. 2 показана конфигурация каждого метода и формы импульсов.

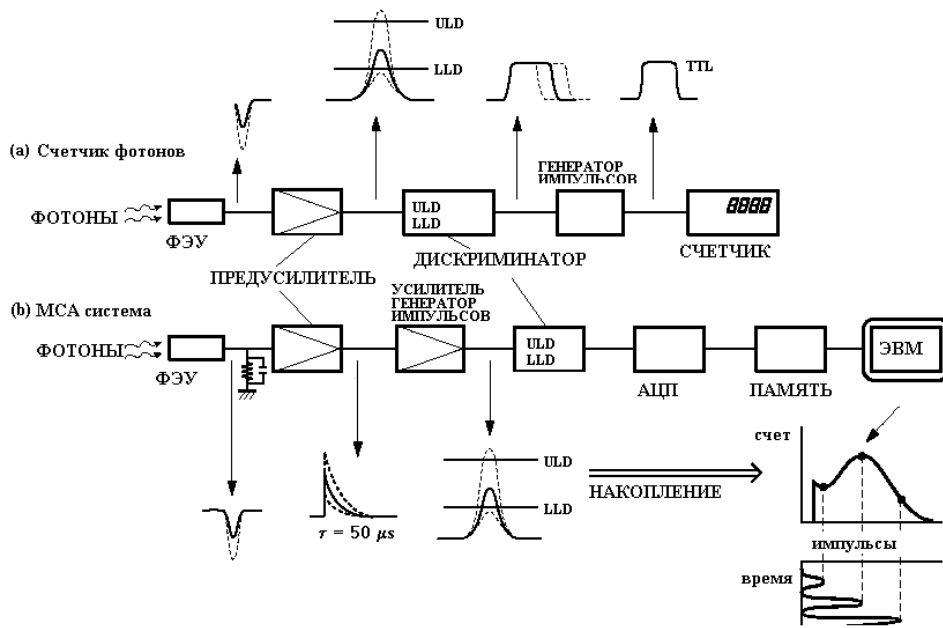


Рис. 2. Блок схема системы счета фотонов

В системе счетчика фотонов (рис. 2, а) выходной импульс ФЭУ усиливается предусилителем. Усиленный импульс направляется в дискриминатор. Дискриминатор сравнивает его с заданными верхним и нижним уровнями (LLD и ULD) и дает на выходе стандартные TTL (ECL) импульсы 0–5 В. Генератор импульсов формирует меандры, позволяющие счетчику различать отдельные импульсы.

В системе МСА (рис. 2, б) выходной импульс ФЭУ сразу усиливается и дискриминируется в зарядово-чувствительном предусилителе. Этот импульс усиливается линейным усилителем и преобразуется в АЦП. Затем сигналы обрабатываются ЭВМ и выводятся на дисплей. Эта система способна одновременно различать импульсы по величине и по частоте появления.

Система счетчика фотонов используется для измерения числа импульсов с ФЭУ, соответствующих регистрации отдельных фотонов, в то время как система МСА используется, чтобы измерить величину каждого импульса и их число одновременно. Первая система предпочтительнее при подсчете скорости и поэтому используется для экспериментов общего плана. Система МСА имеет недостаток, заключающийся в неспособности регистрировать сильные по величине сигналы, и используется для экспериментов, связанных с анализом формы импульса.

## 2. Методы фотонного счета

**2.1. Синхронно-модулированный счет фотонов.** В этом методе для периодического прерывания процесса регистрации используется механический модулятор (прерыватель), а сам процесс регистрации синхронизируется с работой прерывателя. Сигнальный и шумовой импульсы регистрируются одновременно в течение времени, когда свет проходит в трубу ФЭУ, в то время как шумовые импульсы подсчитываются в течение короткого времени прерывания. Затем шумовой сигнал вычитается. Этот метод эффективен, когда присутствует сильный световой шум или когда измеряются световые импульсы чрезвычайно низкой интенсивности.

**2.2. Времяразрешенный счет фотонов.** Этот метод использует импульсный источник света для измерения временных изменений повторяющихся сигналов. Измеренные в различные временные интервалы сигналы суммируются, и воспроизводится временная форма сигнала в целом. Этот метод очень удобен для измерения быстропеременных событий.

**2.3. Времякоррелированный счет фотонов** (time-correlated photon counting (TCPC)) [4]. Спектроскопия одиночных фотонов – это метод детектирования флуоресцентных времен жизни во временном диапазоне от пикосекунд до микросекунд. Обычно при этом образец вещества возбуждается лазером с частотой повторения импульсов порядка 100 кГц. Спектральное распределение излучения обычно покрывает ИК, видимый и УФ-диапазоны. Особенно важно исследование красителей, которые флуоресцируют в голубой, зеленой и красной частях спектра (и в области свыше 700 нм). В качестве источника возбуждения часто используется титан-сапфировый лазер с синхронизацией мод и высокой частотой повторения импульсов. Информация о флуоресцентных временах жизни записывается обычно в виде логарифмической кривой. Данный метод обладает хорошим разрешением внутри ширины импульса, однако требует наличие высокоскоростного ФЭУ и усилителя, системы МСА и специальной электроники.

### 3. Счетчик фотонов в оптическом эхо-процессоре

При накачке оптического кристалла маломощным лазером непрерывного действия возникающие сигналы фотонного эха являются очень слабыми. Регистрация таких сигналов в экспериментальной установке «оптический эхо-процессор» будет производиться за счет многократного повторения актов возбуждения и накопления сигналов эха в специальном устройстве – «счетчике фотонов».

Счетчик фотонов – прибор, специально разработанный для исследований в области фотонной эхо-спектроскопии. Счетчик позволяет реализовывать последовательности трех типов: первичное эхо, стимулированное и долгоживущее эхо, аккумулярованное эхо. Прибор управляет работой акустооптического модулятора (АОМ), задавая последовательность возбуждающих импульсов, производит считывание сигнала с ФЭУ, синхронизирует работу ФЭУ и АОМ, оцифровывает и отправляет в ПК экспериментальные данные. Программа «Интерфейс счетчика фотонов» предназначена для совместной работы с электронным блоком счетчика фотонов. Программа позволяет проводить настройку экспериментальной последовательности импульсов и стробов, генерируемых электронным блоком для взаимодействия с внешними оптико-электронными устройствами; передавать параметры последовательности на электронный блок и принимать значения количества импульсов-фотонов, подсчитанных электронным блоком; сохранять результаты выполнения последовательности в файле с возможностью последующего просмотра и обработки.

Программа позволяет работать в трех режимах:

- режим настройки предназначен для визуальной наладки системы;
- режим определения формы импульса. Этот режим предназначен для автоматического выполнения эксперимента в целом с учетом заданных параметров и автоматического сканирования строба для определения формы светового сигнала;
- режим меняющихся интервалов. В этом режиме определяется интенсивность светового сигнала в зависимости от длительности интервалов между импульсами накачки и между последним импульсом и стробом.

К настоящему времени проведены тестовые испытания по определению формы импульсов, подаваемых на ФЭУ в режиме счета фотонов, экспериментально достигнут режим регистрации отдельных фотонов [5].

### Заключение

Таким образом, показано, что метод счета фотонов является наиболее предпочтительным для регистрации слабых оптических сигналов, в том числе и сигналов фотонного эха при возбуждении активной среды лазером непрерывного действия. Метод позволяет исследовать амплитудные, временные и спектральные характеристики эхо-сигналов. Счетчик фотонов может использоваться в качестве детектора в оптических эхо-процессорах и устройствах фазовой памяти за счет быстродействия, чувствительности, точности и удобного способа обработки экспериментальных данных.

Работа выполнена в рамках грантов: РФФИ (№ 04-02-81009-Бел2004-а, 04-02-16932-а, 05-02-16003-а, 05-02-16169-а, 04-02-17082-а), МНТЦ (№ 2121), при поддержке программой Президиума РАН «Квантовая макрофизика» и ОФН РАН «Оптическая спектроскопия и стандарты частоты».

### Summary

*K.R. Karimullin, V.A. Zuykov, V.V. Samartsev.* Detection of the pulses of light under the photon counting mode.

The method of registration of weak light pulses in a mode of the photon counting is discussed. The general principles of the photon counting, the necessary experimental equipment and possible techniques of the counting are considered. The methods of photon counting, namely, synchronous photon counting using chopper, time-resolved photon counting and time-correlated photon counting (TCPC) is described. The basic characteristics of the photon counting are described. The appendix of techniques of the photon counting for experiments in the field of a photon echo is considered. The Photon Counter (worked out in Kazan State University) and obtained low-level light registration experiment are described.

### Литература

1. *Chen Y., Muller J.D., So P.T.C., Gratton E.* The photon counting histogram in fluorescence fluctuation spectroscopy // *Biophys. J.* – 1999. – V. 77. – P. 553–567.
2. *Malison R.T., Laruelle M., Innis R.B.* Positron and single photon emission tomography // Bloom F.E., Kupfer D.J. (eds). *Psychopharmacology: The Fourth Generation of Progress.* – N. Y: Raven Press, 1995. – P. 865–879.
3. Hamamatsu technical information // Photon counting using photoelectron tubes. – Hamamatsu Photonics K.K, Japan, 1998.
4. Boston electronics technical information // What is time correlated single photon counting? – Boston: Boston electronics corporation, 2002.
5. *Каримуллин К.Р., Зуйков В.А., Самарцев В.В.* Экспериментальная установка «Оптический эхо-процессор» // *Когерентная оптика и оптическая спектроскопия.* Сб. тр. – Казань, 2004. – С. 301–308.

Поступила в редакцию  
20.01.06

---

**Каримуллин Камиль Равкатович** – магистрант физического факультета Казанского государственного университета, лаборант-исследователь лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КНЦ РАН.

**Зуйков Владимир Александрович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КНЦ РАН.

**Самарцев Виталий Владимирович** – доктор физико-математических наук, академик РАН, профессор, заведующий лабораторией нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КНЦ РАН.

E-mail: *samartsev@kfti.knc.ru*