

УДК 621.375+621.391.26

С. С. Ветохин, проф., канд. физ.-мат. наук; Аунг Тхант Вин  
(БГТУ, Минск)

## **ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ЗАРЯДОВ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ ИМПУЛЬСОВ**

В счетчиках фотонов выходные сигналы детектора принято называть одноэлектронными импульсами, поскольку каждый из них вызван отдельным фотоэлектроном, выбитым зарегистрированным фотоном из фотокатода. Такие импульсы несут информацию об обнаруженных фотонах, и мощность регистрируемого сигнала пропорциональна числу одноэлектронных импульсов в единицу времени – скорости счета импульсов.

Область применения счетчиков фотонов в настоящее время весьма обширна: астро- и биофизика, оптическая связь, квантовая криптография и проч. [1, 2]. Точность измерения светового сигнала определяется квантовым шумом самого сигнала [3, 4], что является фундаментальным ограничением. Однако для реального счетчика фотонов и эта точность недостижима в силу далеко не стопроцентной квантовой эффективности фотокатода и наличия неустранимых собственных темновых сигналов квантового фотоприемника.

Другая проблема счетчика фотонов состоит в малой величине одноэлектронного импульса, поскольку фотоэлектрон имеет заряд только  $10^{-19}$  Кл, что на несколько порядков ниже уровня тепловых шумов входного каскада любого усилителя.

Такая ситуация требует применения квантовых методов умножения фотоэлектронов до приемлемого для последующей обработки радиотехническими средствами. В качестве механизмов умножения в настоящее время применяется вторичная электронная эмиссия в вакууме в условиях разгона умножаемых электронов до энергий порядка  $10^2$  эВ и лавинный процесс в полупроводниках.

В первом случае систему умножения необходимо делать многокаскадной, поскольку коэффициент вторичной эмиссии для большинства пригодных материалов не превышает десяти, что требует высоковольтных и высокостабильных источников питания. Реализуемый в современных фотоприемниках с многокаскадным умножителем (фотоэлектронный умножитель – ФЭУ) коэффициент усиления достигает  $10^6$ - $10^9$  при напряжениях питания от 1 до 3 кВ.

Во втором случае (лавинные фотодиоды – ЛФД) коэффициент усиления в лучшем случае составляет  $10^3$ , что создает проблемы обработки одноэлектронных импульсов.

Процесс «усиления» фотоэлектрона также сопровождается квантовой неопределенностью, в результате чего амплитуды одноэлектронных импульсов приобретают довольно широкое статистическое распределение. Для «хороших» ФЭУ это распределение подобно пуассоновскому с параметром 2-5, а для ЛФД это распределение ближе к экспоненциальному. Это создает проблему отделения одноэлектронных импульсов от темновых, амплитудные распределения которых перекрываются. В этой связи регистрируемый сигнал можно рассматривать как шумоподобный, а процедуру отбора – непараметрической.

Тем не менее существует возможность оптимизации процесса отбора таких сигналов путем амплитудной дискриминации импульсов малых амплитуд, среди которых пропорция темновых существенно выше [5]. Поэтому повышение точности измерения слабых световых сигналов связано с улучшением эффективности амплитудного отбора.

Подобная задача в настоящее время успешно решена в области ядерной спектроскопии путем активного интегрирования зарядов отдельных импульсов [6]. Однако в счетчиках фотонов из-за малой длительности одноэлектронных импульсов (десятки наносекунд против микросекунд в сцинтилляционных детекторах) привычные методы интегрирования на интегральных операционных усилителях долгое время считались неприемлемыми.

Появление новых усилителей с полосой единичного усиления до нескольких десятков мегагерц частично решило проблему, по меньшей мере для скоростей счета порядка  $10^4 \text{ с}^{-1}$  [7, 8]. При этом для широкодиапазонных счетчиков фотонов по-прежнему есть необходимость конструирования широкополосных дифференциальных усилителей для построения интеграторов, способных обрабатывать сигналы со скоростями нарастания до  $10^3 \text{ В/с}$  [9]. Лучшее всего этим целям могли бы отвечать однокристалльные транзисторные сборки, а в перспективе – графеновые полевые транзисторные структуры, экспериментальные образцы которых уже появляются [10].

При этом промышленностью уже освоен выпуск интегральных операционных усилителей с частотными свойствами, удовлетворительными для нескоростных счетчиков фотонов на фотоэлектронных умножителях, одноэлектронные импульсы которых имеют длительность 10-

20 нс. Большинство из них проектируются на комплементарных биполярных транзисторах.

Изделия с приемлемыми характеристиками разрабатываются в Беларуси для последующего производства на НПО «Интеграл» [11]. В частности, операционный усилитель ОАmp9 продемонстрировал в режиме повторителя время переключения в пределах 10 нс. Предельная скорость нарастания выходного напряжения для него была 0,7-0,9 В/нс в зависимости от схемы включения корректирующих цепей. Однако обеспечиваемый коэффициент усиления этой схемы составил только  $2 \cdot 10^3$ .

Подобный усилитель с пониженным уровнем шумов ОАmp10 [11] обладал скоростью нарастания выходного напряжения до 0,4 В/нс при максимальном коэффициенте усиления по напряжению  $10^6$ .

Фирма Analog Devices изготовила [12] линейку быстродействующих приборов с различными технологическими маршрутами: AD797, ADA4857, AD8000, AD8007 AD8009. Среди них рекордными параметрами по скорости нарастания (1,4 В/нс) обладают изделия AD8055A и AD8056A при невысоком коэффициенте усиления по напряжению (менее 1000), что может быть достаточно в быстродействующих цифровых системах, на слишком мало для аналоговых измерительных цепей.

Таким же недостатком обладают сверхбыстродействующие усилители фирмы National Semiconductor LM6172 (скорость нарастания 3 В/нс, усиление  $3 \cdot 10^3$ ) и LM7171 (4,2 В/нс и  $2 \cdot 10^3$ , соответственно).

Конкурентоспособными выглядят операционные усилители российского НПП «ПУЛЬСАР» [13]. В частности, изделие К1432УД1АР демонстрирует скорость нарастания выходного сигнала до 1 В/нс, К1432УД8Р – 1,4 В/нс, К1432УД11Р – 2 В/нс, а К1432УД16 – до 1 В/нс при обратной связи по напряжению. Однако и для них коэффициент усиления невелик.

Таким образом, в настоящее время уже имеется возможность реализовать счетчики фотонов с интегрированием зарядов одноэлектронных импульсов, что позволит улучшить эффективность их амплитудной селекции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ветохин С. С. Одноэлектронные фотоприемники / С. С. Ветохин, И. Р. Гулаков, А. Н. Перцев, И. В. Резников. - 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1986. 160 с.

2. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем. Минск : УО ВГКС, 2012. 274 с.

3. Advanced Photon counting: application, methods, instrumentation/Springer Series on Fluorescence. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 371 p.
4. Photon Correlation and Light Beating Spectroscopy/Lectures presented at the NATO Advanced Study Institute, Capri, Italy, July 16-27,1973. 1974 Springer Science+Business Media New York, 1974. 575 p.
5. Ветохин С.С. К выбору порога амплитудной дискриминации одноэлектронного диссекторного датчика/С. С. Ветохин, И. Н. Пустынский, И. В. Резников, А. П. Ташкун. Оптическая и электрооптическая обработка информации. М.: Наука. 1975, с. 41-47.
6. Егоров М. В., Неронский Р. В. Схемные решения отдельных каскадов приемного тракта атмосферной оптической линии связи // Радиопромышленность. 2017. № 3. С. 60–67.
7. Ветохин С.С. Комплексные исследования фотоумножителей для астрофотометрии/ С. С. Ветохин, В. И. Антонов, И. Р. Гулаков, Ю. В. Писляк. Депонир. В ВИНТИ 23.05.1978, №1668-деп.
8. Антоневи́ч А.И. Измеритель зарядов импульсов/Приборы и техника эксперимента, 1979, №6. С. 181-183.
9. Антоневи́ч А. И., Буцкий В. В., Ветохин С. С. Быстродействующий дифференциальный усилитель на дискретных элементах/Приборы и техника эксперимента, 1979, №4. С. 157-158.
10. Свинцов Д. А. Туннельные полевые транзисторы на основе графена/ Физика и техника полупроводников, 2013, том 47, вып. 2. С. 244-250.
11. Дворников О. В. Быстродействующие широкополосные операционные усилители на базовом матричном кристалле/Известия вузов. Электроника, 2023, том 28, вып. 1. С. 93-111.
12. Close J. High speed op amps: performance, process and topologies // 2012 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). Portland, OR: IEEE, 2012. P. 1–8.
13. Интегральные микросхемы. М. : ФГУП «НПП «ПУЛЬСАР», 2006. 40 с.