

и зависимость среднего времени пролета электронов от напряжения между фотокатодом и первым диодом $U_{\phi-1д}$ при напряжении между остальными диодами 200 В. С повышением этого напряжения уменьшается среднее время пролета электронов, причем при $U_{\phi-1д}=300$ В эта зависимость переходит в насыщение. Вклад межэлектродного промежутка фотокатод — первый диод в разброс времени пролета является доминирующим по сравнению с другими межэлектродными промежутками.

Разработанная эмитационная модель фотоэлектронного умножителя позволила также исследовать процесс формирования импульсов тока сцинтилляционного спектрометра. Изучено влияние параметров сцинтилляций (числа фотонов, спектрального состава, длительности и относительной интенсивности компонентов сцинтилляций) на амплитудное разрешение спектрометра. Расчеты на имитационной модели показали, например, что амплитудное разрешение ФЭУ зависит от спектрального состава и интенсивности сцинтилляций. С увеличением λ от 400 до 600 нм разрешение уменьшается приблизительно на 2 %. Это связано с уменьшением начальных скоростей вылета электронов с фотокатода при возрастании λ , что приводит к увеличению сбора электронов на первый диод и амплитуды сцинтилляционных импульсов, а также улучшению разрешения.

Таким образом, разработанная модель, достаточно полно отражая реальные механизмы функционирования ФЭУ в одноэлектронном режиме, позволяет дать рекомендации по выбору оптимальных условий его работы.

Список литературы

1. Апанасович В. В., Гулаков И. Р., Чудовская Е. А. // Оптико-механ. промышленность. 1989. № 3. С. 45.
2. Ветохин С. С., Гулаков И. Р. // Журн. приклад. спектроскопии. 1986. Т. 45. № 1. С. 152.

Поступила в редакцию 28.11.88.

УДК 621.383

С. С. ВЕТОХИН

ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ СЧЕТЧИКА ФОТОНОВ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ РЕГИСТРИРУЕМОГО СВЕТОВОГО ПОТОКА

В фотометрии слабых световых сигналов методом счета фотонов модуляция регистрируемого излучения применяется, как правило, лишь для учета аддитивных компонентов темнового или фонового характера [1, 2]. Однако на практике встречаются задачи, когда это излучение модулируется паразитными процессами с неизвестными характеристиками. При этом точность измерений снижается, а обычные радиотехнические методы фильтрации становятся неэффективными. В этой связи ниже приведен расчет отношения сигнал/шум, обеспечиваемого счетчиком фотонов при гармонической модуляции светового потока.

Пусть глубина модуляции регистрируемого светового сигнала вносящим помеху процессом $m \leq 100$ %. Тогда средняя скорость счета фотонов (или одноэлектронных импульсов [3]) n_c изменяется во времени по закону

$$n_c = n_0 [1 - m(1 - \cos \omega t) / 2], \quad (1)$$

где ω — частота модуляции; n_0 — средняя скорость счета в отсутствие модуляции. При этом средней скорости счета фотонов за период соответствует величина $n_0(1 - m/2)$. Ожидаемое за время τ число зарегистрированных фотонов:

$$N_c = \int_0^{\tau} n_c dt = n_0(1 - m/2)\tau + \frac{mn_0}{2\omega} \sin \omega\tau. \quad (2)$$

При пуассоновской, наиболее распространенной в экспериментах по счету фотонов, статистике отсчетов дисперсия первого члена в (2) равна $D_1 = n_0(1 - m/2)^2$. При расчете дисперсии второго члена в (2) в силу неизвестности частоты модуляции и отсутствия синхронизации между модулирующим воздействием и началом счета фазу гармонической функции следует полагать величиной случайной. Из-за отсутствия априорной информации распределение фазы можно принять равномерным в интервале $[0, 2\pi]$, что даст дисперсию гармонической функции, равную $1/2$. Тогда для числа зарегистрированных фотонов с учетом независимости случайных фазы и скорости счета дисперсия второго члена в (2): $D_2 = n_0 m^2 (n_0 + 1/\tau) / 8\omega^2$. На практике, очевидно, можно потребовать, чтобы $n_0 \gg 1/\tau$, т. е. за интервал счета регистрируется заметное число фотонов, тогда дисперсия N_c :

$$D_c = n_0(1 - m/2)^2\tau + n_0^2 m^2 / 8\omega^2. \quad (3)$$

Пусть темновые и фоновые отсчеты, также подчиняющиеся пуассоновской статистике, увеличивают регистрируемую скорость счета на n_τ , так что измеряемое ее значение становится $n = n_c + n_\tau$, а число отсчетов $N = N_c + N_\tau$ соответственно. Для определения N_c следует дополнительно измерить N_τ (для простоты также за время τ , хотя при оптимизации времени измерения продолжительность накопления аддитивного компонента может быть сокращена [4]) и вычислить $N_c = N - N_\tau$. Тогда дисперсия N_c будет складываться из дисперсий N и N_τ :

$$D_c = n_0(1 - m/2)^2\tau + n_0^2 m^2 / 8\omega^2 + 2n_\tau, \quad (4)$$

что при $\tau \gg |\sin \omega\tau|/\omega$ (это условие позволяет пренебречь в (2) вторым членом) дает отношение сигнал/шум:

$$\rho = \sqrt{n_0\tau(1 - m/2)^2 / [(1 - m/2)^2 + n_0 m^2 / 8\omega^2\tau - 2n_\tau/n_0]}. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что наличием модуляции обусловлена добавка в знаменателе, вклад которой уменьшается с увеличением частоты модуляции и продолжительности измерений.

При использовании коротких интервалов времени, когда $\tau \ll 1/\omega$ и $n_0 \ll 1/\tau$, оказывается, что $D_2 = n_0 m^2 / 8\omega^2\tau$, а отношение сигнал/шум (5) преобразуется к виду:

$$\rho = \sqrt{n_0\tau(1 - m/2)^2 / [(1 - m/2)^2 + m^2 / 8\omega^2\tau^2 - 2n_\tau/n_0]} \quad (6)$$

и демонстрирует более резкую зависимость от продолжительности измерений.

В заключение отметим, что в (5) зависящий от частоты член доминирует, как правило, в знаменателе. При этом $\rho = \omega\tau(1 - m/2)\sqrt{8/m}$ и перестает зависеть от величины регистрируемого сигнала. В (6) этот член, напротив, чаще всего мал, и при $n_\tau \ll n_0$ оказывается, что $\rho = \sqrt{m_0\tau}$ и соответствует [5] случаю большого сигнала для стационарного пуассоновского потока фотонов.

Список литературы

1. Ареччи, Гатти, Сопа // Приборы для научных исследований. 1966. № 7. С. 128.
2. Ветохин С. С. // Оптико-механич. промышленность. 1985. № 12. С. 9.
3. Ветохин С. С. // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1: Физ. Мат. Мех. 1985. № 3. С. 8.
4. Ветохин С. С. // Оптико-механич. промышленность. 1985. № 10. С. 3.
5. Ветохин С. С., Гулаков И. Р., Перцев А. Н., Резников И. В. Одноэлектронные фотоприемники. М., 1986. С. 7.