

УДК 621.383.92

## ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА ЛАВИННЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ В РЕЖИМЕ СЧЕТА ФОТОНОВ

О.К. БАРАНОВСКИЙ, А.О. ЗЕНЕВИЧ, А.М. ТИМОФЕЕВ, О.Ю. ГОРБАДЕЙ

Учреждение образование «Высший государственный колледж связи»  
Ф.Скорины, 8/2, Минск, 220114, Беларусь

Поступила в редакцию 5 мая 2015

Предложены выражения для определения коэффициента шума лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов. Выполнены измерения коэффициента шума кремниевых лавинных фотоприемников в зависимости от напряжения питания, температуры окружающей среды, мощности регистрируемого оптического излучения.

*Ключевые слова:* счет фотонов, коэффициент шума, отношение сигнал/шум, лавинный фотоприемник.

### Введение

В последние годы для приема слабых оптических сигналов с мощностью, меньшей либо равной  $10^{-12}$  Вт, широкое применение находят счетчики фотонов [1]. Для оценки чувствительности счетчика фотонов необходимо не только определить пороговую мощность регистрируемого оптического излучения, но и знать его способность выделять слабые оптические сигналы на фоне шумов. Шумы могут быть вызваны флуктуациями регистрируемого оптического излучения, а также фотоприемником и системой регистрации счетчика фотонов [1,2]. Определяющий вклад в эти шумы вносят флуктуации регистрируемого оптического излучения и шумовые процессы фотоприемников [2]. Поэтому шумами регистрирующей системы счетчика фотонов можно пренебречь.

Для оценки чувствительности фотоприемника используется коэффициент шума  $F$ , определяемый как отношение сигнал/шум на выходе фотоприемника к отношению сигнал/шум на его входе [3].

Однако до настоящего времени в литературе отсутствуют сведения об оценках коэффициента шума  $F$  фотоприемников в режиме счета фотонов, в связи с этим целью данной работы является установление зависимостей  $F$  от статистики фотонов регистрируемого излучения, фоновых шумов, шумов фотоприемника.

### Модель фотоприемника

Предположим, что на вход фотоприемника поступает стационарный оптический поток, формируемый фотонами сигнального оптического излучения с постоянной мощностью и фонового излучения. Под оптическим информационным сигналом будем понимать постоянную составляющую сигнального оптического излучения, а шум будет определяться флуктуациями числа фотонов сигнального оптического излучения и фонового излучения.

В этом случае можно записать отношение сигнал/шум  $\rho_0$  для поступающего на фотоприемник оптического информационного сигнала:

$$\rho_0 = \frac{\langle N_\phi \rangle^2}{D_\phi + D_\psi}, \quad (1)$$

где  $\langle N_\phi \rangle$  – среднее число фотонов информационного сигнала, попавших на фотоприемник за время измерения  $t$ ,  $D_\phi$  и  $D_\psi$  – дисперсия числа фотонов информационного сигнала  $N_\phi$  и числа фотонов фонового излучения  $N_\psi$ , соответственно.

С учетом дисперсионной теоремы Бурже [4], на выходе фотоприемника с квантовой эффективностью регистрации  $\eta$  и средним числом темновых импульсов  $\langle N_\tau \rangle$  за время измерения  $t$ , отношение сигнал/шум  $\rho_1$  можно записать в виде:

$$\rho_1 = \frac{\eta^2 \langle N_\phi \rangle^2}{\eta(1-\eta) \langle N_\phi \rangle + \eta^2 D_\phi + \eta(1-\eta) \langle N_\psi \rangle + \eta^2 D_\psi + D_\psi}, \quad (2)$$

где  $D_\tau$  – дисперсия числа темновых импульсов  $N_\tau$ ,  $\langle N_\psi \rangle$  – среднее число фотонов фонового излучения. Темновыми называют импульсы, возникающие в фотоприемнике в отсутствие оптического излучения.

Соответственно, коэффициент шума фотоприемника в режиме счета фотонов:

$$F = \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{\eta(1-\eta)(\langle N_\phi \rangle + \langle N_\psi \rangle) + \eta^2(D_\phi + D_\psi) + D_\psi}{\eta^2(D_\phi + D_\psi)}. \quad (3)$$

Значение  $F$  целесообразно рассматривать в диапазоне от 1 до  $\rho_0$ . Это связано с тем, что если фотоприемник не вносит изменений в отношении сигнал/шум на его входе, то  $F = 1$ . Минимальное значение отношения  $\rho_1$ , при котором возможна регистрация сигнала на выходе счетчика фотонов, равно единице. В этом случае значение коэффициента шума равно  $F = \rho_0$ .

Для большинства прикладных задач используется оптическое излучение со статистикой фотонов, определяемой распределением Пуассона, как для фонового излучения, так и информационного сигнала [1, 2]. В этом случае выражение (3) принимает вид:

$$F = \frac{\eta(\langle N_\phi \rangle + \langle N_\psi \rangle) + \langle N_\tau \rangle}{\eta^2(\langle N_\phi \rangle + \langle N_\psi \rangle)}. \quad (4)$$

Для фотоприемников, в которых  $\langle N_\phi \rangle \geq \langle N_\tau \rangle$  или  $\langle N_\psi \rangle \geq \langle N_\tau \rangle$ , для коэффициента шума справедливо отношение

$$F = \frac{1}{\eta}. \quad (5)$$

Указанные условия выполняются для лавинных фотоприемников, охлажденных до температуры жидкого азота [1, 2]. В этом случае коэффициент шума равен среднему числу фотонов, попадающих на фотоприемник, при котором на его выходе будет зарегистрирован в среднем один сигнальный импульс.

Для фотоприемников, в которых  $\langle N_\phi \rangle \gg \langle N_\psi \rangle$ , коэффициент шума определяется выражением:

$$F = \frac{\eta \langle N_\phi \rangle + \langle N_\tau \rangle}{\eta^2 \langle N_\phi \rangle} = \frac{1}{\eta} \left( 1 + \frac{\langle N_\tau \rangle}{\langle N_\phi \rangle} \right), \quad (6)$$

где  $\langle N_c \rangle$  – среднее число сигнальных импульсов (образованных фотонами оптического информационного сигнала) на выходе фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов. Указанное условие выполняется в случаях полного затемнения лавинных фотоприемников [1, 2].

При постоянном значении  $\langle N_\tau \rangle$  и увеличении  $\langle N_c \rangle$  величина  $F$ , рассчитанная по формуле (6), приближается к значению коэффициента шума, определяемого выражением (5).

С учетом выражения (6), максимальное значение коэффициента шума, при котором возможно зарегистрировать информационный сигнал на выходе фотоприемника, определяется формулой:

$$F = \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \langle N_\tau \rangle}}{2\eta}. \quad (7)$$

В формулу (7) входят параметры, характеризующие счетчик фотонов. Увеличение числа темновых импульсов, зарегистрированных в течение времени  $t$ , и уменьшение квантовой эффективности регистрации приводят к увеличению коэффициента шума.

При значениях  $\langle N_T \rangle \gg 1$  формулу (7) можно записать в следующем виде:

$$F \approx \frac{\sqrt{\langle N_T \rangle}}{\eta}. \quad (8)$$

На основании формул (7) и (8), а также [1] можно сделать заключение, что максимальное значение  $F$ , при котором возможно принять оптический информационный сигнал, равно минимальному числу фотонов, которое может быть детектировано фотоприемником в течение времени  $t$ .

Таким образом, в случае пуассоновского источника оптического излучения минимальное значение коэффициента шума равно  $1/\eta$ , а максимальное значение соответствует минимальному числу фотонов, которое может быть детектировано фотоприемником в течение времени  $t$ .

### Описание установки и методика эксперимента

Объектом исследования являлись счетчики фотонов на лавинных фотоприемниках (ЛФП): кремниевых лавинных фотодиодах промышленного изготовления ФД-115Л, кремниевых ЛФП с металл-резистивный слой-полупроводник (МРП) структурой.

Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис. 1.

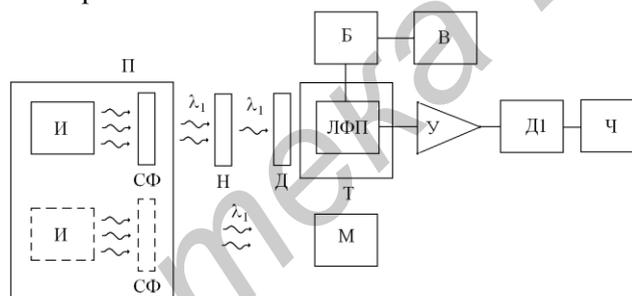


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения коэффициента шума:

П – механическая платформа; И – источник оптического излучения, СФ – светофильтр, Н – нейтральный светофильтр, Д – диафрагма, М – измеритель мощности оптического излучения, Т – камера тепла и холода, ЛФП – лавинный фотоприемник, Б – блок питания лавинного фотодиода, В – вольтметр, У – усилитель импульсов, Д1 – дискриминатор, Ч – частотомер

Источник оптического излучения И вместе со светофильтром СФ размещены на подвижной механической платформе П. Платформа П перемещает источник И и светофильтр СФ в два положения. В одном положении оптическое излучение от источника И через светофильтр СФ поступает на измеритель мощности М. Измеритель мощности определяет мощность оптического излучения источника И с длиной волны  $\lambda_1$ , выделенного светофильтром СФ. В другом положении платформы оптическое излучение источника И с длиной волны  $\lambda_1$ , выделенное светофильтром СФ, поступает на нейтральный светофильтр Н. Светофильтр Н ослабляет мощность оптического излучения в  $k$  раз. После светофильтра Н излучение подается на диафрагму Д. Диафрагма Д в открытом состоянии пропускает через себя оптическое излучение без потерь. После диафрагмы излучение поступает на лавинный фотоприемник ЛФП. В закрытом состоянии диафрагма Д не позволяет оптическому излучению от источника поступать на ЛФП. Лавинный фотоприемник помещен в камеру тепла и холода Т. При помощи камеры Т задается рабочая температура фотоприемника. Температура фотоприемника может изменяться в диапазоне от 150 до 300 К.

Под действием фотона оптического излучения на выходе ЛФП образуется импульс напряжения. Количество импульсов напряжения на выходе ЛФП прямо пропорционально числу фотонов, поступивших на его вход. Импульсы с выхода ЛФП поступают на усилитель У.

После усилителя импульсы поступают на амплитудный дискриминатор Д1. При помощи дискриминатора осуществляется амплитудная селекция усиленных импульсов ЛФП от шумов усилителя. Порог амплитудной селекции дискриминатора выбирается над уровнем собственных шумов усилителя У. На выходе дискриминатора Д1 импульсы нормируются по амплитуде и длительности. Выходные импульсы дискриминатора поступают на вход частотомера Ч. Частотомер подсчитывает количество импульсов.

Блок питания Б обеспечивает напряжение электропитания на ЛФП. Величина напряжения электропитания регистрируется при помощи вольтметра В. Для работы ЛФП в режиме счета фотонов выбирается напряжение электропитания  $U_n$  равным или близким к напряжению пробоя  $U_{пр}$  [1].

Подаваемая на ЛФП мощность оптического излучения  $P_n$  на длине волны  $\lambda_1$  регулируется при помощи ослабляющего нейтрального светофильтра, характеризуемого коэффициентом ослабления  $k$ .

В процессе измерения подсчитывалось число импульсов  $n_t$  за единицу времени при закрытой диафрагме Д на выходе ЛФП. Затем определялось число импульсов  $n_{ст}$  за единицу времени при открытой диафрагме Д на выходе ЛФП. После чего рассчитывался коэффициент шума по формуле:

$$F = \frac{P_n \lambda_1}{k(n_{ст} - n_t) h c} \frac{n_{ст}}{n_t}, \quad (9)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света.

При проведении измерений изменялись перенапряжение ЛФП  $\Delta U = U_n - U_{пр}$  ( $U_n$  – напряжение обратного смещения ЛФП,  $U_{пр}$  – напряжение пробоя ЛФП), рабочая температура фотоприемника, мощность оптического излучения. Для оценки зависимостей использовался  $\Delta U$ , поскольку исследуемые ЛФП имеют различное напряжение пробоя. Длина волны  $\lambda_1$  оптического излучения составляла 850 нм, что соответствовало максимальной чувствительности ЛФП.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измеренные изменения коэффициента шума от  $\Delta U$  при постоянной мощности оптического излучения  $P_n = 10^{-12}$  Вт и температуре  $T = 293$  К приведены на рис. 2. Кривые зависимостей коэффициента шума от перенапряжения имеют минимум. Минимум соответствует перенапряжению  $\Delta U = 0,10$  В для ЛФП с МРП структурой и  $\Delta U = 0,20$  В – ФД-115Л. Для того, чтобы ЛФП вносил минимальный вклад в отношение сигнал/шум входного информационного сигнала, необходимо устанавливать перенапряжение, соответствующее минимуму зависимости  $F(\Delta U)$ . Влияния нестабильности напряжения питания  $\Delta U_n$  на изменения коэффициента шума  $\Delta F$  вблизи минимума  $F(\Delta U)$  составляет  $\Delta F/\Delta U_n = 110$  В<sup>-1</sup> для ЛФП с МРП структурой и  $\Delta F/\Delta U_n = 100$  В<sup>-1</sup> для ФД-115Л. Нестабильность напряжения электропитания составляла  $\Delta U_n = 0,01$  В.

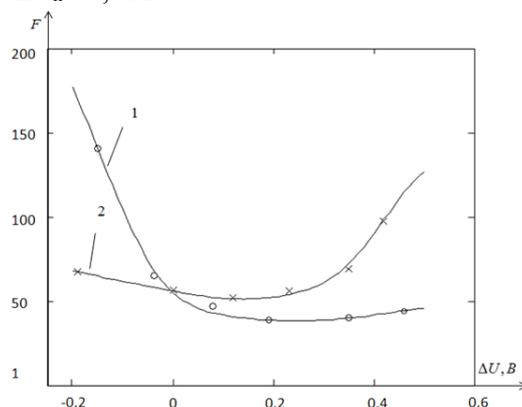


Рис. 2. Зависимость коэффициента шума от перенапряжения на лавинном фотоприемнике 1 – фотоприемник ФД-115Л; 2 – для ЛФП с МРП структурой

Измеренные зависимости коэффициента шума от температуры  $T$  при перенапряжении  $\Delta U = 0,2$  В и мощности оптического излучения  $P_{\text{и}} = 10^{-12}$  Вт приведены на рис. 3.

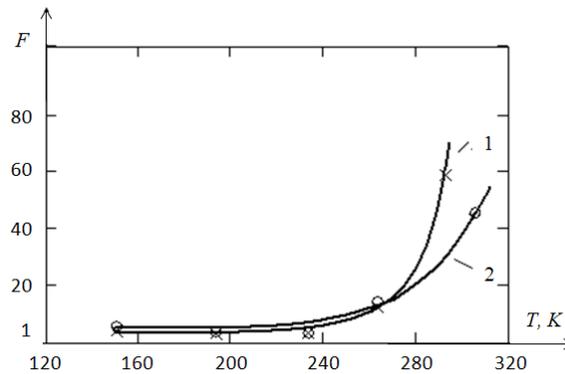


Рис. 3. Зависимость коэффициента шума лавинного фотоприемника от температуры 1 – для ЛФП с МРП структурой; 2 – для ФД-115Л

При понижении температуры значение коэффициента шума уменьшается для исследуемых ЛФП. Более сильная зависимость коэффициента шума от температуры наблюдается для ЛФП с МРП структурой  $\Delta F/\Delta T = 0,4$   $\text{K}^{-1}$ , в то время как для ФД-115Л  $\Delta F/\Delta T = 0,3$   $\text{K}^{-1}$ . При этом,  $\Delta F = F_1 - F_2$  (где  $F_1$  и  $F_2$  – коэффициенты шума при температурах 300 К и 150 К соответственно). Наибольшая зависимость коэффициента шума от температуры наблюдается в диапазоне температур от 250 К до 300 К. Это связано с тем, что в этом диапазоне температур наблюдается рост квантовой эффективности с уменьшением температуры от 0,03 до 0,25 для ФД-115Л и от 0,05 до 0,30 для ЛФП с МРП структурой. При этом, с понижением температуры значение  $n_{\text{т}}$  изменяется для ФД-115Л от  $1,7 \cdot 10^4$  до  $10^{-1} \text{ с}^{-1}$ , а для ЛФП с МРП структурой от  $3,0 \cdot 10^4$  до  $2,0 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ . В диапазоне температур от 150 К до 250 К квантовая эффективность ЛФП всех исследуемых типов изменялась незначительно.

Измеренные зависимости коэффициента шума от мощности оптического излучения при постоянных величинах  $\Delta U = 0,2$  В и температуре  $T = 300$  К представлены на рис. 4. Измерение коэффициента шума проводилось от  $1,5 \cdot 10^{-15}$  до  $10^{-12}$  Вт.

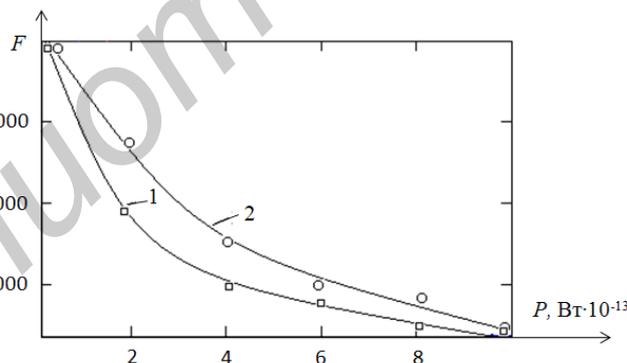


Рис. 4. Зависимость коэффициента шума лавинного фотоприемника от мощности регистрируемого оптического излучения: 1 – для ЛФП с МРП структурой; 2 – для ФД-115Л

Коэффициент шума уменьшается для всех типов исследуемых фотоприемников с увеличением мощности оптического излучения. Значения коэффициента шума фотоприемников ФД-115Л больше, чем для ЛФП с МРП структурой во всем диапазоне исследуемых мощностей. Это связано с тем, что ФД-115Л имеют меньшую квантовую эффективность регистрации по сравнению с ЛФП с МРП структурой, даже в условиях превышения значений интенсивности темновых импульсов ЛФП с МРП структурой ( $n_{\text{т}} = 3,0 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ) над интенсивностью темновых импульсов ФД-115Л ( $n_{\text{т}} = 1,7 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ). Следовательно, в этом случае, вклад квантовой эффективности регистрации в величину коэффициента шума больше, чем вклад интенсивности темновых импульсов  $n_{\text{т}}$ .

### Заключение

В результате измерений установлено, что для уменьшения коэффициента шума фотоприемников, используемых в счетчиках фотонов, необходимо повысить их квантовую эффективность регистрации и уменьшить интенсивность темновых импульсов, регистрируемых в течение времени измерений информационного потока. Это можно обеспечить понижением рабочей температуры ЛФП до 250 К.

Для получения наименьшего значения коэффициента шума необходимо выбирать перенапряжение ЛФП, соответствующее минимуму зависимости  $F(\Delta U)$ .

*Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор №Т11ОБ-043).*

### EVALUATION OF AVALANCHE PHOTODETECTORS NOISE FACTOR OPERATING IN PHOTON COUNTING MODE

A.K. BARANOUSKI, A.O. ZENEVICH, A.M. TIMOFEEV, O.Y. GORBADEY

#### Abstract

The expressions for determination of the avalanche photodetectors noise factor are proposed. The silicon avalanche photodetectors noise factor depending on the supply voltage, ambient temperature, the power of registered optical radiation are measured.

#### Список литературы

1. Гулаков И.Р., Зеневич А.О. Фотоприемники квантовых систем. Минск, 2012.
2. Ветохин С.С., Гулаков И.Р., Перцев А.Н. и др. Одноэлектронные фотоприемники. М., 1986.
3. Робинсон Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. М., 1980.
4. Перина Я. Квантовая статистика линейных и нелинейных оптических явлений. М., 1987.