

УДК 621.383.92

ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ НА ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ ФОТОПРИЕМНИКОВ В РЕЖИМЕ СЧЕТА ФОТОНОВ

И.Р. ГУЛАКОВ, А.О. ЗЕНЕВИЧ

*Высший государственный колледж связи
Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220114, Беларусь*

Поступила в редакцию 2 апреля 2008

Предложена математическая модель образования послеимпульсов в фотоприемниках, работающих в режиме счета фотонов, учитывающая послеимпульсы всех поколений. Получено выражение для определения дисперсии числа фотоотсчетов с учетом вероятности образования послеимпульсов. Выполнена оценка влияния вероятности образования послеимпульсов на отношение сигнал/шум.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, фотоэлектронный умножитель, послеимпульсы, счет фотонов.

Введение

Для регистрации предельно слабого оптического излучения используются фотоприемники, работающие в режиме счета фотонов. При реализации этого режима применяются фотоприемники с внутренним коэффициентом усиления, такие как фотоэлектронные умножители, лавинные фотодиоды, лавинные фотоприемники со структурами металл–диэлектрик–полупроводник и металл–резистивный слой–полупроводник [1]. Режим счета фотонов позволяет значительно улучшить пороговую чувствительность этих фотоприемников по сравнению с другими режимами регистрации оптического излучения [2]. Под пороговой чувствительностью понимается минимальная мощность оптического излучения, которую можно зарегистрировать фотоприемником в рассматриваемом режиме работы при отношении сигнал/шум, равном единице. Так представленные в [1, 2] оценки показывают, что для фотоэлектронных умножителей пороговая чувствительность в режиме счета фотонов зависит от типа фотоумножителя и спектрального состава регистрируемого оптического излучения и составляет порядка 10^{-17} Вт, в то время как для токового режима работы она примерно на порядок хуже. Для лавинных фотодиодов эти значения составляют порядка 10^{-16} Вт и 10^{-14} Вт для режима счета фотонов и токового режима соответственно.

Процесс фоторегистрации в вакуумных и твердотельных фотоприемниках сопровождается побочными оптическими и электрическими явлениями, приводящими к возникновению послеимпульсов, следующих через небольшой отрезок времени за основным импульсом. Вероятность образования послеимпульсов является одним из параметров фотоприемника, влияющим на отношение сигнал/шум, а значит, и на пороговую чувствительность [1].

Однако в настоящее время отсутствуют простые математические модели, позволяющие оценить влияние послеимпульсов на отношение сигнал/шум фотоприемника в режиме счета фотонов. Построенные ранее модели послеимпульсных явлений являются либо достаточно сложными, что затрудняет их практическое использование, либо ограничиваются только

учетом послеимпульсов первого поколения [3–5]. Допущение с послеимпульсами первого поколения можно использовать для фотоэлектронных умножителей, так как вероятность образования послеимпульсов в них мала и составляет $10^{-2} \div 10^{-3}$ [1]. В то же время вероятность образования послеимпульсов в лавинных фотодиодах может достигать 0,2 [1, 8] и существует необходимость учитывать послеимпульсы второго и третьего поколений (когда послеимпульс появляется после регистрации первого послеимпульса и т.д.), вклад которых в измеряемый оптический сигнал может быть существенным.

Поэтому целью предлагаемой работы является построение математической модели образования послеимпульсов в фотоприемниках, работающих в режиме счета фотонов, и оценка влияния вероятности образования послеимпульсов на измеряемый оптический сигнал и отношение сигнал/шум.

Математическая модель

Модель строится на основании следующих предположений:

1) скорость счета выходных импульсов фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов, такова, что эффектом мертвого времени можно пренебречь;

2) за время измерения t_i регистрируется не более одного сигнального импульса, инициированного поглощенным оптическим излучением.

Эти предположения справедливы при регистрации слабого оптического излучения.

Получим статистическое распределение выходных импульсов $P(m)$, образованных оптическим излучением и порожденных им послеимпульсов, для фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов с квантовой эффективностью η и вероятностью образования послеимпульсов α . Для такого фотоприемника вероятность не зарегистрировать на выходе ни одного сигнального импульса и послеимпульса будет равна $P(0)=1-\eta$ в случае попадания на него одного фотона. Вероятность регистрации одного импульса $P(1)$ равна произведению квантовой эффективности регистрации на вероятность того, что послеимпульс не возникнет ($P(1)=\eta(1-\alpha)$). Значение $P(2)$ соответствует произведению η на вероятность образования послеимпульса и на вероятность того, что послеимпульс второго поколения не возникнет, т.е. ($P(2)=\eta\alpha(1-\alpha)$). Продолжая рассуждения, можно показать, что вероятность регистрации m -ого числа импульсов составит $P(m)=\eta\alpha^{m-1}(1-\alpha)$. Тогда распределение отсчетов выходных импульсов фотоприемника с послеимпульсами:

$$\begin{cases} P(0) = 1 - \eta, m = 0, \\ P(m) = \eta\alpha^{m-1}(1 - \alpha), m > 0. \end{cases} \quad (1)$$

Используя выражение (1), можно определить среднее значение M и дисперсию D распределения выходных импульсов фотоприемника:

$$M = \sum_{m=1}^{\infty} m\eta\alpha^{m-1}(1 - \alpha) = \frac{\eta}{1 - \alpha}, \quad (2)$$

$$D = \sum_{m=1}^{\infty} m^2\eta\alpha^{m-1}(1 - \alpha) - \left(\frac{\eta}{1 - \alpha}\right)^2 = \frac{\alpha\eta + \eta}{1 - \alpha} \frac{1 - \eta}{1 - \alpha}. \quad (3)$$

Применив формулы (2) и (3), определим среднее значение числа сигнальных импульсов на выходе фотоприемника $\langle N_c \rangle$ и их дисперсию D_c , если на фотоприемник попадает среднее число фотонов $\langle N_\phi \rangle$ за время $T = \Sigma t_i$.

$$\langle N_c \rangle = \frac{\eta}{1 - \alpha} \langle N_\phi \rangle, \quad (4)$$

$$D_c = \frac{\alpha\eta + \eta(1-\eta)}{1-\alpha^2} \langle N_\phi \rangle + \frac{\eta^2}{1-\alpha^2} D_\phi. \quad (5)$$

где D_ϕ — дисперсия среднего числа фотонов поступающих на фотоприемник. Отметим, что при $\alpha=0$ формула (5) преобразуется в формулу из дисперсионной теоремы Бурже [7]. В выражении (5) с учетом (4) перейдем от $\langle N_\phi \rangle$ к $\langle N_c \rangle$:

$$D_c = \frac{\alpha + 1 - \eta}{1 - \alpha} \langle N_c \rangle + \frac{\eta^2}{1 - \alpha^2} D_\phi. \quad (6)$$

Согласно [1], отношение сигнал/шум ρ определяется по формуле

$$\rho = \frac{\eta N_\phi}{\sqrt{D_c + D_T}}, \quad (7)$$

где D_T — дисперсия темновых импульсов. Подставив в выражение (7) формулы (4) и (6) получим

$$\rho = \frac{(1-\alpha)N_c}{\sqrt{\frac{\alpha + 1 - \eta}{1 - \alpha} \langle N_c \rangle + \frac{\eta^2}{1 - \alpha^2} D_\phi + D_T}}. \quad (8)$$

Полученное выражение (8) можно использовать для определения отношения сигнал/шум для фотоприемников работающих в режиме счета фотонов. Оно позволяет учитывать дисперсии фотонов оптического излучения, падающего на фотоприемник, и темновых импульсов и вероятность образования послеимпульсов.

Результаты моделирования и их обсуждение

Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай, в котором используется источник оптического излучения со статистикой Пуассона, согласно которой $\langle N_\phi \rangle = D_\phi$. Тогда формула (6) для пуассоновской статистики примет вид

$$D_c = \frac{\alpha + 1 - \eta}{1 - \alpha} \langle N_c \rangle + \frac{\eta}{1 - \alpha} \langle N_c \rangle. \quad (9)$$

На рис. 1 показана зависимость отношения $D_c/\langle N_c \rangle$ от вероятности образования послеимпульсов с учетом послеимпульсов всех поколений и послеимпульсов только первого поколения. Зависимость I (рис. 1) строилась на основании выражения (9). Расчет $D_c/\langle N_c \rangle$ с учетом послеимпульсов только первого поколения выполнялся на основании формулы

$$D_c = \left[\sum_{m=1}^2 m^2 \eta \alpha^{m-1} (1-\alpha) - \eta(1+\alpha)^2 \right] \frac{\langle N_c \rangle}{\eta(1+\alpha)} + \eta(1+\alpha) \langle N_c \rangle. \quad (10)$$

В выражении (10) в сумме мы ограничились только двумя слагаемыми, так как для первого поколения послеимпульсов их больше не будет. Среднее число импульсов на выходе фотоприемника с послеимпульсами первого поколения определялось по формуле $\langle N_c \rangle = \eta(1+\alpha) \langle N_\phi \rangle$.

Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что ограничиться послеимпульсами только первого поколения можно при значениях $\alpha \leq 0,05$. Как видно, с ростом α увеличивается дисперсия числа сигнальных импульсов на выходе фотоприемника по сравнению с их средним значением, если учитывать послеимпульсы всех поколений.

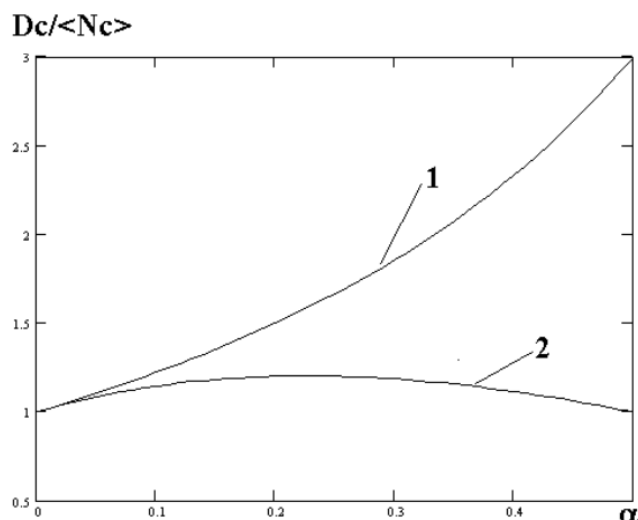


Рис. 1. Зависимость между отношением дисперсии числа сигнальных импульсов к их среднему значению и вероятностью образования послеимпульсов (1 — с учетом послеимпульсов всех поколений; 2 — с учетом послеимпульсов первого поколения, зависимости рассчитаны для $N_c=10$, $\eta=0,1$)

Проведенные исследования лавинных фотодиодов ФД-115л, работающих в режиме счета фотонов при температуре $T=300$ К, представлены в таблице. Выбирались такие скорости счета импульсов, для которых эффектом мертвого времени можно было пренебречь. Согласно [6] при таких скоростях счета с увеличением напряжения питания растет вероятность образования послеимпульсов. Как видно из таблицы, с повышением напряжения питания увеличивается дисперсия числа сигнальных импульсов на выходе лавинного фотодиода по сравнению с их средним значением, что подтверждает результаты моделирования.

Зависимость дисперсии и скорости счета выходных импульсов лавинного фотодиода ФД-115л от напряжения его питания

Напряжение питания, В	Дисперсия сигнальных импульсов	Скорость счета, с ⁻¹	Отношение $D_c/\langle N_c \rangle$	Вероятность появления послеимпульсов
49,8	860	854	1,007	0,004
49,9	2455	2376	1,033	0,016
50,0	4321	4128	1,047	0,023
50,1	7498	7129	1,052	0,025

С учетом формулы (4) и пуассоновской статистики выражение (8) можно записать в виде

$$\rho = \frac{(1-\alpha)N_c}{\sqrt{\frac{\alpha + 1 - \eta}{1 - \alpha} \langle N_c \rangle + \frac{\eta}{1 - \alpha} \langle N_c \rangle + D_T}} \quad (11)$$

На рис. 2 показано, как изменяется отношение сигнал/шум от вероятности образования послеимпульсов. Все значения в зависимости $\rho(\alpha)$ нормировались на величину отношения сигнал/шум ρ_0 при $\alpha=0$. Как видно из полученных зависимостей, увеличение вероятности образования послеимпульсов приводит к уменьшению величины ρ . Отметим, что рассмотрение ограничивается только значениями $\alpha \leq 0,5$, так как большие значения выбирать нецелесообразно. Фотоприемники с большим числом послеимпульсов нельзя использовать для счета фотонов. Полученные результаты моделирования показывают, что при малых значениях вероятности образования послеимпульсов ($\alpha \leq 0,01$) отклонения ρ от ρ_0 незначительны. Так если

за время измерения $t=1$ с было сосчитано $N_c=1000$ сигнальных импульсов при квантовой эффективности регистрации $\eta=0,1$ и дисперсия числа темновых импульсов за это время $D_t=100$, то для $\alpha=0,01$ величина $\rho/\rho_0=0,98$. Поэтому в фотоприемниках с $\alpha \leq 0,01$ при регистрации оптического излучения вкладом послеимпульсов можно пренебречь. В частности это относится к фотоэлектронным умножителям, так как вероятность образования послеимпульсов в них составляет $10^{-2} \div 10^{-3}$ [1].

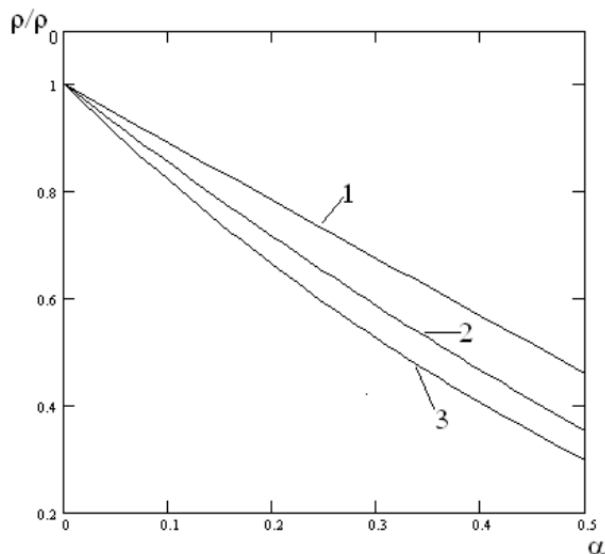


Рис. 2 Зависимость отношение сигнал/шум от вероятности образования послеимпульсов:

1 — $D_t=100$, $\eta=0,1$, $N_c=10$; 2 — $D_t=100$, $\eta=0,1$, $N_c=100$; 3 — $D_t=100$, $\eta=0,1$, $N_c=1000$

Представленные на рис. 3 зависимости ρ от среднего значения числа сигнальных импульсов показывают, что с увеличением $\langle N_c \rangle$, при постоянстве других параметров, растет влияние вероятности образования послеимпульсов на величину ρ . Поэтому при малых значениях $\langle N_c \rangle$ ($\langle N_c \rangle \leq 500$ и $\alpha \leq 0,1$) и недостаточно больших вероятностях образования послеимпульсов, послеимпульсы можно не учитывать при определении значения отношения сигнал/шум.

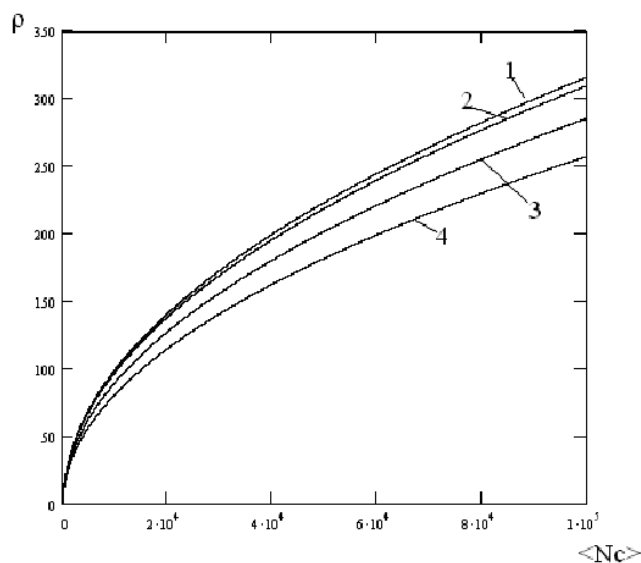


Рис. 3 Зависимость отношение сигнал/шум от среднего значения числа сигнальных импульсов:

1 — $\alpha=0$, $D_t=100$, $\eta=0,1$; 2 — $\alpha=0,01$, $D_t=100$, $\eta=0,1$; 3 — $\alpha=0,05$, $D_t=100$, $\eta=0,1$; 4 — $\alpha=0,1$, $D_t=100$, $\eta=0,1$

Заклучение

Предложенная математическая модель образования послеимпульсов в фотоприемниках, работающих в режиме счета фотонов, позволила учесть послеимпульсы всех поколений. На основании этой модели было получено выражение для определения дисперсии числа фотоотсчетов с учетом вероятности образования послеимпульсов. Выполнена оценка влияния вероятности образования послеимпульсов на отношение сигнал/шум и показано, что с увеличением вероятности образования послеимпульсов уменьшается отношение сигнал/шум.

INFLUENCE OF ATERPULSES ON SIGNAL-TO-NOISE OF PHOTODETECTORS, OPERATING IN THE PHOTONS COUNTING MODE

I.R. GULAKOV, A.O. ZENEVICH

Abstract

The mathematical model of afterpulses, which takes into account afterpulses of all generations in the photodetectors, operating in the photons counting mode is offered. The expression for definition of dispersion of a number of photocounts with probability of afterpulses formation is obtained. The evaluation of influence of the afterpulses formation probability on a signal-to-noise ratio is carried out.

Литература

1. Гулаков И.Р., Холондырев С.В. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях. Минск, 1989.
2. Ветохин С.С., Гулаков И.Р., А.Н. Перцев, Резников И.В. Одноэлектронные фотоприемники. М., 1979.
3. Ветохин С.С. // Оптико-механическая промышленность. 1981. № 6. С. 7–8.
4. Апаносович В.В., Новиков Е.Г. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33, №3. С. 620–624.
5. Ingerson T.E., Keamey R.J., Coulter R.L. // Applied optics. 1983. Vol. 22, № 13. P. 2013–2018.
6. Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Новиков Е.В. // Оптический журнал. 1997. Т.64. №1. С. 55–57.
7. Перина Я. Квантовая статистика линейных и нелинейных оптических явлений. М., 1987.