

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.383.92

**ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ ФОТОДЕТЕКТОРА
НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
СЧЕТЧИКА ФОТОНОВ**

И.Р. ГУЛАКОВ, А.О. ЗЕНЕВИЧ, А.М. ТИМОФЕЕВ

*Высший государственный колледж связи
Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220114, Беларусь**Поступила в редакцию 1 апреля 2010*

Предложены выражения для описания дисперсии темновых импульсов, сопровождающихся послеимпульсами, и определения пороговой чувствительности счетчиков фотонов с послеимпульсами. Выполнена оценка влияния послеимпульсов на уровень пороговой чувствительности счетчика фотонов.

Ключевые слова: пороговая мощность, счетчик фотонов, послеимпульсы.

Введение

Для измерения мощности слабого оптического излучения используются фотоприемники, работающие в режиме счета фотонов. Реализовать этот режим можно только на фотоприемниках с внутренним усилением. К такому типу приемников оптического излучения относятся фотоэлектронные умножители, диссекторы, 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 больше. Для лавинных фотодиодов эти значения составляют порядка 10^{-16} Вт и 10^{-14} Вт в режиме счета фотонов и токовом режиме соответственно.

Процесс регистрации излучения в электровакуумных и полупроводниковых фотоприемниках сопровождается побочными оптическими и электрическими явлениями, приводящими к возникновению послеимпульсов. Послеимпульсами называются импульсы, причиной возникновения которых стали импульсы, вызванные фото- или термогенерированными носителями заряда (основными импульсами). Они следуют через небольшой отрезок времени за основным импульсом и имеют с ним корреляционную связь. Вероятность образования послеимпульсов является одним из параметров фотоприемника, влияющим на его пороговую чувствительность.

В настоящее время отсутствует оценка влияния величины вероятности образования послеимпульсов на пороговую чувствительность фотоприемника. Поэтому целью данной работы является определение влияния вероятности образования послеимпульсов на пороговую чувствительность фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов.

Теоретическое описание счетчиков фотонов с послеимпульсами

Отметим, что под фотоотсчетами понимаются те импульсы, которые образуются на выходе фотоприемника фотогенерированными носителями заряда.

Для расчета пороговой чувствительности фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов, используют формулу для отношения сигнал/шум:

$$\rho = \frac{\eta N_{\phi}}{\sqrt{D_C + D_T}}, \quad (1)$$

где η — квантовая эффективность регистрации счетчика фотонов; N_{ϕ} — среднее число фотонов, поступивших на фотоприемник за время измерения T ; D_C — дисперсия фотоотчетов; D_T — дисперсия темновых импульсов.

Расчеты пороговой чувствительности фотоприемника будем проводить для случая пуассоновской статистики фотоотчетов. Это предположение справедливо тогда, когда время регистрации оптического излучения фотоприемником T значительно превосходит время когерентности оптического излучения [3].

В случае отсутствия послеимпульсов отношение сигнал/шум определяется по формуле:

$$\rho = \frac{\eta N_{\phi}}{\sqrt{\eta N_{\phi} + N_T}}, \quad (2)$$

где N_T — среднее число темновых импульсов фотоприемника, зарегистрированных за время T . Для определения пороговой чувствительности фотоприемника W_{min} примем $\rho=1$, тогда на основании формулы (2) получим:

$$W_{min} = \frac{hc}{T\lambda} N_{\phi} = \frac{hc}{T\lambda} \frac{1 + \sqrt{1 + 4N_T}}{2\eta}, \quad (3)$$

где h — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме; λ — длина волны регистрируемого оптического излучения. При условии, что $N_T \gg 1$, можно записать выражения (3) в виде:

$$W_{min} \approx \frac{hc}{T\lambda} \frac{\sqrt{N_T}}{\eta}. \quad (4)$$

Предположим теперь, что послеимпульсы сопровождают только фотоотсчеты, как это наблюдалось для фотоэлектронных умножителей в режиме счета фотонов. В этом случае D_C для источника излучения с пуассоновской статистикой фотонов можно определить по формуле [4]:

$$D_C = \frac{1+z}{1-z} \eta N_{\phi}, \quad (5)$$

где z — вероятность образования послеимпульса. Дисперсия темновых импульсов счетчика фотонов в этом случае $D_T=N_T$ [2]. Тогда отношение сигнал/шум (1) запишется в виде:

$$\rho = \frac{\eta N_{\phi}}{\sqrt{\frac{1+z}{1-z} \eta N_{\phi} + N_T}}. \quad (6)$$

На основании (5) получим W_{min} для такого счетчика фотонов:

$$W_{min} = \frac{hc}{T\lambda} \frac{1+z + \sqrt{1+z^2 + 4(1-z)^4 N_T}}{2\eta (1-z)^2}. \quad (7)$$

Далее предположим, что послеимпульсы сопровождают только темновые импульсы, что характерно, например, для охлажденных фотоэлектронных умножителей [5]. Тогда для источника излучения с пуассоновской статистикой фотонов $D_C = \eta N_\phi$, а дисперсию темновых импульсов можно определить из формулы (5), приняв $\eta = 1$:

$$D_T = \frac{1+z}{1-z} N_T. \quad (8)$$

На основании формулы (8) получим отношение сигнал/шум:

$$\rho = \frac{\eta N_\phi}{\sqrt{\eta N_\phi + \frac{1+z}{1-z} N_T}}. \quad (9)$$

Тогда W_{min} можно определить по формуле:

$$W_{min} = \frac{hc}{T\lambda} \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \frac{1+z}{(1-z)^2} N_T}}{2\eta}. \quad (10)$$

Предположим, что послеимпульсы сопровождают как темновые импульсы, так и фотоотсчеты. При этом будем считать, что вероятности образования послеимпульсов за темновыми импульсам z_T и фотоотсчетами z_C , причем $z_T \neq z_C$. Это предположение справедливо для случая лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов при комнатных температурах [6]. Тогда отношение сигнал/шум можно записать в виде:

$$\rho = \frac{\eta N_\phi}{\sqrt{\frac{1+z_C}{1-z_C} \eta N_\phi + \frac{1+z_T}{1-z_T} N_T}}. \quad (11)$$

На основании формулы (11) получим W_{min} для такого счетчика фотонов:

$$W_{min} = \frac{hc}{T\lambda} \frac{\frac{1+z_C}{1-z_C} + \sqrt{\left(\frac{1+z_C}{1-z_C}\right)^2 + \frac{4}{1-z_T} N_T}}{2\eta}. \quad (12)$$

Результаты моделирования и их обсуждение

На основании полученных выражений (3), (7), (10) и (12) были рассчитаны зависимости пороговой мощности оптического излучения, регистрируемого счетчиком фотонов, от числа темновых импульсов N_T , зарегистрированных за время измерения T . Каждое из этих выражений содержит постоянный множитель $hc/(T\lambda)$. При выполнении расчетов правые и левые части уравнений (3), (7), (10) и (12) были разделены на этот множитель. Величина вероятности образования послеимпульсов во всех расчетах выбиралась $z < 0,5$. Это связано с тем, что счетчики фотонов с большим значением z использовать для одноквантовой регистрации нецелесообразно из-за большого числа послеимпульсов.

На рис. 1 представлена зависимость пороговой чувствительности счетчика фотонов от числа темновых импульсов для случая, когда послеимпульсы сопровождают только фотоотсчеты. Из полученных результатов видно, что послеимпульсы приводят к увеличению пороговой чувствительности счетчика фотонов по сравнению со счетчиком, у которого послеимпульсы отсутствуют. Чем больше вероятность образования послеимпульсов, тем выше уровень пороговой мощности оптического излучения, которую может зарегистрировать счетчик фотонов.

При увеличении числа темновых импульсов N_T уменьшается разность между пороговыми чувствительностями счетчика фотонов с послеимпульсами и без них. Так для вероятности образования послеимпульсов $z=0,1$ при значениях $N_T \geq 10^3 \text{ с}^{-1}$ для вычисления пороговой мощности можно пользоваться приближенной формулой (4), а для $z=0,5$ формула (4) справедлива при $N_T \geq 10^4 \text{ с}^{-1}$.

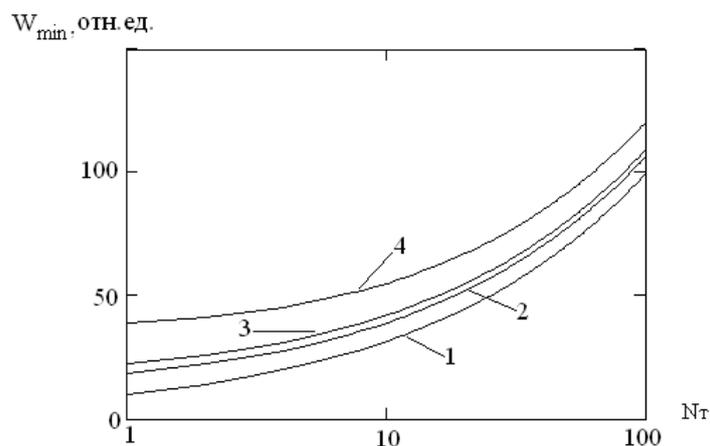


Рис. 1. Зависимость пороговой чувствительности счетчика фотонов от числа темновых импульсов для случая, когда послеимпульсы сопровождают только фотоотсчеты: 1 — вероятность образования послеимпульсов $z=0$; 2 — $z=0,1$; 3 — $z=0,2$; 4 — $z=0,4$ (расчет выполнен для $\eta=0,1$)

На рис. 2 представлена зависимость пороговой чувствительности счетчика фотонов от числа темновых импульсов для случая, когда послеимпульсы сопровождают только темновые импульсы. Как и в предыдущем случае послеимпульсы приводят к увеличению пороговой чувствительности счетчика фотонов по сравнению со счетчиком, у которого послеимпульсы отсутствуют, причем, чем больше значение z , тем больше W_{min} . Рост числа темновых импульсов также приводит к увеличению пороговой чувствительности счетчика фотонов, и разность между пороговыми чувствительностями счетчиков фотонов с послеимпульсами и без них возрастает.

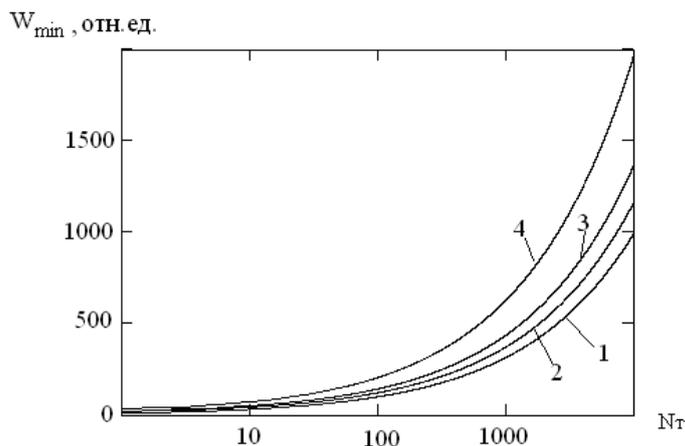


Рис. 2. Зависимость пороговой чувствительности счетчика фотонов от числа темновых импульсов для случая, когда послеимпульсы сопровождают только темновые импульсы: 1 — вероятность образования послеимпульсов $z=0$; 2 — $z=0,1$; 3 — $z=0,2$; 4 — $z=0,4$ (расчет выполнен для $\eta=0,1$)

На рис. 3 представлены зависимости пороговой чувствительности счетчика фотонов от числа темновых импульсов для трех случаев: послеимпульсы сопровождают темновые импульсы, фотоотсчеты, фотоотсчеты и темновые импульсы. Расчет зависимостей 1 и 2 (рис. 3) выполнен, исходя из равенства вероятностей образования послеимпульсов z . Зависимость 3 вычислялась из условия $z=z_T+z_C$. Из полученных результатов видно, что пороговая чувствительность счетчика фотонов при наличии послеимпульсов, сопровождающих фотоотсчеты и темно-

вые импульсы, больше, чем, когда послеимпульсы сопровождают только фотоотсчеты, но меньше, чем, когда послеимпульсы сопровождают только темновые импульсы, причем разность пороговых чувствительностей увеличивается с увеличением N_T . Это объясняется тем, что основной вклад в величину W_{min} вносит N_T , а послеимпульсы, возникающие вслед за темновыми импульсами, приводят к значительному увеличению числа темновых импульсов.

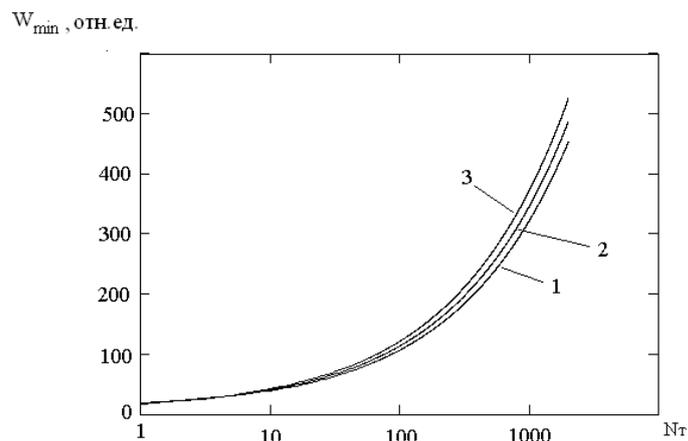


Рис. 3. Зависимость пороговой чувствительности счетчика фотонов от числа темновых импульсов: 1 — послеимпульсы сопровождают фотоотсчеты $z_C=0,1, z_T=0$; 2 — послеимпульсы сопровождают темновые импульсы и фотоотсчеты, $z_C=0,05, z_T=0,05$; 3 — послеимпульсы сопровождают темновые импульсы, $z_C=0, z_T=0,1$ (расчет выполнен для $\eta=0,1$)

В таблице представлены погрешности δ определения пороговой чувствительности лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов, в случае, если не учитывать вероятность образования послеимпульсов. Эта погрешность определялась по формуле

$$\delta = \frac{W_{min} - W'_{min}}{W'_{min}}, \quad (13)$$

где W_{min} — пороговая чувствительность оптического излучения в случае наличия послеимпульсов; W'_{min} — пороговая чувствительность оптического излучения при отсутствии послеимпульсов. В таблице приведены экспериментальные данные, полученные авторами. Вероятность определения послеимпульсов соответствовала их максимальному значению как для фотоотчетов, так и для темновых импульсов. При определении вероятности образования послеимпульсов использовали методику, описанную в работе [7]. Величину W_{min} определяли по формуле (12), а для вычисления W'_{min} пользовались выражением (3). Для всех исследуемых лавинных фотоприемников погрешность измерения пороговой чувствительности не превышала 0,05. Наибольшее значение δ наблюдалось для лавинных фотоприемников с плавным p - n -переходом.

Погрешности определения пороговой чувствительности лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов

Лавинные фотоприемники со структурой	Температура, К	Длина волны оптического излучения, мкм	Вероятность образования послеимпульсов после темновых импульсов	Вероятность образования послеимпульсов после фотоотчетов	Число темновых импульсов N_T , c^{-1}	Погрешность определения пороговой чувствительности
n^+p	300	0,68	0,02	0,07	$6,0 \cdot 10^5$	0,031
$p-n$			0,03	0,12	$8,0 \cdot 10^3$	0,049
$n^+p^-p^+$			0,006	0,01	$8,3 \cdot 10^2$	0,009
$p^+n^-v-n^+$			0,004	0,01	$5,6 \cdot 10^2$	0,007

Заключение

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что более сильную зависимость величина пороговой чувствительности оптического излучения имеет от вероятности образования послеимпульсов, образующихся после темновых импульсов, чем после фотоотсчетов.

THE PHOTODETECTOR ATERPULSES INFLUENCE ON THE DEFINITION ACCURACY OF THE PHOTONS COUNTER THRESHOLD SENSITIVITY

I.R. GULAKOV, A.O. ZENEVICH, A.M. TIMOFEEV

Abstract

Expressions for the description of dark pulses dispersion accompanied by afterpulses, and definitions of threshold sensitivity of photons counters with afterpulses are suggested. The estimation of afterpulses influence on threshold sensitivity level of photons counter has been carried out.

Литература

1. Гулаков И.Р., Холондырев С.В. // Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях. М., 1989.
2. Ветохин С. С., Гулаков И. Р., Перцев А.Н. и др. // Одноэлектронные фотоприемники. М., 1986.
3. Ахматов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. // Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981.
4. Гулаков И.Р., Зеневич А.О. // Докл. БГУИР. 2008. № 2. С. 19–25.
5. Rodman J. P., Smith H.J. // Appl. Opt. 1963. Vol. 2, № 1. P. 181.
6. Гулаков И.Р., Новиков Е.В., Зеневич А.О. // Оптический журнал. 1997. Т. 64, № 1. С. 55–57.
7. Гулаков И.Р., Зеневич А.О. // Пат. № 11775 Республики Беларусь. МПК (2006) G01R31/00 // Официальный бюллетень Национального центра интеллектуальной собственности Республики Беларусь. 2009. № 2(67). С. 115.