

УДК 621.383

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ
ПОТОКА ИМПУЛЬСОВ ОДНОКВАНТОВЫХ ЛАВИННЫХ
ФОТОДИОДОВ

© 2012 г. И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, А. М. Тимофеев

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

Поступила в редакцию 14.11.2011 г.

В режиме счета фотонов выполнены исследования автокорреляционных функций потока импульсов кремниевых лавинных фотодиодов, работающих в режиме одноквантовой регистрации. Установлено влияние послеимпульсов и эффекта мертвого времени на вид автокорреляционной функции.

Одноквантовый метод регистрации оптического излучения — это доступный и удобный способ измерения корреляционных характеристик как одиночного, так и нескольких взаимосвязанных потоков фотонов. Метод широко применяется для исследования кинетики люминесценции в импульсной флуориметрии, при лазерном зондировании атмосферы и водных сред. К достоинствам метода можно отнести, прежде всего, высокую чувствительность, большой диапазон рабочих интенсивностей и анализируемых времен корреляции, высокую точность измерения, удобство цифровой обработки экспериментальных данных, а также сравнительно невысокую стоимость базовой аппаратуры и простоту реализации.

В последнее время в методе одноквантовой регистрации все чаще используются лавинные фотодиоды (л.ф.д.). Такие фотоприемники требуют небольших напряжений питания, обладают достаточно высокой чувствительностью в видимой ближней и инфракрасной областях спектра и имеют малые размеры.

При измерении корреляционных характеристик оптических потоков необходимо, чтобы фотоприемник и регистрирующая аппаратура не вносили дополнительных искажений в этот поток либо эти искажения должны быть минимальными и известными, с тем чтобы их можно было учесть при обработке результатов. Цель данной работы — установить фотоэлектронные процессы в л.ф.д., которые приводят к искажению корреляционных характеристик оптических потоков, и величину этих искажений.

В качестве объектов исследования были выбраны кремниевые лавинные фотоприемники со структурой n^+p-p-p^+ и серийные кремниевые лавинные фотодиоды ФД-115Л, поскольку они имеют достаточно хорошие характеристики в ре-

жиме одноквантовой регистрации при комнатных температурах [1, 2].

Для реализации режима счета фотонов л.ф.д. включался по схеме пассивного гашения лавины. В этом случае л.ф.д. ведет себя подобно счетчику квантов излучения Гейгера—Мюллера (в литературе такая схема включения часто называется гейгеровской). Описание физического принципа регистрации оптического излучения л.ф.д., включенного по схеме пассивного гашения лавины, дано в работах [2, 3].

Для проведения исследований использовалась установка [1], в которой вместо аппаратно-программного измерительного комплекса применен коррелятор для измерения автокорреляционной функции выходного потока импульсов л.ф.д.

В качестве источника излучения с пуассоновской статистикой фотонов использовался светодиод АЛ307А. Оптическое излучение светодиода с длиной волны 0.68 мкм подавалось на л.ф.д. через нейтральный светофильтр и диафрагму. Исследования проводились при температуре 293 К.

Если выходной поток импульсов имеет пуассоновскую статистику, то между моментами времени появления этих импульсов отсутствует какая-либо зависимость [4], и среднее значение произведения числа импульсов в различных, но равных по длительности и неперекрывающихся интервалах времени Δt можно определить как:

$$\langle N_i N_k \rangle = \langle N_i \rangle \langle N_k \rangle, \quad (1)$$

где $\langle N_i \rangle$, $\langle N_k \rangle$ — средние значения числа импульсов в i -м и k -м интервалах времени соответственно.

Автокорреляционная функция потока импульсов G_{ik} в этом случае будет равна нулю:

$$G_{ik} = \langle N_i N_k \rangle - \langle N_i \rangle \langle N_k \rangle = 0. \quad (2)$$

Таким образом, если на лавинный фотодиод поступают фотоны с пуассоновской статистикой, то образованный этими фотонами поток электрических импульсов л.ф.д., работающего в режиме

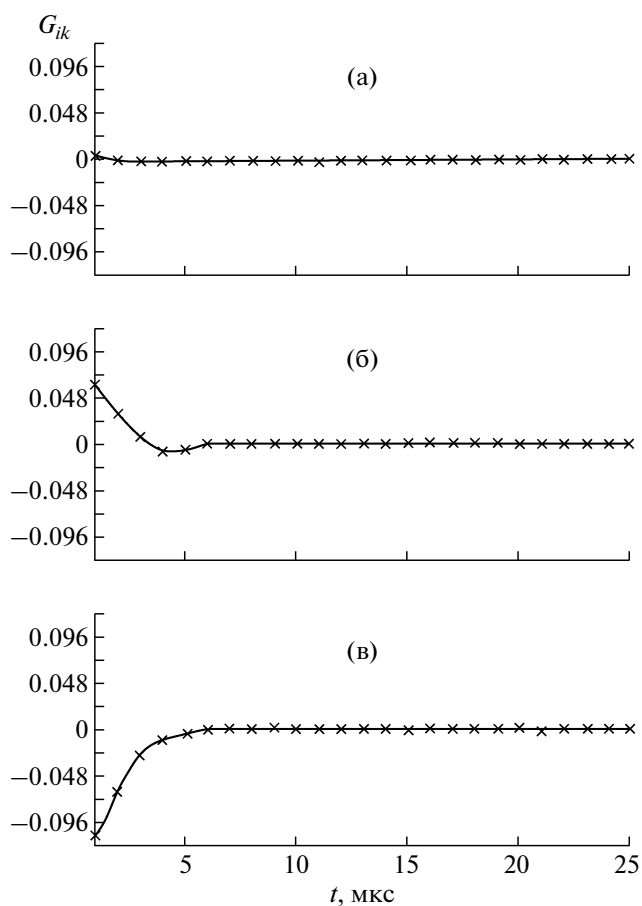


Рис. 1. Автокорреляционная функция G_{ik} для темновых импульсов лавинного фотодиода со структурой $n^+p-\pi-p^+$ при: **а** – $\Delta U = 0$ В, $n_T = 5 \cdot 10^3$ с $^{-1}$; **б** – $\Delta U = 0.1$ В, $n_T = 1.1 \cdot 10^4$ с $^{-1}$; **в** – $\Delta U = 0.9$ В, $n_T = 8.6 \cdot 10^5$ с $^{-1}$.

счета фотонов, должен иметь автокорреляционную функцию, равную нулю. Отклонения от нулевого значения измеренной автокорреляционной функции связаны с искажениями, вносимыми л.ф.д. при регистрации оптического излучения.

При проведении измерений длительность i -го интервала времени выбиралась равной 1 мкс. В этом случае регистрирующая аппаратура не вносила искажений в результаты измерений.

Нами были выполнены исследования автокорреляционных функций выходного потока импульсов л.ф.д. в зависимости от его напряжения питания U_n и интенсивности подсветки I .

Поскольку для различных структур л.ф.д. напряжения пробоя $U_{пр}$ различны, то при сравнении зависимостей их характеристик от напряжения питания использовалась величина перенапряжения $\Delta U = U_n - U_{пр}$. Для структур $n^+p-\pi-p^+$ напряжение пробоя равно 190 В, а для ФД-115Л – 51.44 В. Исследования автокорреляционных функций темновых импульсов показали, что вид этих

функций и их изменение в зависимости от величины перенапряжения ΔU одинаковы для всех исследуемых фотодиодов независимо от типа структуры.

На рис. 1 приведены автокорреляционные функции потока темновых импульсов при различных значениях ΔU для л.ф.д. со структурой $n^+p-\pi-p^+$. Согласно рис. 1а, при перенапряжениях $\Delta U \leq 0.05$ В значения автокорреляционной функции флуктуировали около нуля. Необходимо отметить, что среднее значение автокорреляционной функции равнялось нулю. Максимальное отклонение экспериментально полученных значений автокорреляционной функции от нулевого значения составило $|\sigma| = 8.5 \cdot 10^{-4}$. При этом скорости счета темновых импульсов $n_T \leq 6.5 \cdot 10^3$ с $^{-1}$.

Увеличение перенапряжения в диапазоне от 0.05 до 0.20 В приводило к появлению максимума автокорреляционной функции в первом ее канале (см. рис. 1б). Максимальное значение $G_{ik} = 0.07$ получено для перенапряжения $\Delta U = 0.10$ В, при этом скорость счета темновых импульсов $n_T = 1.1 \cdot 10^4$ с $^{-1}$. Время спада автокорреляционной функции от максимального значения до нуля не превышало 3 мкс.

При дальнейшем увеличении перенапряжения, $\Delta U > 0.20$ В ($n_T > 10^5$ с $^{-1}$), наблюдалось уменьшение автокорреляционной функции в первом ее канале до некоторого минимального значения (рис. 1в). При этом минимальное значение G_{ik} по абсолютной величине с ростом перенапряжения увеличивалось от $G_{ik} = -0.05$ при $\Delta U = 0.25$ В до $G_{ik} = -0.12$ при $\Delta U = 1.0$ В. Интервал времени, в течение которого автокорреляционная функция изменялась от минимального до нулевого значения, возрастал с увеличением перенапряжения от 1 мкс при $\Delta U = 0.25$ В ($n_T = 5.5 \cdot 10^5$ с $^{-1}$) до 3 мкс при $\Delta U = 1.0$ В ($n_T = 10^6$ с $^{-1}$).

Для фотодиодов ФД-115Л при $\Delta U \leq 0$ В и $n_T \leq 5 \times 10^3$ с $^{-1}$ значения автокорреляционной функции флуктуировали около нуля. Среднее значение автокорреляционной функции равнялось нулю на всем временном интервале измерений. Максимальное отклонение экспериментально полученных значений автокорреляционной функции от нулевого значения составило $|\sigma| = 3.7 \cdot 10^{-3}$, что выше, чем для л.ф.д. со структурой $n^+p-\pi-p^+$.

Увеличение перенапряжения в диапазоне от 0 до 0.3 В приводило к появлению максимума автокорреляционной функции в первом ее канале. Максимальное значение $G_{ik} = 0.02$ получено для перенапряжения $\Delta U = 0.05$ В при $n_T = 10^4$ с $^{-1}$. Время спада автокорреляционной функции от максимального значения до нуля не превышало 3 мкс, как и для л.ф.д. со структурой $n^+p-\pi-p^+$.

При дальнейшем увеличении перенапряжения, $\Delta U > 0.3$ В ($n_t \geq 1.5 \cdot 10^5$ с⁻¹), наблюдалось уменьшение автокорреляционной функции до некоторой минимальной величины в первом ее канале. При этом минимальное значение G_{ik} по абсолютной величине с ростом перенапряжения увеличивалось от $G_{ik} = -0.03$ при $\Delta U = 0.35$ В до $G_{ik} = -0.10$ при $\Delta U = 1.0$ В. Интервал времени, в течение которого автокорреляционная функция изменялась от минимального до нулевого значения, с увеличением перенапряжения возрастал от 1 мкс при $\Delta U = 0.35$ В и $n_t = 6.5 \cdot 10^5$ с⁻¹ до 3 мкс при $\Delta U = 1.0$ В и $n_t = 10^6$ с⁻¹.

Такое поведение автокорреляционных функций потока темновых импульсов л.ф.д. с увеличением перенапряжения можно объяснить наличием послеимпульсов и проявлением эффекта мертвого времени.

При значениях перенапряжения $\Delta U \leq 0.05$ В для л.ф.д. со структурой n^+p-p^+ и $\Delta U \leq 0$ В для фотодиодов ФД-115Л статистическое распределение выходного потока темновых импульсов достаточно хорошо описывается распределением Пуассона. Поэтому автокорреляционная функция этого потока равна нулю. Увеличение ΔU в диапазоне 0.05–0.20 В для л.ф.д. со структурой n^+p-p^+ и 0–0.3 В для фотодиодов ФД-115Л приводит к появлению послеимпульсов — импульсов, возникающих в л.ф.д. вслед за темновыми импульсами или фотоотсчетами и имеющих с ними корреляционную связь.

Причиной появления послеимпульсов является захват свободных носителей заряда (электронов или дырок) на ловушечные уровни с последующей их реэмиссией [2]. Вероятность появления послеимпульсов уменьшается с течением времени по экспоненциальному закону. Наличие послеимпульсов приводит к возникновению корреляционных связей между импульсами.

Автокорреляционную функцию импульсов л.ф.д. с послеимпульсами можно описать с помощью следующего выражения:

$$G(t) = G_0 + G_\tau \exp(-t/\tau), \quad (3)$$

где G_0 — автокорреляционная функция без послеимпульсов, имеющая постоянное значение ($G_0 = 0$); G_τ — постоянная автокорреляционной функции с послеимпульсами, которая пропорциональна вероятности появления послеимпульсов; t — время; τ — постоянная времени затухания послеимпульсов.

Исходя из выражения (3), значение автокорреляционной функции в первом канале пропорционально вероятности появления послеимпульсов, а спад автокорреляционной функции соответствует времени затухания послеимпульсов. Отметим также, что послеимпульсы приводят к отклонению статистического распределения потока импульсов

л.ф.д. от пуассоновского. Это объясняется тем, что дисперсия выходного потока импульсов превосходит его математическое ожидание [1].

Анализ полученных автокорреляционных функций показывает, что время, в течение которого наблюдались послеимпульсы, не превышало 3 мкс для всех исследуемых типов л.ф.д.

При значениях $\Delta U > 0.2$ В для л.ф.д. со структурой n^+p-p^+ и $\Delta U > 0.3$ В для фотодиодов ФД-115Л значительно увеличивается скорость счета темновых импульсов и начинает проявляться эффект “мертвого времени”, т.е. появляется интервал времени, в течение которого л.ф.д. нечувствителен к падающему на него оптическому излучению. Это связано с тем, что после пробоя в области лавинного умножения $p-n$ -перехода л.ф.д. необходимо некоторое время для восстановления напряженности электрического поля в этой области до допробойного значения, соответствующего приложенному перенапряжению ΔU . В течение “мертвого времени” также не образуются темновые импульсы на выходе л.ф.д.

Так как продолжительность “мертвого времени” зависит от собственной емкости и внутреннего сопротивления л.ф.д., то для фотодиодов различных типов она различна. Следовательно, будут различаться и скорости счета темновых импульсов, при которых наблюдается этот эффект для исследуемых фотодиодов.

Лавинные фотодиоды, включенные по схеме пассивного гашения лавины, имеют “мертвое время” продлевающегося типа [2], продолжительность которого зависит от интенсивности регистрируемого оптического излучения и скорости счета темновых импульсов. С увеличением интенсивности излучения и n_t “мертвое время” продлевающегося типа увеличивается, поэтому для оценки его длительности используется его среднее значение [5].

Для скоростей счета темновых импульсов, при которых продолжительность “мертвого времени” становится сравнимой с временем образования послеимпульсов, эти эффекты, действуя противоположным образом, компенсируют друг друга. Поэтому с увеличением скорости счета темновых импульсов при увеличении перенапряжения максимум автокорреляционной функции исчезает. Дальнейшее увеличение перенапряжения приводит к тому, что вследствие роста “мертвого времени” л.ф.д. все большее число фотонов оптического излучения не регистрируется, а это в свою очередь приводит к появлению корреляционных связей между импульсами.

Автокорреляционную функцию импульсов л.ф.д. для случая проявления эффекта “мертвого времени” можно описать следующим выражением:

$$G(t) = G_0 - G_d \exp(-t/\tau_d), \quad (4)$$

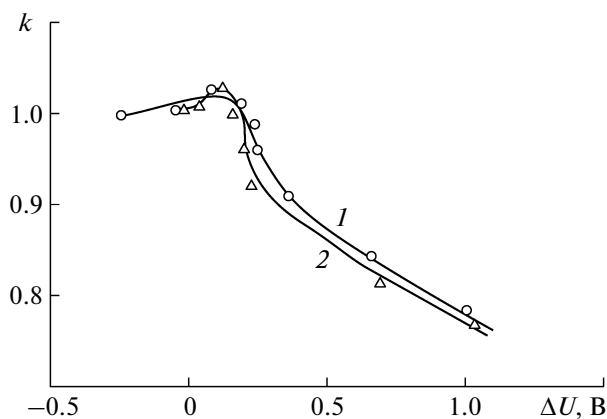


Рис. 2. Зависимости коэффициента k от перенапряжения ΔU для темновых импульсов: 1 – ФД-115Л; 2 – л.ф.д. со структурой n^+p-p^+ .

где G_d – постоянная автокорреляционной функции, пропорциональная вероятности просчетов импульсов; τ_d – среднее значение длительности мертвого времени. Поэтому в первом канале появляется минимальное значение автокорреляционной функции.

Необходимо отметить, что при наличии “мертвого времени” дисперсия выходного потока импульсов становится меньше его математического ожидания [5], что приводит к отклонению статистики потока импульсов от распределения Пуассона. Для оценки соответствия выходного потока темновых импульсов статистике Пуассона использовался коэффициент $k = D/N$, где D – дисперсия распределения темновых импульсов, N – его математическое ожидание. Для распределения Пуассона $k = 1$.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента k от ΔU для темновых импульсов. Как видно из полученных зависимостей, $k = 1$ при $\Delta U \leq 0$ В для темновых импульсов ФД-115Л. При этих перенапряжениях статистическое распределение темновых импульсов соответствует распределению Пуассона, и автокорреляционная функция равна нулю для исследуемых л.ф.д. Для фотодиодов со структурой n^+p-p^+ статистическое распределение темновых импульсов соответствует пуассоновскому при $\Delta U \leq 0.05$ В. Значения $k > 1$ для фотодиодов ФД-115Л наблюдались в диапазоне перенапряжений 0–0.3 В, а для л.ф.д. со структурой n^+p-p^+ – 0.05–0.20 В. Как отмечено ранее, этим перенапряжениям соответствуют автокорреляционные функции с максимальным значением в первом канале.

При перенапряжениях $\Delta U \geq 0.3$ В для фотодиодов ФД-115Л и $\Delta U \geq 0.20$ В для л.ф.д. со структурой n^+p-p^+ коэффициент $k < 1$. Этим перенапряжениям соответствуют автокорреляционные

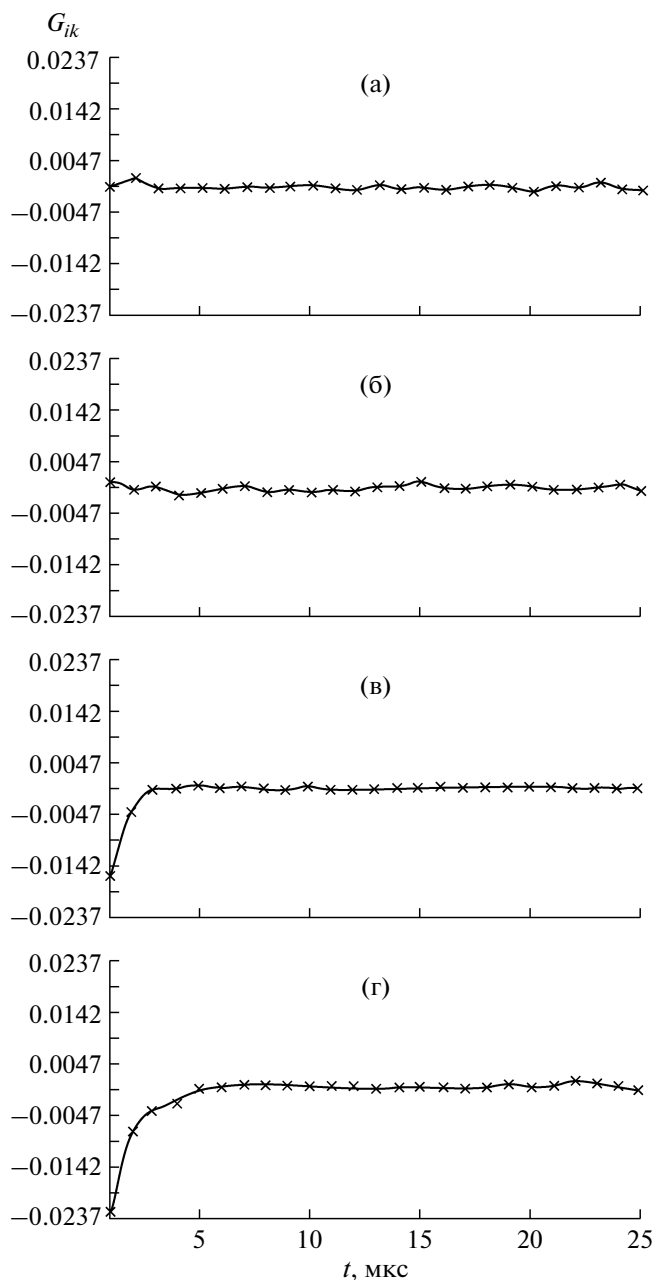


Рис. 3. Автокорреляционная функция G_{ik} лавинного фотодиода со структурой n^+p-p^+ при $\Delta U = 0$ В для темновых импульсов, $n_T = 5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ (а) и при различных интенсивностях оптического сигнала: I_1 , $n = 10^4 \text{ c}^{-1}$ (б); I_2 , $n = 5.1 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ (в); I_3 , $n = 10^5 \text{ c}^{-1}$ (г).

функции с минимальным значением в первом канале.

Оценка среднего значения длительности “мертвого времени” τ_d по автокорреляционным функциям показала, что его величина составила 1.1 и 0.9 мкс для ФД-115Л и л.ф.д. со структурой n^+p-p^+ соответственно.

Исследования автокорреляционных функций потока импульсов л.ф.д. от интенсивности подсветки I (рис. 3) показали, что эти функции имеют одинаковый вид для всех исследуемых фотодиодов независимо от типа структуры. Увеличение интенсивности подсветки приводит к появлению минимального значения автокорреляционной функции в первом ее канале (рис. 3в, 3г). Это можно наблюдать для л.ф.д. со структурой $n^+p-\pi-p^+$ при скорости счета импульсов на выходе фотодиода $n > 5.5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, а для фотодиодов ФД-115Л – при $n > 5.0 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

При дальнейшем увеличении интенсивности подсветки значение автокорреляционной функции в первом ее канале снижается еще больше, достигая минимального значения $G_{ik} = -0.023$ для л.ф.д. со структурой $n^+p-\pi-p^+$ и $G_{ik} = -0.007$ для фотодиодов ФД-115Л при $\Delta U = 0 \text{ В}$. Промежуток времени нарастания автокорреляционной функции от минимального до нулевого значений увеличивается с ростом интенсивности оптического излучения от 1 мкс при скорости счета импульсов $n = 6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ до 3 мкс при $n = 10^5 \text{ с}^{-1}$ для всех исследуемых л.ф.д.

Проведенными исследованиями показано, как послеимпульсы и эффект “мертвого времени” ла-

винных фотодиодов, работающих в режиме счета фотонов, искажают автокорреляционные функции регистрируемых оптических потоков. В то же время по измеренным автокорреляционным функциям можно определить вероятность появления и время затухания послеимпульсов, а также значение “мертвого времени”.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, договор № Т11ОБ-043.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулаков И.Р., Залесский В.Б., Зеневич А.О. и др. // ПТЭ. 2010. № 4. С. 92.
2. Гулаков И.Р., Холондырев С.В. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях. Минск: Изд-во Университетское, 1989.
3. Zappa F., Lacaita A.L., Cova S.D., Lovati P. // Optical Engineering. 1996. V. 35. № 4. P. 938.
4. Ахматов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981.
5. Гольданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959.