

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХРЕЖИМНОЙ РАБОТЫ ЛАВИННЫХ
ФОТОДИОДОВ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ© 2019 г. О. Ю. Горбадей^а, А. О. Зеневич^{а,*}, Е. В. Новиков^а, С. А. Гоибов^а^а Белорусская государственная академия связи
Беларусь, 220114, Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2

*e-mail: a.zenevich@bsac.by

Поступила в редакцию 13.07.2018 г.

После доработки 13.07.2018 г.

Принята к публикации 19.08.2018 г.

Показана возможность одновременной работы лавинных фотодиодов в режиме счета фотонов и токовом режиме. Двухрежимная работа обеспечена при постоянном напряжении питания лавинного фотодиода, превышающем напряжение пробоя его $p-n$ -перехода. Приведены оценки вероятности образования микроплазменных импульсов от интенсивности оптического излучения и напряжения питания лавинного фотодиода для рассматриваемого режима работы.

DOI: 10.1134/S0032816219020113

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время лавинные фотодиоды (л.ф.д.) находят широкое применение для регистрации оптического излучения в лидарных системах, оптической рефлектометрии волоконно-оптических линий связи, в квантовых информационных системах [1–3]. В этих случаях использование л.ф.д. предполагает сочетание двух режимов работы: токового и счета фотонов, что обусловлено необходимостью регистрировать оптическое излучение в широком диапазоне интенсивностей. Токовый режим работы используется для регистрации достаточно мощного оптического излучения, а режим счета фотонов применяется для регистрации излучения малой мощности [4]. В токовом режиме л.ф.д. обычно работают при напряжениях питания $U_{\text{п}}$, меньших напряжения пробоя его $p-n$ -перехода $U_{\text{пр}}$.

В работе [5] для сочетания двух этих режимов применялся управляемый источник питания, который устанавливал напряжение питания л.ф.д. выше или ниже $U_{\text{пр}}$ в зависимости от того, какой из режимов регистрации использовался. Применение такого источника питания со схемой управления усложняет устройство регистрации. Постоянное переключение напряжения питания также может привести к выходу л.ф.д. из строя.

Целью данной работы является анализ возможности реализации токового режима работы и режима счета фотонов при постоянном напряжении питания лавинного фотодиода, превышающем напряжение пробоя его $p-n$ -перехода.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ
ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования были использованы кремниевые лавинные фотодиоды промышленного изготовления ФД-115Л и экспериментальные лавинные фотодиоды со структурой $n^+-p-\pi-p^+$.

Исследования выполнены на установке, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Установка функционирует следующим образом. На светодиод $СД_1$ от генератора Γ поступают прямоугольные импульсы. В результате светодиод $СД_1$ формирует импульсное оптическое излучение, которое поступает на набор нейтральных светофильтров H_1 . Набор светофильтров H_1 обеспечивает требуемое ослабление интенсивности оптических импульсов, направляемых на первый вход оптического смесителя $См$.

От источника I_1 на светодиод $СД_2$ подается постоянное напряжения питания, в результате чего светодиод $СД_2$ испускает оптическое излучение постоянной интенсивности. Это оптическое излучение через набор нейтральных светофильтров H_2 и диафрагму D подается на второй вход оптического смесителя $См$. Диафрагма D используется для перекрытия в необходимых случаях потока оптического излучения. Светодиод $СД_2$ обеспечивает таким образом стационарную подсветку л.ф.д.

Коэффициенты ослабления обоих наборов нейтральных светофильтров H_1 и H_2 могли регу-

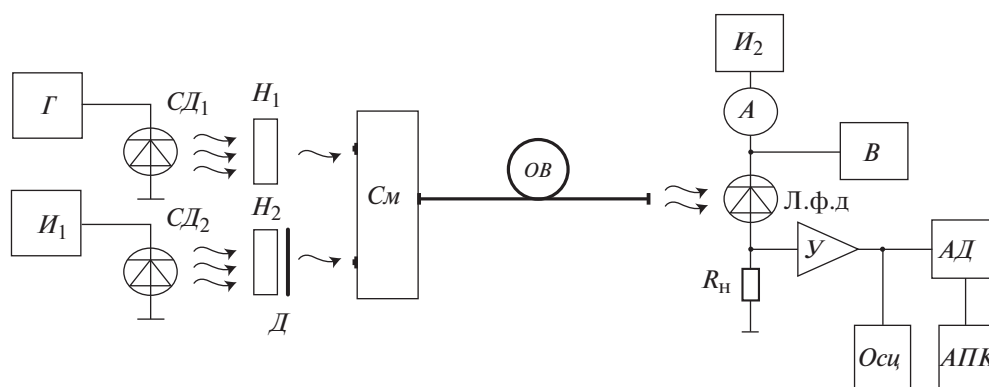


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки. G – генератор прямоугольных импульсов, I_1 , I_2 – источники постоянного напряжения, CD_1 , CD_2 – светодиоды, H_1 , H_2 – наборы нейтральных светофильтров, D – диафрагма, $См$ – оптический смеситель, OB – оптическое волокно, A – амперметр, B – вольтметр, л.ф.д. – лавинный фотодиод, R_n – резистор нагрузки, $Осц$ – осциллограф, $У$ – усилитель импульсов, AD – амплитудный дискриминатор, $АПК$ – аппаратно-программный комплекс.

лироваться в широком диапазоне, обеспечивая ослабление интенсивности излучения до 10^5 раз.

Смеситель $См$, объединив оптические излучения от светодиодов CD_1 и CD_2 , направляет их в оптическое волокно OB , с выхода которого излучение поступает на лавинный фотодиод.

Лавинный фотодиод включен последовательно с нагрузочным резистором R_n (рис. 1). На л.ф.д. подается постоянное напряжение питания $U_n \geq U_{пр}$ от источника I_2 через амперметр A . Напряжение контролируется вольтметром B . При таком включении под воздействием оптических импульсов в фотодиоде формируются импульсы тока. Вместе с тем при этих напряжениях питания в л.ф.д. могут возникать импульсы тока, вызванные микроплазменным пробоем $p-n$ -перехода. К появлению этого пробоя приводят термодогенерированные свободные носители заряда, образующиеся в области умножения носителей заряда $p-n$ -перехода, или свободные носители заряда, возникшие в этой области под воздействием стационарного оптического излучения светодиода CD_2 . Далее такие импульсы будут называться микроплазменными.

Токовые импульсы, независимо от их происхождения, изменяют падение напряжения на нагрузочном резисторе R_n , формируя импульсы напряжения, которые усиливаются усилителем $У$. С выхода усилителя импульсы поступают на вход амплитудного дискриминатора AD . Вид импульсов напряжения на выходе усилителя контролируется осциллографом.

Амплитудный дискриминатор отделяет собственные шумы усилителя от микроплазменных импульсов фотодиода и импульсов, вызванных оптическими сигналами светодиода CD_1 . Импульсы с выхода дискриминатора AD подаются на

вход аппаратно-программного комплекса $АПК$. Аппаратно-программный комплекс на базе компьютера позволяет определять вероятность появления микроплазменных импульсов.

Напряжение пробоя л.ф.д. $U_{пр}$ определялось по его вольт-амперной характеристике согласно методике, рассмотренной в работе [6]. Для исследуемых лавинных фотодиодов оно составляло 51.4 В для ФД-115Л и 190.2 В для л.ф.д. со структурой $n^+-p-\pi-p^+$.

Использовалось оптическое излучение с длиной волны $\lambda = 650$ нм для обоих светодиодов.

Измерения проводились при постоянном значении температуры $T = 293$ К.

Характеристики генератора G изменялись в следующих диапазонах: длительность оптических импульсов 0.1–10 мкс; частота следования импульсов 10^3 – 10^5 Гц.

Поскольку отдельные экземпляры исследуемых лавинных фотоприемников имеют разное напряжение пробоя, то для сравнения их характеристик между собой использовалась величина перенапряжения $\Delta U = U_n - U_{пр}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки возможности одновременной реализации токового и счетного режимов регистрации на исследуемые л.ф.д. подавалось одинаковое перенапряжение $\Delta U = 0.1$ В и на них последовательно направлялось оптическое излучение только от светодиода CD_1 , а затем одновременно от светодиодов CD_1 и CD_2 . Полученные осциллограммы усиленных выходных сигналов л.ф.д. со структурой $n^+-p-\pi-p^+$ представлены на рис. 2. Отметим, что осциллограммы выходных сигнала

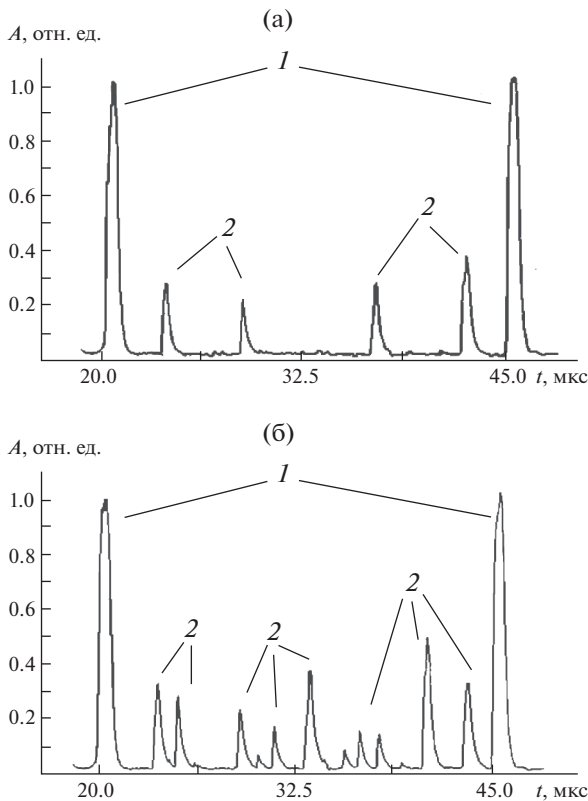


Рис. 2. Осциллограммы усиленных выходных сигналов л.ф.д. со структурой n^+p-p-p^+ при $\Delta U = 0.1$ В без внешней засветки (а) и с засветкой (б). 1 – импульсы, обусловленные оптическими импульсами светодиода $СД_1$; 2 – микроплазменные импульсы.

лов для лавинного фотодиода ФД-115Л имели аналогичный вид.

Как видно из приведенных результатов на рис. 2а, между импульсами, инициированными в л.ф.д. оптическими импульсами светодиода $СД_1$, появляются микроплазменные импульсы, создаваемые в лавинном фотодиоде термогенерированными свободными носителями заряда. Длительность микроплазменных импульсов приблизительно одинакова как для л.ф.д. со структурой n^+p-p-p^+ , так и для лавинных фотодиодов ФД-115Л, и составляет ~ 1 мкс. Отметим, что длительность τ оптических импульсов $СД_1$ выбиралась равной средней длительности микроплазменных импульсов, а частота их следования составляла $4 \cdot 10^4$ Гц.

В процессе выполнения измерений имелась возможность изменения энергетической экспозиции H импульсов, формируемых светодиодом $СД_1$, в диапазоне $6.7 \cdot 10^{-8} - 2.2 \cdot 10^{-5}$ Дж/см². Амплитуда импульсов, сформированных оптическим излучением светодиода $СД_1$ на нагрузочном резисторе фотодиода, естественным образом зависела от величины H . Для значений $H \leq 2.4 \cdot 10^{-6}$ Дж/см² ам-

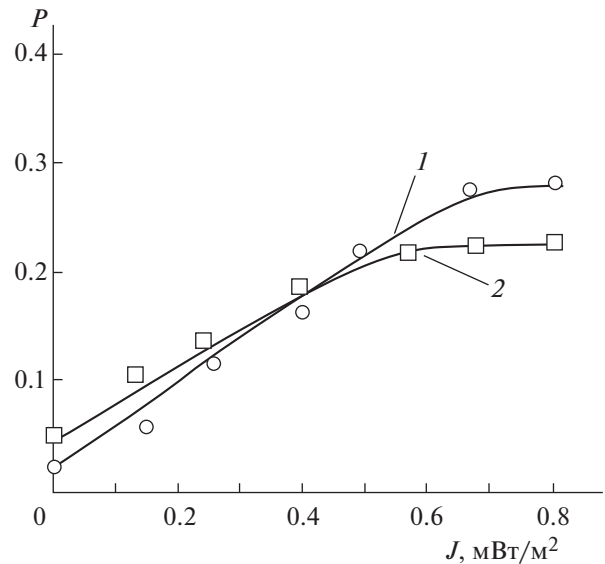


Рис. 3. Зависимость вероятности образования микроплазменных импульсов от интенсивности оптического излучения $СД_2$ для $\Delta U = 0.1$ В. 1 – л.ф.д. со структурой n^+p-p-p^+ ; 2 – для ФД-115Л.

плитуда этих импульсов была равной или меньшей амплитуды микроплазменных импульсов для всех исследуемых фотоприемников. Выделить такие импульсы среди микроплазменных импульсов было практически невозможно. Максимальное количество микроплазменных импульсов, которое могло уложиться в интервале времени $t = t_1 - \tau$ (где t_1 – период следования оптических импульсов), составляло $N_0 = 21$.

Вероятность образования микроплазменных импульсов P определялась как отношение N/N_0 , где N – среднее число импульсов, зарегистрированных за время t .

При одновременном поступлении оптического излучения от светодиодов $СД_1$ и $СД_2$ на л.ф.д. увеличивается количество микроплазменных импульсов за интервал времени t (см. рис. 2б) и, следовательно, растет вероятность P для всех исследуемых фотодиодов.

Зависимость вероятности P от интенсивности J стационарного оптического излучения имела линейный участок для всех исследуемых л.ф.д. (см. рис. 3). Линейный участок соответствовал интервалу интенсивностей стационарной подсветки $0 - 4 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² для фотодиодов ФД-115Л и $0 - 5 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² для л.ф.д. со структурой n^+p-p-p^+ .

Дальнейшее увеличение интенсивности оптического излучения приводило к насыщению зависимости P от J . Такое поведение связано с тем, что при больших интенсивностях оптического излучения проявляется влияние мертвого времени [4], обусловленное тем, что в течение определен-

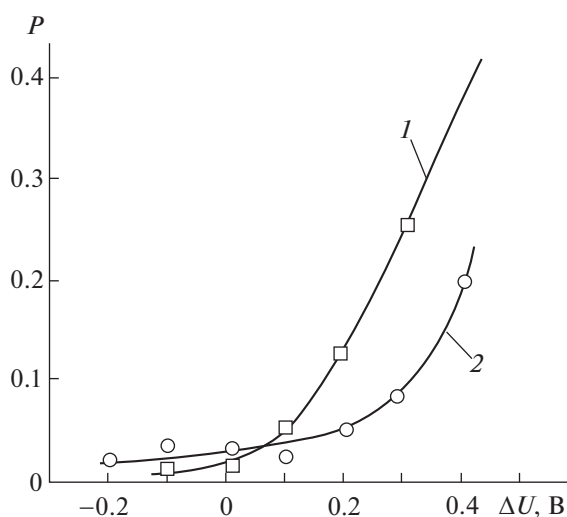


Рис. 4. Зависимость вероятности образования микроплазменных импульсов от ΔU для л.ф.д. двух типов: 1 – ФД-115Л; 2 – л.ф.д. со структурой $n^+ - p - \pi - p^+$.

ного промежутка времени после возникновения в л.ф.д. микроплазменного импульса электрическое поле в области $p-n$ -перехода восстанавливается до допробойного значения. В этот промежуток времени микроплазменные импульсы в л.ф.д. не формируются, диод нечувствителен к падающему на него излучению. С ростом интенсивности оптического излучения вероятность поступления фотона на л.ф.д. в течение этого времени увеличивается. В результате возникают просчеты фотонов, и, как следствие, зависимость P от J отклоняется от линейной.

Из наличия линейного участка зависимостей P от J для всех исследуемых фотоприемников следует, что в промежуток времени t л.ф.д. работают в режиме счета фотонов только при тех интенсивностях J , которые соответствуют этому участку.

Установлено, что минимальный интервал между импульсом, вызванным оптическим излучением светодиода $СД_1$, и появлением за ним первого микроплазменного импульса составляет ~ 0.1 мкс.

Величина H оптического импульса, сформированного светодиодом $СД_1$, для длительностей от 0.1 до 10 мкс не оказывала влияния на вероятность образования микроплазменных импульсов P в исследуемом диапазоне энергетических экспозиций.

Увеличение напряжения питания л.ф.д. приводило к росту количества микроплазменных импульсов, образованных термогенерированными носителями заряда, а также к увеличению амплитуды импульсов, сформированных оптическим излучением от светодиода $СД_1$ при постоянной энергетической экспозиции.

Зависимости вероятности образования микроплазменных импульсов, образованных термогенерированными носителями, от величины ΔU представлены на рис. 4 для частоты следования $4 \cdot 10^4$ Гц и длительности оптических импульсов светодиода $СД_1$ 2 мкс. Оптическое излучение от светодиода $СД_2$ при этом отсутствовало. Исследования выполнены для диапазона перенапряжений $\Delta U = -0.2 \dots +0.4$ В. При $\Delta U < -0.2$ В микроплазменные импульсы в л.ф.д. не возникали. С увеличением $\Delta U > 0.4$ В значительно увеличился электрический ток, протекающий через л.ф.д., что могло привести к тепловому пробоем $p-n$ -перехода.

При изменении ΔU от -0.2 до 0.1 В линейный участок зависимости P от J увеличивался. Это связано с уменьшением значения мертвого времени л.ф.д. при увеличении ΔU в этом диапазоне перенапряжений. Такое изменение длительности мертвого времени обусловлено уменьшением последовательного сопротивления л.ф.д. с увеличением ΔU в интервале от -0.2 до 0.1 В. Отметим, что собственная емкость л.ф.д. при этом оставалась неизменной. Дальнейшее увеличение перенапряжения не приводит к увеличению последовательного сопротивления л.ф.д. и поэтому длительность мертвого времени для $\Delta U > 0.1$ В остается постоянной.

Установлено, что увеличение перенапряжения увеличивает вероятность появления микроплазменных импульсов, вызванных термогенерированными носителями, для всех исследуемых л.ф.д. Последнее обусловлено тем, что рост напряжения питания приводит к увеличению объема области микроплазменного пробоя $p-n$ -перехода л.ф.д. и соответственно к повышению вероятности попадания термогенерированного носителя в эту область и формирования микроплазменного пробоя [4, 6]. Отметим, что увеличение вероятности образования микроплазменных импульсов, вызванных термогенерированными носителями заряда, влекло за собой уменьшение линейного участка зависимости P от J в интервале перенапряжений от 0.1 до 0.3 В. Так, линейный участок при увеличении перенапряжения от 0.1 до 0.3 В уменьшается для фотодиодов ФД-115Л в 1.3 раза, а для л.ф.д. со структурой $n^+ - p - \pi - p^+$ – в 1.2 раза.

Более сильную зависимость P от ΔU имели фотодиоды ФД-115Л. Так, для фотодиодов ФД-115Л отношение $\Delta P / \Delta U_n = 0.8 \text{ В}^{-1}$, а для л.ф.д. со структурой $n^+ - p - \pi - p^+$ – 0.3 В^{-1} (ΔP – изменение вероятности появления микроплазменных импульсов, ΔU_n – изменение приложенного к л.ф.д. напряжения питания).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о возможности одновременной реализации режима счета фотонов и токового режима для лавинных фотодиодов, что расширяет область их практического применения. Двухрежимная работа обеспечивается при постоянном напряжении питания фотодиода, превышающем напряжение пробоя его $p-n$ -перехода.

Определены зависимости вероятности образования микроплазменных импульсов в лавинных фотодиодах от интенсивности падающего на него оптического излучения, сформированного стационарной подсветкой. Показано, что данные зависимости имеют линейный участок и реализация режима счета фотонов возможна только для интенсивностей оптического излучения, соответствующих этому участку.

Показано, что увеличение вероятности образования микроплазменных импульсов, вызванных термогенерированными носителями заряда, приводит к уменьшению линейного участка зависимости вероятности образования микроплазменных импульсов от интенсивности засветки. Это обуславливает сокращение динамического диапазона регистрации лавинного фотодиода в режиме счета фотонов.

Установлено, что фотодиоды ФД-115Л имели более сильную зависимость вероятности образования микроплазменных импульсов от напряжения питания, чем л.ф.д. со структурой $n^+-p-\pi-p^+$.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Т16К-006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Килин С.Я.* Квантовая криптография: идеи и практика. Минск: Белорус. наука, 2007.
2. *Василю Е.В., Мамедов Р.С.* // Цифрові технології. 2009. № 6. С. 94.
3. *Зеневич А.О.* Обнаружители утечки информации из оптического волокна. Минск: Белорус. гос. академия связи, 2017.
4. *Гулаков И.Р., Зеневич А.О.* Фотоприемники квантовых систем. Минск: Высший гос. колледж связи, 2012.
5. *Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Тимофеев А.М.* Патент 17012 РБ. МПК (2006.01) G 08 C 23/00 // Офиц. бюл. Нац. центра интеллектуальной собственности. 2013. № 2. С. 145.
6. *Грехов И.В., Серезжин Ю.Н.* Лавинный пробой $p-n$ -перехода в полупроводниках. Л.: Энергия, 1980.