

УДК 621.383.92

PACS 85.60.-q

Исследование амплитудного распределения микроплазменных импульсов при двухрежимной работе лавинного фотодиода

О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, С. А. Гоибов

Выполнено исследование амплитудного распределения микроплазменных импульсов при одновременной реализации на лавинном фотодиоде режима счета фотонов и токового режима работы. Режимы работы реализованы при постоянном напряжении питания лавинного фотодиода, превышающем напряжение пробоя его $p-n$ -перехода. Оценено влияние на амплитуду микроплазменных импульсов величины напряжения питания лавинного фотодиода и интенсивности оптического излучения.

Ключевые слова: амплитудное распределение, микроплазменный импульс, счет фотонов, токовый режим, лавинный фотодиод.

Ссылка: Горбадей О. Ю., Зеневич А. О., Новиков Е. В., Гоибов С. А. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 4. С. 339.

Reference: O. Y. Gorbadey, A. O. Zenevich, E. V. Novikov, and S. A. Ghoibov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (4), 339 (2019).

Введение

Лавинные фотодиоды (ЛФД) широко используются для регистрации оптического излучения в оптической связи, лидарах, для регистрации слабосветящихся астрономических объектов [1–3]. При применении ЛФД в большинстве случаев требуется регистрация оптического излучения в широком диапазоне интенсивностей. Поэтому зачастую необходимо обеспечивать сочетание двух режимов работы: токового и счета фотонов. Токовый режим работы используется для регистрации достаточно мощного оптического излучения, а режим счета фотонов применяется для регистрации излучения малой мощности [4].

В токовом режиме работы ЛФД осуществляется измерение величины постоянного или импульсного электрического тока, созданного в диоде регистрируемым оптическим излучением. Отметим, что величина тока может быть определена по величине падения напряжения на нагрузочном резисторе R_n , включенном последовательно с ЛФД [4].

Режим счета фотонов применяется для повышения чувствительности ЛФД [4]. В этом режиме выполняют подсчет количества импульсов тока, образованных фотонами регистрируемого оптического излучения в ЛФД. Отметим, что такой режим работы реализуется в большинстве случаев при напряжениях питания ЛФД U_n , больших напряжения пробоя его $p-n$ -перехода $U_{пр}$.

В работе [5] было предложено устройство, которое позволяло осуществлять работу ЛФД в этих режимах. Для реализации переключения ЛФД из одного режима в другой использовался управляемый источник питания, который устанавливал постоянное напряжение питания выше или ниже $U_{пр}$ в зависимости от того, какой из режимов необходим для регистрации оптического излучения. Однако использование такого источника питания со

Горбадей Ольга Юрьевна, преподаватель.
Зеневич Андрей Олегович, ректор, д.т.н.
Новиков Евгений Владимирович, директор Института современных технологий связи, к.т.н.
Гоибов Сухроб Абдурахимович, аспирант.
Белорусская государственная академия связи.
Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2.
Тел. +(375 29) 878-49-25. E-mail: o-st1@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24 января 2019 г.

© Горбадей О. Ю., Зеневич А. О., Новиков Е. В., Гоибов С. А., 2019

схемой управления усложняет устройство регистрации, а также может привести к выходу ЛФД из строя из-за постоянного переключения напряжения питания. Поэтому для реализации двухрежимной работы ЛФД целесообразно применять постоянное напряжение питания $U_{п} \geq U_{пр}$. Однако в настоящее время исследования возможности использования $U_{п} \geq U_{пр}$ для реализации одновременной двухрежимной работы ЛФД отсутствуют, а, следовательно, нет информации о характеристиках светодиода в таком режиме работы. Одной из наиболее важных характеристик ЛФД является амплитудное распределение его импульсов, поскольку именно эта характеристика позволяет выбирать оптимальный порог амплитудной селекции, обеспечивающий в режиме счета фотонов выделение сигнальных импульсов на фоне шумов, а при реализации токового режима работы при $U_{п} \geq U_{пр}$ – отделение помеховых микроплазменных импульсов от регистрируемого сигнала.

В связи с этим целью данной работы является исследование характеристик амплитудного распределения импульсов ЛФД при двухрежимной работе.

Описание установки и методики проведения эксперимента

Исследования выполнены на установке, структурная схема которой представлена на рис. 1. Установка работает таким образом, что на светодиод СД1 от генератора Г поступают прямоугольные импульсы. Благодаря этому светодиод СД1 создает импульсное оптическое излучение, которое подается на набор нейтральных светофильтров Н1. Набор светофильтров Н1 осуществляет необходимое ослабление интенсивности оптических импульсов. После ослабления оптические импульсы поступают на первый вход оптического смесителя СМ.

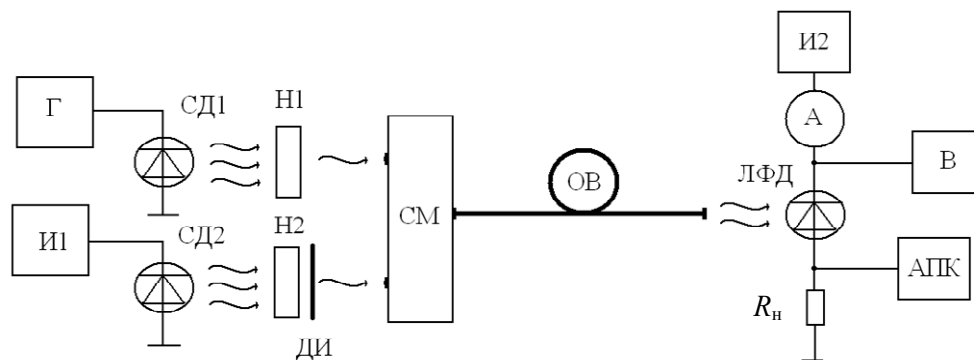


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: Г – генератор прямоугольных импульсов; И1 и И2 – источники постоянного напряжения; СД1 и СД2 – светодиоды; Н1 и Н2 – наборы нейтральных светофильтров; ДИ – диафрагма; СМ – оптический смеситель; ОВ – оптическое волокно; А – амперметр; В – вольтметр; ЛФД – лавинный фотодиод; R_n – резистор нагрузки; АПК – аппаратно-программный комплекс.

На светодиод СД2 от источника И1 подается постоянное напряжения питания, при этом светодиод СД2 испускает оптическое излучение постоянной интенсивности, что обеспечивает постоянную засветку фотоприемника. Оптическое излучение светодиода СД2 через набор нейтральных светофильтров Н2 и диафрагму ДИ подается на второй вход оптического смесителя СМ. Диафрагма ДИ применяется для перекрытия оптического излучения, поступающего на второй вход смесителя СМ от светодиода СД2.

Коэффициенты ослабления обоих наборов нейтральных светофильтров Н1 и Н2 могли регулироваться в широком диапазоне, обеспечивая ослабление интенсивности излучения до 10^5 раз.

Смеситель СМ, объединив оптические излучения от светодиодов СД1 и СД2, направляет их в оптическое волокно ОВ, с выхода которого излучение поступает на лавинный фотодиод ЛФД.

Лавинный фотодиод ЛФД обеспечивает регистрацию оптического излучения и вклю-

чен последовательно с нагрузочным резистором R_n (см. рис. 1). На ЛФД подается постоянное напряжение питания $U_n \geq U_{пр}$ от источника И2. Величина падения напряжения на ЛФД контролируется вольтметром В, а ток, протекающий через лавинный фотодиод, измеряется амперметром А. При регистрации оптических импульсов от светодиода СД1 в фотодиоде формируются импульсы тока. Одновременно импульсы тока также могут возникать при $U_n \geq U_{пр}$ в результате микроплазменного пробоя $p-n$ -перехода. Это связано с неоднородностью электрического поля в области $p-n$ -перехода и с наличием свободных термо- или фотогенерированных носителей заряда в этой области [4].

Импульсы тока изменяют падение напряжения на нагрузочном резисторе R_n , формируя импульсы напряжения. Последние поступают на вход аппаратно-программного комплекса АПК. В АПК осуществляется усиление регистрируемых и микроплазменных импульсов, их выделение на фоне шумов ЛФД путем амплитудной селекции, а также измерение амплитудного распределения импульсов, средней амплитуды импульсов и её дисперсии. Аппаратно-программный комплекс позволяет регистрировать и среднее число импульсов, сформированных на нагрузочном резисторе R_n за некоторый промежуток времени t .

Далее микроплазменные импульсы, вызванные термогенерированными носителями электрического заряда, будут называться темновыми импульсами. Микроплазменные импульсы, образованные под воздействием фотонов регистрируемого оптического излучения постоянной интенсивности, будут называться одноквантовыми. Импульсы, сформированные импульсным оптическим излучением светодиода СД1, будут называться фотооткликами.

Величина $U_{пр}$ определяется по вольтамперной характеристике ЛФД согласно методике, рассмотренной в работе [6].

Исследовались светодиоды СД1 и СД2 с длиной волны оптического излучения $\lambda = 650$ нм. Все измерения выполнялись при постоянной температуре $T = 293$ К.

Использовался генератор прямоугольных импульсов Г с длительностью оптических им-

пульсов 1 мкс и частотой следования импульсов 4×10^4 Гц.

Применяемые для исследования лавинные фотодиоды имеют разные напряжения пробоя. Поэтому для сравнения характеристик ЛФД между собой использовалась величина перенапряжения $\Delta U = U_n - U_{пр}$.

Результаты и их обсуждение

В качестве объектов исследования были использованы кремниевые лавинные фотодиоды промышленного изготовления ФД-115Л и лавинные фотодиоды со структурой n^+p-p-p^+ . Напряжение пробоя для лавинных фотодиодов ФД-115Л составляло $U_{пр} = 53,1$ В, а для ЛФД со структурой $n^+p-p-p^+ - U_{пр} = 198,1$ В.

В процессе проведения исследований было выполнено сравнение амплитудных распределений темновых импульсов, амплитудного распределения темновых и одноквантовых импульсов, а также амплитудного распределения темновых и одноквантовых импульсов и фотоотклика оптических импульсов. Результаты измерений представлены на рис. 2. На рисунке показаны результаты измерений для ЛФД со структурой n^+p-p-p^+ . Результаты измерений, полученные для лавинного фотодиода ФД-115Л, были аналогичными. Отметим, что амплитудные распределения темновых, темновых и одноквантовых импульсов, которые были получены в отсутствие оптических импульсов от СД1, совпадали. Поэтому на рис. 2 представлена вероятность амплитудного распределения для темновых и одноквантовых импульсов. Результаты, приведенные на рис. 2, были получены для постоянного значения перенапряжения $\Delta U = 0,1$ В. Интенсивность оптической засветки светодиода СД2 J выбиралась такой, чтобы в ЛФД не проявлялся эффект мертвого времени, и составляла $J = 10^{-5}$ Вт/м². Энергетическая экспозиция H оптических импульсов, формируемых светодиодом СД1, была равной $2,2 \times 10^{-5}$ Дж/см² и выбиралась такой, чтобы амплитуда фотоотклика превосходила амплитуду темновых и одноквантовых импульсов более чем в два раза. Это позволяло достаточно хорошо отделять темновые и одноквантовые импульсы от импульсов фотоотклика.

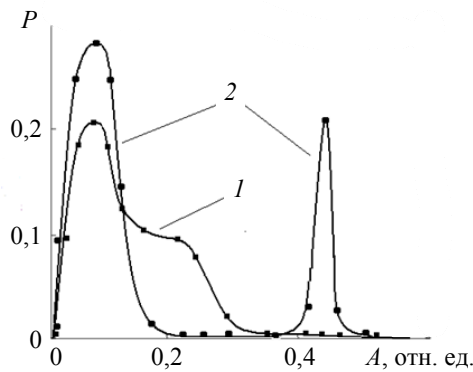


Рис. 2. Вероятность амплитудного распределения импульсов ЛФД со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$: 1 – темновых и одноквантовых; 2 – темновых, одноквантовых и фотоотклика.

Вероятность амплитудного распределения имела явно выраженный пик в области малых амплитуд (рис. 2, кривая 1). При наличии оптических импульсов от светодиода СД1 в амплитудном распределении появляется еще один пик в области более высоких амплитуд (рис. 2, кривая 2), сформированный фотооткликами от этих импульсов. Также увеличивается вероятность, соответствующая максимальному значению низкоамплитудного пика по сравнению со случаем отсутствия оптических импульсов от светодиода СД1. Такое увеличение вероятности появления низкоамплитудных импульсов связано с тем, что оптические импульсы СД1 приводят к увеличению количества свободных носителей заряда в области $p\text{-}n$ -перехода ЛФД и областях, прилегающих к ней. Это, в свою очередь, приводит к понижению напряженности электрического поля в данной области и, как следствие, к уменьшению амплитуды микроплазменных (темновых и одноквантовых) импульсов.

Уменьшение энергетической экспозиции H оптических импульсов, формируемых светодиодом СД1, приводило к тому, что максимум высокоамплитудного пика амплитудного распределения смещался в сторону низких амплитуд. Для значений $H \leq 2,2 \times 10^{-6}$ Дж/см² в амплитудных распределениях импульсов такой пик отсутствовал, а амплитудные распределения, полученные для темновых импульсов, темновых и одноквантовых импульсов, темновых, одноквантовых и оптических импульсов от светодиода СД1, совпадали и имели вид кривой 2 на рис. 2. Это связано с тем,

что для таких H ЛФД работает только в режиме счета фотонов.

На рис. 3 представлены зависимости средней амплитуды темновых и одноквантовых импульсов от энергетической экспозиции H . Как видно из полученных результатов, уменьшение H приводило к росту средней амплитуды импульсов для всех исследуемых типов ЛФД. Как было отмечено ранее, снижение энергетической экспозиции приводило к уменьшению числа свободных носителей заряда в области $p\text{-}n$ -перехода ЛФД и областях, прилегающих к ней, что влекло увеличение напряженности электрического поля в канале микроплазменного пробоя. Под каналом микроплазменного пробоя понимается та часть $p\text{-}n$ -перехода, в которой возникает микроплазменный пробой. Такое увеличение напряженности вызывало рост коэффициента умножения носителей электрического заряда в этом канале, а, следовательно, и увеличение амплитуды микроплазменных импульсов.

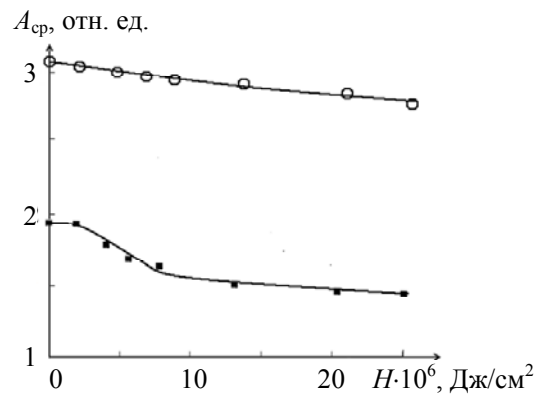


Рис. 3. Зависимости средней амплитуды темновых и одноквантовых от энергетической экспозиции H оптических импульсов: \circ – лавинный фотодиод со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$; \blacksquare – лавинный фотодиод ФД-115Л.

Отметим, что более сильную зависимость изменения амплитуды от величины H имели лавинные фотодиоды ФД-115 Л. Так, величина отношения $|\Delta A/\Delta H| = 120$ (В см²)/Дж для ЛФД со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ и $|\Delta A/\Delta H| = 200$ (В см²)/Дж для лавинного фотодиода ФД-115Л (здесь ΔA – изменение средней амплитуды темновых и одноквантовых импульсов; ΔH – изменение энергетической экспозиции в исследуемом диапазоне экспозиций). Средняя амплитуда импульсов ЛФД со струк-

турой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ во всем исследуемом диапазоне H была больше, чем $A_{\text{ср}}$ для лавинных фотодиодов ФД-115Л. Это связано с различием структур данных фотоприемников и, следовательно, с различными значениями коэффициента умножения носителей в канале микроплазменного пробоя.

Полученные зависимости средней амплитуды темновых и одноквантовых импульсов, а также дисперсии амплитудных распределений этих импульсов от перенапряжения при воздействии на ЛФД оптическими импульсами от светодиода СД1 представлены на рис. 4. Интенсивность оптической засветки от светодиода была постоянной и составляла 10^{-5} Вт/м², а энергетическая экспозиция оптических импульсов от светодиода СД1 составляла $H = 2,2 \times 10^{-5}$ Дж/см².

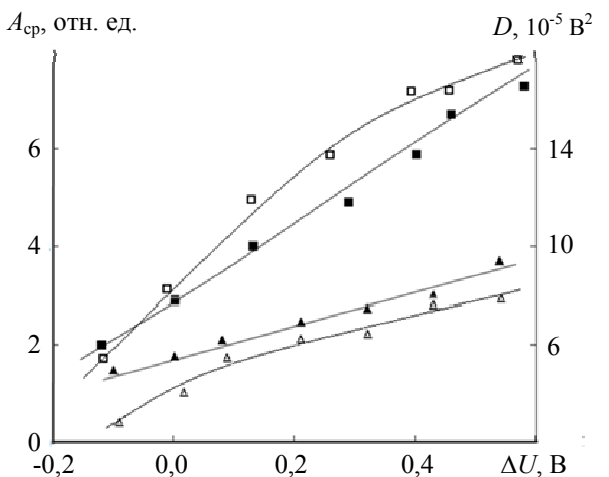


Рис. 4. Зависимости средней амплитуды $A_{\text{ср}}$ темновых и одноквантовых и дисперсии D их амплитудного распределения от перенапряжения: ■ – средняя амплитуда импульсов ЛФД со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$; □ – дисперсия амплитудного распределения темновых и одноквантовых импульсов ЛФД со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$; ▲ – средняя амплитуда импульсов ФД-115Л; Δ – дисперсия амплитудного распределения темновых и одноквантовых импульсов ФД-115Л.

Увеличение перенапряжения ΔU приводило к росту средней амплитуды темновых и одноквантовых импульсов $A_{\text{ср}}$ и дисперсии их амплитудного распределения D для всех типов исследуемых ЛФД. Рост величины $A_{\text{ср}}$ связан с тем, что увеличение перенапряжения приводило к росту напряженности электрического поля в канале микроплазменного пробоя, а значит к увеличению коэффициента

умножения носителей заряда и амплитуды микроплазменных импульсов. Увеличение дисперсии обусловлено появлением с ростом перенапряжения нескольких каналов микроплазменного пробоя с различными коэффициентами умножения носителей заряда.

Все исследуемые типы ЛФД имели линейную зависимость $A_{\text{ср}}$ от ΔU . Наиболее сильную зависимость $A_{\text{ср}}$ от ΔU имели ЛФД со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$. Так, величина отношения $\Delta A/\Delta U_n = 0,04$ для ЛФД со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ и $\Delta A/\Delta U_n = 0,03$ для лавинного фотодиода ФД-115Л (ΔU_n – изменение перенапряжения). Эта величина определяет требования к стабильности напряжения источника питания фотоприемника. Для лавинных фотодиодов ФД-115Л необходимо предъявлять более высокие требования к стабилизации напряжения питания, чем для ЛФД со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$.

Во всем исследуемом диапазоне перенапряжений средняя амплитуда темновых и одноквантовых импульсов ЛФД со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ превосходила $A_{\text{ср}}$ фотодиодов ФД-115Л. Как было отмечено выше, это связано с тем, что фотоприемники имели различную структуру, а, следовательно, различные зависимости коэффициентов умножения носителей заряда в каналах микроплазменного пробоя от величины напряженности электрического поля.

Заключение

В процессе проведенных экспериментальных исследований определены зависимости от величины энергетической экспозиции вида амплитудных распределений для лавинных фотодиодов при одновременной реализации режима счета фотонов и токового режима.

Вид амплитудного распределения микроплазменных импульсов изменяется при изменении величины энергетической экспозиции. Показано, что рост величины энергетической экспозиции приводил к уменьшению амплитуды микроплазменных импульсов для всех типов исследуемых фотоприемников.

Установлено, что средняя амплитуда микроплазменных импульсов для лавинных фотодиодов ФД-115Л была меньшей, чем для ЛФД со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$. Также показано, что

для получения постоянного значения средней амплитуды импульсов в системах на базе ЛФД со структурой n^+p - π - p^+ к стабильности напряжения источника питания фотоприемника необходимо предъявлять более высокие требования, чем в системах на основе лавинных фотодиодов ФД-115Л.

*Работа выполнена при поддержке
Белорусского республиканского фонда
фундаментальных исследований
(договор № Т16К-006, № Т17М-076).*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Килин С. Я.* Квантовая криптография: идеи и практика. – Минск: Беларус. наука, 2007.
2. *Василиу Е. В., Мамедов Р. С.* // Цифрові технології. 2009. № 6. С. 94.
3. *Зеневич А. О.* Обнаружители утечки информации из оптического волокна. – Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017.
4. *Гулаков И. Р., Зеневич А. О.* Фотоприемники квантовых систем: монография. – Минск: УО ВГКС, 2012.
5. *Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Тимофеев А. М.* Устройство передачи данных по оптическому каналу связи: пат. 17012 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 08C 23/00/. Официальный бюл.: Нац. Центр интеллектуал. собственности. 2013. № 2. С. 145–146.
6. *Грехов И. В., Сережкин Ю. Н.* Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках. – Л.: Энергия, 1980.

PACS: 85.60.-q

Investigation of the amplitude distribution of microplasma pulses with a dual-mode avalanche photodiode

O. Y. Gorbadey, A. O. Zenevich, E. V. Novikov, and S. A. Ghoibov

Belarusian State Academy of Communications
8/2 F. Skorina st., Minsk, 220114, Belarus
E-mail: o-st1@yandex.ru

Received January 24, 2019

The study of the amplitude distribution of microplasma pulses with the simultaneous implementation of the photon counting mode and the current mode for avalanche photodiodes was performed. The modes of operation are realized with a constant avalanche photodiode supply voltage exceeding the breakdown voltages of its p - n -junction. The effect on the amplitude of microplasma pulses of the magnitude of the avalanche photodiode supply voltage and the intensity of optical radiation is determined.

Keywords: amplitude distribution, microplasma pulse, photon counting, current mode, avalanche photodiode.

REFERENCES

1. S. Ya. Kilin, *Quantum cryptography: ideas and practice*. (Minsk, Belarus. Nauka, 2007) [in Russian].
2. E. V. Vasiliu and R. S. Mamedov, *Tsifrovyye Tekhnologii*, No. 6, 94 (2009).
3. A. O. Zenevich, *Optical Fiber Information Leak Detectors* (Minsk, Belarusian State Academy of Communications, 2017) [in Russian].
4. I. R. Gulakov and A. O. Zenevich, *Photodetectors of Quantum Systems* (Minsk, UO VGKS, 2012) [in Russian].
5. I. R. Gulakov, A. O. Zenevich, and A. M. Timofeev, *Device for data transmission via optical communication channel*. Pat 17012 Rep. Belarus, IPC (2006.01) G 08C 23/00. Official bulletin: Nat. Center intellectual property, No. 2, 145–146 (2013).
6. I. V. Grekhov and Yu. N. Serezhkin, *Avalanche breakdown of p - n -junction in semiconductors* (Leningrad, Energiya, 1980) [in Russian].