

## Усиление фототока лавинными фотоприемниками при микроплазменном пробое

М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Е. В. Новиков

*Рассмотрены процессы усиления фототока лавинными фотоприемниками при микроплазменном пробое и показано, что возникающие при этом микроплазменные импульсы заметно влияют на величину коэффициента усиления. Предложен способ определения коэффициента усиления фототока лавинных фотоприемников при наличии микроплазменного пробоя.*

*Установлено, что напряжение пробоя зависит от интенсивности оптического излучения вплоть до  $2,5 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> и обосновано, что для определения коэффициента усиления фототока при напряжениях питания, больших напряжения пробоя, необходимо использовать оптические импульсы с интенсивностью большей указанной и длительностью большей или равной 10,0 нс.*

*Ключевые слова:* лавинный фотоприемник, кремниевый фотоэлектронный умножитель, коэффициент усиления фототока, микроплазменные импульсы.

**Ссылка:** Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Новиков Е. В. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 2. С. 117.

**Reference:** M. A. Asayonak, A. O. Zenevich, O. V. Kochergina, and E. V. Novikov, Usp. Prikl. Fiz. 8 (2), 117 (2020).

### Введение

В настоящее время для регистрации оптического излучения в широком интервале интенсивностей в видимой и ближней инфракрасной области спектра достаточно часто применяются лавинные фотоприемники. К таким фотоприемникам относятся лавинные фотодиоды и кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ). При регистрации лавинными фотоприемниками оптического из-

лучения в широком интервале интенсивностей возможно сочетание двух режимов работы: токового и счета фотонов. В работе [1] нами было показано, что эта возможность реализуется при напряжениях питания близких или превышающих напряжение пробоя фотоприемников, однако при этом необходимо достаточно точно знать значение коэффициента усиления фототока.

При напряжениях питания близких или превышающих напряжение пробоя в лавинных фотоприемниках возникают микроплазменные импульсы [2, 3], которые вносят погрешность в измерение коэффициента усиления фототока. Данные импульсы появляются вследствие микроплазменного пробоя, возникающего из-за неоднородности электрического поля в области умножения носителей заряда  $p-n$ -перехода фотоприемника.

В связи с образованием микроплазменных импульсов наиболее часто применяемые методы определения коэффициента усиления фототока [4–6], не позволяют обеспечить достаточную точность измерения.

---

Асаёнок Марина Анатольевна, аспирант.  
Зеневич Андрей Олегович, ректор, д.т.н., профессор.  
Кочергина Ольга Викторовна, аспирант.  
Новиков Евгений Владимирович, директор Института современных технологий связи, к.т.н.  
Белорусская государственная академия связи.  
Беларусь, 220114, Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2.  
E-mail: m.asayonok@bsac.by, a.zenevich@bsac.by;  
o.kochergina@bsac.by; e.novikov@bsac.by

Статья поступила в редакцию 16 марта 2020 г.

© Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Новиков Е. В., 2020

Поэтому целью данной статьи является разработка способа определения коэффициента усиления фототока лавинного фотоприемника при напряжениях питания, соответствующих микроплазменному пробую, позволяющего устранить погрешность, вносимую микроплазменными импульсами.

### Описание способа и экспериментальной установки

Для достижения поставленной цели выполняется следующая последовательность действий. На лавинный фотоприемник подают напряжение питания, соответствующее нелавинному режиму, под которым понимается регистрация оптического излучения фотоприемником без усиления фототока. В таком режиме исследуемые фотоприемники работали при напряжениях питания  $U_{\text{п}} = 5$  В. Любое оптическое излучение, которое может поступать на фотоприемник, при этом перекрывают, после чего измеряют темновой ток  $I_{\text{тн}}$ , протекающий через фотоприемник. Затем на фотоприемник подают оптическое излучение постоянной интенсивности и проводят измерение общего электрического тока  $I_{\text{он}}$ , протекающего через него. Затем прикладывают к фотоприемнику напряжение  $U_{0\text{п}}$ , соответствующее лавинному режиму. Под лавинным режимом понимается регистрация оптического излучения фотоприемником с усилением фототока, но при напряжениях питания ниже его напряжения пробоя  $U_{\text{пр}}$ . После этого перекрывают любое оптическое излучение, которое может поступать на фотоприемник, и измеряют темновой ток  $I_{\text{тл}}$ , протекающий через него. Затем на фотоприемник подают оптическое излучение постоянной интенсивности такой же как и в нелавинном режиме работы. После чего измеряют общий электрический ток  $I_{\text{ол}}$ , протекающий через лавинный фотоприемник в этих условиях.

На основании полученных значений общего  $I_{\text{он}}$  и темнового  $I_{\text{тн}}$  токов при напряжениях питания в нелавинном режиме работы и общего  $I_{\text{ол}}$  и темнового  $I_{\text{тл}}$  токов при напряжениях питания в лавинном режиме работы фотоприемника определяют коэффициент усиления фототока  $M$  по следующей формуле:

$$M = \frac{I_{\text{ол}} - I_{\text{тл}}}{I_{\text{он}} - I_{\text{тн}}}. \quad (1)$$

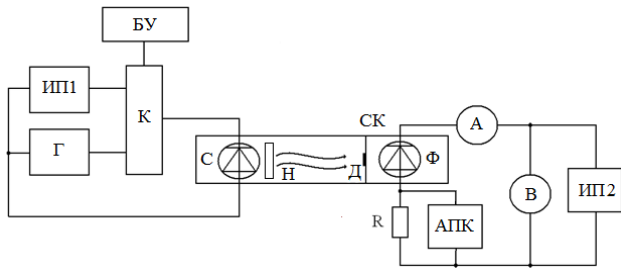
Затем прикладывают к лавинному фотоприемнику напряжение питания, соответствующее появлению микроплазменного пробоя  $U_{1\text{п}}$  и измеряют среднюю длительность и амплитуду микроплазменных импульсов.

Далее формируют оптический импульс длительностью большей средней длительности микроплазменных импульсов и такой интенсивности, чтобы фотоотклик этого импульса на выходе фотоприемника имел амплитуду большую средней амплитуды микроплазменных импульсов. Затем определяют усредненное значение амплитуды фотоотклика  $A_2$  на выходе фотоприемника, после чего понижают напряжение питания фотоприемника до  $U_{0\text{п}}$  и подают на него оптические импульсы той же длительности и интенсивности как и для предыдущего значения напряжения питания  $U_{1\text{п}}$ . Измеряют амплитуду фотоотклика на выходе фотоприемника  $A_1$  и определяют коэффициент усиления фототока  $M_{\text{и}}$  для напряжения питания  $U_{1\text{п}}$  на основании выражения:

$$M_{\text{и}} = M \frac{A_2}{A_1}. \quad (2)$$

Для реализации предложенного способа измерений использовалась экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Экспериментальная установка работает следующим образом. Перед началом цикла измерений светодиод С и лавинный фотоприемник Ф с установленными между ними диафрагмой Д и нейтральным светофильтром Н помещаются в светонепроницаемый кожух СК. Блок управления БУ подключает к светодиоду С источник питания ИП1 через коммутатор К. При этом диафрагма Д закрыта. На фотоприемник Ф от регулируемого источника постоянного напряжения ИП2 подается напряжение питания, соответствующее нелавинному режиму. Напряжение контролируется вольтметром В. В этих условиях при помощи амперметра А измеряется темновой ток  $I_{\text{тн}}$ , протекающий через фотоприемник Ф.



**Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки. С – светодиод; Ф – лавинный фотоприемник; ИП1 – источник питания светодиода; ИП2 – регулируемый источник постоянного напряжения; Г – генератор прямоугольных импульсов; К – коммутатор; БУ – блок управления; А – амперметр; В – вольтметр; СК – светонепроницаемый кожух; Н – нейтральный светофильтр; Д – диафрагма; АПК – аппаратно-программный комплекс; R – нагрузочный резистор.

После выполнения измерения открывают диафрагму Д и оптическое излучение постоянной интенсивности поступает на фотоприемник Ф. В этом режиме амперметром А измеряется общий электрический ток  $I_{\text{он}}$ , протекающий через фотоприемник Ф.

Затем с помощью регулируемого источника постоянного напряжения ИП2 увеличивают напряжение питания фотоприемника до значения  $U_{0п}$ , соответствующего лавинному режиму. Контролируют значения напряжения вольтметром В. Закрывают диафрагму Д и измеряют амперметром А темновой ток  $I_{\text{тл}}$ , протекающий через фотоприемник.

После выполнения измерения открывают диафрагму Д и на фотоприемник начинает поступать оптическое излучение постоянной интенсивности от светодиода С. При этом измеряется при помощи амперметра А общий ток  $I_{\text{ол}}$ , протекающий через фотоприемник Ф.

Используя замеренные значения, вычисляется коэффициент усиления  $M$  фототока фотоприемника по формуле (1).

Закрывают диафрагму Д и на фотоприемник Ф подают от источника ИП2 напряжение питания, соответствующее микроплазменному пробую  $U_{1п}$ . При помощи вольтметра В определяется величина этого напряжения.

В этом режиме с помощью аппаратно-программного комплекса АПК, в состав которого входят компьютер с цифровым осциллографом, оцифровываются и сохраняются параметры формируемых на нагрузочном резисторе R отдельных импульсов напряжения, а затем рассчитываются средние значения

длительности и амплитуды микроплазменных импульсов.

Затем блок управления БУ переключает коммутатор К таким образом, что выход генератора прямоугольных импульсов Г подключается к светодиоду С, обеспечивая формирование оптических импульсов. Открывают диафрагму Д, изменяют длительность и амплитуду прямоугольных оптических импульсов, формируемых генератором Г, добиваются того, чтобы амплитуда и длительность фотоотклика, сформированная этими импульсами была большей амплитуды и длительности микроплазменных импульсов. Для этого аппаратно-программным комплексом АПК контролируются параметры фотоотклика на нагрузочном резисторе R. После чего определяют усредненное значение амплитуды фотоотклика  $A_2$  на нагрузочном резисторе R лавинного фотоприемника.

Затем понижают напряжение источника ИП2 до  $U_{0п}$  и регистрируют значение амплитуды фотоотклика  $A_1$  на нагрузочном резисторе R фотоприемника при помощи аппаратно-программного комплекса АПК.

Используя замеренные значения, определяют коэффициент усиления фототока фотоприемника  $M_{\text{и}}$  для напряжения питания  $U_{1п}$  по формуле (2).

Исследования проводились при постоянной температуре  $T = 300$  К. Длина волны оптического излучения составляла 630 нм и была близка к максимальной чувствительности для каждого типа исследуемых лавинных фотоприемников. Поскольку исследуемые лавинные фотоприемники имели различные напряжения пробоя  $U_{\text{пр}}$ , то для сравнения их характеристик между собой использовалась величина перенапряжения  $\Delta U = U - U_{\text{пр}}$ , где  $U$  – напряжение питания лавинного фотоприемника.

## Результаты эксперимента и их обсуждение

В качестве объектов исследования использовались серийно выпускаемые кремниевые лавинные фотодиоды ФД-115Л, лавинные фотодиоды ВРУР 52 (Республика Польша), лавинные фотодиоды КОФ101, кремниевые фотоэлектронные умножители из опытной партии, произведенной ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь). Напряжения пробоя

для исследуемых лавинных фотоприемников составляли:  $U_{пр} = 52,5$  В для лавинного фотодиода ФД-115Л;  $U_{пр} = 189,9$  В для – ВРҮР 52;  $U_{пр} = 279,0$  В для – КОФ101;  $U_{пр} = 37,0$  В для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл».

Поскольку для более точного определения величины  $M_{и}$  необходимо выбирать такое напряжение питания, для которого наблюдалась как можно большая величина  $M$ , то в этом случае напряжение питания лавинного фотоприемника должно быть близким к напряжению пробоя этого фотоприемника, но не превышать его. Однако при напряжениях питания близких к напряжению пробоя в лавинном фотоприемнике могут возникать микроплазменные импульсы, которые вносят погрешность в определение величины  $M_{и}$ . Поэтому необходимо выбирать напряжение питания  $U_{0п}$  достаточно близким к напряжению пробоя, но таким, чтобы для этого напряжения не возникали микроплазменные импульсы.

В связи с этим нами были выполнены исследования вольт-амперных характеристик лавинных фотоприемников при разных интенсивностях регистрируемого оптического излучения. По полученным вольт-амперным характеристикам определены напряжения пробоя лавинных фотоприемников в соответствии с методикой работы [3]. Согласно данной методике напряжение пробоя соответствует точке пересечения продолжения линейного участка вольт-амперной характеристики с осью координат, по которой отложены значения напряжения, как это показано на рис. 2, а для лавинного фотодиода ФД-115Л.

Для всех типов исследуемых лавинных фотоприемников наблюдается зависимость напряжения пробоя от интенсивности оптического излучения  $J$ , регистрируемого лавинным фотоприемником. Данные зависимости представлены на рис. 2, б. Для оценки изменения напряжения пробоя при различных значениях  $J$  используется величина  $\Delta = U_{0пр} - U'_{пр}$ , где  $U_{0пр}$  – напряжение пробоя при  $J = 0$ ,  $U'_{пр}$  – напряжение пробоя при  $J > 0$ .

При интенсивностях оптического излучения больших или равных  $2,5 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> наблюдается насыщение зависимости  $\Delta$  от  $J$  для всех типов лавинных фотоприемников. Таким образом, значение  $\Delta$ , полученное при  $J = 2,5 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>, может быть применено для определения  $U_{0п} = U_{0пр} - \Delta$ .

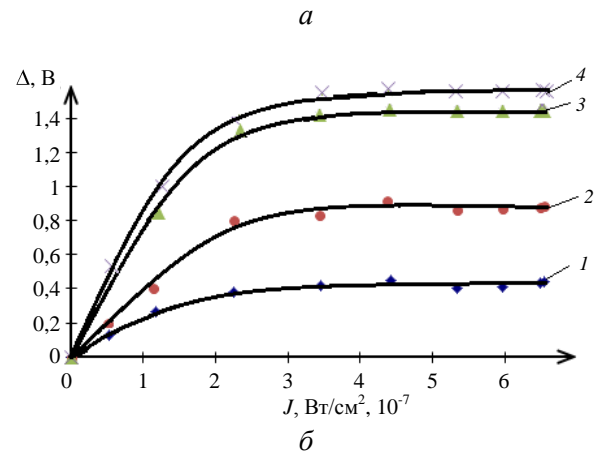
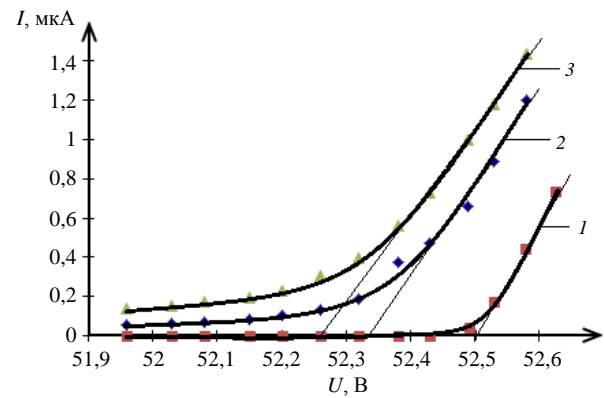


Рис. 2. Зависимости напряжения пробоя лавинных фотоприемников от интенсивности регистрируемого оптического излучения: а – вольт-амперные характеристики лавинного фотодиода ФД-115Л (1 – для интенсивности оптического излучения  $J = 0$ ; 2 –  $J = 0,5 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>; 3 –  $J = 1,26 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>); б – напряжения пробоя фотоприемников для различных интенсивностей оптического излучения (1 – для ФД-115 Л; 2 – для ВРҮР 52; 3 – для SiФЭУ, 4 – КОФ101).

При использовании предложенного способа определения коэффициента усиления фототока, важным является выбор интенсивности и длительности импульсов регистрируемого оптического излучения. От этих параметров оптического импульса будет зависеть амплитуда и длительность фотоотклика, сформированного на выходе лавинного фотоприемника. По амплитуде и длительности фотоотклика можно выделить его на фоне микроплазменных шумов, если эти амплитуда и длительность превышают амплитуду и длительность микроплазменных импульсов.

Средняя длительность микроплазменных импульсов в исследуемом диапазоне перенапряжений  $\Delta U = -0,5 \div 0,5$  В оставалась неизменной и составляла следующие значения: для лавинных фотодиодов ФД-115Л  $\tau_{ср} = 1,0$  мкс;

для – ВРУР 52  $\tau_{cp} = 1,1$  мкс; для Si-ФЭУ  $\tau_{cp} = 1,5$  мкс, для – КОФ101  $\tau_{cp} = 0,9$  мкс. Данный диапазон перенапряжений был выбран с учетом того, что при  $\Delta U \geq -0,5$  В начинают появляться микроплазменные импульсы, а при  $\Delta U > 0,5$  В значительно увеличивался электрический ток, протекающий через лавинный фотоприемник, что могло привести к его тепловому пробою.

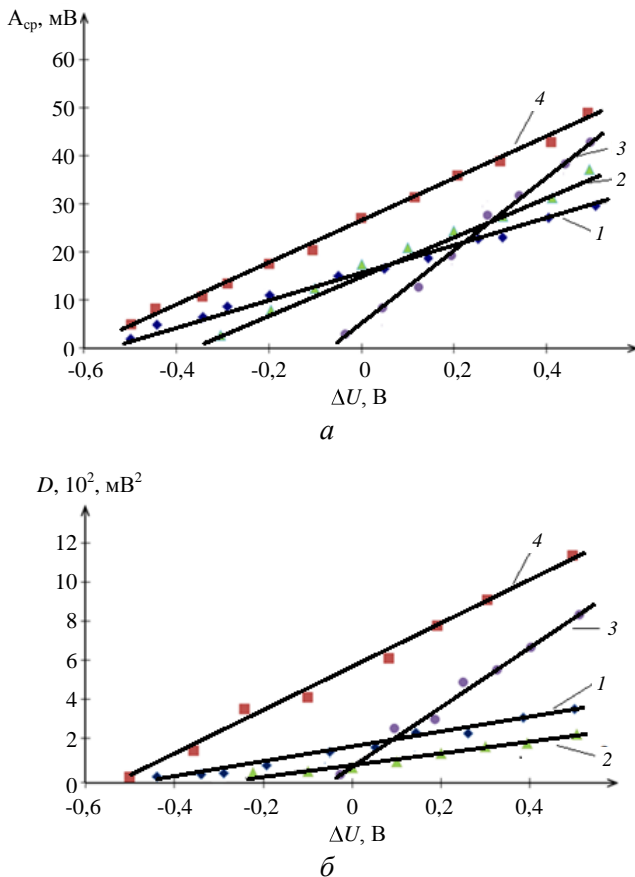


Рис. 3. Зависимости средней амплитуды (а) и дисперсии амплитуды (б) микроплазменных импульсов лавинных фотоприемников от перенапряжения: 1 – для ВРУР 52; 2 – для ФД-115Л; 3 – для Si-ФЭУ; 4 – для КОФ101.

Зависимости средней амплитуды микроплазменных импульсов исследуемых лавинных фотоприемников и ее дисперсии от перенапряжения представлены на рис. 3. Увеличение перенапряжения приводило к росту средней амплитуды микроплазменных импульсов и их дисперсии. Так, для  $\Delta U = 0,5$  В, наибольшего в исследуем диапазоне перенапряжений, величина средней амплитуды  $A_{cp}$  и её дисперсии  $D$  составляли следующие значения:  $A_{cp} = 27$  мВ,  $D = 3,2 \times 10^2$  мВ<sup>2</sup> для лавинного фотодиода ВРУР 52,  $A_{cp} = 34$  мВ,  $D = 2,0 \times 10^2$  мВ<sup>2</sup> для

лавинного фотодиода ФД-115Л,  $A_{cp} = 47$  мВ,  $D = 1,2 \times 10^3$  мВ<sup>2</sup> для лавинного фотодиода КОФ101,  $A_{cp} = 40$  мВ,  $D = 8,2 \times 10^2$  мВ<sup>2</sup> для Si-ФЭУ.

Поэтому для реализации способа мы предлагаем использовать интенсивности оптического излучения  $J \geq 2,5 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для таких интенсивностей удастся сформировать фотоотклик с амплитудой большей 156 мВ, что более чем в три раза превосходило среднюю амплитуду микроплазменных импульсов. Вероятность возникновения микроплазменного импульса с такой амплитудой составляла менее  $10^{-2}$ .

Длительность оптических импульсов выбиралась такой, для которой отклонение амплитуды фотоотклика от его среднего значения было бы наименьшим. Для определения соответствующего значения длительности были выполнены исследования зависимости среднеквадратичного отклонения амплитуды фотоотклика  $\delta$  от длительности оптического импульса  $\tau$ . Как видно из полученных зависимостей (см. рис. 4) с увеличением длительности оптического импульса уменьшается значение  $\delta$ . При длительностях оптического импульса  $\tau \geq 10,0$  мкс величина среднеквадратичного отклонения амплитуды фотоотклика не изменяется и имеет значения меньше 0,01 мВ для всех исследуемых лавинных фотоприемников. Отметим, что рост  $\delta$  при малых длительностях оптического импульса обусловлен тем, что для них начинают проявляться эффекты флуктуации количества фотонов в импульсе, а также коэффициента умножения носителей заряда.

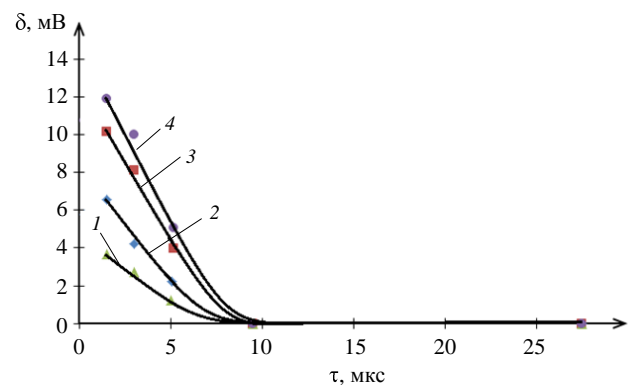


Рис. 4. Зависимость среднего квадратичного отклонения амплитуды фотоотклика лавинного фотоприемника от длительности импульсов при перенапряжении  $\Delta U = 0,03$  В: 1 – для ВРУР 52; 2 – для

Si-ФЭУ, 3 – для ФД-115Л, 4 – для КОФ101.

Для длительности импульса  $\tau = 10,0$  мкс и интенсивности оптического излучения  $J = 2,5 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> были определены коэффициенты усиления фототока для различных перенапряжений, согласно выражений (1) и (2). При определении значений  $M_{и}$  по формуле (2) использовались следующие величины: для лавинного фотодиода ФД-115Л  $M = 98$  и  $A_1 = 15$  мВ; для ВРУР 52  $M = 436$  и  $A_1 = 7,4$  мВ; для Si-ФЭУ  $M = 893$  и  $A_1 = 23,3$  мВ, для КОФ101  $M = 50$  и  $A_1 = 2,9$  мВ.

Выполнено сравнение коэффициентов усиления, полученных по формулам (1) и (2) для одинаковых перенапряжений. Для сравнения использовалось относительное отклонение значений коэффициента

$$\sigma = \frac{|M - M_{и}|}{M} 100 \%$$

Результаты этого сравнения представлены на рис. 5.

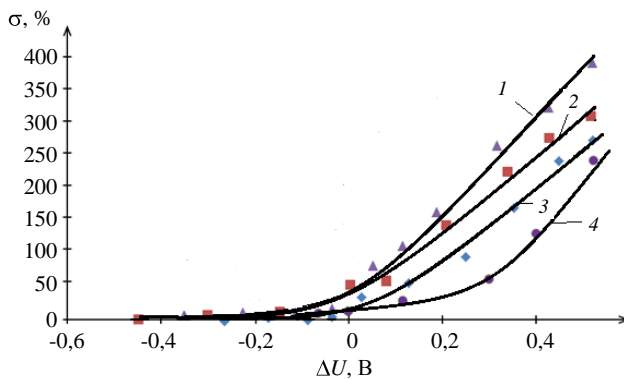


Рис. 5. Зависимость относительного отклонения значений коэффициента усиления фототока лавинного фотоприемника от перенапряжения: 1 – для КОФ101; 2 – для ВРУР 52; 3 – для ФД-115Л; 4 – для Si-ФЭУ.

Как видно из полученных результатов (см. рис. 5) коэффициенты усиления, рассчитанные по формулам (1) и (2) при напряжениях питания меньших напряжения пробоя достаточно близки и отличаются менее чем на погрешность измерения. При напряжениях питания больших напряжения пробоя относительное отклонение значения коэффициента увеличивается с ростом  $\Delta U$ . Так, для  $\Delta U = 0,5$  В, наибольшего в исследуем диапазоне перена-

пряжений, величины  $\sigma$  составляют:  $\sigma = 400$  % для КОФ101;  $\sigma = 327$  % для лавинного фотодиода ВРУР 52;  $\sigma = 260$  % для ФД-115Л;  $\sigma = 248$  % для Si-ФЭУ.

## Заключение

Разработан способ определения коэффициента усиления фототока лавинного фотоприемника при напряжениях питания, соответствующих микроплазменному пробоя, позволяющий устранить погрешность, вносимую микроплазменными импульсами.

Установлено, что напряжение пробоя лавинных фотоприемников зависит от интенсивности оптического излучения. Для всех типов лавинных фотоприемников при интенсивностях оптического излучения больших или равных  $2,5 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> напряжение пробоя перестает изменяться.

Получено, что для определения коэффициента усиления фототока  $M_{и}$  при напряжениях питания больших напряжения пробоя необходимо использовать оптические импульсы с интенсивностью большей  $2,5 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> и длительностью большей или равной 10,0 мкс.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горбадей О. Ю., Зеневич А. О., Новиков Е. В., Гоубов С. А. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 4. С. 339.
2. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем: монография. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
3. Грехов И. В., Сержкин Ю. Н. Лавинный пробой  $p$ - $n$ -перехода в полупроводниках. – Л.: Энергия, 1980.
4. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик – Москва: Изд-во стандартов, 1988.
5. Устройство для измерения характеристик лавинного фотодиода: АС. 532064 СССР. № 2087938; заявл. 23.12.74; опубл. 15.10.76. Бюл. № 38. 2 с.
6. Устройство для измерения характеристик лавинного фотодиода: АС. 1051470 СССР. № 3473938; заявл. 16.07.1982; опубл. 30.10.1983. Бюл. № 40 2 с.

PACS: 85.60.-q

## Photocurrent amplification by avalanche photodetectors during microplasma breakdown

M. A. Asayonak, A. O. Zenevich, O. V. Kochergina, and E. V. Novikov

Belarusian State Academy of Communications  
8/2 F. Skorina st., Minsk, 220114, Belarus

Received March 16, 2020

*The processes of amplification of the photocurrent by avalanche photodetectors during microplasma breakdown are considered, and it is shown that the microplasma pulses arising from this noticeably affect the magnitude of the gain. A method is proposed for determining the photocurrent gain of avalanche photodetectors in the presence of microplasma breakdown.*

*It was established that the breakdown voltage depends on the intensity of optical radiation up to  $2.5 \times 10^{-7} \text{ W/cm}^2$  and it is justified that to determine the gain of the photocurrent at supply voltages higher than the breakdown voltage, it is necessary to use optical pulses with an intensity greater than the specified and duration greater or equal to  $10.0 \mu\text{s}$ .*

*Keywords:* avalanche photodetector, silicon photoelectron multiplier, photocurrent gain, microplasma pulses.

### REFERENCES

1. O. Y. Gorbadey, A. O. Zenevich, E. V. Novikov, and S. A. Ghoibov, *Usp. Prikl. Fiz.* **7** (4), 339 (2019).
2. I. R. Gulakov and A. O. Zenevich, *Photodetectors of Quantum Systems* (Minsk, UO VGKS, 2012) [in Russian].
3. I. V. Grekhov and Yu. N. Serezhkin, *Avalanche breakdown of p-n-junction in semiconductors* (Leniongrad, Energiya, 1980) [in Russian].
4. GOST 17772-88. Radiation receivers semiconductor photoelectric and photodetector devices. Methods for measuring photoelectric parameters and determining characteristics – Moscow: Publishing house of standards, 1988. P. 9 [in Russian].
5. Device for measuring the characteristics of the avalanche photodiode: SA. 532064 USSR. No. 2087938; declared 12.23.74; publ. 10.15.76. Bull. No. 38. P. 2 [in Russian].
6. Device for measuring the characteristics of the avalanche photodiode: SA. 1051470 USSR. No. 3473938; declared 07.16.1982; publ. 10.30.1983. Bull. No. 40. P. 2 [in Russian].