

# Фотоэлектроника

УДК 535.211

## Повышение стойкости фотоприемных устройств на базе германиевого лавинного фотодиода к воздействию мощного лазерного излучения

А. А. Короннов, А. Е. Сафутин, М. М. Землянов, Г. М. Зверев

*Представлены результаты исследования увеличения шумов германиевых лавинных фотодиодов вследствие воздействия мощного лазерного излучения. На основании полученных экспериментальных данных было рассчитано значение уровня шума, действующее на выходе усилителя фотоприемного устройства с частично деградировавшим фотодиодом, а также значение порогового напряжения компаратора, при котором выполняются требования по количеству ложных срабатываний. Для восстановления работоспособности фотоприемного устройства после мощной засветки была разработана и успешно испытана схема автоматического переключения порогового напряжения компаратора.*

PACS 85.60.Dw

*Ключевые слова:* германиевый лавинный фотодиод, фотоприемное устройство, импульсный лазерный дальномер.

### Введение

Одной из наиболее распространенных причин выхода из строя фотоприемных устройств (ФПУ), работающих в системах импульсной лазерной дальнометрии, является засветка ФПУ системами противодействия средствам дальнометрии либо мощным лазерным излучением (собственным), отраженным от катафотной цели. В результате деградации фотодиода возрастают его темновой ток и шумы, что приводит к превышению допустимого значения вероятности ложной регистрации цели.

На сегодняшний день для защиты ФПУ от мощной засветки широко применяется двухимпульсный режим работы дальномера, при котором первое измерение проводится с дополнительно внесенным оптическим фильтром, ослабление ко-

торого позволяет обнаружить цель, имеющую высокую отражательную способность, и защищает фотодиод от выжигания, а в случае отсутствия отклика проводится второе измерение без фильтра. Однако такой режим работы не всегда способен защитить фотодиод от засветки отраженным лазерным импульсом высокой мощности. Так, например, если первое измерение проводится по безопасному участку цели, имеющей катафотные элементы, то принимается решение об удалении фильтра, в результате повторное измерение может привести к случайной засветке фотодиода мощным импульсом лазерного излучения, принятом от отражателя. В этом случае сохранение работоспособности дальномерной системы будет зависеть от стойкости фотоприемного устройства к лазерному излучению.

В современных фотоприемных устройствах, предназначенных для работы как на длине волны  $\lambda = 1,064$  мкм, так и на  $\lambda = 1,54$  мкм, преимущественно применяются германиевые лавинные фотодиоды (ЛФД) и фотодиоды на базе соединений  $A_3B_5$ . При этом, несмотря на то, что последние позволяют обеспечить более высокую чувствительность, их стойкость к лазерному излучению существенно ниже, чем у германиевых ЛФД. По данным, приведенным в источниках [1—4], для  $A_3B_5$ -фотодиодов допустимая плотность мощности воздействия на длине волны  $\lambda = 1,064$  мкм варьируется от  $10^5$  до  $5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> при длительно-

**Короннов Алексей Алексеевич**, инженер-конструктор, аспирант<sup>1</sup>.

**Сафутин Александр Ефремович**, начальник лаборатории<sup>1</sup>.

**Землянов Михаил Михайлович**, начальник отдела<sup>1</sup>.

**Зверев Георгий Митрофанович**, начальник отдела, профессор<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup> АО «НИИ «ПОЛЮС» им. М. Ф. Стальмаха».

Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3.

Тел. 8 (925) 276-14-86. E-mail: koronnov@inbox.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 27 октября 2015 г.

© Короннов А. А., Сафутин А. Е., Землянов М. М., Зверев Г. М., 2015

сти импульса 4—20 нс, в то время как воздействие 4-нс импульса при плотности мощности  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> не приводит к существенной деградации германиевого ЛФД [5]. Помимо этого, в работе [6] показано, что даже в случае частичного разрушения германиевого ЛФД воздействием лазерного излучения возможно продолжение его эксплуатации при снижении чувствительности фотоприемного устройства. При этом требования, предъявляемые к значению вероятности ложной регистрации цели, могут быть выполнены в результате совместной или отдельной регулировки напряжения смещения на фотодиоде и порогового напряжения компаратора.

В настоящее время системы автоматической регулировки фотоприемных устройств применяются преимущественно для обеспечения оптимальной чувствительности в диапазоне температур и адаптации к работе в условиях сильной фоновой засветки [7, 8]. Настоящие системы позволяют провести автоматическую настройку ФПУ после мощной засветки, однако их реализация требует существенного усложнения структуры устройства. Одновременно с этим при деградации фотодиода первостепенной задачей является сохранение работоспособности фотоприемного устройства, для чего достаточно перевести его в аварийный режим работы. В связи с этим нами был разработан специальный блок, формирующий повышенный порог компаратора в случае возрастания шумов фотодиода. Критерием, по которому принимается решения о выходе из строя ФПУ и необходимости его регулировки, является возрастание количества ложных импульсов, формируемых компаратором. Поэтому целью данной работы явилось исследование увеличения среднеквадратического значения шума фотодиодов в результате воздействия лазерного излучения.

### Постановка эксперимента

Экспериментальному исследованию были подвергнуты 6 образцов германиевых ЛФД с диаметром чувствительной площадки 200 мкм, выполненных по мезапланарной технологии. Для каждого ЛФД при помощи специального усилителя предварительно определялось рабочее напряжение смещения, при котором его среднеквадратическое значение шума составляло 2 пА/Гц<sup>1/2</sup>. Воздействие на каждый фотодиод проводилось однократно импульсом длительностью 4 нс при фокусировке излучения на чувствительной площадке ЛФД в пятно диаметром порядка 20 мкм. В качестве источника лазерного излучения использовался ла-

зер модели LCS-DTL-122QT, излучающий на длине волны  $\lambda = 1,064$  мкм. Воздействие проводилось при различных импульсных мощностях излучения в диапазоне 600—1300 Вт, после чего измерялся шум фотодиода при установке определенного ранее рабочего напряжения смещения. Результаты исследования отображены на рис. 1, из которого видно, что для воздействий мощностью, лежащей в рассматриваемом диапазоне, изменение уровня шума можно аппроксимировать экспоненциальным законом.

### Обсуждение результатов

Количество ложных импульсов, формируемых компаратором, можно определить как число положительных выбросов случайного процесса  $N$  на уровне порогового напряжения компаратора  $H$ , для чего справедливо соотношение [9]:

$$N = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}} \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), \quad (1)$$

где для среднеквадратического значения шума  $\sigma$  на выходе усилителя с высоким входным сопротивлением справедливо выражение из [10]:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \times \sqrt{\frac{1}{R_H \cdot C_{ВХ}} \int_0^{\omega} [U_{УС}^2 + I_{ЛФД}^2 \cdot \left(\frac{R_H^2}{1 + \omega^2 \cdot R_H^2 \cdot C_{ВХ}^2}\right)] d\omega}. \quad (2)$$

Здесь  $I_{ЛФД}$  — измеренное значение шума ЛФД,  $R_H$  — сопротивление нагрузки фотодиода,  $C_{ВХ}$  — суммарная эквивалентная входная емкость усилителя и фотодиода,  $U_{УС}$  — шум эквивалентного источника ЭДС, приведенного к входу усилителя с коэффициентом усиления  $K$ .

Таким образом, при известных параметрах усилителя на основании экспериментальных данных можно рассчитать пороговое напряжение компаратора, обеспечивающее допустимое количество ложных импульсов. Такие расчеты (рис. 1) были проведены при подстановке в выражения одного-двух значений, действительных для опытного фотоприемного устройства:  $\Delta f = 10$  МГц,  $N = 6$ ,  $K = 50$ ,  $R_H = 39$  кОм,  $C_{ВХ} = 0,4$  пФ,  $U_{УС} = 67$  нВ/Гц<sup>1/2</sup>.

Дополнительно стоит обратить внимание на то, что в реальных условиях эксплуатации при разрушении фотодиода мощной засветкой абляционный дефект обычно имеет размеры, существенно меньшие по сравнению с площадью чувствительной площадки, и разрушение имеет характер, аналогичный исследованному в настоящей работе.

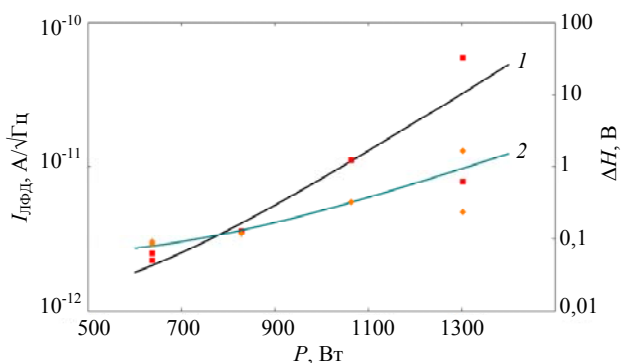


Рис. 1. Увеличение среднеквадратического значения шума фотодиода после воздействия лазерным излучением (кривая 1) и соответствующее ему увеличение порога компаратора (кривая 2), обеспечивающее сохранение работоспособности ФПУ

Такой механизм разрушения фотодиода характеризуется изменением чувствительности и коэффициента лавинного умножения только в области, подверженной воздействию лазерного излучения [6], и амплитуду фотоотклика при засветке всей чувствительной площадки можно считать неизменной. Поэтому для чувствительности  $S$  всего ФПУ при повышении порогового напряжения компаратора до уровня  $H$  можно записать

$$S = S_0 \cdot \frac{H}{H_0} \quad (3)$$

где  $S_0$  и  $H_0$  — соответственно начальные значения чувствительности и порогового напряжения компаратора.

### Схема переключения ФПУ в аварийный режим работы

Как указывалось ранее, критерием переключения порогового напряжения компаратора является превышение количества ложных импульсов на выходе ФПУ допустимого значения. При этом время, в течение которого возможно проводить контроль количества ложных импульсов, ограничено временем отключения встроенного в ФПУ вторичного источника питания (ВИП). Отключение ВИП осуществляется специальным стробирующим импульсом, в течение действия которого становится возможным детектирование полезного сигнала. Таким образом, разделяя стробирующий импульс на два интервала, можно в течение первого интервала провести настройку ФПУ, а в течение второго проводить измерение. Такой алгоритм работы был реализован при помощи специального блока, структура которого представлена на рис. 2.

Макет блока был собран на отдельной плате и испытывался при подключении к опытному фотоприемному устройству, для которого приемлемо

отключение преобразователя на время до 400 мкс. Поскольку для измерений расстояния достаточно 200 мкс, то в течение первой половины стробирующего импульса можно провести подготовку к измерениям. Для этого на компаратор DA3 подается управляющий импульс, разрешающий заряд емкости C1 ложными сигналами. Сформированный уровень напряжения на емкости посредством операционного усилителя управляет транзистором VT1. При достаточно большом базовом потенциале снижается опорный уровень компаратора DA1 и устанавливается аварийный режим работы фотоприемного устройства.

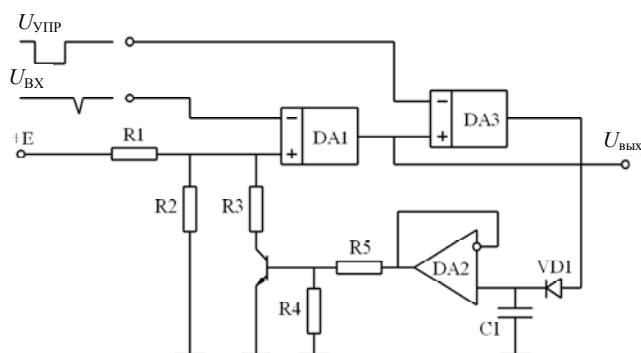


Рис. 2. Структурная схема блока автоматического переключения порога компаратора

Следует отметить, что для увеличения порогового напряжения компаратора достаточно регистрации в течение 200 мкс всего одного импульса, так как это эквивалентно 5000 ложных импульсам в секунду, в то время как для рассматриваемого фотоприемного устройства максимально допустимым количеством является 6. Поэтому настройка схемы проводилась таким образом, чтобы изменение напряжения на опорном выводе компаратора происходило после одиночного ложного сигнала и сохранялось в течение действия стробирующего импульса. Для этого номинал емкости C1 подбирался таким образом, чтобы при открытии транзистора VT1 входил в режим перегрузки. В результате время восстановления режима работы ФПУ определялось временем разряда емкости C1 через входное сопротивление операционного усилителя и временем выхода транзистора из режима отсечки. Это позволило без введения дополнительных элементов обеспечить восстановление режима работы ФПУ по окончании стробирующего импульса, что необходимо, если избыточное количество ложных импульсов вызвано фоновой засветкой, интенсивность которой непостоянна от измерения к измерению.

При реализации схемы переключение ФПУ в аварийный режим работы происходило при изменении порога компаратора от 80 до 350 мВ и

снижении чувствительности до 260 нВт. Для такой настройки схемы ожидаемый допустимый уровень мощности воздействия составляет 1083 Вт при 4 нс длительности импульса лазерного излучения, сфокусированного в пятно диаметром 20 мкм.

Однако стоит отметить, что в диапазоне от 6 до 5000 ложных срабатываний в секунду возможно отсутствие регистрации ложного импульса в течение первых 200 мкс, и, как следствие, его регистрация при измерениях. Особый интерес в этом случае представляет оценка диапазона мощности воздействия на ЛФД, в котором не гарантировано переключение порога компаратора. Расчет в соответствии с выражениями (1) и (2) показывает, что в диапазоне шумового тока ЛФД от 2 до  $3,37 \text{ нА/Гц}^{1/2}$  возможно сохранение порога компаратора по окончании времени подготовки ФПУ к измерению. Используя экспериментальные данные, можно показать, что рассчитанный диапазон шума ЛФД соответствует диапазону мощности воздействия от 627 до 778 Вт, уменьшение которого возможно за счет увеличения времени подготовки к изменениям и уменьшения временного интервала ожидания отклика цели. Однако даже без принятия этих мер предложенное в настоящей работе решение существенно повышает стойкость фотоприемного устройства мощной засветке.

### Заключение

В результате проведенного экспериментального исследования фотодиодов, подверженных разрушающему воздействию лазерным излучением, была получена зависимость увеличения шумов от уровня мощности излучения. Это позволило в зависимости от мощности воздействия на ФПУ дать оценку уровня порога компаратора, необходимого для обеспечения заданной вероятности ложной регистрации после воздействия. Для повышения порога компаратора из начального состояния на необходимый уровень после мощной

засветки ФПУ была разработана специальная схема, испытания которой проводились при имитации увеличения шума фотодиода увеличением напряжения смещения на нем.

В работе было показано, что введение настоящей схемы автоматического смещения порога компаратора в состав фотоприемного устройства существенно повышает его стойкость лазерному воздействию. Для реализованной в настоящей работе схемы на основе экспериментальных данных было показано, что переключение порога компаратора с 80 до 350 мВ способно обеспечить работоспособность ФПУ при чувствительности 260 нВт после мощности воздействия, достигающей 1083 Вт.

*В заключение авторы выражают благодарность Бинюкову И. В. за содействие при оснащении экспериментального стенда, а также Сафутинной С. П. за помощь в проведении исследований.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каталог фирмы, [www.cmcelectronics.ca](http://www.cmcelectronics.ca)
2. Каталог фирмы, [www.lasercomponents.com](http://www.lasercomponents.com)
3. Dion B., Bélanger N., Lauzon J., et al. // Proc. SPIE. 2010. V. 7684-4. No. 704208. P. 31.
4. Dion B., Lepage P., Bertone N. // IEEE LEOS. 2006. V. 20. No. 5. P. 29.
5. Зверев Г. М., Землянов М. М., Короннов А. А. // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 79.
6. Короннов А. А., Зверев Г. М., Землянов М. М. и др. // Прикладная физика. 2015. № 4. С. 54.
7. Абазадзе Ю. В., Лицарев Н. А., Почтарев В. Л. и др. // Квантовая электроника. 2002. № 3. С. 247.
8. Патент, EP 2052477 B1. Automatic avalanche photodiode bias setting system based on unity-gain noise measurement / R. W. Vyren. 25.06.2014.
9. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Советское радио, 1966.
10. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1989.

## Improvement of resistance of photodetectors with a germanium avalanche photodiode to high power laser irradiation influence

*A. A. Koronnov<sup>1</sup>, A. E. Safutin<sup>1</sup>, M. M. Zemlyanov<sup>1</sup>, and G. M. Zverev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> M. F. Stelmah Research Institute «Polyus»  
3 Vvedensky str., Moscow, 117279, Russia  
E-mail: koronnov@inbox.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received October 27, 2015

*The research results of noise increase of germanium avalanche photodiode induced by high power laser irradiation influence were shown. Based on obtained experimental data, the noise level at the amplifier output of the photodetector with a partially degraded photodiode and the threshold voltage of comparator ensuring the acceptable number of false signals were calculated. The automatic switching circuit of threshold voltage of comparator for restoring serviceability of photodetector after high power light exposure was designed and successfully tested.*

PACS: 85.60.Dw

*Keywords:* germanium avalanche photodiode, photodetector, pulsed laser rangefinder.

#### REFERENCES

1. Catalog: [www.cmcelectronics.ca](http://www.cmcelectronics.ca)
2. Catalog: [www.lasercomponents.com](http://www.lasercomponents.com)
3. B. Dion, N. Bélanger, J. Lauzon, et al., Proc. SPIE **7684-4** (704208), 31 (2010).
4. B. Dion, P. Lepage, and N. Bertone, IEEE LEOS **20** (5), 29 (2006).
5. G. M. Zverev, M. M. Zemlyanov, and A. A. Koronov, Prikladnaya Fizika, No. 2, 79 (2015).
6. A. A. Koronov, G. M. Zverev, M. M. Zemlyanov, et al., Prikladnaya Fizika, No. 4, 54 (2015).
7. Yu. V. Abazadze, N. A. Lotsarev, V. L. Pochtarev, et al., Quantum Electronics, No. 3, 247 (2002).
8. R. W. Byren, Patent EP 2052477 B1. 25.06.2014.
9. V. I. Tikhonov, *Statistical Radio Engineering* (Sovetsk. Radio, Moscow, 1966) [in Russian].
10. J. Gowar, *Optical Communication Systems* (Prentice/Hall International, 1985; Radio Svyaz', Moscow, 1989).