

УДК 621.383

## Особенности схемотехники импульсных пороговых ФПУ с малым временем восстановления чувствительности после воздействия импульса перегрузки

П. М. Боровков, Л. Н. Казарин, Н. В. Кравченко, А. В. Потапов, М. А. Трищенко

*Данная работа посвящена рассмотрению и практической реализации различных схемных решений быстродействующих фотоприемных устройств, основанных на использовании в качестве фоточувствительного элемента фотодиодов, оптимизированных для приема на спектральный диапазон 0,85—1,067 мкм. При этом длительность входных оптических сигналов может изменяться в широком диапазоне от 5 до 400 нс, с уровнями регистрируемых энергий от  $1 \times 10^{-16}$  до  $2 \times 10^{-9}$  Дж.*

PACS: 85.60.-q

*Ключевые слова:* фотоприемное устройство, ФПУ, время восстановления, фотодиод.

### Введение

Квадрантное ФПУ было разработано на основе Si-p-i-n-фотодиода для решения задач по обнаружению и селекции по амплитуде и времени сигналов от лазерного пятна в ближнем ИК-диапазоне.

Анализ возможных схемотехнических решений по увеличению чувствительности ФПУ на основе фотодиодов приводит к выводу о необходимости применения на входе усилителя большой нагрузки (500 кОм и более). Такое сопротивление нагрузки увеличивает электрическую взаимосвязь (в многоэлементных ФПУ) и постоянную времени входной RC-цепи, что существенно увеличивает время восстановления чувствительности.

Эти недостатки частично устраняются использованием усилителя с отрицательной параллельной обратной связью по напряжению, когда сопротивление нагрузки включено в цепь отрицательной обратной связи. Таким образом, применение такой обратной связи является одним из методов существенного уменьшения времени восстановле-

ния чувствительности при одновременном улучшении быстродействия до того момента, когда не будет исчерпан динамический диапазон используемого усилителя по преобразованию входного фототока в выходное напряжение.

В настоящее время для уменьшения времени восстановления чувствительности применительно к ФПУ применяют следующие способы:

- 1) использование на входе усилителя активного ключа на транзисторе (полевом или биполярном);
- 2) применение ограничительного диода на входе усилителя;
- 3) построение логарифмического каскада, как на входе, так и в последующих трактах усилителей;
- 4) использование схемы временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ);
- 5) применение многоступенчатой системы ослабления сигналов, как на входе ФПУ, так и в последующих каскадах усилителя.

Следует учесть, что в ФПУ часто используется комбинация нескольких способов для более существенного уменьшения времени восстановления чувствительности.

Каждый из приведенных способов доказал свою состоятельность, хотя и имеет свои особенности в применении и не лишен недостатков. Так, при использовании 1 и 4 способов необходимо дополнительно применять различные схемы управления ключами на транзисторах, вводить в системах стробируемые активные элементы и генераторы импульсов. Одновременно приходится дополнительно принимать меры по снижению амплитуды переходных процессов как от импульсов управления, так и самих ключей.

---

**Боровков Павел Михайлович**<sup>1</sup>, главный специалист.

**Казарин Лев Николаевич**<sup>1</sup>, ведущий инженер-электроник.

**Кравченко Николай Владимирович**<sup>1</sup>, начальник ПТК.

**Потапов Анатолий Васильевич**<sup>1</sup>, главный специалист.

**Трищенко Михаил Алексеевич**<sup>2</sup>, профессор.

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111396, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел. 8 (499) 374-94-00. E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Московский институт радиоэлектроники и автоматики (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

*Статья поступила в редакцию 29 декабря 2014 г.*

---

© Боровков П. М., Казарин Л. Н., Кравченко Н. В.,  
Потапов А. В., Трищенко М. А., 2015

Применение способа 2 носит ограниченный характер и используется, как правило, для защиты от пробоя входного каскада ФПУ высоковольтным импульсом, формируемым фотодиодом при больших энергиях входных оптических сигналов.

Использование способа 3 также сопряжено с существенными ограничениями, так как реальное значение тока с фотодиода может достигать нескольких десятков миллиампер, что приводит к необходимости ограничения его величины тем или иным способом. Помимо этого, на выходе логарифмического каскада при перегрузках возникает переходной процесс, что требует дополнительных мер по устранению дополнительных (ложных) импульсов.

Таким образом, из всего изложенного следует, что ни один из рассмотренных способов уменьшения времени восстановления чувствительности ФПУ не является идеальным решением. Требуемый результат всегда достигается лишь с помощью компромиссного решения.

Данная работа посвящена рассмотрению и практической реализации различных схемных решений быстродействующих фотоприемных устройств, основанных на использовании в качестве фоточувствительного элемента фотодиодов, оптимизированных для приема на спектральный диапазон 0,85—1,067 мкм. При этом длительность входных оптических сигналов может изменяться в широком диапазоне от 5 до 400 нс, с уровнями регистрируемых энергий от  $1 \times 10^{-16}$  до  $2 \times 10^{-9}$  Дж.

### Особенности схемотехники

Из возможных схемотехнических решений выбор был сделан в пользу использования усилителя с параллельной отрицательной обратной связью по напряжению (так называемое трансимпедансное включение), когда сопротивление нагрузки включено в цепь отрицательной обратной связи.

Даже при высоком сопротивлении нагрузки, обеспечивающего снижение составляющей его теплового шума, удастся минимизировать взаимосвязь в многоканальных ФПУ за счет меньшего эквивалентного входного сопротивления усилителя и, тем самым, снизить постоянную времени входной RC-цепи.

В ФПУ использован квадрантный  $p-i-n$ -фотодиод с зазором между элементами 100 мкм, диаметром фотоплощадки 3,0 мм, имеющий токовую импульсную чувствительность  $S_\lambda \geq 0,4$  А/Вт. При этом емкость каждой площадки  $C_{фд} < 1,0$  пФ, темновые токи утечки площадок  $I_{ут} < 10$  нА, а ток охранного кольца не более 10 мкА при значении  $U_{фд} \approx 200$  В.

На входе усилителя применён малошумящий полевой транзистор типа 2П341А с  $e_{ш} < 1,2$  нВ·Гц<sup>1/2</sup>,  $C_{зи} < 4,5$  пФ и  $C_{зс} < 1,5$  пФ.

Для расширения динамического диапазона входных сигналов использована многоступенчатая система ослабления сигналов как на входе ФПУ, так и в последующих каскадах усилителя, что обеспечивается применением ключей.

На рис. 1 приведена структурная схема ФПУ. Входной ключ обеспечивает пассивную автоматическую защиту даже при отсутствии внешнего сигнала управления, т. к. его переход коллектор—база выполняет функцию ограничительного диода. Необходимое значение коэффициента ослабления устанавливается путём подбора различных комбинаций потенциалов на входах ключей. Усилительные каскады обеспечивают необходимое усиление для достижения заданного значения вольтовой чувствительности ФПУ с одновременной квазиоптимальной коррекцией выходного импульса. Работа на нагрузку 50 Ом обеспечивается мощным выходным повторителем. Для обеспечения устойчивости ФПУ к пульсациям по цепям питания в его состав включены фильтры питания.

### Структурная схема ФПУ

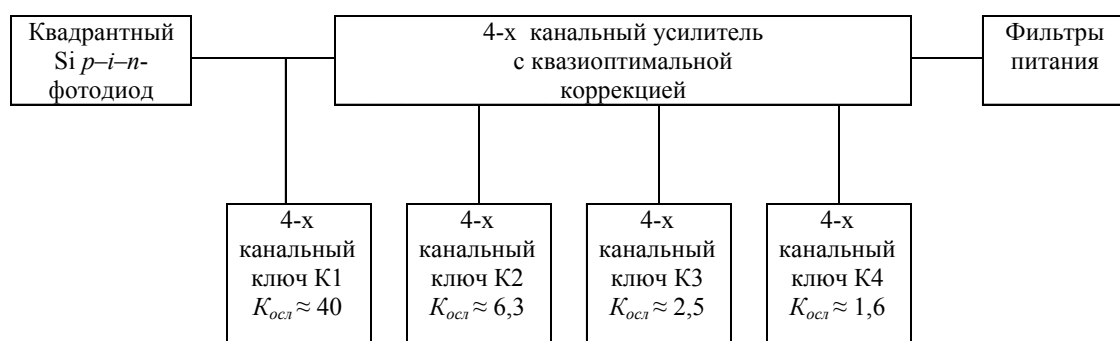


Рис. 1. Структурная схема ФПУ

Для получения минимального уровня токового шума нагрузки на входе усилителя её значение выбрано равным 5,0 МОм. Дальнейшее увеличение величины нагрузки не приводит к заметному улучшению чувствительности из-за доминирующего вклада токовых шумов фотодиода и входного транзистора, но при этом ведет к увеличению времен разрешения и восстановления чувствительности.

С целью обеспечения возможности селекции сигналов в состав ФПУ включен ключ «Строб».

### Экспериментальные результаты

Изготовлен макет образца и измерены его основные фотоэлектрические характеристики:

– порог импульсной чувствительности на  $\lambda = 1,064$  мкм (при длительности входного сигнала 20 нс) не более  $\Phi = 1 \cdot 10^{-16}$  Дж;

- время нарастания выходного импульса  $\tau_{0,1-0,9} \sim 180$  нс;
- динамический диапазон при работе ключей  $\geq 1,0 \cdot 10^7$ ;
- время разрешения не более 3,5 мкс;
- время восстановления чувствительности не более 200 мкс;
- диапазон линейности выходного сигнала не менее 3 В;
- сопротивление нагрузки 50 Ом.

На рис. 2 приведена осциллограмма при длительностях входных импульсов 20 нс и входных мощностях 1 мкВт и 100 мВт, соответственно, для левого и правого импульсов, когда ключи ФПУ не активны, а на рис. 3 приведена осциллограмма при мощностях 5 мВт и 500 мкВт, соответственно, для левого и правого импульсов, когда ключи ФПУ активированы.

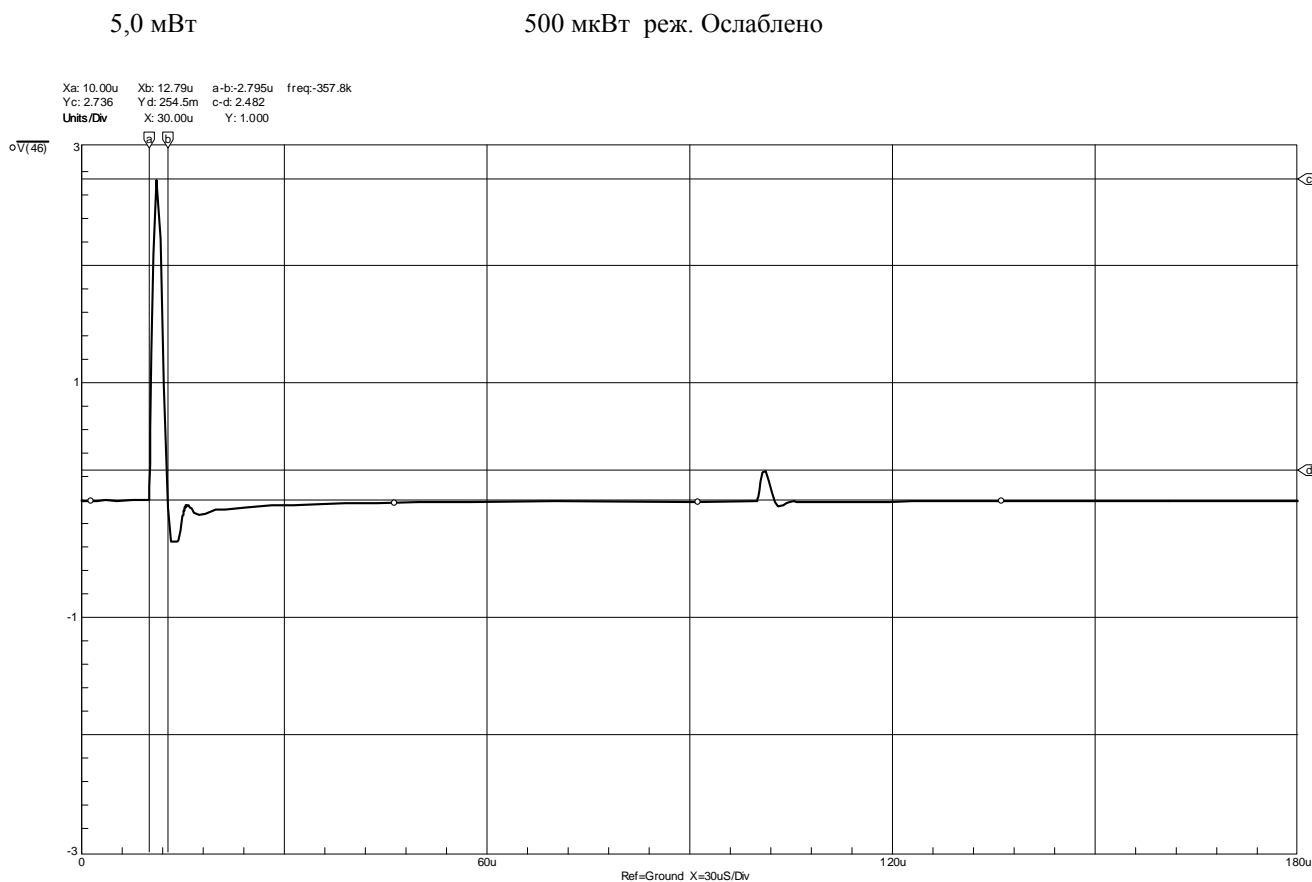


Рис. 2. Выходные сигналы с ФПУ от импульсов мощностью 5,0 мВт и 500 мкВт при наличии сигналов управления

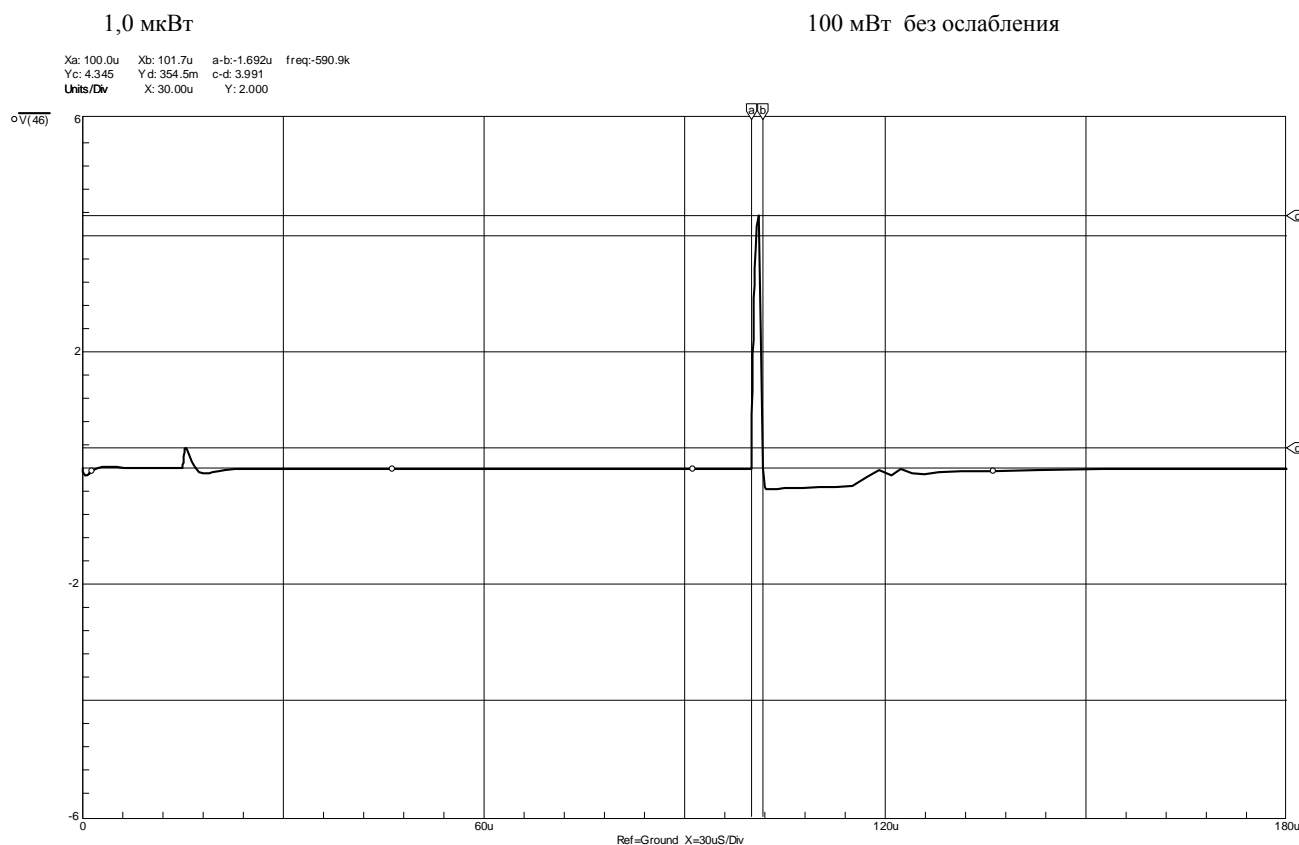


Рис. 3. Выходные сигналы с ФПУ от импульсов мощностью 1,00 мкВт и 100 мВт при отсутствии сигналов управления

### Заключение

Полученные экспериментальные данные показывают правильность выбранной концепции схемотехнического построения электронного тракта ФПУ, т. е. для получения удовлетворительного результата необходимо одновременное применение целого ряда комбинированных решений, а именно:

1) входной тракт должен обеспечивать защиту от перегрузок входным сигналом, как в активном режиме, когда используется сигнал управления, так и в пассивном режиме, когда отсутствует сигнал управления на входном электронном ключе ФПУ;

2) с целью уменьшения времени восстановления ФПУ его усилительные каскады должны быть построены так, чтобы активные полупроводниковые элементы не использовались в режимах глубокого насыщения (желательно построение усилительных каскадов на запирающие рабочим полезным сигналом);

3) для уменьшения разброса коэффициентов ослабления следует отдавать предпочтение многоступенчатой системе ослабления сигналов;

4) достигнутый при этом уровень основных параметров (пороговая чувствительность) и динамический диапазон входных оптических сигналов находятся на уровне лучших мировых образцов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотозлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.
2. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях. — Мир, 1979.
3. Трищенко М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — Радио и связь, 1992.
4. Ушакова М. Б. Обзор зарубежной литературы за 1993—2000 гг. — ГНЦ РФ ГУП «НПО «Орион».
5. Боровков П. М., Казарин Л. Н. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 621.
6. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотозлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
7. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотозлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. — М.: Физматкнига, 2012.
8. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 82.
9. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Ленинград: Машиностроение, 1977.
10. Жуковский А. П. Радиоприемные устройства. — М.: Высшая школа, 1989.

## Features of a circuit technology for pulse threshold photodetectors with rapid sensitivity recovery after the influence of an overloading pulse

*P. M. Borovkov, L. N. Kazarin, N. V. Kravchenko,  
A. V. Potapov, and M. A. Trishenkov*

Orion R&P Association Inc.  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia

*Received December 29, 2014*

*The present article is devoted to consideration and practical realization of various high-speed photoreceivers circuit solutions based on the use of photodiodes, optimized for receiving within the spectral wavelength range 0.85—1.067  $\mu\text{m}$ , as a photosensitive element. The duration of input optical signals may vary in a wide range between 5 and 400 ns, with registered energy levels between  $1 \times 10^{16}$  and  $2 \times 10^{-9}$  J.*

PACS: 85.60.-q

*Keywords:* photodetector, recovery time, photodiode.

### REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base*. (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
2. A. van der Zijl, *Noises at Measurements* (Mir, Moscow, 1979) [in Russian].
3. M. A. Trishenkov, *Photodetectors and CCD* (Radio i Svyaz', Moscow, 1992) [in Russian].
4. M. B. Ushakova, *Review of Foreign Literature on 1993-2000*. (NPO Orion).
5. P. M. Borovkov, L. N. Kazarin, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 621 (2013).
6. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
7. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photoresistors and Photodetectors*. (Fizmatkniga, Moscow, 2012) [in Russian].
8. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 82 (2011).
9. M. M. Miroshnikov, *Theoretical Foundation of Optic-Electronic Devices* (Mashinostroenie, Leningrad, 1977) [in Russian].
10. A. P. Zhukovskii, *Radio Receivers*. (Vyssh. Shkola, Moscow, 1989) [in Russian].