

УДК 621.383

Четырёхканальное ФПУ на основе квадрантного кремниевого фотодиода для координатных систем

П.М. Боровков, Л.Н. Казарин, А.В. Потапов, Н.В. Фролов

В статье рассмотрена основная номенклатура требований, предъявляемых к ФПУ. Приведена одна из возможных концепций построения электронного тракта ФПУ. Показаны его структурная и принципиальная электрические схемы. Приведены основные параметры используемой элементной базы. Рассмотрены особенности конструкции и приведены экспериментальные данные.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw.

Ключевые слова: ФПУ, фотоприемное устройство, пороговая чувствительность, квазиоптимальная фильтрация, фотодиод.

Введение

В настоящее время к координатно-чувствительным ФПУ выдвигается ряд повышенных требований как по фотоэлектрическим параметрам, так и по конструктивным. В первую очередь, это высокая пороговая чувствительность, минимальные взаимосвязь и разброс чувствительности между каналами, минимальные габариты и масса, а также устойчивость к внешним воздействующим факторам, в том числе к магнитным и электромагнитным полям. Во вторую, — повышенные требования к динамическому диапазону входных оптических сигналов и диапазону линейности выходных сигналов, устойчивости к постоянной фоновой засветке и ряду других параметров [1, 4].

Целью данной работы является рассмотрение одной из возможных концепций построения электронного тракта ФПУ в интересах повышения общей эффективности координатно-чувствительных ФПУ.

Основные концепции

Анализ возможных схемотехнических решений по улучшению чувствительности ФПУ приводит к выводу о необходимости применения на входе усилителя большой входной нагрузки (не менее $5 \cdot 10^6$ Ом) [2, 3]. Однако высокое значение сопротивления входной нагрузки увеличивает

электрическую взаимосвязь (в многоэлементных ФПУ) и постоянную времени входной RC -цепи, что приводит к увеличению времени восстановления ФПУ. Эти недостатки устраняются при использовании усилителя с параллельной отрицательной обратной связью по напряжению (т.н. «трансимпедансное включение» по материалам зарубежной печати [5, 6]), когда сопротивление нагрузки включено в цепь отрицательной обратной связи. Даже при высоком сопротивлении нагрузки (что обеспечивает снижение составляющей его теплового шума) удастся минимизировать взаимосвязь за счет меньшего эквивалентного входного сопротивления усилителя и снизить постоянную времени RC -цепи. Коэффициент передачи такого усилителя равен произведению комплексного сопротивления обратной связи Z_{oc} на токовую чувствительность S_I фотодиода [3]. Он мало зависит от коэффициента усиления усилителя и от емкости на его входе, что позволяет снизить разбросы вольтовой чувствительности и электрическую взаимосвязь между каналами.

В ФПУ также необходимо использование $p-i-n$ -фотодиода с минимальными значениями межэлементных зазоров (для увеличения крутизны пеленгационной характеристики), токов утечки и собственной ёмкости. На входе усилителя ФПУ необходимо использование сверхмалощумящего полевого транзистора с последующей квазиоптимальной фильтрацией импульсных сигналов для достижения максимального отношения сигнал / шум.

Элементная база и некоторые особенности построения электронного тракта ФПУ

Исходя из вышеизложенного, в ФПУ был применён кремниевый $p-i-n$ -фотодиод с зазором между элементами 50 мкм, диаметром фотопло-

Боровков Павел Михайлович, главный специалист.

Казарин Лев Николаевич, ведущий инженер.

Потапов Анатолий Васильевич, главный специалист.

Фролов Николай Васильевич, ведущий инженер.

ОАО «НПО «Орион»,

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2

Тел.: (495) 632-31-80. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2013 г.

© Боровков П.М., Казарин Л.Н., Потапов А.В., Фролов Н.В., 2013

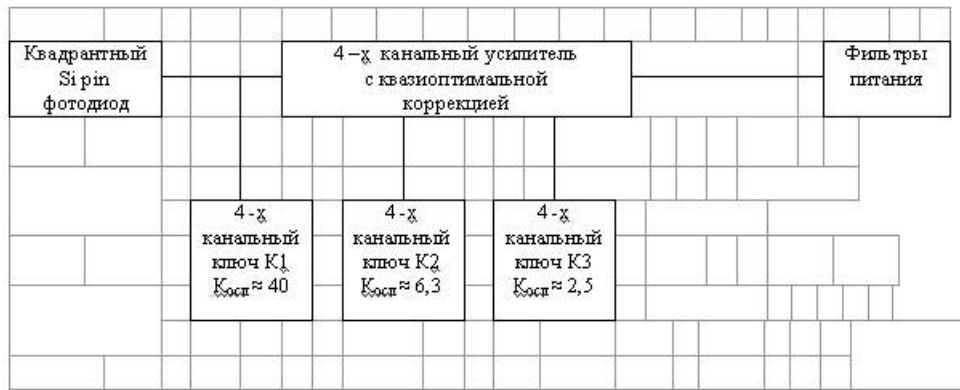


Рис. 1. Структурная схема ФПУ.

щадки 3,0 мм (с целью достижения минимальных значений токов утечки и ёмкости), имеющий токовую импульсную чувствительность $S_\lambda \geq 0,4$ А/Вт, ёмкость каждой площадки не более $C_{фл} < 1,0$ пФ, темновыми токами утечки площадок $I_{ут} < 10$ нА и током охранного кольца не более 10 мкА при значении $U_{фл} \approx 200$ В.

На входе усилителя применён один из лучших отечественных полевых транзисторов типа 2П341А с $e_{ш} < 1,2$ нВ·Гц^{1/2}, $C_{зи} < 4,5$ пФ и $C_{зс} < 1,5$ пФ. В роли ключа на входе ФПУ использован транзистор типа 2Т3132А как обладающий малой ёмкостью и достаточным быстродействием в режиме малых токов ($C_k < 0,5$ пФ, $f_{гр} \geq 7,5$ ГГц), обеспечивающий автоматическую защиту от электрического пробоя входного транзистора ФПУ при оптических импульсных перегрузках.

Из теории оптимальной фильтрации следует, что оптимум чувствительности ФПУ находится в области времён, близких к значениям постоянной шумовой составляющей его усилителя (справедливо, только когда длительность входного сигнала меньше входной постоянной усилителя и не требуется полное восстановление входной формы сигнала) [8–10]. Отклонение длительности выходного импульса от этого значения в ту или другую сторону приводит к ухудшению отношения сигнал/шум не менее чем на 10% на каждую октаву. Поэтому оптимизации параметров интегро-дифференцирующих цепей усилителя было уделено особое внимание.

Расчёты показывают, что для достижения минимальной пороговой чувствительности значение фронта выходного импульса (при следующих входных параметрах: суммарная входная ёмкость $C_{свх} \leq 8,0$ пФ, входное сопротивление $R_{свх} \geq 5$ МОм, э.д.с. шума полевого транзистора $e_{ш} < 1,2$ нВ·Гц^{1/2}, суммарный ток утечки $I_{ут} < 10$ нА) не должно превышать величины 150 нс.

Для расширения динамического диапазона входных сигналов использована многоступен-

чатая система ослабления сигналов как на входе ФПУ, так и в последующих каскадах усилителя, что обеспечивается применением ключей. Необходимое значение коэффициента ослабления вытекает из требований по динамическому диапазону и устанавливается путём подбора различных комбинаций потенциалов на входах этих 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. На рис. 1 и 2 приведены структурная и принципиальная схемы ФПУ.

Как видно из структурной и принципиальной схем, усилитель ФПУ включает в себя набор электронных ключей, управляемых напряжениями от минус 5,0 В до 0,0 В. Расчетный коэффициент ослабления сигнала на выходе равен 1000, что вытекает из требований к динамическому диапазону, и изменяется, соответственно, для следующих ключей: $K1 \approx 40$; $K2 \approx 6,3$ и $K3 \approx 2,5$. Необходимое значение коэффициента ослабления устанавливается путём подбора различных комбинаций потенциалов на входах ключей K1, K2 и K3.

Для получения минимального уровня токового шума нагрузки на входе усилителя её значение выбрано равным 5,0 МОм, т.к. дальнейшее её увеличение не приводит к заметному улучшению чувствительности из-за превалирующего вклада токовых шумов фотодиода и входного транзистора [2, 7].

Усилительные каскады на VT2 и DA1 обеспечивают необходимое усиление с одновременной квазиоптимальной коррекцией выходного импульса. Работа на нагрузку 50 Ом обеспечивается мощным выходным повторителем.

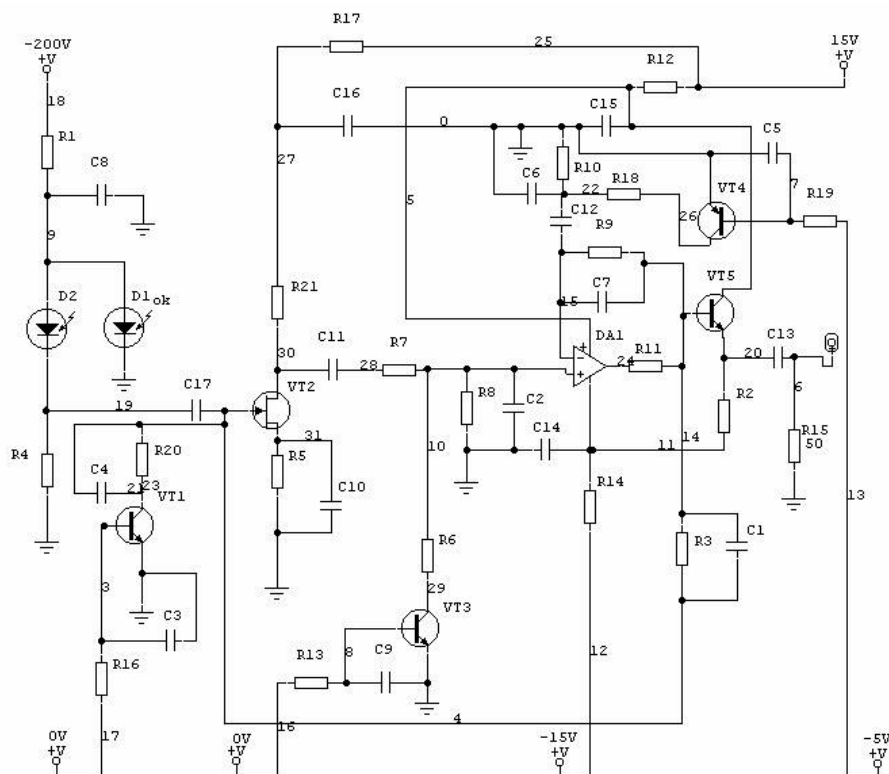


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема 1-го канала квадрантного ФПУ.

Для обеспечения устойчивости ФПУ к пульсациям по цепям питания в его состав включены фильтры $R1, C8, R17, C16, R12, C15, R14, C14$.

Конструкция ФПУ

Несущей конструкцией ФПУ является цоколь в виде прямоугольного параллелепипеда, изготовленный из сплава 29НК-ВИ, обеспечивающий согласованный температурный коэффициент расширения для металлостеклянного спая. На торцевой поверхности цоколя установлены: квадрантный фотодиод, высокоомные резисторы и разделительные конденсаторы, а на боковых поверхностях — 4 микросборки усилителей, изготовленные по гибридно-тонкопленочной технологии. Герметичность внутреннего объема ФПУ обеспечивается лазерной сваркой крышки с цоколем. Входное окно выполнено из стекла марки А-151. Для защиты от коррозии наружных поверхностей ФПУ применяется никелевое покрытие, а паяемость выводов обеспечивается их облуживанием.

Таким образом, достигается моноблочная, герметичная, не требующая обслуживания и ремонта металлостеклянная конструкция ФПУ, обеспечивающая необходимую защиту ФПУ от внешних воздействующих факторов.

Экспериментальные результаты

Изготовлен макет образца и измерены его следующие основные фотоэлектрические характеристики:

- порог импульсной чувствительности на $\lambda = 1,06$ мкм (при длительности входного сигнала 20 нс) $\Phi = 1 \cdot 10^{-16}$ Дж;
- время нарастания выходного импульса $\tau_{0,1-0,9} \sim 180$ нс;
- динамический диапазон при работе ключей $\geq 1,0 \cdot 10^6$;
- диапазон линейности выходного сигнала ≤ 3 В;
- сопротивление нагрузки 50 Ом.

Заключение

Полученные экспериментальные данные показывают правильность выбранной концепции схемотехнического построения электронного тракта ФПУ, а именно:

1. применение $p-i-n$ -фотодиода для снижения входной емкости ФПУ;
2. использование сверхмалошумящего полевого транзистора с целью уменьшения входных токов с одновременным снижением э.д.с. шума;
3. построение входного тракта ФПУ по трансимпедансной схеме позволило существенно увеличить величину сопротивления входной нагрузки без ухудшения быстродействия с одновременным снижением его шумовой токовой составляющей;
4. использование квазиоптимальной фильтрации обеспечило минимальные потери в отношении сигнал/шум;
5. основной параметр (пороговая чувствительность) находится на уровне лучших мировых

образцов; его значение превышает расчетное предельное значение не более чем на 80%, при этом дополнительные потери обусловлены в основном из-за невозможности использования фильтров по полосе сигнала выше 2-го порядка, т.к. их использование не обеспечивает апериодическую форму сигнала на выходе во всем динамическом диапазоне импульсных входных сигналов.

Литература

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.
2. А. Ван дер Зил Шумы при измерениях. — М.: Мир, 1979.
3. Трищенко М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992.
4. Ушакова М.Б. Обзор зарубежной литературы за 1993–2000 гг. — ГНЦ РФ ГУП «НПО «Орион».
5. Досталл И. Операционные усилители. — М.: Мир, 1982.
6. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных интегральных схем. — М.: Мир, 1985.
7. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. — М.: Мир, 1986.
8. Аверин Л.Н. // Оптико-механическая промышленность. 1974. № 10. С. 3
9. Михеев В.С., Петров А.С. // Оптико-механическая промышленность. 1978. № 2. С. 11
10. Лезин Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. — М.: Советское радио, 1969.

Quadrant silicon photodiode based on the four-channel amplified photodetector for coordinating systems

P.M. Borovkov, L.N. Kazarin, A.V. Potapov, and N.V. Frolov

Orion R&P Association

46/2 Enthuziastov sh., Moscow, 111123, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

Main nomenclature of presented requirements for the PPM has been surveyed. One of the possible concepts of the photo detector electronic path construction has been presented. It is structural and circuit electrical schemes have been presented. Basic parameters of the used element basis are provided. Design features are viewed and the experimental data is shown.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw.

Keywords: photodetector, threshold response, quasi-optimal filter, photodiode.

Bibliography — 10 references

Received October 10, 2013