

Модуль на малошумящих полевых транзисторах для обработки сигналов лавинных фотодиодов

Олег Дворников, Владимир Чеховский, Валентин Дятлов (г. Минск, Беларусь), Николай Прокопенко (г. Шахты, Россия)

На основе модернизированной аналоговой ИС для датчиков космической аппаратуры и малошумящих полевых транзисторов с р-п-переходом и каналом n-типа разработан электронный модуль обработки сигналов лавинных фотодиодов, содержащий зарядочувствительный усилитель и активный полосовой фильтр. Наименьший эквивалентный шумовой заряд модуля достигнут с транзистором типа KS363V и составляет 292 эл.+1,9 эл./пФ при времени пика 2,2 мкс. Приведены схемные решения и результаты измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ параметров современных фотоприёмников показал, что во многих случаях реализация оптико-электронных устройств, регистрирующих десятки фотонов, целесообразна на основе лавинного фотодиода (ЛФД) и малошумящей считывающей электроники [1]. Ранее авторами статьи были разработаны и экспериментально исследованы электронные модули CRP-MDL-1 и CRP-MDL-2, предназначенные для обработки сигналов ЛФД [2, 3] и использующие аналоговую ИС для датчиков космической аппаратуры [4].

Анализ измерений выявил недостаточно эффективную обработку сигналов ЛФД с большой внутренней ёмкостью (C_D) из-за повышенного уровня шумов, который для зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) характеризуется зависимостью эквивалентного шумового заряда (ENC, Equivalent Noise Charge) от ёмкости, соединённой с входом. Под эквивалентным

шумовым зарядом понимается входной заряд, вызывающий на выходе системы сигнал, равный среднеквадратическому значению напряжения шумов. Обычно величина ENC описывается среднеквадратическим значением заряда, выраженным в количестве электронов (эл.).

Изучение передовых изделий данного класса показало, что предельно малый уровень шумов обычно достигается за счёт применения дискретного малошумящего полевого транзистора с р-п-переходом и каналом n-типа (n-ПТП). В этом случае минимизация шума возможна за счёт ёмкостного согласования n-ПТП и ЛФД (желательно, чтобы входная ёмкость транзистора была равна ёмкости ЛФД) и охлаждения транзистора. Примером таких устройств являются гибридные ИС фирмы Amptek (США) [5–8].

Целью настоящей статьи является анализ схемы и параметров электронного модуля обработки сигналов ЛФД, созданного на основе модернизированной аналоговой ИС для датчиков космической аппаратуры и малошумящих дискретных n-ПТП.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ

Для создания устройства обработки сигналов ЛФД с предельно низким уровнем ENC были выполнены следующие работы:

- модернизирована аналоговая ИС для датчиков космической аппаратуры [4], в которой операционные усилители (ОУ) U1A и U1B заменены на входной каскад CSP-Stage2

(см. рис. 1), а ОУ U2A, U2B и U2C, входящие в инструментальный усилитель, в новой ИС (см. рис. 2) выполнены в виде отдельных компонентов;

- разработана электрическая схема модуля (см. рис. 3), предусматривающая возможность подключения дискретных транзисторов;
- исследованы характеристики модуля при использовании n-ПТП с различной входной ёмкостью (см. таблицу).

Структурная схема модернизированной ИС приведена на рисунке 2. Она содержит два входных каскада CSP-Stage2-1, CSP-Stage2-2, работающих с внешним n-ПТП, два инвертирующих усилителя напряжения U4A, U4B с головным малошумящим p-ПТП и токовым аттенуатором [4], три ОУ (U2A, U2B и U2C) с резистором 9,2 кОм в цепи отрицательной обратной связи, и блоки U3B, U3C, задающие рабочий режим.

При подключении к выводу IN блока CSP-Stage2 стока внешнего n-ПТП, исток которого соединён с шиной нулевого потенциала, а затвор – с входом, и соединении выводов REF и ADD полученная схема представляет собой «перегнутый» каскод, в котором транзистор Q1 включён с общей базой, а усиление по напряжению определяется крутизной внешнего n-ПТП и суммарным сопротивлением всех параллельных цепей, соединённых с высокоимпедансным узлом – коллектором Q1.

Канал обработки сигнала фотодиода, реализованный в электронном модуле (см. рис. 3), включает:

- ЗЧУ на CSP-Stage2-2, J₁, C₂, R₃;
- дифференцирующую цепь R₁C₁ с «компенсацией полюса нулём» резистором R₂;
- последовательно соединённые активные интеграторы: первый (C₆, R₁₁, U4A), второй (C₃, R₅, U2B), третий (C₄, R₇, U2A) и четвёртый (C₅, R₈, U2C).

Таким образом, канал обработки образуют последовательно соединённые ЗЧУ и активный полосовой фильтр типа CR-RC¹.

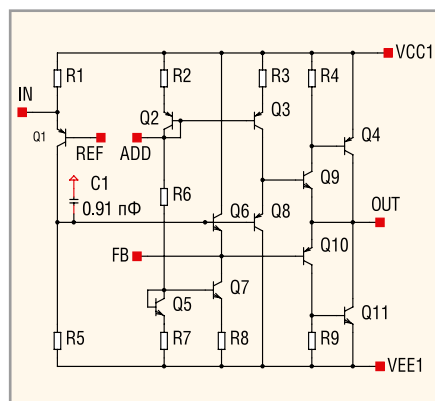


Рис. 1. Электрическая схема входного каскада CSP-Stage2 микросхемы

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения характеристик электронного модуля выполнялись с помощью комплекта оборудования, включающего:

- цифровой осциллограф Agilent MSO 6052A или Infiniium HP 54830B;
- выносной пробник 10073C;
- генератор сигналов произвольной формы Agilent 33250A;
- аттенуатор Agilent 8494G;
- двухканальный источник питания Agilent E3646;
- интерфейсный модуль USB – GPIB Agilent 82357B;
- систему сбора данных Agilent 34970A с набором управляющих модулей;
- персональный компьютер;
- импульсный калибратор И1-15;
- делитель напряжения ДН-1.

Оборудование было объединено в систему с помощью шины GPIB. Управление осуществлялось посредством разработанного в среде Agilent VEE специализированного программного обеспечения для автоматизированного измерения характеристик ИС. Полученные данные записывались

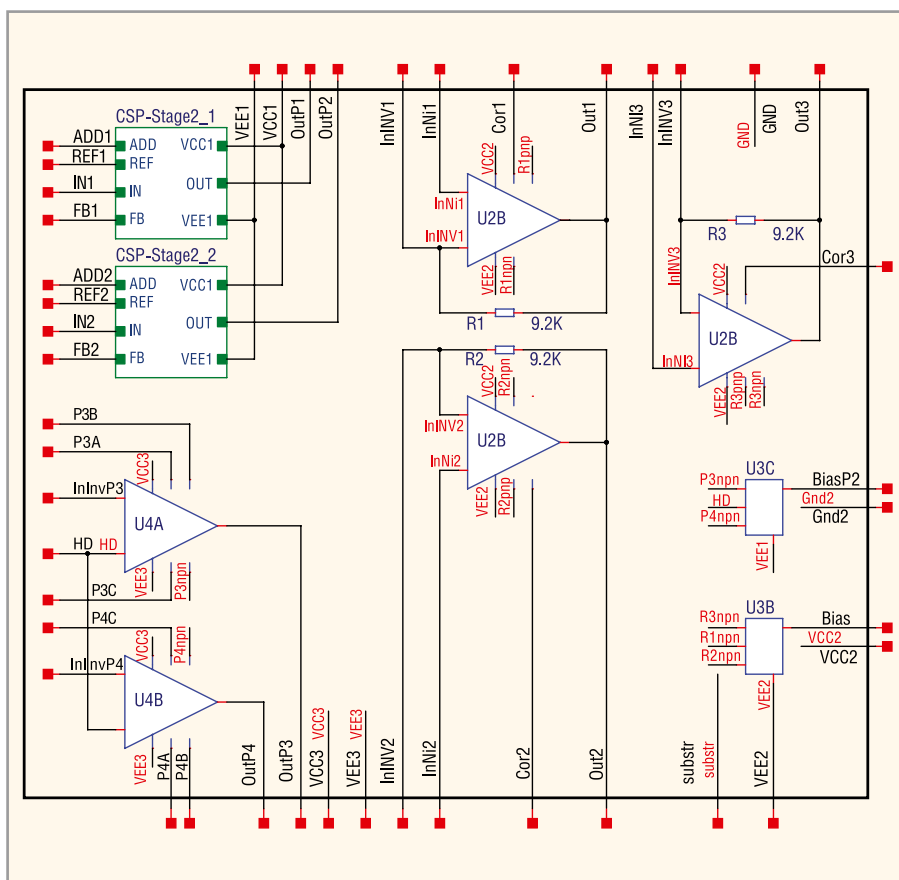


Рис. 2. Структурная схема ИС

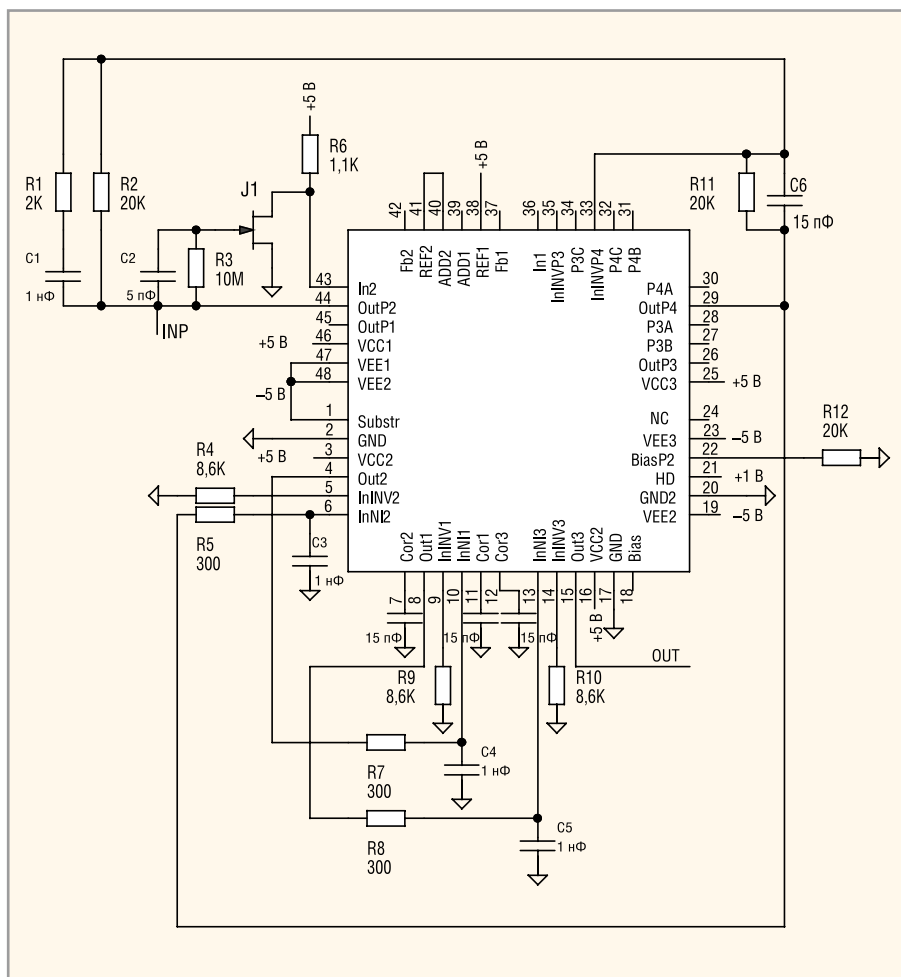


Рис. 3. Упрощённая электрическая схема электронного модуля обработки сигналов ЛФД

в текстовый файл, дальнейшая обработка которого производилась в среде MS EXCEL с помощью стандартных средств и специализированных программ (макросов).

В результате измерений установлено, что шумы электронного модуля с разными транзисторами описываются следующими соотношениями:

- для ПТП типа КП303 – 448 эл.+ + 29,5 эл./пФ при времени пика $T_p = 1,5$ мкс;
- для ПТП типа IF140 – 421 эл.+ + 14,1 эл./пФ при $T_p = 1,5$ мкс;
- для ПТП типа KS152 – 223 эл.+ + 5,0 эл./пФ при $T_p = 1,4$ мкс;
- для ПТП типа KS152 – 226 эл.+ + 3,8 эл./пФ при $T_p = 2,1$ мкс;

- для ПТП типа KS363V – 321 эл.+ + 2,3 эл./пФ при $T_p = 1,5$ мкс;
- для ПТП типа KS363V – 292 эл.+ + 1,9 эл./пФ при $T_p = 2,2$ мкс.

Анализ результатов измерений показал, что наименьший уровень шумов для ЛФД с большой ёмкостью обеспечивает применение транзистора KS363V при $T_p = 2,2$ мкс, а для ЛФД с малой ёмкостью – транзистора KS152 при $T_p = 1,4$ мкс.

Результаты измерений характеристик электронного модуля также иллюстрируют рисунки 4–10, на которых приведены:

- формы выходных сигналов при использовании головных транзисторов КП303, IF140, KS152, конкретной величине входного заряда (Q_{IN}) и разных C_D ;

Типовые параметры n-ПТП, использованных в электронном модуле

Параметр	Тип транзистора			
	IF140A	2SK152	2SK363	HT009
Напряжение отсечки, В	от -0,5 до -6,0	от -0,55 до -2,0	от -0,3 до -1,2	от -1,0 до -7,0
Максимальный ток стока, мА	5,0...15,0	9,5...42,0	5,0...30,0	до 20,0
Крутизна, мА/В	>4,5	>21,0	>25,0	10,0...30,0
Входная ёмкость, пФ	<3,0	<9,0	75,0	нет данных

- зависимости ENC от внутренней ёмкости C_D при различном времени пика выходного сигнала (T_p).

Рисунки 4–10 можно скачать единым архивом из интернет-приложения к статье на интернет-странице журнала (www.soel.ru).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан электронный модуль обработки сигналов ЛФД, состоящий из зарядочувствительного усилителя и активного полосового фильтра со структурой CR-RC⁴. Модуль преобразует короткие токовые импульсы в выходное напряжение и характеризуется малым уровнем собственных шумов, определяемым, в основном, внешним полевым транзистором. Для ЛФД с большой ёмкостью целесообразно применять ПТП типа KS363V, для которого уровень шумов описывается соотношением 292 эл.+1,9 эл./пФ при времени пика 2,2 мкс.

Низкий уровень шумов модуля позволяет эффективно регистрировать токовые импульсы различных ЛФД, кремниевых и газовых детекторов частиц и ионизирующих излучений и других ёмкостных датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворников О.В. Средства регистрации импульсного видимого излучения малой интенсивности. Часть 1: Особенности и возможности многоканальных фотоприёмников с внутренним усилением. Приборы и методы измерений. № 2 (5). 2012. С. 5–13.
2. Дворников О.В. Электронный модуль обработки сигналов лавинных фотодиодов. Инженерный вестник Дона. № 4 (часть 2). 2012. <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1338>.
3. Дворников О.В. Малощумящий электронный модуль обработки сигналов лавинных фотодиодов. Приборы и методы измерений. № 2 (7). 2012. С. 42–46.
4. Дворников О.В. Универсальная аналоговая микросхема для датчиков космической аппаратуры. Современная электроника. №3. 2011. С. 56–65.
5. Charge Sensitive Preamplifier. A-250. A New State-of-the-Art. <http://www.amptek.com>.
6. A250 Application Notes. (AN250-2, Revision 3). <http://www.amptek.com>.
7. Pulse Amplifier A275. <http://www.amptek.com>.
8. Pulse Amplifier A275FC, A275FN. <http://www.amptek.com>.

