
СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 621.382

СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ. ЧАСТЬ 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ. ОБЗОР

Дворников О.В.¹, Чеховский В.А.², Дятлов В.Л.¹

¹ Минский научно-исследовательский приборостроительный институт, г. Минск, Республика Беларусь

² Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь

Рассмотрены схемы включения, выходные сигналы и считывающая электроника кремниевых фотоэлектронных умножителей. Сформулированы требования к аналоговым устройствам для предварительной обработки их сигналов, в соответствии с которыми создана серия радиационно-стойких аналоговых микросхем, включающая компаратор напряжения и трансрезистивные усилители с разным коэффициентом преобразования и быстродействием. (E-mail: oleg_dvornikov@tut.by)

Ключевые слова: кремниевый фотоэлектронный умножитель, считывающая электроника, радиационно-стойкие аналоговые микросхемы, компаратор, трансрезистивный усилитель.

Введение

Нами ранее установлено [1], что реализация нечувствительных к магнитному полю оптико-электронных систем с однофотонным разрешением целесообразна на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей (*Silicon Photomultiplier, SiPM*). Целью настоящей статьи является изучение основных проблем, возникающих при обработке сигналов *SiPM*, в том числе: выбор схемы включения, применение существующей или разработка специализированной считывающей электроники.

Схемы включения кремниевых фотоэлектронных умножителей

Схема включения (рисунок 1) устанавливает требуемый рабочий режим *SiPM* и согласовывает его со считывающей электроникой. Обычно главной задачей при разработке схемы включения является обеспечение стабильности коэффициента усиления *SiPM* при изменении

напряжения питания и температуры, а также высокого отношения сигнал/шум, хотя для ряда применений особое внимание уделяется достижению максимального быстродействия.

Полярность напряжения смещения *SiPM* (напряжения, падающего на фотоприемнике) определяется типом проводимости подложки. Источник питания подключается к *SiPM* со стороны гасящих резисторов через интегрирующую *RC*-цепь, используемую для защиты источника и подавления импульсных помех. Другой электрод *SiPM* соединяется через нагрузочный резистор R_L (с сопротивлением в диапазоне от 1 до 20 кОм) с шиной нулевого потенциала или с регулируемым источником напряжения (цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) на рисунке 1в), применяемым для точной подстройки коэффициента усиления.

Чаще всего считывание сигнала *SiPM* осуществляется с помощью трансрезистивного усилителя (ТРУ) или зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) [2]. Иногда применяется быстродействующий усилитель в режиме сумматора (рису-

нок 1г) для выработки синхронизирующего импульса (узел TRG) по сумме сигналов всех каналов.

Обычно фотодетектор соединен со схемой считывания по переменному сигналу через разделительный конденсатор, не превышающий де-

сятков нанофард (рисунки 1а, б; на рисунке 1в разделительный конденсатор расположен внутри интегральной схемы (ИС), как показано далее на рисунке 4), так как низкочастотная составляющая входного сигнала не содержит полезной информации.

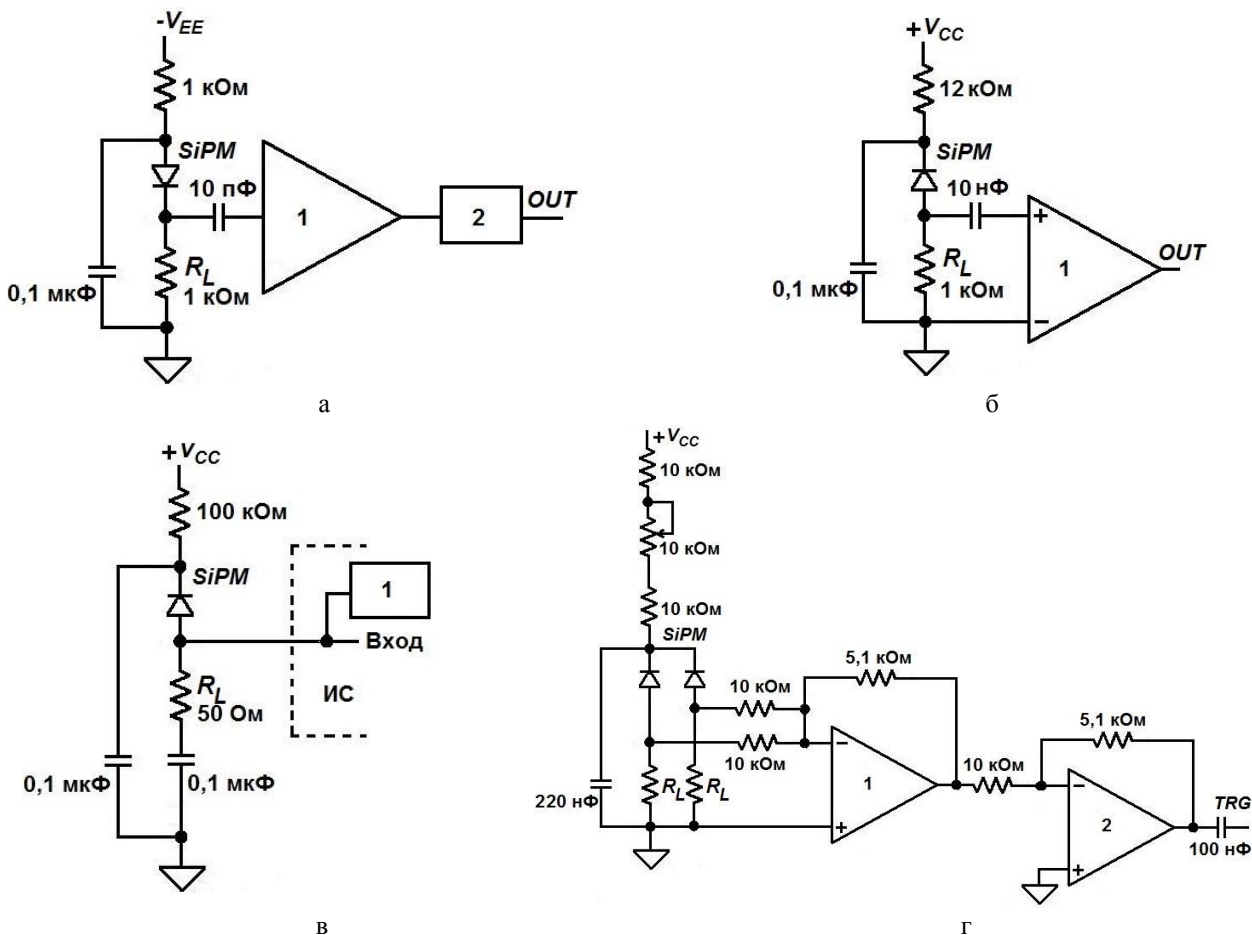


Рисунок 1 – Типовые схемы включения SiPM. а: 1 – трансрезистивный усилитель с 50-омным входным сопротивлением типа VT120; 2 – усилитель-дискриминатор 9327 фирмы Ortec [6]; б: 1 – трансрезистивный усилитель с 50-омным входным сопротивлением [4]; в: 1 – 8-разрядный цифро-аналоговый преобразователь [10]; г: 1, 2 – двухкаскадный усилитель на базе ОУ AD8002 [7]

Для термостабилизации режима работы в интегрирующей цепи применяют параллельное соединение резистора и термистора. Таким способом было достигнуто температурное изменение усиления SiPM менее 0,1 % в диапазоне температур от минус 18 до минус 8°C [3].

Моделирование формы выходного сигнала

Форма выходного сигнала SiPM определяется параметрами используемых полупровод-

никовых, тонкопленочных слоев и топологией ячейки. Для моделирования в Spice-подобных программах выходного сигнала SiPM предложена эквивалентная электрическая схема, показанная на рисунке 2 [4].

Эквивалентная схема описывает фотодетектор, состоящий из N ячеек, часть из которых находятся в активном режиме (лавина развивается), другая – в пассивном, а также учитывает внешние элементы, необходимые для установки рабочего режима и подключения к SiPM электроники считывания.

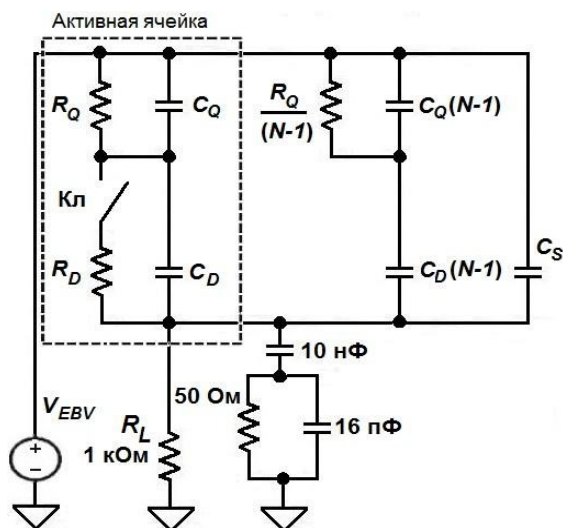


Рисунок 2 – Эквивалентная электрическая схема SiPM [4]

Элементы на рисунке 2 характеризуют: C_D , R_D – емкость и сопротивление (при наличии лавины) диода одной ячейки; C_Q – паразитную емкость межсоединений (металлизации); R_Q – сопротивление гасящего лавину резистора; C_S – паразитную емкость с подложкой; V_{EBV} – источник напряжения, $V_{EBV} = V_{BIAS} - V_{BR}$; V_{BIAS} – напряжение смещения; V_{BR} – пробивное напряжение диода ячейки; переход ключа (Кл) из состояния «разомкнуто» в состояние «замкнуто» имитирует включение лавины, а переход из состояния «замкнуто» в состояние «разомкнуто» – гашение лавины; резистор 1 кОм и конденсатор 10 нФ – внешние элементы схемы включения (рисунок 1б); резистор 50 Ом и конденсатор 16 пФ характеризуют входные параметры ТРУ (рисунок 1б).

Адекватность эквивалентной схемы проверена при сравнении результатов моделирования и измерений двух SiPM фирмы FBK [4]. Установлено, что результаты моделирования формы выходного сигнала SiPM достаточно точно соответствуют измерениям.

Анализ динамических параметров различных кремниевых фотоумножителей выполнен в [5] с использованием широкополосного (0,01–500 МГц) усилителя с входным сопротивлением 50 Ом. Полученные результаты обобщены в таблице 1.

Особенности считывающей электроники

Для обработки сигналов кремниевых фотоумножителей часто используют электронные

модули на основе микросхем общего применения [4, 6, 7]. При этом удастся получить относительно высокий уровень параметров системы фотоприемник – считывающая электроника за исключением потребляемой мощности и габаритов. В связи с указанным, предпринимались попытки обработки сигналов SiPM ранее созданными ИС, оптимизированными для работы с детекторами других типов.

Таблица 1

Длительность фронта спада для различных SiPM [5]

Наименование фирмы	Размер ячейки, мкм	Длительность фронта спада, нс
<i>Photonique</i>	43 × 43	> 300
<i>Fondazione Bruno Kessler</i>	40 × 40	50 ÷ 80
<i>SensL</i>	20 × 20	75
<i>SensL</i>	35 × 35	130
<i>SensL</i>	50 × 50	220
<i>Hamamatsu Photonics K.K.</i>	25 × 25	10
<i>Hamamatsu Photonics K.K.</i>	50 × 50	30
<i>Hamamatsu Photonics K.K.</i>	100 × 100	80

Так, для считывания сигналов 16-канальной матрицы кремниевых фотоумножителей [8] использовалась микросхема MAROC2, созданная для работы с вакуумным фотоумножителем H7564 фирмы Hamamatsu. Каждый из 64 каналов ИС содержит малошумящий ЗЧУ со ступенчатой регулировкой коэффициента преобразования заряд-напряжение (K_{QV}) в диапазоне 6 разрядов и два активных полосовых фильтра, улучшающих отношение сигнал/шум. Обработка фильтром сигнала ЗЧУ приводит к появлению импульса специальной формы, поэтому такой активный фильтр в ядерной электронике называется усилителем-формирователем (УФ), а его динамические характеристики описываются не полосой пропускания, а временем пика выходного импульса [2]. В ИС MAROC2 к выходу «быстрого» УФ с временем пика менее 15 нс подключен дискриминатор для выработки временной отметки о поступлении импульса на вход ЗЧУ. «Медленный» УФ допускает регулировку времени пика в диапазоне от 50 до 150 нс. При минимальной величине K_{QV} , устанавли-

ваемой для увеличения динамического диапазона ИС, нелинейность преобразования входного заряда в выходное напряжение менее 1,5 % для входного заряда до 80 пКл и менее 0,9 % – для 10 пКл.

Результаты испытаний ИС *MAROC2* позволили установить, что типовая структура канала (ЗЧУ, УФ, дискриминатор) может быть применена для обработки сигналов *SiPM*, однако динамический диапазон и время пика «медленного» УФ должны быть существенно увеличены. Так, для длительности фронта спада *SiPM* около 40 нс время пика УФ рекомендуется увеличить до 250 нс.

Малая длительность фронта спада и высокое внутреннее усиление *SiPM* делают возможным изменение структуры канала и ослабляют требования к усилению и отношению сигнал/шум электроники считывания, а именно позволяют:

- исключить непосредственное соединение считывающей электроники с фотодетектором (допускается подключение через разделительный конденсатор);

- не применять для получения низкого уровня шумов последовательное соединение малошумящего ЗЧУ и УФ со временем пика порядка единиц микросекунд.

В соответствии с новыми требованиями в последнее время созданы ИС, ориентированные на работу с *SiPM*.

Например, в работе [9] рассмотрена 8-канальная микросхема для работы с *SiPM*, разработанная с целью получения максимально возможного быстродействия дискриминатора, снижения флуктуаций его задержки и обеспечения динамического диапазона преобразования ток-напряжение около 60 дБ. Для удовлетворения указанным требованиям применена новая структура канала (рисунок 3), включающая дифференциальный съем токового сигнала с фотодетектора, дифференциальный ТРУ с отрицательной обратной связью (ООС) по току, схему преобразования дифференциального выходного напряжения в синфазный токовый сигнал, токовый дискриминатор, расширитель выходного импульса, блок индивидуальной установки порогов дискриминаторов, цифровой интерфейс.

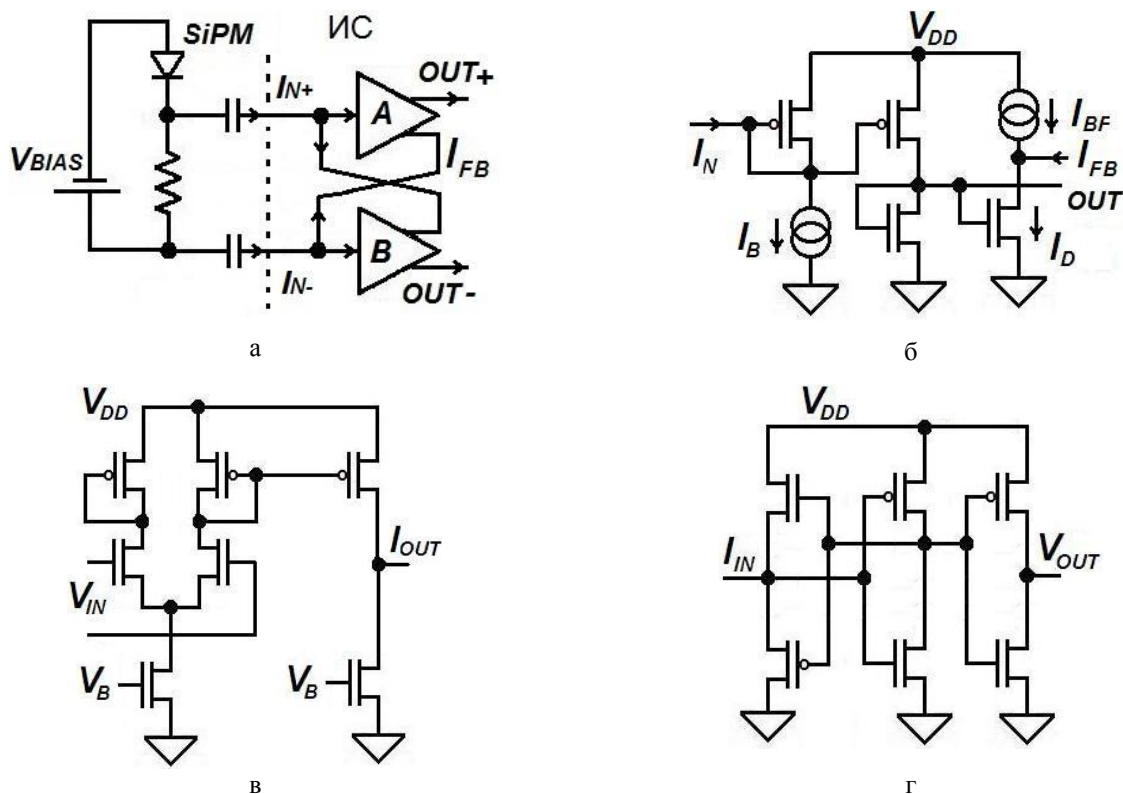


Рисунок 3 – Основные схематехнические решения специализированной ИС для *SiPM* [9]: а – дифференциальный съем токового сигнала с фотодетектора; б – половина дифференциального транзрезистивного усилителя (А и В на рисунке 3а); в – схема преобразования дифференциального выходного напряжения транзрезистивного усилителя в синфазный токовый сигнал; г – токовый дискриминатор

Применение ТРУ обусловлено тем, что такое схемотехническое решение обычно обеспечивает больший динамический диапазон и быстродействие при емкостном источнике сигнала, чем усилитель напряжения и ЗЧУ [2]. Кроме того, дифференциальная структура ТРУ с ООС по току дополнительно в 2 раза увеличивает полосу пропускания и уменьшает входное сопротивление, а также значительно увеличивает устойчивость к синфазным помехам. Источники тока I_B , I_{BF} на рисунке 3б устанавливают рабочий режим ТРУ при отсутствии входного сигнала, разностный токовый сигнал $I_{FB} = I_{BF} - I_D$ поступает в цепь ООС, а напряжение между выходами усилителей A и B – на вход схемы преобразования (рисунок 3в).

Заметим, что расширитель импульса обычно применяется для того, чтобы увеличить длительность выходного импульса дискриминатора при кратковременном превышении его порога и сделать длительность импульса дискриминатора достаточной для обработки последующими каскадами [2].

ИС изготовлена по *SiGe*-технологии фирмы *Austria-Micro-System (AMS)* с проектной

нормой 0,35 мкм и обеспечивает следующие параметры [9]:

- длительность фронта нарастания выходного напряжения дискриминатора – около 2 нс;
- максимальный входной ток – 160 мкА, что соответствует сигналу 1000 ячеек *SiPM*;
- максимальная рассеиваемая мощность не превышает 16 мВт/канал.

Другим примером специализированной ИС (рисунок 4) является микросхема *SPIROC (SiPM Integrated Read-Out Chip)* [10], которая предназначена для считывания токового сигнала по 36 параллельным каналам, определения момента достижения им максимума по каждому из каналов без использования сигналов внешней синхронизации, хранения, оцифровки сигналов и передачи данных для дальнейшей обработки.

ИС содержит часть схемы, задающей рабочий режим фотодетектора, а именно 36-канальный микромощный 8-разрядный ЦАП, с помощью которого изменяется потенциал сигнального входа, подключаемого непосредственно к *SiPM* (без разделительного конденсатора).

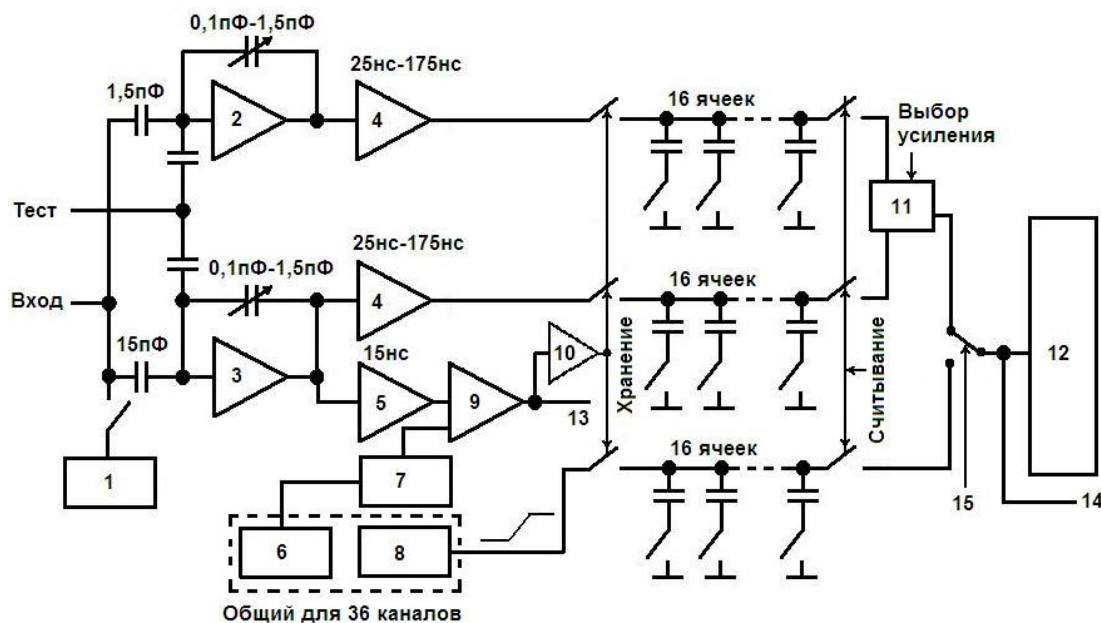


Рисунок 4 – Упрощенная схема специализированной ИС SPIROC [10]:

- 1 – 36-канальный 8-разрядный цифро-аналоговый преобразователь; 2 – зарядочувствительный усилитель с «малым» усилением; 3 – зарядочувствительный усилитель с «большим» усилением; 4 – «медленный» усилитель-формирователь; 5 – «быстрый» усилитель-формирователь; 6 – одноканальный 10-разрядный цифро-аналоговый преобразователь для установки порога всех каналов; 7 – 4-разрядное устройство подстройки порога каждого канала; 8 – генератор пилообразного напряжения с длительностью «пилы» от 0,3 до 5 мкс; 9 – дискриминатор; 10 – элемент с изменяемой задержкой; 11 – блок выбора усиления; 12 – 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь Вилкинсона; 13 – выход синхросигнала; 14 – аналоговый выход; 15 – управляющий сигнал генератора пилообразного напряжения

Выходное напряжение ЦАП регулируется в диапазоне от 0,5 до 4,5 В, что позволяет настраивать величину V_{BIAS} для уменьшения технологического разброса усиления фотодетекторов, соединенных с разными входами ИС.

Требуемый динамический диапазон обрабатываемых сигналов *SiPM* величиной от 1 до 2000 фотоэлектронов обеспечивается парой ЗЧУ, подключаемых параллельно к каждому входу ИС через интегральные конденсаторы различного номинала: 1,5 пФ для ЗЧУ с «малым» усилением и 15 пФ для ЗЧУ с «большим» усилением. Каждый ЗЧУ также имеет ступенчатую регулировку усиления за счет подключения конденсаторов ООС величиной от 0,1 до 1,5 пФ.

К выходам ЗЧУ подключен «медленный» УФ типа $CR-RC^2$ [2], время пика которого регулируется в пределах от 25 до 175 нс, и аналоговое запоминающее устройство (ЗУ) глубиной 16 ячеек для хранения мгновенных значений выходного сигнала УФ.

Каждый канал имеет независимую схему регистрации момента поступления входного импульса, включающую «быстрый» УФ со временем пика около 15 нс, дискриминатор с 4-разрядной подстройкой порога срабатывания, аналоговое ЗУ глубиной 16 ячеек, вспомогательные схемы управления и коммутации сигналов. К системе регистрации момента поступления входных импульсов относятся также генератор пилообразного напряжения и один 10-разрядный ЦАП для установки общего порога всех дискриминаторов.

Преобразование сигналов, хранящихся в аналоговых ЗУ, в цифровую форму выполняется с помощью 36-канального 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя, выполненного по схеме Вилкинсона и обрабатывающего поступающие сигналы за цикл в 100 мкс. ИС выполнена по *SiGe*-технологии фирмы *AMS* с проектной нормой 0,35 мкм и характеризуется следующими основными параметрами:

– для выхода «быстрого» УФ: коэффициент преобразования – 120 мВ/фотоэлектрон, время пика – 15 нс, отношение сигнал/шум – 24. Такие параметры позволяют установить порог срабатывания дискриминатора на уровне 0,5 фотоэлектрона;

– для выхода «медленного» УФ в режиме максимального усиления при времени пика 100 нс коэффициент преобразования составляет 10 мВ/фотоэлектрон, отношение сиг-

нал/шум – 11 (3 для режима минимального усиления);

– нелинейность преобразования входной заряд – выходное напряжение менее 1 % в динамическом диапазоне входных сигналов до 60 дБ;

– напряжение питания аналоговой части – 5 В, цифровой – 3,5 В;

– размер кристалла – 7,2×4,2 мм;

– максимальная рассеиваемая мощность зависит от режима работы и составляет 25 мкВт/канал.

На основе анализа параметров, структурных и схемотехнических решений выработаны рекомендации по проектированию считывающей электроники кремниевых фотоумножителей.

1. Так как алгоритмы цифровой обработки данных постоянно совершенствуются, то рекомендуется аналоговые и цифровые устройства считывающей электроники размещать на разных микросхемах.

2. Существующая тенденция увеличения числа регистрирующих каналов приводит к необходимости создания многоканальных ИС.

3. Допустимо применение структуры аналогового канала в виде: трансрезистивный усилитель, дискриминатор или зарядочувствительный усилитель, усилитель-формирователь, дискриминатор.

4. Эквивалентный шумовой заряд, отнесенный к входу канала, не должен превышать 10 000 электронов для коэффициента усиления кремниевых фотоумножителей около 10^5 при времени пика сигнала на аналоговом выходе до сотен наносекунд, а на входе дискриминатора – десятков наносекунд.

5. Желательно обеспечить входной динамический диапазон не менее 70 дБ.

6. Из-за дискретного вида выходного сигнала фотоумножителя при обработке сигналов малой интенсивности от считывающей электроники не требуется высокая линейность преобразования входного тока в выходное напряжение.

7. Для увеличения универсальности, расширения области применения и номенклатуры используемых источников сигналов (фотодетекторов) рекомендуется предусмотреть в каждом канале электронную регулировку формы (амплитуды и/или длительности) выходного

импульса и обеспечить радиационную стойкость считывающей электроники.

Заметим, что в связи с улучшением конструкций и технологий изготовления кремниевых фотоумножителей, требования к параметрам считывающей электроники постоянно уточняются.

Серия радиационно-стойких трансрезистивных усилителей-дискриминаторов

Для проверки корректности сформулированных рекомендаций и разработанных схемотехнических решений основных аналоговых блоков считывающей электроники на базовом матричном кристалле «АБМК 1-3» созданы одно- и двухканальные специализированные ИС, каждая из которых включает быстродействующий компаратор *Comp 1-5* и различные схемы трансрезистивных усилителей (*Ampl 1-14*, *Ampl 1-15*, *Ampl 1-17*). Все усилители содержат входной каскад на малощумящем *n-p-n* транзисторе с общей базой, несколько дифференциальных каскадов (ДК) с резистивной нагрузкой и выходные эмиттерные повторители [11]. Схемотехнически ТРУ отличаются разным режимом работы головного биполярного транзистора, количеством усилительных ДК, использованием в некоторых ДК каскадного включения транзисторов.

При разработке схем ТРУ и компаратора *Comp 1-5* использованы основные правила проектирования радиационно-стойких ИС [12]:

- все ИС имеют дифференциальную структуру, причем выходной сигнал также снимается между двумя выводами;
- исключено применение горизонтальных *p-n-p* транзисторов;
- максимально увеличена плотность эмиттерного тока;
- резисторы сформированы на сильнолегированном полупроводниковом слое *p*-базы *n-p-n* транзистора.

В таблицах 2, 3 показаны основные параметры усилителей и компаратора, а на рисунках 5, 6 – результаты измерений параметров при различной поглощенной дозе гамма-излучения, подтверждающие радиационную стойкость ИС.

К сожалению, усилители *Ampl 1-14*, *Ampl 1-15*, *Ampl 1-17* имеют недостаточный динамический диапазон из-за высокого уровня шумов. Это объясняется тем, что главной целью проектирования было обеспечение максимального быстродействия ТРУ. В дальнейших разработках планируется уменьшение уровня шумов и расширение динамического диапазона за счет ограничения полосы пропускания и модернизации выходного каскада.

Таблица 2

Основные параметры трансрезистивных усилителей

Параметр	Тип усилителя		
	<i>Ampl 1-14</i>	<i>Ampl 1-15</i>	<i>Ampl 1-17</i>
Напряжение питания, В	+ 3...+ 5	+ 3...+ 5	+ 3...+ 5
Входное сопротивление, Ом	50,0	50,0	50,0
Коэффициент преобразования, не менее, мВ/мкА	10,0	5,0	0,5
Полоса пропускания по уровню –3 дБ, МГц	150	170	250
Среднеквадратическое значение шумового тока, приведенного к входу, при емкости источника сигнала 10 пФ, нА	110	80	170
Входной динамический диапазон, не менее, дБ	60	65	60

Таблица 3

Основные параметры компаратора

Параметр	Величина
Напряжение питания, В	+ 3
Ток потребления, мА	12,0
Выходной ток, мА	4,5
Задержка включения/выключения, нс	6,0
Длительность фронта нарастания/спада, нс	3,0

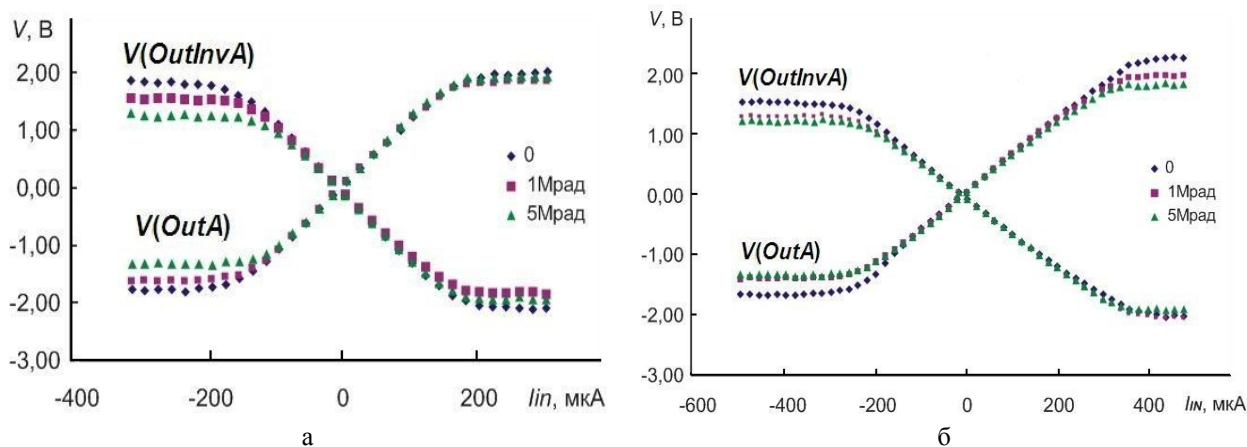


Рисунок 5 – Экспериментальная зависимость амплитуды напряжения на выходах усилителей от входного тока при различной величине поглощенной дозы: а – *Ampl* 1-14; б – *Ampl* 1-15

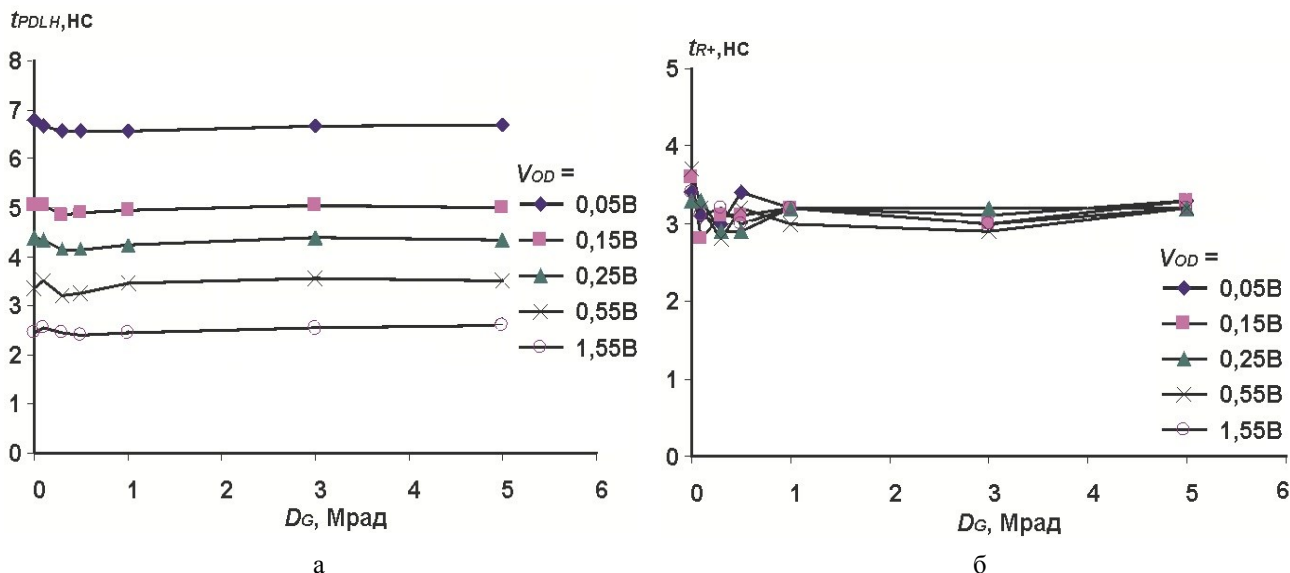


Рисунок 6 – Экспериментальная зависимость параметров компаратора от поглощенной дозы гамма-излучения (D_G) при различном превышении порога (V_{OD}): а – задержка переключения; б – длительность фронта нарастания

На основе отработанных на «АБМК 1-3» схемотехнических решений изготовлены 8-канальные микросхемы трансрезистивных усилителей-дискриминаторов, названные *AD* 8-14, *AD* 8-15, *AD* 8-17.

Заключение

Сформулированы рекомендации по проектированию считывающей электроники для кремниевых фотоумножителей, в том числе: выполнение аналоговой и цифровой обработки сигналов разными специализированными микросхемами; две предпочтительные структуры аналогового канала предварительной обработ-

ки сигналов; требования к уровню шумов, динамическому диапазону, быстродействию, дополнительным возможностям аналогового канала. Применение рекомендаций позволяет ускорить выполнение начальных этапов проектирования считывающей электроники.

С помощью рекомендаций разработана, изготовлена на базовом матричном кристалле «АБМК 1-3» и исследована, в том числе при воздействии гамма-излучения, серия одно- и двухканальных радиационно-стойких аналоговых микросхем для работы с кремниевыми фотоумножителями. Экспериментальная апробация подтвердила высокий уровень параметров и радиационную стойкость разработанных

компаратора напряжения и трансрезистивных усилителей, на основе которых созданы 8-канальные микросхемы усилителей-дискриминаторов AD 8-14, AD 8-15, AD 8-17.

Список использованных источников

1. Дворников, О.В. Средства регистрации импульсного видимого излучения малой интенсивности. Часть 1. Особенности и возможности многоканальных фотоприемников с внутренним усилением / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 2(5). – С. 5–13.
2. Абрамов, И.И. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем / И.И. Абрамов, О.В. Дворников. – Минск : Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2006. – 286 с.
3. Miyamoto, H. SiPM development for the imaging Cherenkov and fluorescence telescopes / H. Miyamoto, M. Teshima // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. A623. – P. 198–200.
4. Characterization and simulation of different SiPM structures produced at FBK / A. Piazza [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. A617. – P. 417–419.
5. Electro-optical characterization of SiPM: A comparative study / N. Dinu [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2009. – Vol. A610. – P. 423–426.
6. Tests of timing properties of silicon photomultipliers / A. Ronzhin [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. A616. – P. 38–44.
7. Performance evaluation of SiPM photodetectors for PET imaging in the presence of magnetic fields / S. Espan [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. A613. – P. 308–316.
8. First results in the application of silicon photomultiplier matrices to small animal PET / G. Llosa [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2009. – Vol. A610. – P. 196–199.
9. A CMOS front-end for SiPM devices aimed to TOF applications with adjustable threshold and high dynamical range / D. Badoni [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. 617. – P. 310–312.
10. SPIROC (SiPM Integrated Read-Out Chip): dedicated very front-end electronics for an ILC prototype hadronic calorimeter with SiPM read-out / M. Bouchel [et al.] // Topical workshop on electronics for particle physics 2010, 20–24 September 2010, Aachen, Germany. <http://iopscience.iop.org/1748-0221/6/01/C01098>.
11. Дворников, О.В. Комплект трансрезистивных усилителей для работы с лавинными фотодиодами / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, М.А. Батурицкий // Материалы 3-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2010»: Минск, Республика Беларусь, 10–12 ноября 2010 г. – Минск, 2010. – С. 54–55.
12. Дворников, О.В. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Ч. 2. Базовые схемотехнические решения АБМК 1-3 // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М. : ИППМ РАН, 2010. – С. 283–288.

Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L.

Equipments to single photon registration. Part 2. Silicon photomultiplier signal preliminary processing. (Review)

Bias circuits, output signals and readout electronics of silicon photomultipliers are considered. Requirements to analog IC for SiPM signal preliminary processing are formulated. According to requirements the set of radiation hardened analog ICs including the comparator and transresistance amplifiers with different gain and speed is produced. (E-mail: oleg_dvornikov@tut.by)

Key words: silicon photomultiplier, readout electronics, radiation hardened analog IC, comparator, transresistance amplifier.

Поступила в редакцию 09.01.2013.