

УДК 621.382

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

О.В. ДВОРНИКОВ¹, В.А. ЧЕХОВСКИЙ², В.Л. ДЯТЛОВ¹, Ю.В. БОГАТЫРЕВ³,
С.Б. ЛАСТОВСКИЙ³

¹ОАО «МНИПИ»

Я. Коласа, 73, Минск, 220113, Беларусь

²Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий Белгосуниверситета
М. Богдановича, 153, Минск, 220040, Беларусь

³Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению
П. Бровка 19, Минск, 220072, Беларусь

Поступила в редакцию 31 января 2012

Рассмотрено влияние гамма-излучения Co^{60} на статические и динамические характеристики трансрезистивного усилителя и компаратора напряжения, реализованных на базовом матричном кристалле типа «АБМК 1-3» с учетом сформулированных правил проектирования радиационно-стойких аналоговых интегральных схем (ИС). При поглощенной дозе $D = 5$ Мрад входной ток компаратора возрос на 25%, остальные параметры ИС (коэффициент преобразования, длительность фронта нарастания и спада трансрезистивного усилителя, задержка переключения, длительность фронта нарастания и спада, выходной ток компаратора) изменились незначительно.

Ключевые слова: радиационная стойкость, гамма-излучение, аналоговые интегральные схемы, компаратор, трансрезистивный усилитель.

Введение

Одним из приоритетных направлений современной микроэлектроники является производство радиоэлектронных систем, малочувствительных к воздействию проникающей радиации.

Возможным способом реализации таких устройств может быть создание систем в корпусе (СвК), состоящих из нескольких полупроводниковых кристаллов с цифровыми и/или аналоговыми функциями, изготовленных по разным технологическим маршрутам, обеспечивающим наилучшее сочетание технических, экономических характеристик и радиационной стойкости. В этом случае аналоговые ИС целесообразно синтезировать на биполярных транзисторах (БТ) и полевых транзисторах с $p-n$ -переходом (ПТП), которые позволяют достичь высокого уровня статических параметров, низких шумов и небольших радиационных изменений основных характеристик.

Эффективному проектированию радиационно-стойких аналоговых ИС способствует применение ранее разработанного нами комплексного подхода [1–3], который в том числе включает:

- рекомендации по выбору интегральных элементов и режимов их работы;
- типовые схемотехнические решения аналоговых устройств;
- маршрут радиационных исследований, методики контроля работоспособности аналоговых ИС до, во время и после воздействия проникающей радиации.

Целью настоящей работы является экспериментальная апробация разработанных методов проектирования и исследований радиационно-стойких аналоговых ИС путем изучения влияния гамма-излучения Co^{60} на статические и динамические характеристики двух типовых схем: трансрезистивного усилителя и компаратора напряжения.

Исследуемые образцы и методика эксперимента

Для исследований выбраны микросхемы трансрезистивного усилителя Ampl-1.15 (рис. 1) и компаратора Comp-1.3 (рис. 2), реализованные на базовом матричном кристалле «АБМК 1-3» [2, 4].

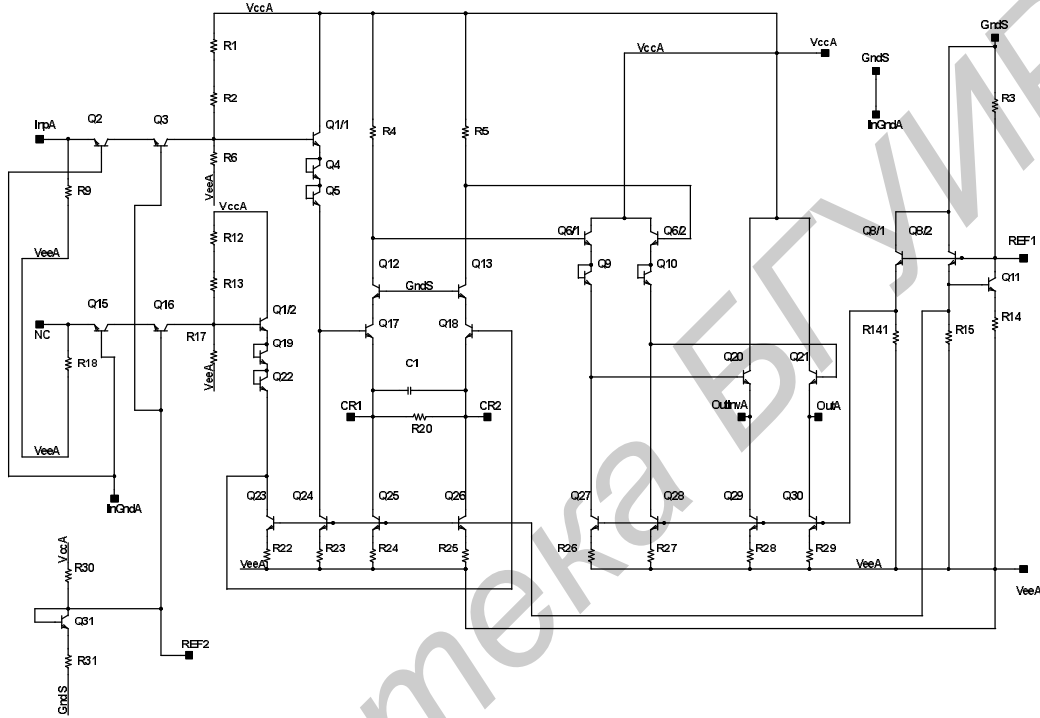


Рис. 1. Электрическая схема усилителя Ampl-1.15

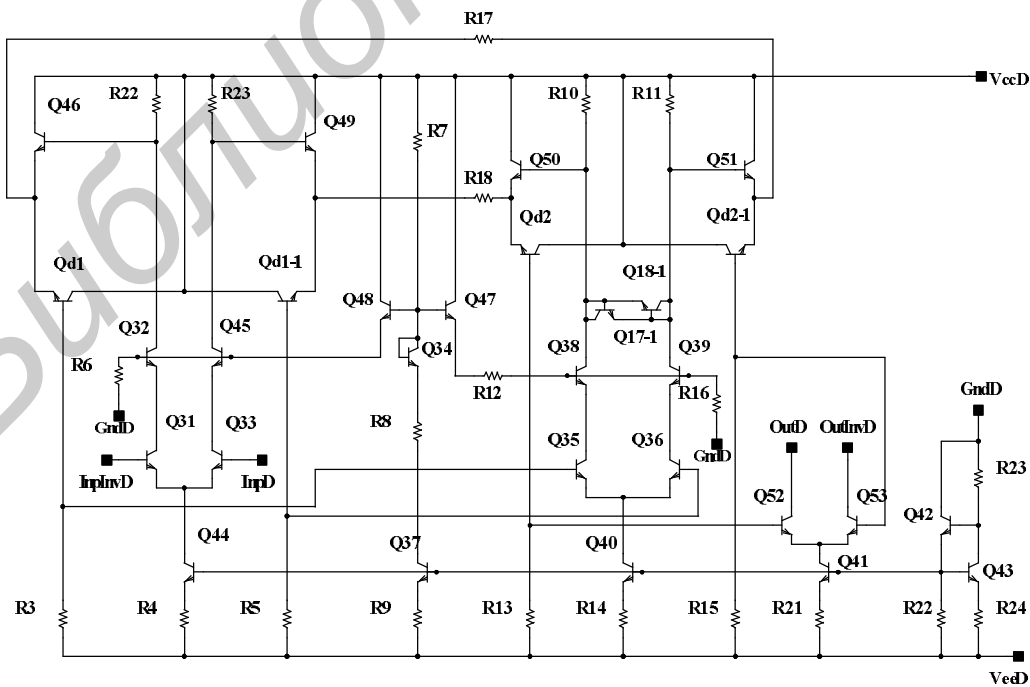


Рис. 2. Электрическая схема компаратора Comp-1.3

Электрические схемы на рис. 1, 2 выполнены в системе проектирования *OrCAD*, в соответствии с правилами которой одноименные узлы (например, V_{EEA} на рис. 1) соединены между собой.

Входной каскад усилителя *Ampl-1.15* (рис. 1) образован транзисторами с общей базой (ОБ) (Q_2, Q_3) и общим коллектором (ОК) ($Q_{1/1}$). Каскад с ОБ преобразует импульсы входного тока в напряжение с помощью резисторов R_1, R_2, R_6 . В качестве входного транзистора Q_2 применяется малощумящий *n-p-n*-транзистор, работающий при эмиттерном токе, равном 1 мА. Дифференциальный каскад (ДК) с каскодно включенными транзисторами (Q_{12}, Q_{17} и Q_{13}, Q_{18}) и резистивной нагрузкой обеспечивает необходимое усиление, а конденсатор в эмиттерных цепях укорачивает фронт выходного импульса. ДК соединен с выходом усилителя через эмиттерные повторители ($Q_{6/1}, Q_{6/2}$ и Q_{20}, Q_{21}) с диодами (Q_9, Q_{10}) для сдвига постоянного уровня напряжения. Выходные эмиттерные повторители (Q_{20}, Q_{21}) обеспечивают работоспособность *Ampl-1.15* при подключении внешней нагрузки величиной более 2 кОм. Для задания смещения ДК по постоянному напряжению применен источник опорного напряжения на транзисторах с ОБ (Q_{15}, Q_{16}) и ОК ($Q_{1/2}$), полностью идентичный входному каскаду.

Компаратор *Comp 1-3* состоит из трех дифференциальных каскадов, два из которых (Q_{31}, Q_{33} и Q_{35}, Q_{36}) с резистивной нагрузкой, а третий (Q_{52}, Q_{53}) с «открытым» коллектором. Дифференциальные каскады для уменьшения эффекта Миллера используют каскодное включение транзисторов, а именно: транзисторы $Q_{32}, Q_{45}, Q_{38}, Q_{39}$ включены с ОБ. Их базовый потенциал задает источник опорного напряжения $Q_{47}, Q_{48}, R_6, R_{12}, R_{16}$. Дифференциальные каскады соединены между собой через эмиттерные повторители $Q_{46}, Q_{49}, Q_{50}, Q_{51}$, которые одновременно сдвигают уровень постоянного напряжения с помощью стабилитронов, выполненных на обратно смещенных эмиттерных переходах транзисторов Q_{D1}, Q_{D2} . Рабочий режим транзисторов компаратора устанавливается многокаскадным «токовым зеркалом».

При разработке схем использованы следующие правила проектирования радиационно-стойких ИС [2]:

- обе ИС имеют дифференциальную структуру, причем выходной сигнал также снимается между двумя выводами (*OutA* и *OutInvA* для *Ampl-1.15*, *OutD* и *OutInvD* для *Comp 1-3*);
- исключено применение горизонтальных *p-n-p*-транзисторов;
- максимально увеличена плотность эмиттерного тока;
- резисторы сформированы на сильнолегированном полупроводниковом слое *p*-базы *n-p-n*-транзистора.

Обычно для уменьшения влияния на параметры ИС возрастающих при радиационном облучении базовых токов БТ вводят цепи компенсации [2, 5]. Однако в исследуемых ИС компенсация базовых токов умышленно не выполнена для выявления уровня радиационной стойкости наиболее простых схемотехнических решений.

Используемый маршрут радиационных исследований, поясняющий цикл измерений/испытаний, и блок-схема установки для измерений во время облучения и регистрации одиночных событий подробно рассмотрены в [3]. Следует отметить, что: ИС при облучении находились в электрическом режиме; установка для измерений и методика регистрации одиночных событий позволяла отдельно зафиксировать кратковременные сбои и «зашелкивания» в ИС; облучение образцов гамма-квантами Co^{60} проводилось на установке «Исследователь» [6] при температуре около 300 К; суммарная поглощенная доза после сеансов облучения составляла 0,1; 0,3; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0 Мрад.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Одновременно с аналоговыми ИС изучалось влияние гамма-излучения на параметры тестовых транзисторов, изготовленных по тому же технологическому маршруту. Установлено, что при поглощенной дозе до 5,345 Мрад изменение ряда параметров *n-p-n*-транзисторов мало:

- выходного малосигнального сопротивления, напряжения пробоя, сопротивления полупроводниковых областей – менее 2 %;
- напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе – менее 3 мВ.

Кроме того, максимум зависимости статического коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером (β) от коллекторного тока (I_C) *n-p-n*-транзисторов уменьшается до 30 % и

сдвигается в область больших коллекторных токов при $D < 0,845$ Мрад, а при поглощенной дозе, ориентировочно превышающей 0,845 Мрад, максимум β $n-p-n$ -транзисторов изменяется слабо.

Порядок контроля параметров ИС до и после гамма-облучения и основные результаты измерений приведены в таблице и на рис. 3–8.

Порядок контроля параметров аналоговых ИС при радиационных исследованиях

Измеряемые параметры	В ходе облучения	До и после облучения
Для усилителей		
Ток потребления по источникам напряжения питания	+	+
Форма выходного сигнала	+	+
Выходное напряжение при отсутствии входного сигнала	+	+
Амплитуда выходного напряжения	+	+
Коэффициент преобразования	+	+
Длительность фронта нарастания и спада выходного сигнала	–	+
Для компараторов		
Ток потребления по источникам напряжения питания	–	+
Входной ток	–	+
Амплитуда выходного сигнала	+	+
Задержка переключения в зависимости от: синфазного входного сигнала превышения порога	– –	+ +
Длительность фронта нарастания и спада сигнала в зависимости от: синфазного входного сигнала превышения порога	– –	+ +
Длительность выходного импульса в зависимости от: синфазного входного сигнала превышения порога	– –	+ +
Скважность выходного сигнала при входном синусоидальном напряжении и фиксированном пороге	+	–

Анализ результатов выполненных измерений позволяет утверждать следующее.

1. Максимальная амплитуда выходного напряжения $Ampl-1.15$ (рис. 3) уменьшается для неинвертирующего выхода на 20%, а для инвертирующего выхода – на 13% при поглощенной дозе 5 Мрад.

2. Выходное напряжение $Ampl-1.15$ при отсутствии входного сигнала увеличилось для неинвертирующего выхода на 15%, а для инвертирующего выхода – на 12% при поглощенной дозе 5 Мрад.

3. Изменение коэффициента преобразования ИС $Ampl-1.15$ (рис. 3) не превышает 4 % в диапазоне поглощенных доз до 5 Мрад для входного сигнала как положительной, так и отрицательной полярности в линейной области передаточной характеристики (абсолютное значение входного тока менее 30 мкА).

4. Длительность фронта ИС $Ampl-1.15$ для инвертирующего (рис. 4) и неинвертирующего (рис. 5) выхода слабо изменилась в диапазоне входных токов от 50 до 200 мкА для поглощенной дозы 5 Мрад.

5. Входной ток компаратора возрастает до 25 % при увеличении поглощенной дозы до 5 Мрад.

6. Выходной ток компаратора уменьшается до 7 % при увеличении поглощенной дозы до 5 Мрад.

7. Задержка переключения компаратора по дифференциальному сигналу (рис. 6), длительность фронта нарастания (рис. 7) и спада (рис. 8) практически не зависят от поглощенной дозы при разном входном синфазном напряжении и превышении порога.

С нашей точки зрения, изменение характеристик аналоговых ИС, указанное в пп. 1, 2, 6, вызвано уменьшением выходного тока источников тока в $Ampl-1.15$ и $Comp 1-3$ из-за спада коэффициента передачи тока в схеме с общей базой ($\alpha = I_C/I_E$). Такое изменение режимного тока не приводит к «критическому» изменению параметров аналоговых устройств и может быть устранено внешней подстройкой, например, подключением резистора между выводами $REF1$ и

GndS для Ampl-1.15 (рис. 1). Разная величина радиационного изменения параметров для выходов Ampl-1.15 (пп. 1, 2) обусловлена тем, что из-за неидентичности интегральных элементов выходное напряжение Ampl-1.15 при отсутствии входного сигнала для инвертирующего и неинвертирующего выходов различно, и при гамма-облучении плечи дифференциального каскада работают при отличающемся коллекторном токе.

Для устранения радиационного изменения входного тока (п. 5) компаратора рекомендуется применение схем компенсации базовых токов БТ.

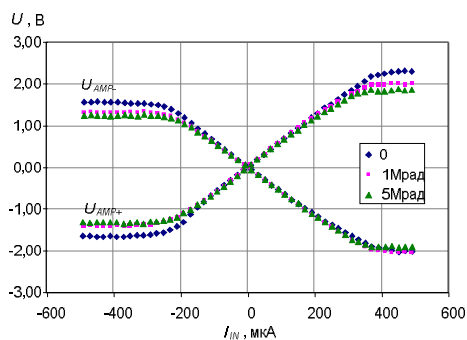


Рис. 3. Зависимость амплитуды выходного напряжения на неинвертирующем (U_{AMP+}) и инвертирующем (U_{AMP-}) выходе ИС Ampl-1.15 от входного тока (I_{IN}) при различной величине поглощенной дозы

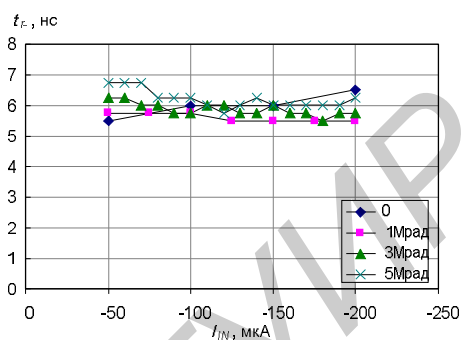


Рис. 4. Длительность фронта нарастания сигнала на инвертирующем выходе (t_r) ИС Ampl-1.15 в зависимости от входного тока (I_{IN}) при различной величине поглощенной дозы

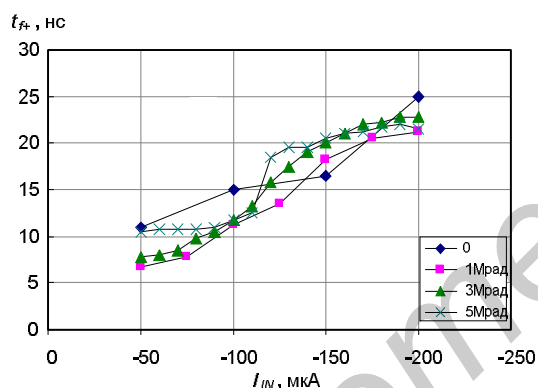


Рис. 5. Длительность фронта спада сигнала на неинвертирующем выходе (t_{f+}) ИС Ampl-1.15 в зависимости от входного тока (I_{IN}) при различной величине поглощенной дозы

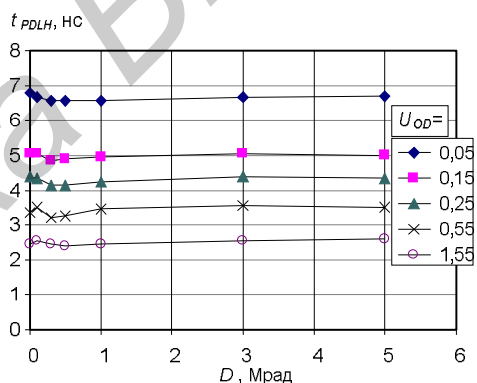


Рис. 6. Зависимость задержки переключения Comp 1-3 по дифференциальному сигналу (t_{PDLH}) от поглощенной дозы при различном превышении порога U_{OD}

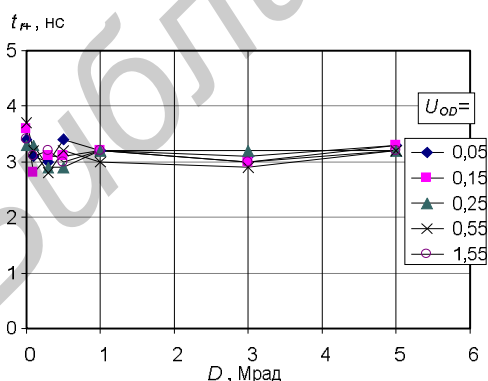


Рис. 7. Зависимость длительности фронта нарастания сигнала (t_{r+}) на неинвертирующем выходе Comp 1-3 от поглощенной дозы при различном превышении порога U_{OD}

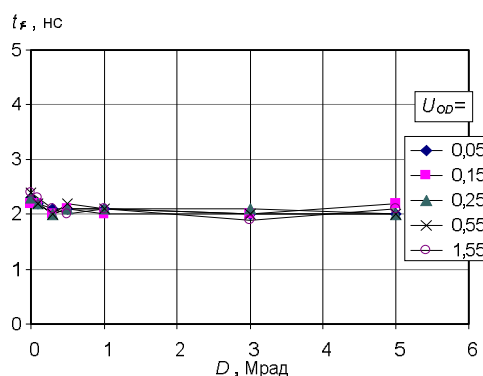


Рис. 8. Зависимость длительности фронта спада сигнала (t_{f-}) на инвертирующем выходе Comp 1-3 от поглощенной дозы при различном превышении порога U_{OD}

Заклучение

Исследовано радиационное изменение статических и динамических характеристик трансрезистивного усилителя и компаратора при воздействии гамма-облучения с суммарной поглощенной дозой до 5 Мрад.

Установлено, что гамма-излучение Co^{60} заметно влияет только на входной ток компаратора, который возрастает до 25 % при увеличении поглощенной дозы до 5 Мрад. Остальные параметры ИС (коэффициент преобразования, длительность фронта нарастания и спада трансрезистивного усилителя, задержка переключения, длительность фронта нарастания и спада, выходной ток компаратора) изменились незначительно.

Таким образом, использование при проектировании биполярных аналоговых ИС базового матричного кристалла «АБМК 1-3» и сформулированных правил, а именно:

- применение дифференциальной структуры ИС,
- исключение горизонтальных *p-n-p*-транзисторов,
- максимальное увеличение плотности эмиттерного тока,
- формирование резисторов на сильнолегированных полупроводниковых слоях, - позволяет создавать ИС, малочувствительные к воздействию гамма-излучения.

RADIATION HARDNESS ENSURING OF ANALOG INTEGRATED CIRCUITS

O.V. DVORNIKOV, V.A. TCHEKHOVSKI, V.L. DIATLOV, YU.V. BOGATYREV,
S.B. LASTOVSKI

Abstract

Influence of gamma radiation Co^{60} on static and dynamic characteristics of the transresistance amplifier and the comparator realized on the master slice array «АБМК 1-3» is considered taking into account formulated design rule. At absorbed dose $D = 5$ Mrad the comparator input current has increased on 25 %, other IC parameters (gain, impulse response of the transresistance amplifier, propagation delay, transition time, output current of the comparator) have changed slightly.

Список литературы

1. Дворников О.В., Гришков В.Н. // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. 2010. С. 301–306.
2. Дворников О.В. // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. 2010. С. 283–288.
3. Дворников О.В., Чеховский В.А. // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. 2010. С. 289–294.
4. Дворников О.В., Батурицкий М.А., Чеховский В.А. // Материалы 3-ей Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2010». Минск, 10–12 ноября 2010 г. Минск, 2010. С. 51–52.
5. Дворников О.В., Прокопенко Н.Н. // Материалы 2-ой Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2009». Минск, 11–13 ноября 2009 г. Минск, 2009. С. 52–53.
6. Радиационный центр ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению». Минск, 2008.