

Радиационно-стойкие аналоговые интегральные схемы

О.В. Дворников¹, В.А. Чеховский², В.Л. Дятлов¹, Ю.В. Богатырев³, С.Б. Ластовский³

¹ОАО “МНИПИ”, МНТЦ “МикАН”, oleg_dvornikov@tut.by

²Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий Белгосуниверситета

³Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению

Аннотация — Рассмотрено влияние гамма-излучения ^{60}Co и потока электронов с энергией 4 МэВ 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 и интегральном потоке электронов $F_E = 3,5 \cdot 10^{15}$ эл./см² входной ток компаратора возрос, соответственно, на 25 и 80 %, 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, интегральный поток электронов, компаратор, трансрезистивный усилитель, аналоговые интегральные схемы.

I. 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, состоящих из нескольких полупроводниковых кристаллов с цифровыми и/или аналоговыми функциями, изготовленных по разным технологическим маршрутам, обеспечивающим наилучшее сочетание технических и 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], [2], 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 ^{60}Co и потока электронов с энергией 4 МэВ на статические и динамические характеристики двух типовых схем: трансрезистивного усилителя и компаратора напряжения.

II. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И ОСОБЕННОСТИ 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]. Электрические схемы, показанные на рисунках, выполнены в системе проектирования *OrCAD*, в соответствии с правилами которой одноименные узлы (например, V_{EEA} на рис. 1) соединены между собой.

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]. Однако в исследуемых ИС компенсация базовых токов умыш-

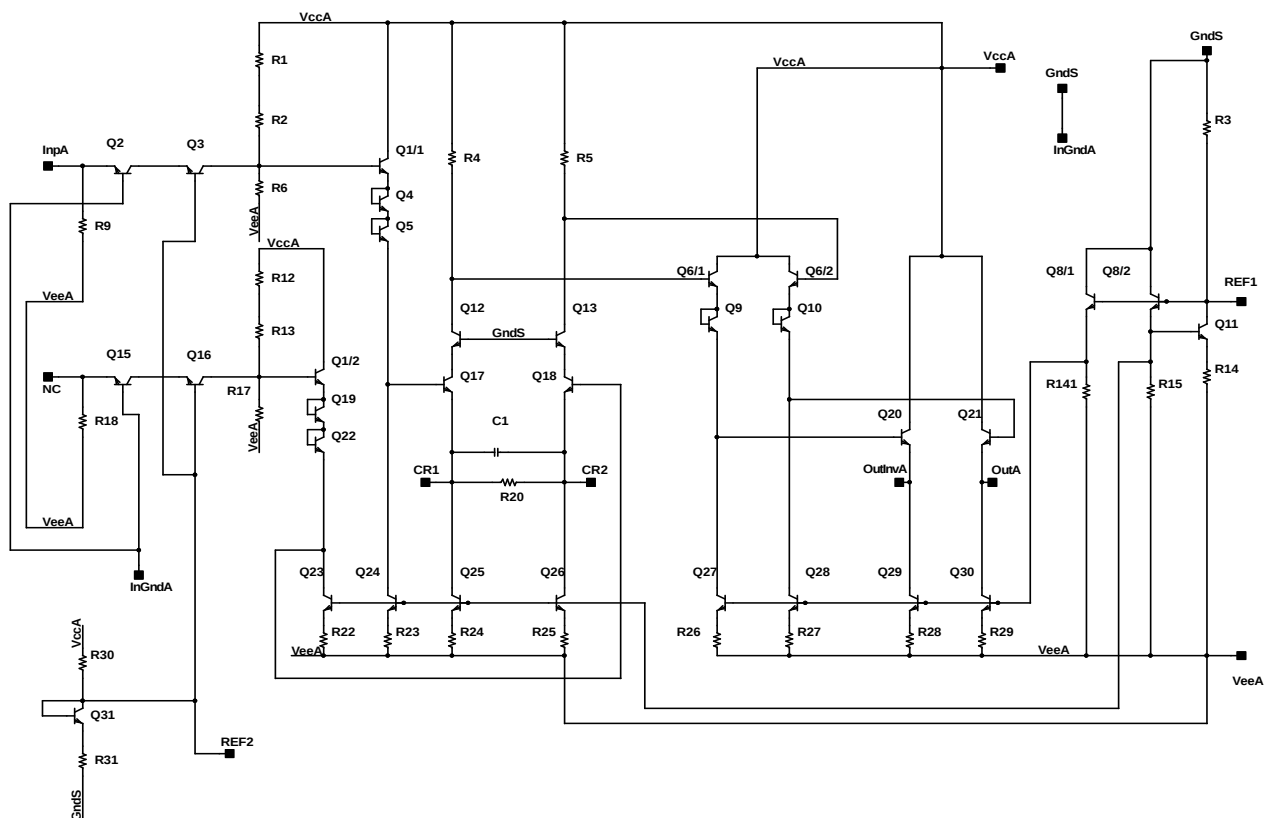


Рис. 1. Электрическая схема усилителя *Ampl-1.15*

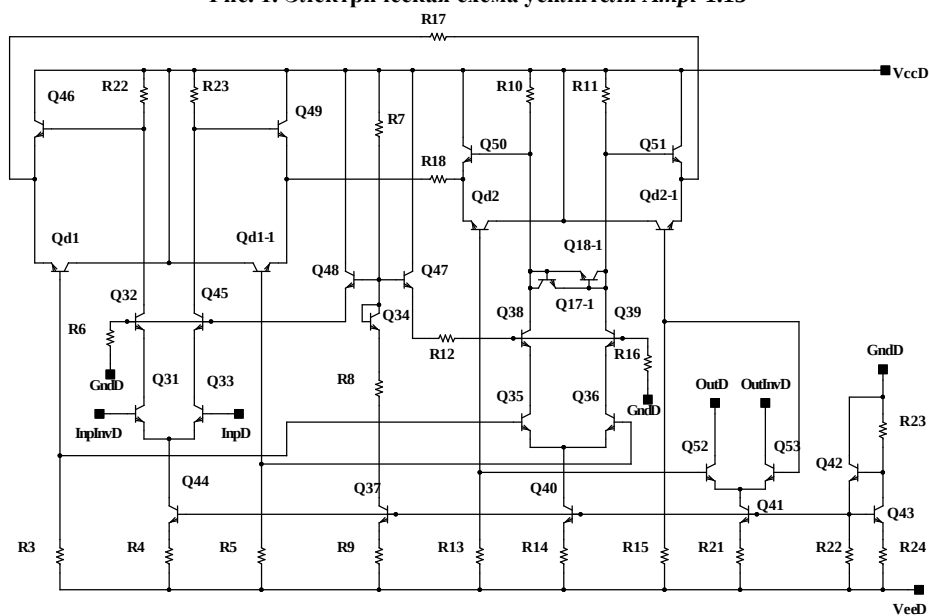


Рис. 2. Электрическая схема компаратора *Comp-1.3*

ленно не выполнена для выявления уровня радиационной стойкости наиболее простых схемотехнических решений.

Облучение образцов гамма-квантами ^{60}Co проводилось при температуре около 300 К. Суммарная поглощенная доза после сеансов облучения составляла 0,1; 0,3; 0,5; 1,0; 3,0; 5 Мрад. Для изучения деградации характеристик, вызванной эффектами смещения, на

некоторые образцы ИС без крышек корпуса воздействовало электронное излучение, при этом интегральный поток электронов составлял $7 \cdot 10^{12}$; $2,5 \cdot 10^{14}$; $3,5 \cdot 10^{15}$ эл./см², а энергия электронов была $E_E = 4$ МэВ.

Учитывая существующие методики оценки эквивалентности радиационных эффектов [3], можно предположить, что интегральный поток электронов F_E с энергией $E_E = 4$ МэВ вызовет в ИС такие же дефекты

смещения как поток нейтронов $F_N = F_E/70$ с энергией $E_N = 1,5$ МэВ.

Одновременно с ИС воздействию гамма- и электронного облучения подвергались тестовые транзисторы, находящиеся в активном режиме, близком к рабочему.

Для тестовых БТ с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов типа ИППП-1 измерялись:

- входная вольтамперная характеристика (ВАХ) в схеме с ОБ (зависимость напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе U_{BE} от эмиттерного тока I_E);
- выходная ВАХ в схеме с общим эмиттером (ОЭ) (зависимость коллекторного тока I_C от напряжения на промежутке коллектор-эмиттер U_{CE});
- зависимость статического коэффициента передачи тока в схеме с ОЭ от коллекторного тока $\beta = f(I_C)$.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения тестовых БТ выявили, что при поглощенной дозе до 5,345 Мрад изменение ряда параметров n - p - n -транзисторов незначительно, а именно:

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

Кроме того, максимум зависимости $\beta = f(I_C)$ 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.

Воздействие потока электронов $3,5 \cdot 10^{15}$ эл./см² также несущественно изменяет выходное малосигнальное сопротивление и напряжение на прямосмещенном эмиттерном переходе, но приводит к спаду максимума β n - p - n -транзисторов почти на 45 %.

Основные результаты измерений параметров аналоговых ИС показаны на рис. 3 – 6.

Анализ результатов выполненных измерений позволяет утверждать, что:

- 1) Уменьшение коэффициента преобразования ИС *Ampl*-1.15 в линейной области передаточной характеристики менее 4 % при $D = 5$ Мрад и 8 % при $F_E = 3,5 \cdot 10^{15}$ эл./см².
- 2) Длительность фронта выходного сигнала *Ampl*-1.15 изменяется незначительно в диапазоне входных токов от 50 до 200 мкА как при $D = 5$ Мрад, так и $F_E = 3,5 \cdot 10^{15}$ эл./см².
- 3) Входной ток компаратора возрастает до 25 % при $D = 5$ Мрад и 80 % при $F_E = 3,5 \cdot 10^{15}$ эл./см².
- 4) Выходной ток компаратора уменьшается приблизительно до 6 % при $D = 5$ Мрад и $F_E = 3,5 \cdot 10^{15}$ эл./см².

5) Задержка переключения компаратора по дифференциальному сигналу, длительность фронта нарастания и спада слабо зависят от поглощенной дозы и потока электронов при разном входном синфазном напряжении и превышении порога.

С нашей точки зрения, изменение характеристик аналоговых ИС, указанное в пп. 1, 4 вызвано уменьшением выходного тока источников тока в *Ampl*-1.15 и *Comp* 1-3 из-за спада коэффициента передачи тока в схеме с ОБ. 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.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано радиационное изменение статических и динамических характеристик трансрезистивного усилителя и компаратора при воздействии гамма-облучения с суммарной поглощенной дозой до 5 Мрад и электронов с энергией 4 МэВ и интегральным потоком до $3,5 \cdot 10^{15}$ эл./см².

Установлено, что проникающая радиация заметно влияет только на входной ток компаратора, который возрастает до 25 % при поглощенной дозе 5 Мрад и до 80 % при потоке электронов $3,5 \cdot 10^{15}$ эл./см². Остальные параметры ИС: коэффициент преобразования, длительность фронта нарастания и спада трансрезистивного усилителя, задержка переключения, длительность фронта нарастания и спада, выходной ток компаратора - изменяются незначительно.

Таким образом, использование при проектировании биполярных аналоговых ИС базового матричного кристалла “АБМК 1-3” и сформулированных правил проектирования позволяет создавать радиационно-стойкие ИС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дворников О.В., Гришков В.Н. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Ч. 1. Учет влияния проникающей радиации в «Spice-подобных» программах // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 301-306.
- [2] Дворников О.В. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Ч. 2. Базовые схемотехнические решения АБМК 1-3 // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 283–288.
- [3] Устюжанинов В.Н., Чепиженко А.З. Радиационные эффекты в биполярных интегральных микросхемах. – М.: Радио и связь, 1989. – 144 с.

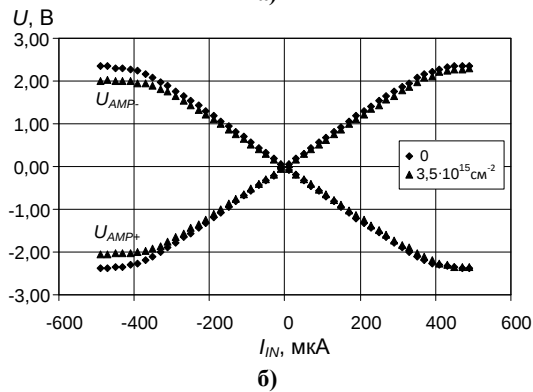
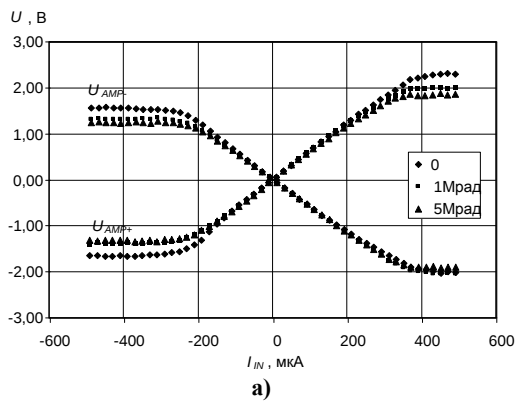


Рис. 3. Зависимость амплитуды выходного напряжения *Amp1-1.15* от входного тока (I_{IN}) при различной величине: а) поглощенной дозы; б) потока электронов

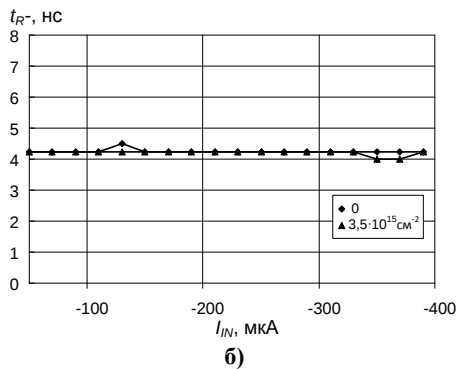
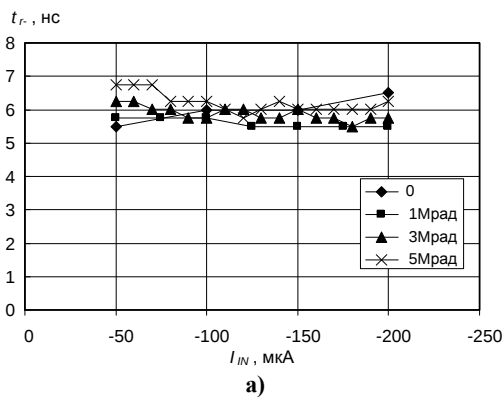


Рис. 4. Длительность фронта нарастания сигнала на инвертирующем выходе *Amp1-1.15* в зависимости от входного тока (I_{IN}) при различной величине: а) поглощенной дозы; б) потока электронов

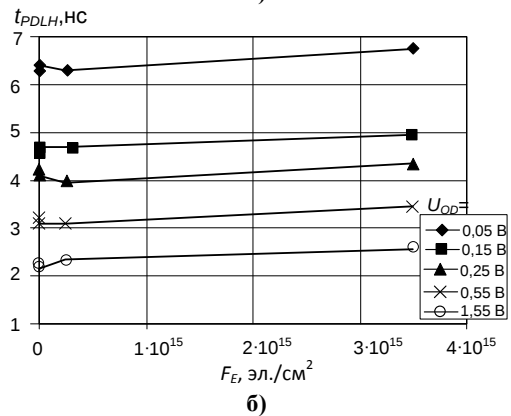
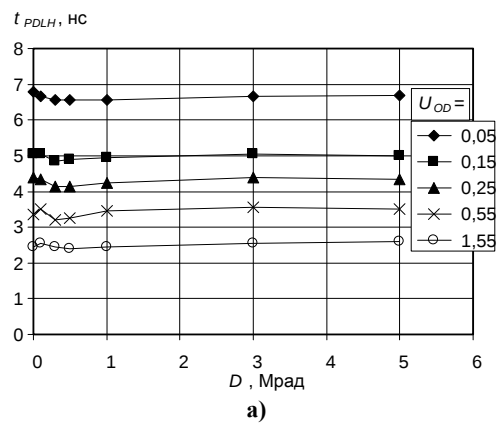


Рис. 5. Зависимость задержки переключения *Comp 1-3* по дифференциальному сигналу при различном превышении порога U_{OD} от: а) поглощенной дозы; б) потока электронов

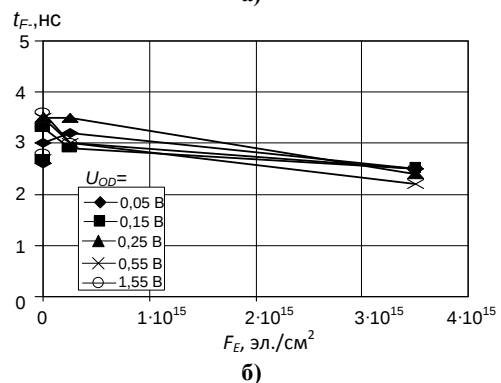
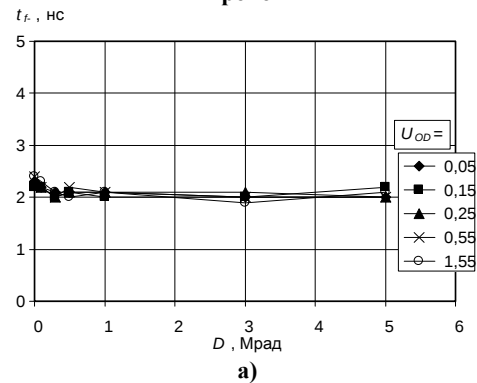


Рис. 6. Зависимость длительности фронта спада сигнала на инвертирующем выходе *Comp 1-3* при различном превышении порога U_{OD} от: а) поглощенной дозы; б) потока электронов