

## Исследование деградации параметров интегральных микросхем операционных усилителей при воздействии ионизирующего излучения космического пространства

*Виноградов Р. Н., Вологдин Э. Н., Дюканов П. А., Корнеев С. В., Савченко Е. М., Смирнов Д. С.*

Приводятся результаты экспериментального исследования воздействия ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП) на биполярные интегральные микросхемы операционных усилителей (далее ОУ), работающие в процессе воздействия в электрическом режиме. Определены наиболее чувствительные параметры исследуемых ОУ к воздействию ИИ КП. Установлена связь изменения параметров ОУ с деградацией коэффициента передачи тока биполярных транзисторов, входящих в состав ОУ.

### Введение

Характер деградации параметров интегральных микросхем (ИМС) зависит от их технологии изготовления, топологии, принципиальной электрической схемы, а также от режима работы ИМС в процессе воздействия ионизирующего излучения. При воздействии ИИ КП деградация параметров ИМС связана главным образом с ионизационными процессами в материалах ИМС за счёт электронов и протонов, то есть с поверхностными радиационными эффектами [1].

Тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) космического пространства ввиду малой плотности их потока не могут привести к существенной деградации параметров ИМС. Воздействие ТЗЧ на ИМС приводит к функциональным сбоям и к потере работоспособности (в частности, в случае возникновения тиристорного эффекта). В данной работе эти эффекты не рассматриваются.

Если в качестве характеристики уровня облучения использовать поглощённую дозу  $D$ , то воздействия электронов, протонов и  $\gamma$ -квантов различных энергий с точки зрения проявления поверхностных радиационных эффектов идентичны, что позволяет моделировать ИИ КП с помощью изотопных источников  $\gamma$ -излучения [1].

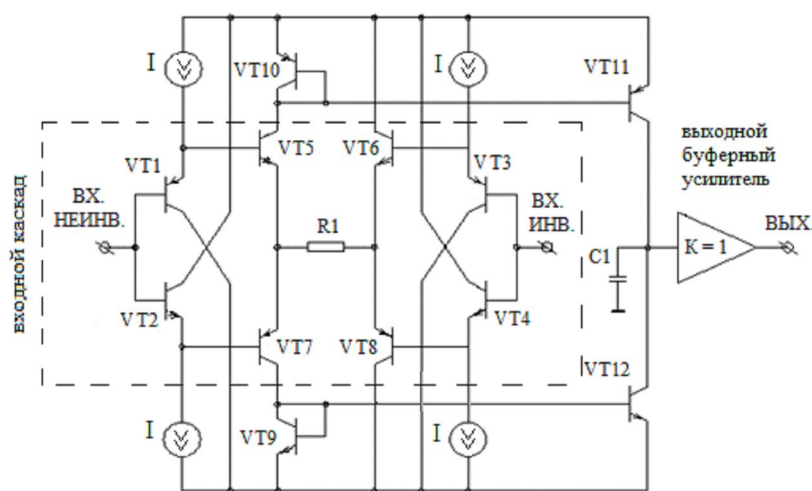


Рис. 1

Упрощённая принципиальная электрическая схема ОУ

### Объекты исследования

В работе исследовались ОУ с обратной связью по напряжению с симметричными высокоомными входами [2], имеющие одинаковую принципиальную электрическую схему (рис. 1). ОУ изготовлены на основе высокочастотной комплементарной биполярной технологии с изоляцией элементов обратносмещённым р-п переходом [3].

По параметрам исследуемые ОУ можно разделить на две группы:

1. ОУ с коэффициентом усиления  $K_{у.у.} = 9000-10000$ , входным током  $I_{ВХ} = 1-4$  мкА, напряжением смещения  $U_{СМ} = 1-4$  мВ и током потребления  $I_{ПОТ} = 8-9$  мА;
  2. ОУ с  $K_{у.у.} = 4000-5500$ ,  $I_{ВХ} = -1- -2,5$  мкА,  $U_{СМ} = -0,3- -3$  мВ,  $I_{ПОТ} = 5,5-6,5$  мА.
- Остальные параметры у обеих групп ОУ схожи.

### Методика эксперимента

Облучение ОУ проводилось на гамма-облучателе интегральных схем ГОИС-5 на основе радионуклидных источников изотопа цезий-137 с энергией гамма-квантов  $E_{\gamma} = 0,66$  МэВ и мощностью поглощённой дозы  $P = 40$  Рад/с (по воде). Следует отметить, что для космического пространства характерно низкоинтенсивное ионизирующее излучение ( $P \leq 1$  Рад/с), которое приводит к более сильной деградации параметров биполярных ИМС (в зарубежной литературе этот эффект получил название ELDRS [4]). Поэтому результаты, приведённые в работе, дают качественную оценку стойкости ИМС к ИИ КП. Для количественной оценки необходимо воспользоваться руководящим документом [5].

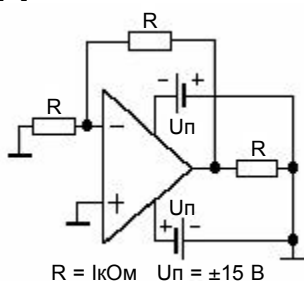


Рис. 2

Схема включения ОУ при облучении

Часть испытуемых изделий из одной группы в процессе воздействия излучения была включена по схеме, приведённой на рис. 2 («активный» режим), а вторая часть из этой же группы находилась в обесточенном состоянии («пассивный» режим). Облучение продолжалось до достижения насыщения наиболее сильно деградирующих параметров ОУ.

### Экспериментальные данные

В ходе экспериментального исследования деградации параметров ОУ при облучении для обеих групп было установлено, что:

– наиболее чувствительными параметрами ОУ к воздействию ионизирующего излучения являются  $K_{у.у.}$ ,  $U_{СМ}$ ,  $I_{ВХ}$  и коэффициент ослабления синфазных сигналов  $K_{ОСС}$ ;

– изменения тока потребления, выходного тока, максимального входного напряжения и частоты единичного усиления ОУ незначительны.

На рис. 3-5 приводятся типичные зависимости  $K_{у.у.}$ ,  $I_{ВХ}$  и  $U_{СМ}$  от  $D$  для ОУ из первой группы, имеющих приблизительно одинаковые исходные параметры и работающих в процессе облучения в «пассивном» и «активном» режимах. На рисунках чётко прослеживается различная степень деградации рассматриваемых параметров в зависимости от режима работы ОУ в процессе облучения. Можно сделать вывод, что облучение ОУ (из первой группы) в «пассивном» режиме приводит к наибольшей деградации  $K_{у.у.}$  и  $I_{ВХ}$ , при этом в случае «активного» режима работы ОУ на начальной стадии облучения наблюдается немонотонное изменение  $I_{ВХ}$  и  $U_{СМ}$ . Также следует отметить, что зависимость  $K_{ОСС}$  от  $D$  (не приведённая на данных графиках) повторяет ход аналогичной зависимости для  $K_{у.у.}$ .

Для ОУ из второй группы было установлено, что  $K_{у.у.}$  и  $K_{ОСС}$  наиболее сильно деградируют в случае облучения ОУ, работающих в «активном» режиме, при этом так же, как и для ОУ из первой группы наблюдается немонотонная зависимость  $I_{ВХ}$  и  $U_{СМ}$  от  $D$ .

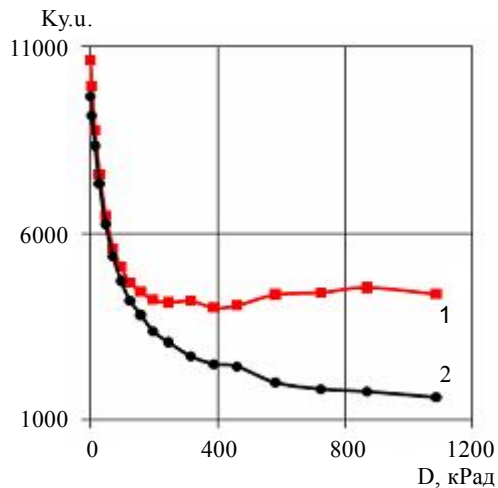


Рис. 3

Зависимость  $K_{у.у.}$  от поглощённой дозы:  
1 – активный режим, 2 – пассивный режим

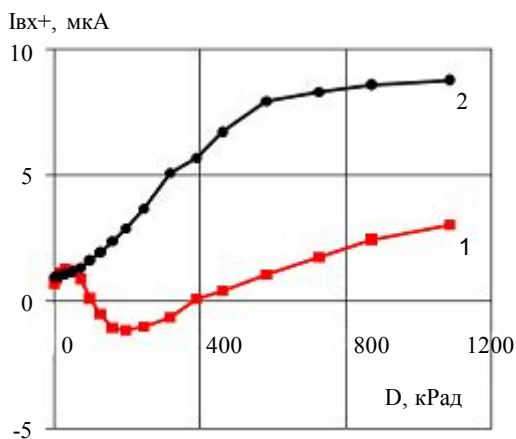


Рис. 4

Зависимость  $I_{ВХ+}$  от поглощённой дозы:  
1 – активный режим, 2 – пассивный режим

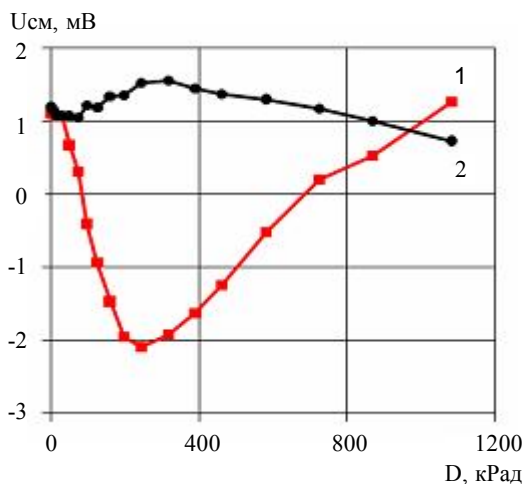


Рис. 5

Зависимость  $U_{см.}$  от поглощённой дозы:  
1 – активный режим, 2 – пассивный режим

### Анализ экспериментальных данных

Рассмотрим более подробно связь радиационного поведения параметров исследуемых ОУ с радиационным поведением биполярных транзисторов (БТ), входящих в их состав.

Специфика воздействия ИИ КП на полупроводниковые приборы состоит в том, что деградация их параметров в основном связана с накоплением положительного заряда в объеме пассивирующего окисла, а также с встраиванием поверхностных состояний на границе раздела  $SiO_2-Si$  и изменением их заряда в условиях инжекции. Роль структурных нарушений в объеме кремния при воздействии ИИ КП невелика [1].

Ток поверхностной рекомбинации, который ответственен за деградацию коэффициента передачи тока транзистора ( $h_{21E}$ ) при воздействии ИИ КП, определяется в основном радиационными эффектами на границе раздела  $SiO_2-Si$ . Влияние радиационно-индуцированного заряда в пассивирующем окисле биполярного транзистора на поверхностные рекомбинационные процессы невелико из-за малых величин электрических полей в нём.

Рассмотрим влияние режима работы биполярного транзистора при воздействии ИИ КП на процесс образования поверхностных состояний. Образование поверхностных состояний на границе раздела  $SiO_2-Si$  связано с захватом дырок, генерируемых ионизирующим излучением в окисле на напряжённые и скомпенсированные связи на границе раздела. Наличие электрического поля в пассивирующем окисле в местах захода на него эмиттерной металлизации (связанного с контактной разностью потенциалов эмиттерного перехода при «пассивном» режиме работы БТ) приводит к эффективному процессу образования поверхностных состояний в результате разделения под действием поля электрон-дырочных пар, генерируемых ионизирующим излучением. Приложение к эмиттерному переходу прямого смещения, с одной стороны, приводит к уменьшению поля в окисле и, следовательно, к менее эффективному процессу образования поверхностных состояний по сравнению с «пассивным» режимом. С другой стороны, при

---

прямом смещении на эмиттерном переходе идёт инжекция неосновных носителей в приповерхностную область базы. Неосновные носители, попадая на состояния границы раздела  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ , меняют её заряд и тем самым влияют на процесс образования радиационно-индуцированных поверхностных состояний. В неравновесных условиях заполнение состояний на границе раздела  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  определяется положением квазиуровня Ферми. При достаточно высоком уровне инжекции квазиуровень Ферми для неосновных носителей занимает такое положение относительно уровней поверхностных состояний, при котором они заряжаются знаком, соответствующим знаку неосновных носителей. В NPN транзисторах, работающих в «активном» режиме, при воздействии ИИ КП отрицательный заряд на границе раздела  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  приводит к притягиванию дырок, генерируемых ионизирующим излучением в окисле, к поверхности кремния, в результате процесс образования поверхностных состояний идёт более эффективно по сравнению с «пассивным» режимом. В свою очередь, в PNP транзисторах, работающих в «активном» режиме, положительный заряд границы раздела  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  приводит к отталкиванию дырок, генерируемых ионизирующим излучением в окисле, от поверхности кремния, и, как следствие, эффективность образования поверхностных состояний уменьшается по сравнению с «пассивным» режимом.

Таким образом, прямое смещение на эмиттерном переходе NPN транзистора может приводить как к уменьшению, так и к увеличению деградации коэффициента передачи тока по сравнению с облучением обесточенного транзистора. В случае PNP транзистора прямое смещение на эмиттерном переходе будет всегда приводить к уменьшению деградации коэффициента передачи по сравнению с облучением обесточенного транзистора. Подтверждением сделанного вывода являются данные, полученные в работах [6-8].

В ходе экспериментального исследования влияния режима работы на деградацию  $h_{21E}$  биполярных транзисторов, изготовленных по технологии исследуемых ОУ при воздействии ионизирующего излучения, было установлено, что:

- облучение обесточенного транзистора PNP-типа приводит к наибольшей деградации  $h_{21E}$  по сравнению со случаем облучения его в «активном» режиме работы (эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный переход – в обратном);
- для транзистора NPN-типа наблюдается обратная зависимость изменения  $h_{21E}$  при облучении, то есть наибольшая деградация  $h_{21E}$  происходит в «активном» режиме работы.

Полученный результат позволяет качественно объяснить ход зависимостей  $K_{u.u.}(D)$ ,  $I_{BX}(D)$  и  $U_{CM}(D)$  для ОУ, работающих в «активном» и «пассивном» режимах в процессе облучения.

При этом следует иметь в виду, что исследуемые ОУ изготовлены по технологии, в которой идентичность комплементарных пар транзисторов достигается не за счёт различных площадей эмиттера, а за счёт разных толщин баз, то есть с точки зрения геометрических размеров, влияющих на проявление радиационных поверхностных эффектов, комплементарные транзисторы одинаковы.

Коэффициент усиления главным образом зависит от коэффициента передачи тока биполярных транзисторов выходного буферного усилителя, который с увеличением поглощённой дозы уменьшается, а величина уменьшения определяется электрическим режимом работы транзисторов. Различное поведение  $K_{u.u.}$  ОУ из первой и второй групп, работающих в процессе облучения в «пассивном» и «активном» режимах, очевидно, связано с тем, что для ОУ из первой группы деградация  $K_{u.u.}$  определяется

падением  $h_{21E}$  PNP транзистора, а для ОУ из второй группы – падением  $h_{21E}$  NPN транзистора. Тогда облучение обесточенных ОУ из первой группы приведёт к более сильной деградации  $K_{у.и.}$  по сравнению с ОУ, на которые было подано напряжение питания (рис. 3). Для ОУ из второй группы должна быть обратная ситуация, то есть наиболее сильная деградация  $K_{у.и.}$  при облучении ОУ, работающих в «активном» режиме, что и наблюдается экспериментально.

Коэффициент ослабления синфазных сигналов по определению прямо пропорционален коэффициенту усиления и ход его зависимости от  $D$  повторяет ход зависимости  $K_{у.и.}(D)$ .

Входной ток согласно принципиальной электрической схеме ОУ (рис. 1) равен разности базовых токов  $I_B$  комплементарных пар транзисторов VT1-VT2 и VT3-VT4 входного каскада ОУ, которые обратно пропорциональны  $h_{21E}$  соответствующих биполярных транзисторов. При облучении величина входного тока будет определяться током базы наиболее сильно деградирующего транзистора. Как следует из экспериментальных данных, радиационное поведение входного тока ОУ из первой (рис. 4) и второй групп определяется радиационным поведением транзистора PNP-типа. Немонотонное изменение входного тока на начальной стадии облучения ОУ, работающих в «активном» режиме, связано с увеличением роли во входном токе базового тока NPN транзистора, что иллюстрируется на рис. 6.

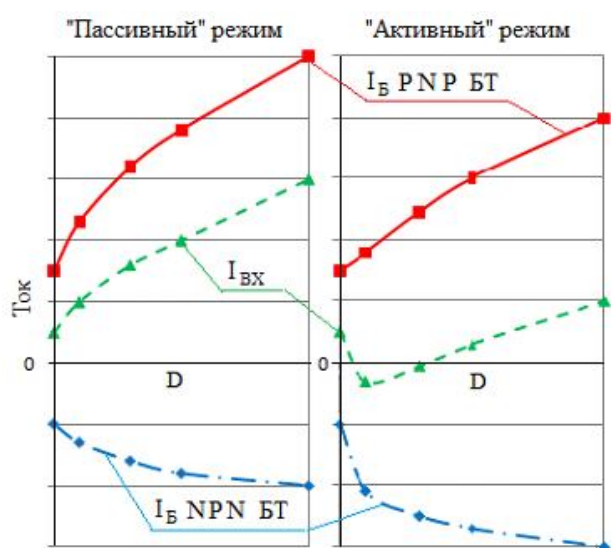


Рис. 6

Зависимость  $I_B$  транзисторов PNP- и NPN-типа, а также  $I_{BX}$  от  $D$  для ОУ из первой группы, облучаемых в «пассивном» и «активном» режимах

Причиной возникновения напряжения смещения является разностный ток, создающий падение напряжения на сопротивлении  $R1$  (рис. 1), который определяется симметрией  $h_{21E}$  комплементарных транзисторов VT5-VT7 и VT6-VT8. Поэтому ход зависимости  $U_{CM}(D)$  объясняется аналогично объяснению зависимости  $I_{BX}(D)$ .

### Заключение

Наиболее чувствительными параметрами исследуемых операционных усилителей к воздействию ионизирующего излучения космического пространства являются  $K_{у.и.}$ ,  $U_{CM}$ ,  $I_{BX}$  и  $K_{OCC}$ . Степень изменения указанных параметров зависит от электрического режима работы операционных усилителей в процессе воздействия ионизирующего излучения и

определяется деградацией коэффициента передачи тока биполярных транзисторов.

Для интегральных микросхем операционных усилителей, предназначенных для применения в космической аппаратуре, необходимо проводить испытания на воздействие ионизирующего излучения космического пространства в режимах, приводящих к наибольшей деградации их параметров.

### Литература

1. Першенков В. С., Попов В. Д., Шальнов А. В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. – М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 256 с.

---

2. Виноградов Р. Н., Корнеев С. В., Ксенофонтов Д. Л., Савченко Е. М. Архитектура современных быстродействующих операционных усилителей // Материалы международной научно-технической конференции «Электроника и информатика – 2005». – Москва. – 2005. – С. 123-124.

3. Виноградов Р. Н., Дроздов Д. Г., Корнеев С. В. Оптимизация комплементарного биполярного технологического процесса изготовления ИМС с использованием САПР TCAD. – Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009(222). – Вып. 1. – С. 58-64.

4. Enlow E. W., Pease R. L., Combs W. E., Schrimpf R. D., Nowlin R. N. Response of advanced bipolar processes to ionizing radiation // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1991. – V. 38. – P. 1342-1351.

5. Изделия электронной техники. Микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Инженерные методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию низкоинтенсивного протонного и электронного излучения космического пространства // РДВ 319.03.37-2000.

6. Д. В. Савченков, А. С. Бакеренков, И. Н. Абраменко, А. А. Романенко. Влияние смещения эмиттерного перехода на радиационную деградацию базового тока биполярного транзистора и прогнозирование эффекта низкой интенсивности // Научно-технический сборник «СТОЙКОСТЬ-2009». – М.: СПЭЛС. – 2009. – С. 95-96.

7. Д. В. Бойченко, Л. Н. Кессаринский, М. А. Соковишин. Влияние режима работы мощных биполярных транзисторов на радиационное поведение // Научно-технический сборник «СТОЙКОСТЬ-2011». – М.: СПЭЛС. – 2011. – С. 101-102.

8. А. С. Петров. Исследование деградации коэффициента передачи биполярных транзисторных микросхем при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения // Научно-технический сборник «СТОЙКОСТЬ-2011». – М.: СПЭЛС. – 2011. – С. 111-112.

---

---

## **ЗАКОНЧЕНА ПУБЛИКАЦИЯ СЕРИИ СТАТЕЙ**

**ВАСИЛЬЕВА В.Ю.**

**НА ТЕМУ**

### **“ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ СЛОЁВ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ДЛЯ МИКРОСХЕМ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ НОРМАМИ 0,35-0,18 мкм”**

1. Часть 1. Основные тенденции развития методов. – 2010. – Вып. 1(224). – С. 67-82.
  2. Часть 2. Аппаратура и методология осаждения слоёв. – 2011. – Вып. 1(226). – С. 51-66.
  3. Часть 3. Закономерности роста слоёв в промышленных реакторах. – 2011. – Вып. 2(227). – С. 24-36.
  4. Часть 4. Обобщённая методология анализа закономерностей процессов роста тонких слоёв. – 2012. – Вып. 1(228). – С. 3-18.
  5. Часть 5. Схемы роста и корреляция закономерностей осаждения и свойств тонких слоёв. – 2012. – Вып. 2(229). – С. 48-63.
- 
-