

УДК 621.375.049.77

DOI:10.36845/2073-8250-2020-256-1-33-39

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ КРЕМНИЕВЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ СТОЙКОСТИ В ЧАСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЁЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

П.А. Дюканов, С.В. Корнеев, В.С. Паньков, Д.В. Сидоров, В.Ф. Синкевич, С.В. Трунов
АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд, д. 27

В статье представлены результаты исследований радиационно стойкого операционного усилителя с обратной связью по напряжению и «Rail-to-Rail» выходом при воздействии γ -облучения, а также исследования при воздействии ТЗЧ КП. Промоделирована работа ОУ в исследовательском режиме. Предложены меры для повышения уровня радиационной стойкости к воздействию ТЗЧ КП изделий электронной техники, содержащих в своем составе интегральные МОП-конденсаторы.

Ключевые слова: операционные усилители, тяжёлые заряженные частицы космического пространства, пробой интегральных конденсаторов, радиационная стойкость

Сведения об авторах: Дюканов Павел Алексеевич, dukanov@pulsarnpp.ru; Корнеев Сергей Викторович; Паньков Вячеслав Сергеевич аспирант; Сидоров Дмитрий Владимирович, к.т.н., sidorov@pulsarnpp.ru; Синкевич Владимир Фёдорович, д.т.н., профессор; Трунов Сергей Викторович, аспирант

STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL CONTROL IN THE DESIGN AND MANUFACTURING OF SILICON OPERATIONAL AMPLIFIERS TO ENSURE THE REQUIRED LEVEL OF RADIATION HARDNESS DURING THE EXPOSURE TO HIGH-ENERGY PARTICLES OF OUTER SPACE

P.A. Dyukanov, S.V. Korneev, V.S. Pankov, D.V. Sidorov, V.F. Sinkevich, S.V. Trunov

The article presents the results of performance testing of radiation-hardened operational amplifier with voltage feedback and a “Rail-to-Rail” output when exposed to γ -irradiation, as well as testing when exposed to high-energy particles. The Op-Amp operation was simulated in a research mode. Certain measures are proposed to increase the level of radiation hardness of electronic products containing integrated MOS-capacitors to the effects of high-energy particles of outer space.

Keywords: operational amplifiers, high-energy particles of outer space, breakdowns of integrated capacitors, radiation hardness

Data on authors: Dyukanov Pavel Alexeevich dukanov@pulsarnpp.ru; Korneev Sergey Viktorovich; Pankov Vyacheslav Sergeevich, postgraduate; Sidorov Dmitry Vladimirovich, Ph.D. sidorov@pulsarnpp.ru; Sinkevich Vladimir Fedorovich, Sc. D., Professor; Trunov Sergey Viktorovich, postgraduate

Введение

Операционные усилители (ОУ) широко применяются во многих областях полупроводниковой микроэлектроники как отдельные устройства, так и как элементы, входящие в состав различных функциональных блоков (ФБ) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Популярность обусловлена универсальностью ОУ, которая позволяет построить на его основе множество электронных узлов. Между тем область применения различных изделий и ФБ накладывает на них и ОУ, в частности, свои требования. Так к РЭА и к элементной компонентной базе (ЭКБ), входящей в её состав, предназначены для космических применений, предъявляются требования в части стойкости к воздействию ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства (КП) [1].

В последние годы особое внимание уделяется проблеме воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) на ЭКБ и РЭА в целом. В зависимости от функционального класса ЭКБ последствия от воздействия ТЗЧ КП могут выражаться в виде кратковременных эффектов переходной ионизационной реакции или катастрофических отказов, вызванных, например, возникновением одиночного тиристорного эффекта или пробоем диэлектрической структуры [2]. В ОУ при воздействии ТЗЧ КП наблюдаются: одиночный эффект переходной импульсной реакции, одиночный тиристорный эффект, одиночный эффект пробоя диэлектрика [2].

Разработка ОУ

В рамках опытно-конструкторских работ, выполняемых АО «НПП «Пульсар», велась разработка радиационно стойких операционных усилителей с обратной связью по напряжению и «Rail-to-Rail»

выходом, предназначенных для работы в системах обработки аналоговых сигналов. Разработанные микросхемы ОУ предназначены для применения в схемах решающих усилителей, интеграторов, сумматоров, в системах автоматического контроля и регулирования и в системах обработки аналоговых и аналого-цифровых сигналов. ОУ выполнены на основе комплементарных биполярных транзисторов с изоляцией, обратносмещённым *p-n*-переходом с проектной нормой 2 мкм, силицидных резисторов на диэлектрике и конденсаторов на основе структуры поликремний-оксид кремния-нитрид кремния-алюминий.

К разрабатываемым изделиям предъявлялись повышенные требования в части радиационной стойкости, в том числе стойкости к воздействию ИИ КП.

Упрощённая электрическая схема операционного усилителя 1432УД37 представлена на рис. 1. Вход микросхемы построен на двух дифференциальных каскадах (ДК) *n-p-n* и *p-n-p* типа, реализованного на транзисторах Т1-Т4. Транзисторы Т5-Т8 выполняют роль усилительного каскада и одновременно преобразуют ток входного ДК в напряжение. Далее с коллекторов транзисторов Т5-Т8 сигнал поступает на вход второго ДК, реализованного на двух встречноключённых двухтактных эмиттерных повторителях. После чего сигнал ошибки через токовые зеркала на транзисторах Т9-Т10 и Т13-Т14 передаётся на выход схемы. ИОТ (источник опорного тока) имеет слабую положительную зависимость от температуры и задаёт рабочие точки всем ДК.

В большинстве ОУ серии 1432 для формирования интегральных конденсаторов применяется составной диэлектрик на основе SiO₂ (оксида кремния) и Si₃N₄ (нитри-

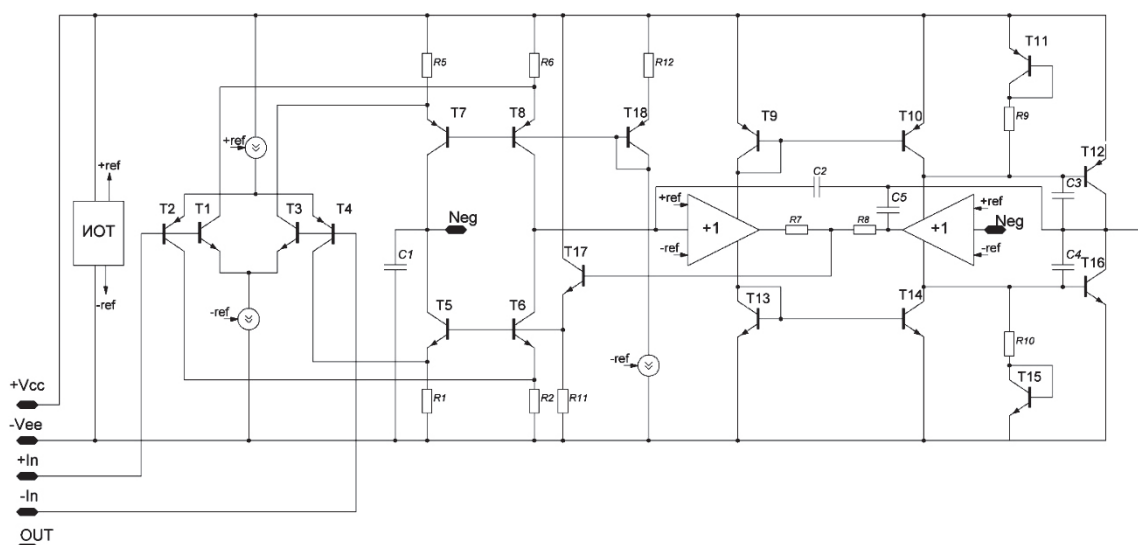


Рис. 1

Упрощённая электрическая схема ОУ 1432УД37У

да кремния). Для обеспечения миниатюризации кристалла, в т. ч. за счёт сокращения площади пассивных элементов, и повышения механической прочности диэлектрического покрытия пластины (исключения растрескивания, отслаивания и т. п.) в процессе разработки кристалла 1432УД37 было проведено уменьшение толщины Si_3N_4 с 0,12 до 0,08 мкм.

Исследования на воздействие γ -квантов

Проведённые исследования по уровню стойкости к дозовым эффектам показали хорошие результаты. При уровне поглощённой дозы 2×10^6 рад контролируемые параметры изделий остались в пределах норм (табл. 1).

Таблица 1

Значения основных статических параметров микросхем 1432УД37У после воздействия γ -квантов

Контролируемый параметр Наименование параметра, единица измерения	Нормы по ТЗ	Номер образца					
		1	2	3	4	5	6
До воздействия							
Максимальное выходное напряжение, В	$\geq \pm 12,7 $	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4
Напряжение смещения нуля, мВ	$\leq \pm 1,0 $	-0,3	0,4	-0,3	-0,3	-0,2	0,2
Ток потребления (на 1 канал), мА	$\leq 5,0$	3,3	3,3	3,3	3,4	3,2	3,2
После воздействия							
Максимальное выходное напряжение, В	$\geq \pm 12,7 $	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4
Напряжение смещения нуля, мВ	$\leq \pm 1,0 $	-0,2	-0,2	-0,1	0,1	-0,2	0,1
Ток потребления (на 1 канал), мА	$\leq 5,0$	3,3	3,5	3,5	3,2	3,3	3,5

Исследования на воздействие ТЗЧ

Конденсаторы, входящие в состав электрической схемы исследуемых образцов: 4 выходных конденсатора

(рис. 2а), корректирующий конденсатор (рис. 2б) и конденсатор, входящий в состав источника опорного тока (ИОТ) (рис. 2в).

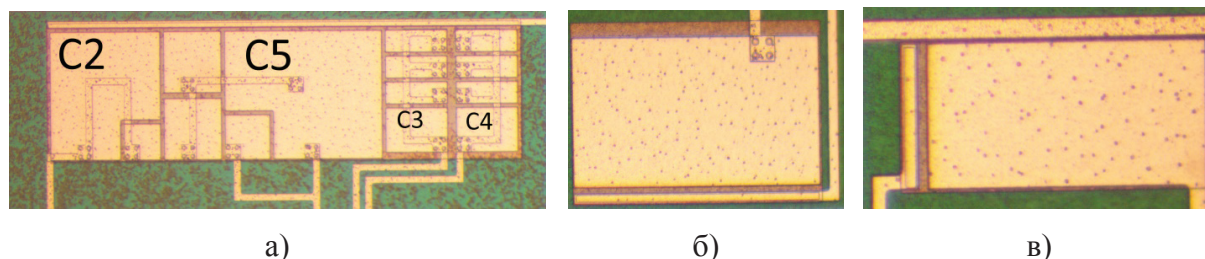


Рис. 2

Сечение интегрального конденсатора ИМС 1432УД37У:
а – выходные конденсаторы C2-C5; б – корректирующий конденсатор C1; в – конденсатор C6, входящий в состав ИОТ

Сечение конденсатора по слоям представлено на рис. 3. В качестве диэлектрика в структуре МДП-конденсатора используется комбинация оксида кремния и нитрида кремния. Требуемая технологическая толщина диэлектрических слоёв: Si_3N_4 – 120 нм, SiO_2 – 100 нм для обеспечения необходимых значений удельной ёмкости и запаса по пробивным напряжениям (не менее 100 В). На экспериментальной партии, из которой были собраны микросхемы 1432УД37У, производились замеры общей толщины диэлектрика на контрольной пластине. Полученные значения, отражённые

в сопроводительном листе на партию пластин, находились в диапазоне от 83 до 88 нм. При входном контроле пластин на тестовых кристаллах пробивное напряжение конденсатора измерялось в девяти точках. Результаты замеров укладывались в диапазон значений от 80 до 110 В.

Исследования проводились на циклотроне У400М ОИЯИ (г. Дубна) на ионах ^{132}Xe . Линейные потери энергии (ЛПЭ), обеспечиваемые выводимыми ионами, – не менее $60 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ ($62,39 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$). Облучение проводилось под углом 0° между осью пучка и нормалью к поверхности кристалла. Схемы включения ОУ приведены на рис. 4. На вход микросхемы подаётся входное напряжение, равное половине напряжения питания $U_{\text{пит}}$. Выход подключён через согласованную нагрузку к осциллографу.

При подаче напряжения питания $U_{\text{пит}} = \pm 13,5 \text{ В}$ во время облучения наблюдался катастрофический отказ – ограничение по току потребления от источника питания – 13,5 В, на выходе микросхемы устанавливается потенциал, равный – 13,5 В.

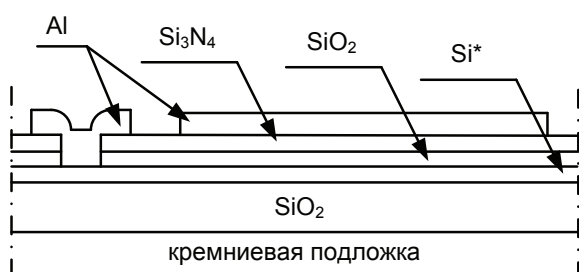


Рис. 3

Сечение интегрального конденсатора ИМС 1432УД37У

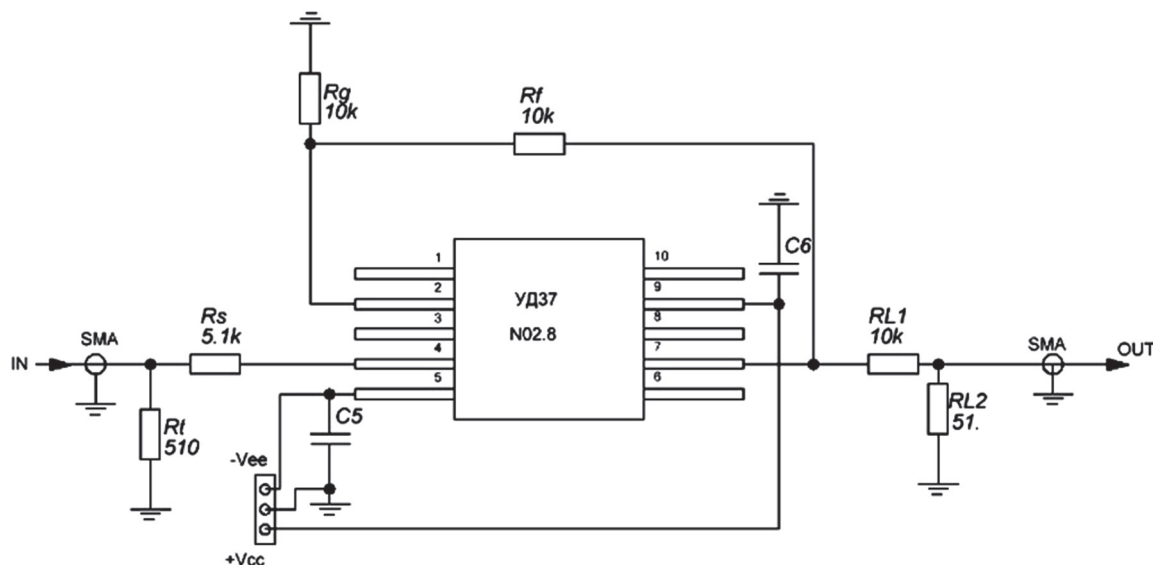


Рис. 4

Схемы включения ИМС 1432УД37У в процессе испытаний

Промоделировав работу микросхемы согласно рис. 4, определили напряжения на конденсаторах (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что при подаче на вход положительного сигнала конденсаторы C2, C4 и C5 имеют максимальную разность потенциалов между обкладками, равную полному напряжению питания. При подаче отрицательного питания на вход микросхемы максимальное напряжение будет на одном конденсаторе – C3.

Как правило, при испытании микросхем, выполненных по кремниевой технологии, на воздействие ТЗЧ КП возникает пробой диэлектрика тонкоплёночных конденсаторов. Подобный эффект подробно рассматривается на

примере высоковольтного МОП транзистора в [3], откуда следует, что во время испытаний на воздействие ТЗЧ с ЛПЭ 60 МэВ·см²/мг пробой конденсаторов наступает при напряжении примерно в 3 раза ниже, чем напряжение пробоя конденсатора. Нетрудно рассчитать, что для облегчения функционирования микросхемы в условиях воздействия ТЗЧ при предельно допустимом напряжении питания $U_{пит} = \pm 16,5$ В пробивное напряжение интегральных конденсаторов на основе кремний–диэлектрик–металл должно быть не менее 100 В.

Для проверки значения пробивных напряжений конденсаторов была собрана установка, состоящая из измерителя па-

Таблица 2

Значения напряжения на конденсаторах микросхем 1432УД37У при различных входных напряжениях

$U_{пит} = \pm 13,5$ В	U_{C1} , В	U_{C2} , В	U_{C3} , В	U_{C4} , В	U_{C5} , В	U_{C6} , В
$U_{ВХ} = + U_{пит} / 2$	2,6	26,5	0,6	26,8	24,3	1,5
$U_{ВХ} = 0$ В	1,7	11,8	12,8	12,8	11,8	1,5
$U_{ВХ} = - U_{пит} / 2$	0,3	2,4	26,8	0,6	1,2	1,5

Таблица 3

Значения пробивных напряжений на конденсаторах микросхем 1432УД37У

№ образца	$U_{пр\ C1}, В$	$U_{пр\ C2}, В$	$U_{пр\ C3}, В$	$U_{пр\ C4}, В$	$U_{пр\ C5}, В$	$U_{пр\ C6}, В$
1	69	63	62	62	63	70
2	69	62	62	61	62	69
3	71	65	67	66	66	70
4	70	65	62	63	63	68

раметров полупроводниковых приборов Л2-100 и зондовой установки. После чего испытуемые конденсаторы были изолированы от микросхемы путём отключения шин металлизации и измерены значения пробивного напряжения конденсаторов. Результаты замеров напряжения пробоя конденсаторов на четырёх работоспособных микросхемах из той же партии приведены в табл. 3.

Из таблицы следует, что пробивные напряжения конденсаторов превышают полное напряжение питания микросхемы примерно в два раза, что повышает вероятность отказа ИМС при облучении ТЗЧ. Измеренные значения говорят о том, что пробой диэлектрика может наступить практически на всех конденсаторах.

Выводы

Для повышения уровня стойкости изделий, в состав которых входят интегральные конденсаторы, потенциально чувствительные к воздействию ТЗЧ, при невозможности увеличения толщины диэлектрика – предусмотреть последовательное включение конденсаторов [4].

Как при подготовке испытательной партии опытных образцов, так и при поставке образцов конечному потребителю необходимо проводить дополнительную разработку по пробивному напряжению интегральных конденсаторов.

В связи с тем, что при подаче на вход ИМС ОУ как положительного, так и отрицательного входного сигнала наблюдается максимальное напряжение на конденсаторах (положительный входной сигнал – С2, С4 и С5; отрицательный входной сигнал – С3), для подтверждения отсутствия катастрофического отказа в образцах ОУ необходимо проводить испытания при двух полярностях входных сигналов, обеспечивающих максимальное выходное напряжение ОУ.

Литература

1. Рембеза, С.И. Влияние ионизирующего излучения космического пространства на свойства полупроводниковых приборов / С.И. Рембеза, А.А. Стоянов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – № 10-1. – С. 63-66.
2. Таперо, К.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов – Москва: Бином, 2012. – 340 с.
3. Зинченко, В.Ф. Сравнительный анализ механизмов пробоя тонких окислов SiO₂ в структурах металл-окисел-полупроводник при воздействии тяжёлых заряженных частиц и импульсного электрического напряжения / В.Ф. Зинченко, К.В. Лаврентьев, В.В. Емельянов, А.С. Ватуев // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – Вып. 2. – С. 30-36.

4. Анашин, В.С. и др. Результаты исследования чувствительности нитрид-кремниевых интегральных конденсаторов к воздействию ТЗЧ / В.С. Анашин, Е.М. Савченко, А.Е. Козюков, Э.Н. Вологдин, А.С. Будяков, А.Д. Першин, К.Ж. Фарадьян, Д.В. Сидоров // Материалы XV научно-технической конференции. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА, 27-29 сентября, 2017, Москва-Дубна. – М.: АО «НПП «Пульсар», 350 с.
3. Zinchenko V.F., Lavrentyev K.V., Emelyanov V.V., Vatuiev A.S. Sravnitel'nyy analiz mekhanizmov proboya tonkikh okislov SiO₂ v strukturakh metall-okisel-poluprovodnik pri vozdeystvii tyazholykh zaryazhennykh chastits i impul'snogo elektricheskogo napryazheniya [Comparative analysis of the breakdown mechanisms in thin SiO₂ oxides in MOS structures under the effect of high-energy particles and pulsed electrical voltage]. *Journal of Technical Physics*, 2016, vol. 86, iss. 2, pp. 30-36.
4. Anashin V.S., Savchenko E.M., Kozyukov A.E., Vologdin E.N., Budyakov A.S., Pershin A.D., Faradyan K.Zh., Sidorov D.V. Rezul'taty issledovaniya chuvstvitel'nosti nitrid-kremniyevykh integral'nykh kondensatorov k vozdeystviyu TZCh [The results of a study on the sensitivity of integrated silicon-nitride capacitors to the effects of high-energy particles]. *Materialy XV nauchno-tekh-nicheskoy konferentsii. Tverdotel'naya elektronika. Slozhnyye funktsional'nyye bloki REA*, Moscow, S&PE Pulsar JSC, 2017, 350 p.
1. Rembeza S.I., Stoyanov A.A. Vliyaniye ioniziruyushchego izlucheniya kosmicheskogo prostranstva na svoystva poluprovodnikovyykh priborov [The effect of ionizing radiation of outer space on the performance of semiconductor devices]. *Proceedings of Voronezh State University*, 2012, vol. 8, no. 10-1, pp. 63-66.
2. Tapero K.I., Ulimov V.N., Chlenov A.M. Radiatsionnyye efekty v kremniyevykh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya [Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications]. Binom, Moscow, 2012, 340 p.

References