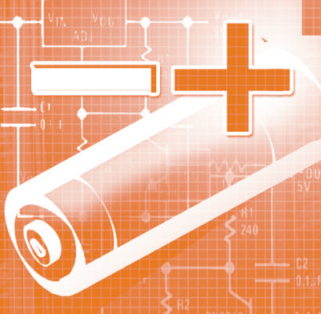




DC/DC-преобразователи CRANE Electronics: результаты испытаний на воздействие радиации – экзамен сдан

Виктор Жданкин

Одной из важнейших задач создания космических аппаратов с длительным сроком активного существования является обеспечение требуемой стойкости бортовой аппаратуры к воздействиям ионизирующих излучений космического пространства. В статье обсуждаются общие вопросы разработки преобразователей космической категории качества, кратко представлены результаты испытаний радиационно-стойких DC/DC-преобразователей, серийно выпускаемых компанией CRANE Aerospace & Electronics под торговой маркой Interpoint™, на стойкость к одиночным эффектам, которые проводились при подготовке модулей для применения в бортовой аппаратуре марсохода Curiosity. Также представлены результаты испытаний на стойкость к ионизационным дозовым эффектам при воздействии низкоинтенсивного гамма-излучения с небольшой мощностью дозы, которые проявляются в некоторых компонентах DC/DC-преобразователей с биполярной структурой. Статья написана по материалам, предоставленным компанией CRANE Aerospace & Electronics [1]–[3].

Подходы к разработке преобразователей космического назначения

Полёт на Марс обнажил существенные проблемы для разработчиков преобразователей напряжения. Космическое пространство является жёсткой средой с предельными температурами и радиационными воздействиями различных видов излучения. Космическая аппаратура в дополнение к требованиям по стойкости к специфическим дестабилизирующим факторам такой среды должна характеризоваться ещё и устойчивостью к различным видам вибрации, механическим ударам и при этом надёжно функционировать в течение 15 лет или более, включая время (до 5 лет) наземных испытаний.

Объём работ по квалификации преобразователя напряжения для применения в космической аппаратуре является значительным, поэтому преимуществом пользуются DC/DC-преобразователи с уже подтверждёнными техническими характеристиками, допускающими их к использованию в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов. Серийные изделия космического при-

боростроения, как правило, характеризуются большей продолжительностью времени выпуска (период от начала выпуска изделия до снятия его с производства), что обязывает разработчика преобразователей применять компоненты, которые будут оставаться доступными в течение десятилетий. Применение микросхем с высокой степенью интеграции является рискованным предложением, так как они часто имеют относительно короткое время выпуска и подвергаются конструкционным изменениям наряду с изменениями технологии их производства. Помимо этого выбор дискретных компонентов вместо стандартных интегральных микросхем предоставляет разработчику большую гибкость в вопросах формирования структуры устройства и выбора метода регулирования. В силу приведённых причин наилучшим решением для преобразователей космической категории качества (Space) часто является применение дискретных компонентов с подтверждёнными для специфики использования параметрами.

Для обеспечения требуемого времени непрерывного безотказного функцио-

нирования надо исследовать воздействие наихудшего сочетания внешних факторов. Анализ предельных значений параметров компонентов с учётом коэффициентов запаса и нормативных значений является предпочтительным подходом к обеспечению надёжного безотказного функционирования техники. Так, космическое пространство характеризуется большим перепадом температур, поэтому в качестве требования может выступать работа при криогенных температурах вплоть до -130°C и при температурах выше $+125^{\circ}\text{C}$, что, как правило, находится за пределами спецификаций поставщика, в силу этого, прежде чем сделать выбор, необходимо провести обширные исследования изменений характеристик компонента или устройства при воздействии предельных температур.

Проникновение в космос является рискованной операцией, которая требует огромного внимания к механической конструкции преобразователя. Очень важен способ крепления, особенно для крупных устройств, таких как трансформаторы и большие конденсаторы. Даже тип маркировочной краски на

крышке преобразователя нужно принять во внимание, так как космический аппарат часто должен соответствовать требованиям к содержанию летучих конденсируемых веществ (Collected Volatile Condensable Material – CVCМ) и устойчивости к дегазации, измеряемой по общей убыли массы (Total Mass Loss – TML). И если преобразователь планируется использовать в составе бортового оборудования космического аппарата, он должен выдерживать воздействие радиации.

РАДИАЦИОННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В КОСМОСЕ

Ионизирующее излучение космического пространства включает в себя ионизирующие излучения низкой и высокой интенсивности, протоны и ионы солнечных и галактических космических лучей, вызывающие в изделиях электронной техники одиночные эффекты и структурные повреждения кристаллической решётки из-за смещения атомов (Displacement Damage) при воздействии высокоэнергетических частиц. В космическом пространстве постоянно присутствуют ионизирующие излучения, и преобразователь должен быть сконструирован так, чтобы функционировать в этой враждебной окружающей среде. При путешествии в течение 8 месяцев марсохода Curiosity к Марсу он подвергался трём значительным всплескам солнечных космических лучей (СКЛ, или Solar Mass Ejections – SME) наряду с непрерывным воздействием галактических космических лучей.

Космическая радиация состоит из потоков высокоэнергетических протонов, или α -частиц, высокоэнергетических электронов, или β -частиц, нейтронов, тяжёлых ядер, а также электромагнитных полей, γ -излучения и рентгеновских лучей. Её воздействие может быть непосредственно ионизирующим или косвенно ионизирующим. Ионизирующее излучение может служить причиной повышения напряжения и тока смещения в биполярных усилителях и компараторах, уменьшения порога пропускания биполярных усилителей, уменьшения коэффициента усиления у биполярных транзисторов, отрицательного смещения затвора MOSFET-транзисторов. Нейтроны вызывают ионизирующее излучение косвенно, когда они взаимодействуют с полупроводниковыми приборами, что приводит к нестабильности атомов, которые

излучают гамма- или альфа-частицы при радиоактивном распаде.

Структурное повреждение кристаллической решётки из-за смещения атомов является результатом воздействия неионизирующего излучения, когда высокоэнергетическая частица вызывает разрушение в полупроводниковой кристаллической решётке, образуя захватывающие узлы и сокращая время существования носителей при малой их концентрации. В отличие от повреждений, создаваемых ионизирующим излучением, такое структурное повреждение часто является постоянным (необратимым). Структурное повреждение кристаллической решётки ухудшает характеристики устройств, чувствительных к световому потоку, уменьшая коэффициенты передачи тока и снижая коэффициенты усиления транзисторов, особенно при низких плотностях тока, и может понижать коэффициент рекомбинации во многих полупроводниковых устройствах с дополнительной примесной электропроводностью.

Одиночные эффекты тоже являются значительной проблемой для преобразователей, предназначенных для применения в космической аппаратуре. Они проявляются, когда высокоскоростная частица сталкивается с устройством и передаёт ему свою энергию. Степень повреждения зависит от массы частицы, скорости и вещества, с которым она сталкивается. Результатом может быть изменение состояния логических устройств или прекращение функционирования устройства вследствие разрушительного радиационного защёлкивания транзисторов в пропускаящем состоянии, что часто наблюдается у КМОП- и БиКМОП-устройств. Общепринятая классификация одиночных эффектов подробно представлена, например, в [4] и [5].

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПЯЖЕНИЯ

С учётом описанных подходов к разработке и в целях уменьшения влияния дестабилизирующих факторов космического пространства сложилась методология проектирования преобразователей напряжения для бортового оборудования космических аппаратов, включающая в себя перечисленные далее пункты.

- Обеспечение значительного ограничения допустимых значений напряжения для активных устройств.

- Использование токоограничивающих резисторов.
- Выбор топологии для источников с высоким импедансом (обратноходовая или снабжаемая током топология).
- Применение транзисторов MOSFET, стойких к эффекту пробоя подзатворного диэлектрика (Single Event Gate Rapture – SEGR) и к импульсному изменению напряжения (dV/dt).
- Проектирование с учётом резкого уменьшения коэффициента усиления транзистора при воздействии радиации.
- Применение микросхем ограниченной сложности (низкой степени интеграции).
- Применение схем с биполярными усилителями, которые менее чувствительны к ионизирующему излучению.
- Применение схем, которые допускают значительные изменения напряжения смещения и тока смещения.
- Управление выключением MOSFET-транзисторов отрицательным напряжением затвор–исток (V_{gs}) для компенсации пороговых смещений при наихудшем сочетании дестабилизирующих факторов.
- Испытание и отбор на стойкость всех чувствительных к радиации компонентов.

Проверка с отбраковкой компонентов на радиационную стойкость *предполагает свой собственный набор проблем*, связанных со стоимостью времени испытаний на ускорителях частиц, радиоактивной природой нейтронов и продолжительностью времени испытаний, требуемой для определения характеристик устройства при низких интенсивностях ионизирующего излучения, наблюдаемого в космическом пространстве (мощность дозы ниже 10^{-3} – 10^{-2} рад (SiO_2)/с).

МОДУЛИ ПИТАНИЯ ДЛЯ МАРСИАНСКОЙ МИССИИ

Разработка устройства для миссии на Марсе была связана с решением множества уникальных проблем, которые требовали всестороннего понимания физики процессов, материаловедения, особенностей передачи тепла и космического излучения, а также анализа состояний на схемном уровне и применения методологии проектирования для уменьшения влияния специфических дестабилизирующих факторов космического пространства.

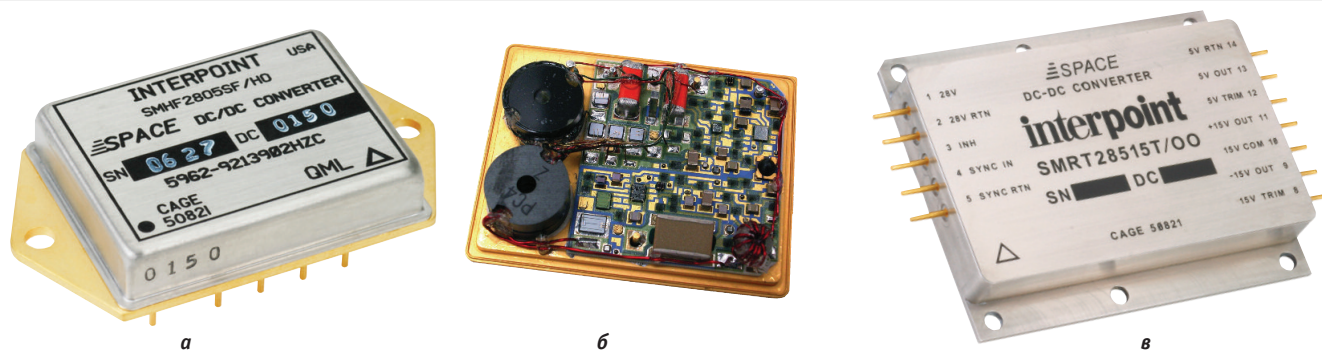


Рис. 1. Внешний вид конструкции: а – радиационно-стойкого интегрально-гибридного DC/DC-преобразователя серии SMHF с крепёжными фланцами; б – преобразователя серии SMHF без крышки; в – радиационно-стойкого DC/DC-преобразователя серии SMRT

Компания CRANE Aerospace & Electronics (CRANE Electronics), будучи одним из ведущих мировых производителей DC/DC-преобразователей и помехоподавляющих фильтров, на протяжении многих лет выпускает продукцию космической категории качества, постоянно адаптируясь к новым уровням соответствующих требований и возрастающей сложности необходимых испытаний. Продукция компании CRANE Electronics, поставляемая под торговой маркой Interpoint™, уже применялась ранее во многих программах NASA (National Aeronautics and Space Agency – Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, НАСА), включая всё ещё находящуюся в стадии реализации миссию Cassini-Huygens Saturn (аппарат Cassini-Huygens, запущенный в 1997 году, до сих пор продолжает посылать ценные данные о Сатурне и его спутниках). Очередным проектом стал автономный планетарный зонд Curiosity (Mars Science Laboratory – MSL).

В аппаратуре Curiosity (см. врезку «Зонд Curiosity») применены девять различных серий DC/DC-преобразователей и помехоподавляющих фильтров компании CRANE Electronics, включая SMFLHP, SMRT, SMHF и SFME. На

рис. 1 показан внешний вид некоторых DC/DC-преобразователей Interpoint™. Помехоподавляющие фильтры служат дополнением к DC/DC-преобразователям, упрощая обеспечение соответствия системы требованиям стандарта MIL-STD-461 к помехам излучения, кондуктивным помехам и другим воздействиям.

Далее в статье представлены результаты испытаний преобразователей компании CRANE Aerospace & Electronics на воздействие ионизирующих излучений низкой интенсивности, которые были получены при подготовке изделий для применения в бортовой аппаратуре миссии Curiosity.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОДИНОЧНЫХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ НА DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Ионизирующие излучения космического пространства при воздействии на внутренние электронные компоненты DC/DC-преобразователей вызывают одиночные эффекты как результат воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) и протонов с относительно высокими энергиями (свыше 1 МэВ), которые приводят к обратимым сбоям и необратимым (катастрофическим) отказам. Необходимо заметить, что невоз-

можно защититься от воздействия протонов с относительно высокими энергиями и ТЗЧ путём применения дополнительных экранов, поэтому данную проблему необходимо решать на всех этапах конструирования DC/DC-преобразователя (выбор компонентной базы и схемотехнических решений, процесс изготовления и др.). Одиночные эффекты могут быть причиной резкого увеличения выходного напряжения, просадки напряжения, отключений и повторных включений, защёлкиваний или катастрофических отказов. Значение пороговых линейных потерь энергии (ЛПЭ) иона в веществе 40 МэВ·см²/мг (>37 МэВ·см²/мг) характерно для большей части частиц, с которыми космический аппарат может столкнуться за время своего активного существования, и это значение является достаточным для большинства космических программ. Значение ЛПЭ 85 МэВ·см²/мг по существу охватывает все частицы, с которыми космический аппарат может столкнуться в течение своего срока активного существования. Параметры стойкости к воздействию одиночных частиц в основном подтверждаются испытаниями готового DC/DC-преобразователя.

В период между февралём 2010 и февралём 2011 года были проведены испы-

Зонд Curiosity

Зонд Curiosity был запущен с космодрома Air Force Station, расположенного на мысе Канаверал, 26 ноября 2011 года ракетой «Атлас-5», а 5 августа 2012 года совершил посадку на Марс в районе кратера Гейла. Curiosity, наиболее сложный из когда-либо разработанных планетарных зондов, содержит в 10 раз больше научного оборудования, чем его предшественники Spirit и Opportunity. Основной задачей Curiosity является исследование того, мог ли Марс когда-либо иметь благоприятные условия для жизни бактерий, а также пригоден ли Марс для организации поселений будущих экспедиций

исследователей. В результате 100-дневной работы марсохода Curiosity были обнаружены вода в грунте [6] и органика небиологического происхождения, а также были проведены измерения радиации. Выяснилось, если человек решит отправиться на Красную планету, то, кроме жуткого холода и разреженного воздуха, он подвергнется риску получить опасную дозу радиации. Марсоход Curiosity оказался первым земным аппаратом, который сделал измерения заряженных частиц с помощью американского прибора RAD. За первые сто дней он зафиксировал несколько вспышек на Солнце, в результате

которых поток заряженных частиц резко вырос. Однако, как показали расчёты, оболочка аппарата сократила мощность соответствующих доз в несколько раз. Результаты измерений прибора RAD были дополнены данными прибора HEND (изготовитель ИКИ РАН, Россия), установленного на находящемся на марсианской орбите аппарате Mars Odyssey. В отличие от американского прибора, он способен улавливать нейтроны низких энергий. Мониторинг радиационной обстановки на Марсе очень важен в связи с подготовкой будущих полётов туда человека. ■

Таблица 1

Краткое представление результатов испытаний гибридных DC/DC-преобразователей CRANE Electronics на воздействие одиночных заряженных частиц

Код компонента	Оборудование/ дата	Результаты испытаний, ЛПЭ (МэВ·см ² /мг)	Напряжение питания	Размер выборки
SMRT28515T	H: TAMU/ 10.03.2010; LBNL/ 10.06.2010; TAMU/ 10.11.2010	H: SEL ЛПЭ > 86,3; SET ЛПЭ < 25. Эффекты SET наблюдались при ±300 мВ (пик.), 600 нс	±15 В	1
SMTR283R3S	H: TAMU/ 10.03.2010; TAMU/ 10.11.2010	H: SEL ЛПЭ > 86,3; SET ЛПЭ < 54. Эффекты SET наблюдались при 700 мВ (пик.), 100 мкс	±15 В	3
SMSA2812D	H: TAMU/ 10.03.2010; TAMU/ 10.11.2010	H: SEL ЛПЭ > 86,3; SET ЛПЭ < 28,8. Эффекты SET наблюдались при ±300 мВ (пик.), 600 нс	±12 В	2
MFP0507S	H: TAMU/ 10.12.2010; LBNL/ 11.01.2011	H: SEL ЛПЭ > 85,4; SET ЛПЭ < 3,49. Эффекты SET при выходном напряжении 0,8 В – 200 мВ, 100 мкс; при выходном напряжении 3,3 В – менее 800 мВ, 200 мкс	0,8; 3,3 В	4
SLH2812D	H: LBNL/10.06.2010; TAMU/ 10.11.2010; TAMU/ 10.03.2010	H: SEL ЛПЭ > 86,3; SET ЛПЭ < 58,8. Эффекты SET: импульс 1 В (пик.), 700 нс	±15 В	2
SMFLHP2815S	H: TAMU/ 10.03.2010; TAMU/ 10.11.2010	H: SEL ЛПЭ > 86,3; SET ЛПЭ < 53,1. Эффекты SET: импульс 1 В (пик.), 200 мкс	±15 В	2
SMSA2815S	L: NRL/ 10.05.2010	L: при поглощении фотонов. Эффекты SET: импульсы +160 мВ и 192 мВ, 100 мкс	±15 В	2

тания на стойкость к воздействию ТЗЧ различных компонентов разных компаний (микросхемы АЦП/ЦАП, FPGA, операционных усилителей, транзисторов MOSFET, микросхем памяти, линейных регуляторов и DC/DC-преобразователей), которые планировались к применению в космических программах NASA. Подвергались испытаниям и несколько серий DC/DC-преобразователей производства компании CRANE Electronics: SMRT28515T, SMTR283R3S, SMSA2812D, SMSA2815S, MFP0507S, SLH2812D, SMFLHP2815S.

Основные исследования на стойкость к воздействию отдельных ТЗЧ проводились на циклотроне Texas A&M University (TAMU) и на установке Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Обе эти установки предназначены для циклического ускорения протонов и ионов с широким диапазоном энергии.

Для имитационного моделирования радиационных эффектов от отдельных ядерных частиц (одиночных сбоев) применялся также сфокусированный лазер американской лаборатории NRL (Naval Research Laboratory). Лазерный луч с длиной волны 590 нм на глубине проникновения 2 мкм имел интенсивность сфокусированного излучения около 37% (снижение до уровня 1/e) от интенсивности на поверхности, частота повторения импульсов составляла 1 кГц. Необходимо отметить, что испытания на стойкость к воздействию отдельных заряженных частиц на лазерных имитаторах со сфокусированным излучением

позволяют воспроизводить ряд одиночных радиационных эффектов:

- эффекты одиночных сбоев, включая эффекты функциональных сбоев;
- эффекты вторичного пробоя, в том числе в мощных полевых транзисторах;
- эффекты отказов (тиристорные эффекты SEL и катастрофические отказы);
- одиночные переходные эффекты (SET – Single Event Transient, «иголки») – кратковременные импульсы напряжения (тока), возникающие вследствие одиночных радиационных эффектов.

Результаты испытаний и анализа воздействий ТЗЧ на электронные компоненты приведены в отчете [7]. В табл. 1 кратко представлены результаты испытаний DC/DC-преобразователей CRANE Electronics на воздействие одиночных ядерных частиц, а более подробно об испытаниях одного из них – SMFLHP2815S [8] и полученных результатах рассказывается в следующем разделе.

ИСПЫТАНИЯ DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ SMFLHP2815S НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЗЧ

Исследования проводились с целью определения стойкости одноканального DC/DC-преобразователя SMFLHP2815S (рис. 2) к воздействию одиночных эффектов от воздействия потоков ТЗЧ на



Рис. 2. Внешний вид конструкции одноканального DC/DC-преобразователя SMFLHP2815S

испытательном оборудовании в Cyclotron Institute, расположенном на территории Texas A&M University. Работа проводилась по программе NASA Electronics Parts and Packaging (NEPP).

Испытывались два образца. Каждый образец подвергался воздействию корпускулярного ионизирующего излучения, и результаты сравнивались для контроля. Перед испытаниями у образцов удалили крышки. Конверторы серии SMFLHP являются однотактными прямоходовыми импульсными DC/DC-преобразователями напряжения, которые использует квазипрямоугольные импульсы с постоянной частотой переключения 600 кГц. Гальваническая развязка между входными и выходными цепями в основной цепи обеспечивается трансформатором, а в контуре обратной связи используется широкополосная индуктивная связь. В этих устройствах применяется уникальная двойная петля обратной связи, которая управляет выходным током с использованием внутреннего контура обратной связи и выходным напряжением в режиме контура обратной связи с последовательным включением напряжения. Дополнительная обратная связь по току дросселя улучшает переходные характеристики в токовом режиме и упрощает параллельное подключение нескольких модулей.

Испытательный стенд

Испытания проходили на стенде Texas&M Cyclotron Radiation Effects Facility пучками с энергией 15 МэВ/нуклон. Плотность потока частиц составляла от $5,49 \times 10^2$ до $1,45 \times 10^5$ частиц/см² в секунду. Для разрушающих испытаний все тесты проводились при потоке до 1×10^6 частиц/см² или пока не происходили разрушающие события. Для неразрушающих испытаний все тесты осуществлялись при потоке до 1×10^6 частиц/см² или пока не насчитывалось достаточное число (>100) пере-

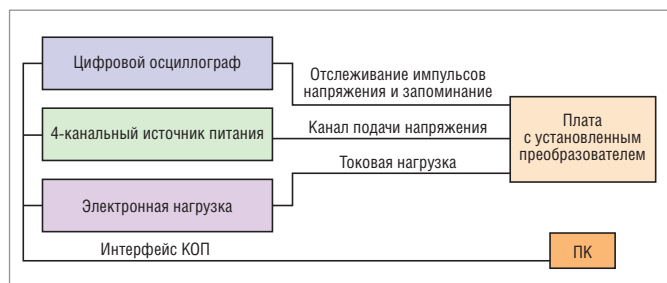


Рис. 3. Структурная схема оборудования для испытания преобразователя SMFLHP2815S на воздействие одиночных ядерных частиц

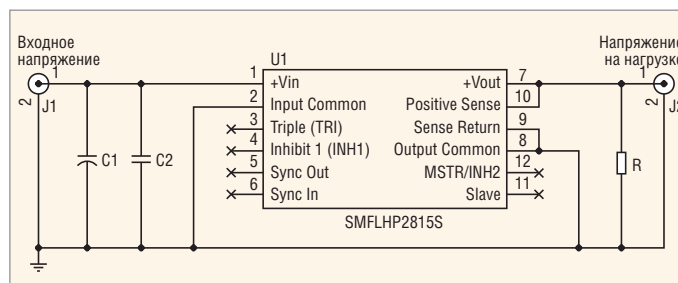


Рис. 4. Принципиальная схема включения преобразователя SMFLHP2815S при испытаниях на воздействие ТЗЧ

ходных состояний. Для испытаний применялись ионы Хе, Та и Ау. При этом выдерживалась комнатная температура. Испытания проводились при входном напряжении 28, 21 и 35 В, при отключённой, 30-процентной и 50-процентной нагрузке. Контролировались ток на входе преобразователя и выходное напряжение.

Проверялись стойкость к воздействиям ТЗЧ по эффекту отказов SEL (тиристорные эффекты), одиночному эффекту пробоя подзатворного диэлектрика в МДП-структурах (SEGR) и переходной ионизационной реакции в виде отдельных импульсов напряжения.

Структурная схема оборудования для испытания преобразователя SMFLHP2815S представлена на рис. 3. Она содержит источник питания для обеспечения входных напряжений, электронную нагрузку, плату с проверяемым устройством, компьютер для управления измерительным оборудованием через интерфейс КОР, а также цифровой электронно-лучевой осциллограф для фиксирования любых отклонений от нормы на выходе. После подачи заданного входного напряжения значения выходного напряжения отображаются на осциллографе, кото-

рый срабатывает при значениях, которые находятся выше или ниже установленного порога (250 мВ). На рис. 4 приведена принципиальная схема включения преобразователя SMFLHP2815S при испытаниях.

Результаты испытаний

Подробные результаты испытаний приведены в таблице отчёта [8].

Устройства подвергались воздействию корпускулярного ионизирующего излучения ионов ксенона, тантала и золота с потоками от $8,49 \times 10^3$ до $3,03 \times 10^6$ частиц/см². Для разрушающих и неразрушающих испытаний наблюдения велись до максимального значения ЛПЭ 86,3 МэВ·см²/мг при прямом угле падения пучка. Для модуля SMFLHP2815S не наблюдалось разрушающих событий, но устройство оказалось восприимчиво к воздействию ТЗЧ по эффекту одиночных сбоев SET и выдавало импульсы напряжения в выходных цепях, которые в наихудшем случае имели пиковую амплитуду около –1 В и длительность 200 мкс. Эти импульсы могут быть уменьшены путём применения соответствующей схемы LC-фильтра совместно с DC/DC-преобразователем. На графиках 1 и 2 рис. 5 показаны такие импульсы.

сы напряжения для наихудшего случая, а на рис. 6 – наблюдаемое сечение эффекта (отношение общего числа проявлений эффекта в устройстве к плотности переноса частиц).

Испытания SMFLHP2815S проводились при входном напряжении 28 В в режиме холостого хода и при 30-процентной нагрузке. Дополнительные испытания проводились для наихудшего сочетания факторов: входные напряжения 21 и 35 В при нагрузке 30 и 50%. Общий вывод таков, что максимальное количество импульсов напряжения в выходных цепях является относительно небольшим, поэтому испытываемое устройство может применяться в бортовой аппаратуре космической техники.

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

В начале статьи при обсуждении подходов к разработке преобразователей напряжения для космических применений указывалось на то, что применение микросхем с высокой степенью интеграции является для данной сферы рискованным предложением. Между тем, микросхемы бывают очень разные, поэтому есть смысл более подробно обсудить вопрос их применения.

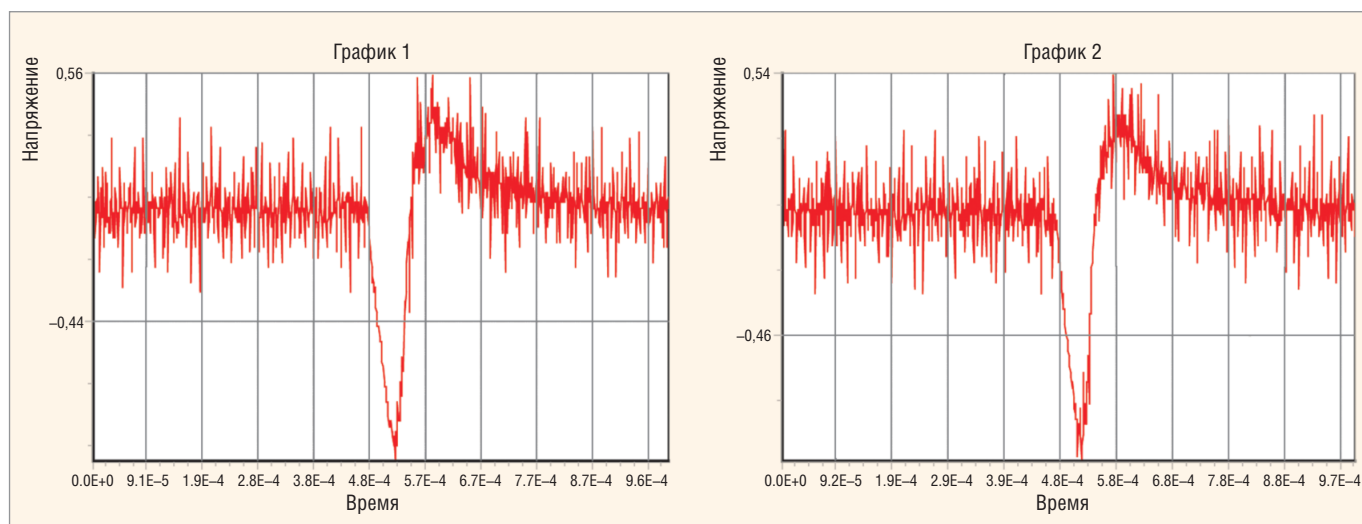


Рис. 5. Типичные для наихудшего случая импульсные напряжения с пиковой амплитудой около -1 В и длительностью 200 мкс

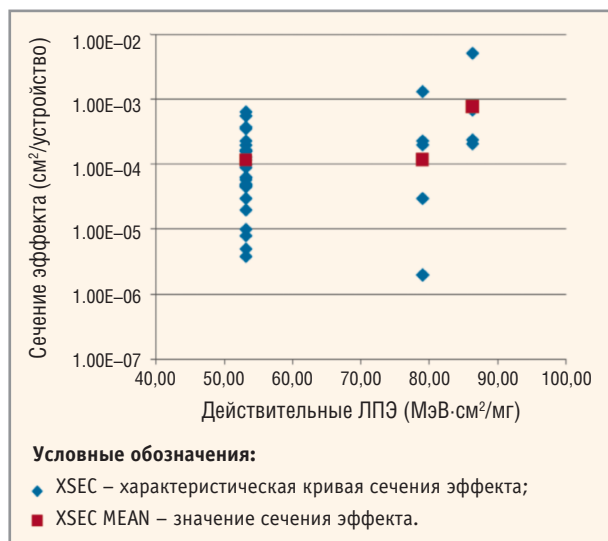


Рис. 6. Сечения эффекта SET для SMFLHP28155

История вопроса

Полупроводниковые устройства, созданные для применения в бортовой аппаратуре космической техники, были разработаны в те времена, когда стандартные радиационные испытания осуществлялись при высокой мощности дозы (HDR). За последние пять лет были проведены дополнительные испытания этих изделий при низких мощностях поглощённой дозы (LDR), согласующихся с ELDRS (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity – эффект уменьшения величины предельной накопленной дозы для биполярных изделий при воздействии реального ионизирующего излучения космического пространства с мощностью дозы ниже 10^{-3} – 10^{-2} рад (SiO_2)/с). Уверенность в корректном поведении продукции космической категории качества компании CRANE Electronics при мощностях ELDRS основана на том, что испытания были проведены как на компонентном уровне, так и на уровне готовых преобразователей.

Испытаниям подвергались DC/DC-преобразователи популярных серий SLH, SMSA, SMHF, SMTR и SMRT. Эти изделия содержат в своём составе несколько видов биполярных интегральных схем. Данные биполярные устройства являются потенциально чувствительными к суммарной накопленной дозе ионизирующего излучения при очень низких мощностях дозы, часто определяемых как мощности менее 10 мрад (Si)/с.

В [3] приведены схемы применения каждой ИМС и данные о влиянии эффектов ELDRS на характеристики преобразователя, что полезно для понимания допустимого предела устойчивости изделия к дозовым эффектам при воз-

действии реального ионизирующего излучения космического пространства, статистические данные испытаний компонентов, которые содержат сведения о поведении партии кремниевых пластин при низких мощностях дозы, статистические данные испытаний преобразователей с зарегистрированными партиями ИМС.

Перечень ИМС, содержащихся в каждом преобразователе перечисленных серий, приведён в табл. 2. Кратко охарактеризуем каждый из четырёх упомянутых в таблице видов биполярных интегральных микросхем.

- **LM119.** Это двоярный компаратор, приобретённый у компании National Semiconductor как кристалл MD8. Данный кристалл тестировался на воздействие радиации согласно руководящему техническому документу Source Control Drawing (SCD), который содержит пострadiaционные ограничения, обнаруженные компанией CRANE Electronics.
- **LM136.** Это прецизионный источник опорного напряжения 2,5 В, приобретённый у National Semiconductor как кристалл MDR. Имеет гарантированное значение предельной накопленной дозы 100 крад (Si), подтверждённое при воздействии ионизирующего излучения с высокой мощностью дозы.
- **LM158.** Это двоярный операционный усилитель, приобретённый у компании National Semiconductor как кристалл MDE. Имеет гарантированные и испытанные для партии микросхем параметры радиационной стойкости при низких мощностях дозы (ELDRS). В DC/DC-преобразователях CRANE

Electronics применяются микросхемы LM158 или микросхемы MC34072.

- **MC34072.** Это двоярный усилитель, приобретённый у компании On Semi и испытанный CRANE Electronics по руководящему техническому документу SCD, который содержит пострadiaционные ограничения, обнаруженные компанией CRANE Electronics.

Результаты исследований ИМС LM119

ИМС LM119 является единственной интегральной микросхемой, используемой в дискретной реализации схемы широтно-импульсного модулятора во всех рассматриваемых преобразователях. Устройство представляет собой двоярный компаратор, одна часть которого функционирует в качестве генератора тактовых импульсов, а вторая – в качестве компаратора ШИМ-контроллера. Генератор является гистерезисной схемой с гистерезисом в несколько вольт. Возможным результатом воздействия радиации на данный компонент выступает сдвиг частоты генератора, поэтому намеренно этот генератор сделан нечувствительным к весьма значительным изменениям напряжения смещения и тока смещения. Изменения напряжения смещения создают смещения в одинаковом направлении на обоих уровнях цикла гистерезиса, а не собственно в гистерезисе. В результате схема может без последствий выдерживать смещения 100 мВ или выше, что во много раз больше, чем можно было бы ожидать от воздействий ионизирующего излучения с низкой мощностью дозы. Ток смещения тоже приводит к положительному или отрицательному смещению рабочей точки, но так как перемещения происходят в одинаковом направлении, то влияние на частоту практически отсутствует.

Другая половина ИМС LM119 используется в качестве ШИМ-компаратора, диапазон входной помехи общего (синфазного) вида составляет от 1,2 до 6 В при изменении коэффициента заполнения от 0 до 60%. Смещение рабочей точки, вызванное большим изменением на входе напряжения смещения или тока смещения, не влияет на коэффициент заполнения. Высокое значение коэффициента петлевого усиления при разомкнутом контуре обратной связи будет возвращать рабочую точку на прежнее место, что необходимо для достижения правильного коэффициента заполнения и корректного значения выходного напряжения.

Таблица 2

Перечень биполярных ИМС, содержащихся в DC/DC-преобразователях CRANE Electronics рассматриваемых серий

Серия	Компонент
SLH	LM136
SMSA	LM119, LM136, LM158
SMHF	LM119, LM136, LM158 или MC34072
SMTR	LM119, LM136, LM158 или MC34072
SMRT	LM119, LM136, LM158

Схема ШИМ-контроллера, в которой применяется LM119, практически невосприимчива к значительным изменениям напряжения и тока смещения. Как следует из результатов испытаний [3], эта схема тестировалась при воздействии низких мощностей поглощённых доз ионизирующих излучений (ELDRS) до значений поглощённых доз 50 крад (Si) и 100 крад (Si) с изменением частоты на 1%. Для поглощённой дозы 100 крад (Si) при сопоставлении данных, полученных при воздействии большой мощности дозы (HDR) и низкой мощности дозы (LDR), различий не обнаружено. Эта схема много раз была испытана при больших мощностях дозы (HDR) до поглощённой дозы 450 крад (Si) опять же с изменением частоты менее чем на 1%.

Интересные сведения об устойчивости ИМС LM119 можно получить из

врезки «Краткое изложение результатов испытаний сдвоенного компаратора LM119 на воздействие ионизирующих излучений с низкой мощностью дозы».

Результаты исследований ИМС LM136

Источник опорного напряжения LM136 применяется во всех изделиях космической категории качества компании CRANE Electronics для получения опорного напряжения, на основе которого формируется выходное напряжение. Изменение в выходном напряжении является суммой смещения опорного напряжения и смещения входного напряжения усилителя. Значение измеренного изменения выходного напряжения при испытаниях воздействием низкой мощности дозы ионизирующего излучения может быть использовано для

определения суммы смещений обеих составляющих, а сравнение значений смещений, полученных при испытаниях воздействиями доз высокой и низкой мощностей, может быть использовано для определения влияния предельной накопленной дозы при воздействии ионизирующего излучения небольшой мощности на каждую из этих составляющих.

В данных, полученных при испытании ИМС LM136 воздействием высокой мощности дозы до значения поглощённой дозы 100 крад (Si), обнаружено стойкое изменение выходного напряжения 0,3%. В данных, полученных при испытаниях преобразователя SMRT на воздействие небольшой мощности дозы ионизирующего излучения (ELDRS) при поглощённой дозе 100 крад (Si), обнаружено смещение выходного напря-

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ СДВОЕННОГО КОМПАРАТОРА LM119 НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С НИЗКОЙ МОЩНОСТЬЮ ДОЗЫ

Общие положения

Хорошо известно, что эффекты, вызванные суммарной накопленной дозой радиации, могут быть причиной ухудшения параметров и, в конечном счёте, функционального сбоя в электронном устройстве. Повреждение происходит посредством образования электронно-дырочной пары, передачи и захвата дырок в диэлектрических зонах. В современных микросхемах, созданных по КМОП-технологии с технологическими нормами 0,6 мкм и менее, большая часть разрушения обнаруживается в менее толстых изолирующих зонах. Устройства же, использующие биполярные компоненты с малой концентрацией носителей, проявляют чувствительность к воздействию ионизирующих излучений с небольшой мощностью дозы (ELDRS). В настоящее время общепринят метод прогнозирования чувствительности к ELDRS или моделирования чувствительности к низкой мощности дозы при комнатной температуре и воздействии облучения 50–100 рад (Si)/с (Condition A в стандарте MIL-STD-883G Test Method 1019.7). В течение последних 10 лет был проверен ряд ускоренных методик, включая отжиг при повышенной температуре, подобный тому, который применяется для МОП-устройств, и облучение при различных температурах. Однако ни одна из этих методик не была признана столь же успешной и для обширного ряда построенных на биполярных компонентах линейных устройств и/или устройств смешанных сигналов, используемых в аппаратуре космических кораблей.

Самое последнее требование, включённое в стандарт MIL-STD-883G Test Method

1019.7, предписывает, чтобы устройства, потенциально склонные к воздействию ELDRS, «были испытаны при предполагаемой во время применения мощности (поглощённой) дозы, при принятой низкой мощности дозы до уровня поглощённой дозы, превышающего значение предельной накопленной дозы, или по ускоренным методикам, таким как облучение при повышенной температуре с учётом допуска на деградацию параметра прибора». Недавно опубликованный стандарт MIL-STD-883 Test Method 1019.7, хоть и предусматривает ускоренное испытание, но по существу требования этого стандарта надо понимать так, что перед тем как назначать испытания по ускоренным методикам, должны быть выполнены испытания на ELDRS при низкой мощности дозы для подтверждения приемлемости ускоренного испытания на основе результатов воздействия низкой мощности дозы на компоненты.

Исходя из ограничений ускоренного испытания и в целях обеспечения соответствия требованиям MIL-STD-883G Test Method 1019.7 Condition D были проведены испытания рассматриваемой микросхемы на ELDRS при мощности дозы 10 мрад (Si)/с.

Установка для испытаний на стойкость к дозовым эффектам

Испытания на ELDRS были проведены с использованием радиационной установки Radiation Assured Devices' Longmire Laboratories (Колорадо-Спрингс). В качестве источника ELDRS применялся излучатель GB-150, модифицированный для обеспечения панорамной экспозиции. Стержни из ^{60}Co были

зафиксированы на основании излучателя. Во время облучения стержень поднимался электронным таймером-контроллером, и воздействие осуществлялось в воздухе. Мощность дозы излучателя могла изменяться от приблизительно 1 мрад (Si)/с до максимального значения порядка 50 рад (Si)/с и зависела от расстояния от источника. Для испытания на ELDRS при низкой мощности дозы устройства размещались на расстоянии приблизительно 2 метра от стержней из ^{60}Co . Калибровка излучателя осуществлялась Radiation Assured Devices' Longmire Laboratories с использованием термолюминесцентных дозиметров (TLD), зарегистрированных в National Institute of Standards and Technology (NIST).

Условия радиационных испытаний

Сдвоенный компаратор LM119 облучался при различных электрических условиях: при подаче однополярного напряжения 10 В и при подключении всех выводов к земле. Устройства облучались до максимального значения поглощённой дозы 50 крад (Si) со считыванием данных при значениях 10, 20, 30 и 50 крад (Si). Контроль электрических параметров производился в течение 1 часа после окончания каждого периода облучения. После каждого периода облучения в течение 2 часов устройства вращались для накопления следующей дозы радиации. Для обеспечения требуемой мощности дозы 10 мрад (Si)/с плата с микросхемой при испытании на ELDRS была помещена в камеру с источником ^{60}Co и расположена в свинцово-алюминиевом

жения 0,5% и не обнаружено различий между результатами испытаний при HDR и LDR. При испытаниях модуля серии SMSA воздействием мощностей доз ELDRS до поглощённой дозы 50 крад (Si) обнаружено смещение выходного напряжения 0,3% и тоже не обнаружено различий между результатами испытаний при HDR и LDR.

Результаты исследований ИМС MC34072

Этот усилитель применяется для формирования сигнала ошибки в случае, когда существует разность между опорным и выходным напряжением. Это значительно усиленное напряжение ошибки управляет ШИМ-контроллером для воздействия на выходное напряжение. Как было упомянуто при рассмотрении компонента LM136, сумма смещений в

усилителе и источнике опорного напряжения может проявляться в виде изменения выходного напряжения. Испытания, проведённые для преобразователя серии SMSA, содержащего две разные партии кремниевых пластин MC34072, до поглощённой дозы 50 крад (Si), показали, что смещение выходного напряжения было 0,3% при испытаниях LDR и HDR. Это напряжение смещения, вероятно, явилось результатом смещения только от источника опорного напряжения LM136.

Вывод

Каждый из трёх компонентов, определённый как потенциально чувствительный к воздействию ELDRS, был испытан много раз на компонентном уровне и в составе преобразователей. Микросхема источника опорного напряжения LM136

была испытана 4 раза в составе преобразователя (каждый раз — из разных партий), 1 раз на компонентном уровне. Микросхема LM119 была испытана 3 раза в составе преобразователей (каждый раз — из разных партий) и один раз на компонентном уровне. Микросхема MC34072 была испытана 2 раза в составе изделий и 1 раз как отдельный компонент, каждое испытание проводилось для микросхем из разных партий. Результаты испытаний и, что очень важно, их согласованность, по крайней мере, для трёх партий пластин каждого компонента значительно уменьшают риск потенциальной проблемы ELDRS. Кроме того, надо учитывать, что данные компоненты были специально спроектированы так, чтобы минимизировать влияние радиации, вызывающей изменения технических параметров.

контейнере. Свинцово-алюминиевый контейнер требуется в соответствии с документом MIL-STD-883G Test Method 1019.7 Section 3.4, который гласит следующее: «Свинцово-алюминиевый (Pb/Al) контейнер. Испытываемые образцы должны быть помещены в Pb/Al-контейнер для уменьшения влияний повышенной дозы рассеянной радиации с низкой энергией. Минимальная толщина свинца должна быть 1,5 мм, он окружает внутренний алюминиевый экран с требуемой толщиной по меньшей мере 0,7 мм. Этот Pb/Al-контейнер создаёт приблизительное равновесие заряженных частиц между Si и TLD, такое как контейнер из CaF_2 . Напряжённость радиационного поля внутри Pb/Al-контейнера должна быть измерена перед началом испытаний в тех случаях, когда был заменён источник излучения или когда были изменены его ориентация либо форма, а также форма контейнера, элемент тестового оборудования. Это измерение должно быть произведено после помещения дозиметра (например, TLD) в контейнер на то место, где приблизительно размещается облучаемый образец. В том случае, когда может быть доказано, что рассеянная низкоэнергетическая радиация настолько мала, что не вызовет ошибки дозиметрии вследствие увеличения дозы, Pb/Al-контейнер может не использоваться».

Значение мощности дозы внутри свинцово-алюминиевого контейнера было определено по измерениям мощности излучения дозиметром TLD непосредственно перед началом экспозиции для определения поглощённой дозы. Значение мощности дозы во время этого эксперимента было 10 мрад (Si) с точностью $\pm 5\%$.

Проверяемые параметры

В этой работе исследовались следующие параметры:

- напряжение смещения на входе V_{IO} ;
- ток смещения на входе I_{IO} ;
- входной ток смещения $+I_B$;
- входной ток смещения I_B ;
- ток источника питания I_{CC} ;
- выходное напряжение высокого уровня V_{OH} ;
- выходное напряжение низкого уровня V_{OL} .

Параметры были представлены в виде зафиксированных данных, а все необработанные данные, включая сводку определяющих признаков, представлены в форме отчёта [3], а также в виде отдельного файла в формате Excel. Данные определяющих признаков содержат среднее, стандартное отклонение и среднее значение с коэффициентом K_{TL} (ограничивающий коэффициент точности при одностороннем измерении). Используемое значение K_{TL} равно 4,666 согласно MIL-HDBK 814 “Military Handbook. Ionizing Dose and Neutrons Hardness Assurance Guidelines for Microcircuit and Semiconductor Devices” при использовании односторонних доверительных границ допуска 99/90% и объёма выборки 5 штук. Заметим, что для прохождения устройством тестирования на ELDRS должен выполняться следующий критерий: после радиационного облучения технические параметры устройства должны соответствовать спецификации и среднее значение для выборки должно удовлетворять требованиям спецификации с учётом ограничивающего коэффициента K_{TL} . В том случае, когда после радиационного облучения этот критерий не

выполняется, соответствующая партия устройств рассматривается как партия, не прошедшая радиационные приёмочные испытания (Radiation Lot Acceptance Testing — RLAT).

Результаты испытаний при воздействии ионизирующих излучений небольшой мощности дозы

В соответствии с представленными критериями для двоянных компараторов LM119 из партий с кодами 0806/J205B6252 неудачно закончилось испытание на ELDRS при первом уровне возрастающей дозы 10 крад (Si) вследствие увеличения входных токов смещения на обоих каналах. На инвертирующем и неинвертирующем входах тоже были выявлены аномальные изменения параметров при 10 крад (Si) и 20 крад (Si). Но несмотря на то что были обнаружены существенные ухудшения напряжения смещения на входе и входных токов смещения, устройства сохранили свой основной набор функций, доказательством чего послужили результаты последних двух испытаний, в которых проверялись V_{OL} и V_{OH} при подключении устройства в схему в качестве стандартного компаратора.

Из результатов испытаний видно, что параметры до воздействия радиации и пострadiaционные параметры находятся в пределах спецификаций даже с учётом K_{TL} . Параметры испытываемых устройств значительно не изменились, как и следовало ожидать. Поэтому можно сделать вывод, что любые обнаруженные их изменения были обусловлены только радиационным облучением. ■

Результаты испытаний компонентов DC/DC-преобразователей на ELDRS

Таблица 3

Изделие	Компонент	Партия пластины		Мощность дозы	Суммарная накопленная доза ионизации
SMRT	LM158	JM084X27-WS	—	10 мрад (Si)/с	100 крад
SMRT	LM136	JM0CX16-W10	—	10 мрад (Si)/с	100 крад
SMRT	LM119	J2098325-W6	—	10 мрад (Si)/с	100 крад
MFP	LM136	JM05CX201-W10	—	10 мрад (Si)/с	100 крад
SMSA2815S	LM136	J206B7482	JM0637042	0,02 рад (Si)/с	50 крад
SMSA2815S	MC34072	P550F100N-W38	P536F100L-W18	0,02 рад (Si)/с	50 крад
SMSA2815S	LM119	J20667341	J205B6252-W6	0,02 рад (Si)/с	50 крад
Компонент	MC34072	HM069063	—	10 мрад (Si)/с	32,4 крад
Компонент	LM136	A122M002-W1	—	5 мрад (Si)/с	32,4 крад
Компонент	LM119	J205B6252	—	10 мрад (Si)/с	5 крад

Результаты испытаний преобразователя SMRT при воздействии ионизирующего излучения с низкой мощностью дозы 10 мрад (Si)/с (контролируемый параметр – выходное напряжение [В] на основном выходе 3,3 В)

Таблица 4

Воздействие	Режим холостого хода				Входное напряжение приложено, нагрузка подключена			
	Серийный номер 157	Изменение, %	Серийный номер 170	Изменение, %	Серийный номер 176	Изменение, %	Серийный номер 218	Изменение, %
0 крад	3,305	—	3,298	—	3,299	—	3,294	—
20 крад	3,302	0,09077	3,294	0,12129	3,294	0,15156	3,29	0,12143
40 крад	3,298	0,2118	3,289	0,27289	3,287	0,36375	3,285	0,27322
60 крад	3,294	0,33283	3,284	0,4245	3,281	0,54562	3,279	0,45537
80 крад	3,288	0,51437	3,28	0,54579	3,274	0,75781	3,274	0,60716
100 крад	3,284	0,6354	3,278	0,60643	3,27	0,87905	3,273	0,63752
Отжиг 168 ч при +100°C	3,3	0,15129	3,293	0,15161	3,293	0,18187	3,288	0,18215

Результаты испытаний преобразователя SMRT при воздействии ионизирующего излучения с низкой мощностью дозы 10 мрад (Si)/с (контролируемый параметр – выходное напряжение [В] на основном выходе 15 В)

Таблица 5

Воздействи е	Режим холостого хода				Входное напряжение приложено, нагрузка подключена			
	Серийный номер 157	Изменение, %	Серийный номер 170	Изменение, %	Серийный номер 176	Изменение, %	Серийный номер 218	Изменение, %
0 крад	15,03	—	15,02	—	15,04	—	14,99	—
20 крад	15,02	0,06653	15,01	0,06658	15,03	0,06649	14,98	0,06671
40 крад	15,01	0,13307	14,99	0,19973	15	0,26596	14,96	0,20013
60 крад	14,99	0,26613	14,97	0,33289	14,98	0,39894	14,95	0,26684
80 крад	14,97	0,3992	14,96	0,39947	14,96	0,53191	14,93	0,40027
100 крад	14,95	0,53227	14,94	0,53262	14,94	0,66489	14,92	0,46698
Отжиг 168 ч при +100°C	15,01	0,13307	15,01	—	15,02	—	14,98	—

Результаты испытаний преобразователя SMRT при воздействии ионизирующего излучения с низкой мощностью дозы 10 мрад (Si)/с (контролируемый параметр – частота переключения [кГц])

Таблица 6

Воздействи е	Режим холостого хода				Входное напряжение приложено, нагрузка подключена			
	Серийный номер 157	Изменение, %	Серийный номер 170	Изменение, %	Серийный номер 176	Изменение, %	Серийный номер 218	Изменение, %
0 крад	293	—	294	—	291	—	291	—
20 крад	294	0,341297	295	0,340136	292	0,343643	285	2,06186
40 крад	295	0,682594	296	0,680272	292	0,343643	292	0,343643
60 крад	295	0,682594	297	1,020408	292	0,343643	293	0,687285
80 крад	295	0,682594	297	1,020408	292	0,343643	293	0,687285
100 крад	295	0,682594	298	1,360544	293	0,687285	293	0,687285
Отжиг 168 ч при +100°C	294	0,341297	294	0	291	0	291	0

Результаты испытаний каждого из этих компонентов кратко представлены в табл. 3. Результаты испытаний преобразователя серии SMRT на воздействие мощностей доз ELDRS представлены в табл. 4–6, а некоторые результаты испытаний преобразователя серии SMSA2815S приведены в табл. 7–9. Значения параметров всех испытываемых образцов DC/DC-преобразователей SMSA2815S оставались в пределах требований спецификаций до значения поглощенной дозы 50 крад (Si) после воздействия гамма-излучения с мощностью дозы 20 мрад (Si)/с. Подробно результаты испытаний преобразователя SMSA2815S представлены в отчёте [9].

Множество испытаний различных партий потенциально чувствительных интегральных микросхем, применяемых в изделиях космической категории качества компании CRANE Aerospace & Electronics, не выявили эффекта уменьшения величины предельной накопленной дозы радиации для биполярных изделий при воздействиях ионизирующего излучения с низкой мощностью дозы (ELDRS с мощностью дозы ниже 10^{-3} – 10^{-2} рад (SiO₂)/с). Испытания интегральных микросхем были проведены как в составе преобразователей, так и отдельно для компонентов. Кроме того, преобразователи показали свою устойчивость к изменениям параметров интегральных схем в результате воздействия ионизирующих излучений, что значительно минимизирует влияние накопленной дозы ионизации, независимо от мощности дозы. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Dave Perchlik. Challenges of Designing Voltage Converters for a Mission to Mars [Электронный ресурс] // PowerPulse.Net. – 2012. – Режим доступа : http://www.powerpulse.net/powerViews.php?pv_id=6.
2. NASA's Mars Science Lab, Curiosity, Lands on Mars with Interpoint™ DC-DC Converters : News Release. – Redmond : CRANE Aerospace & Electronics, 2012.
3. Jay Kuehny, David Perchlik. Low Dose Rate Effects on Crane Space Products. – CRANE Aerospace & Electronics, February, 2012.
4. Анашин В.С. Средства контроля воздействия ионизирующих излучений космического пространства на РЭА космических аппаратов в области одиночных эффектов // Датчики и системы. – 2009. – № 9.
5. Анашин В.С. Общие вопросы обеспечения стойкости РЭА космических аппаратов к ионизирующим излучениям космического

Таблица 7

Выходное напряжение как функция значения поглощённой дозы для преобразователя SMSA2815S

Поглощённая доза, крад (Si)	Выходное напряжение, В				
	Контрольный образец	Испытываемое устройство № 1	Испытываемое устройство № 2	Испытываемое устройство № 3	Среднее значение
0	14,930	14,951	14,913	14,927	14,93033
2	14,975	14,961	14,914	14,926	14,93367
5	14,978	14,974	14,910	14,934	14,93933
7	14,977	14,973	14,922	14,935	14,9433
10	14,978	14,972	14,930	14,940	14,94733
15	14,978	14,920	14,936	14,950	14,93533
30	14,978	14,985	14,952	14,981	14,97267
50	14,978	14,955	14,945	14,878	14,95933
Отжиг в течение недели при комнатной температуре	14,930	14,951	14,913	14,961	14,94167

Таблица 8

Изменение входного тока [А] при различных значениях поглощённой дозы для преобразователя SMSA2815S (режим холостого хода)

Поглощённая доза, крад (Si)	Контрольный образец	Испытываемое устройство № 1	Испытываемое устройство № 2	Испытываемое устройство № 3	Среднее значение
0	0,0330	0,0330	0,0310	0,0310	0,0317
2	0,0330	0,0330	0,0310	0,0317	0,0319
5	0,0330	0,0330	0,0318	0,0320	0,0323
7	0,0331	0,0330	0,0318	0,0319	0,0322
10	0,0330	0,0330	0,0309	0,0310	0,0316
15	0,0330	0,0329	0,0312	0,0314	0,0318
30	0,0331	0,0329	0,0311	0,0304	0,0315
50	0,0330	0,0330	0,0312	0,0380	0,0341
Отжиг	0,0330	0,0330	0,0312	0,0380	0,0341

Таблица 9

Изменение входного тока [А] при различных значениях поглощённой дозы для преобразователя SMSA2815S (устройство включено, входное напряжение 31 В, ток нагрузки 300 мА)

Поглощённая доза, крад (Si)	Контрольный образец	Испытываемое устройство № 1	Испытываемое устройство № 2	Испытываемое устройство № 3	Среднее значение
0	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0030
2	0,003	0,003	0,0029	0,0029	0,0029
5	0,0029	0,0028	0,0027	0,0028	0,0028
7	0,0029	0,0028	0,0027	0,0027	0,0027
10	0,0029	0,0027	0,0027	0,0025	0,0026
15	0,0029	0,0028	0,0027	0,0027	0,0027
30	0,0028	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027
50	0,0031	0,0029	0,0029	0,0028	0,0029
Отжиг	0,0031	0,0029	0,0029	0,0028	0,0029

пространства за счёт ЭКБ // Контроль стойкости электронной компонентной базы к ионизирующим излучениям космического пространства для её применения в радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов : тез. докл. семинара 12 дек. 2012. — М.: РОСКОСМОС, 2012.

- Первые результаты российского эксперимента ДАН на борту марсохода НАСА Curiosity, работающего на поверхности Марса : сообщение пресс-службы ИКИ РАН [Электронный ресурс] // ИКИ. — М., 2012. — Режим доступа : http://www.iki.rssi.ru/events/events_12.htm.
- Martha V. O'Bryan, Kenneth A. LaBel, Jonathan A. Pellish, Jean-Marie Lauenstein, et al. Recent Single Event Effects Compendium of

Candidate Electronics for NASA Space Systems // NSREC 2011 W-6. — NASA, 2011.

- Anthony B. Sanders, Hak S. Kim, Anthony M. Phan. SEE Test Plan 3.0. Heavy Ion SEE Test of SMFLHP2815S from Interpoint. T030210_T110910_SMFLHP2815S. — NASA, 2010.
- Stephen Buchner, Christian Poivey, Jim Forney, Hak Kim. TID Test Report SMSA2815S (Interpoint) DC-to-DC Converter. G07SEP_SMSA2815_TID. — NASA/GSFC, 6th November, 2007.

**Автор – сотрудник
фирмы ПРОСОФТ
Телефон: (495) 234-0636
E-mail: info@prosoft.ru**