

# СОКРАЩЕНИЕ СТОИМОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ ЗА СЧЕТ НЕСПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ

КЕН О'НИЛ (KEN O'NEILL), [Microchip Technology](#)

*В статье описывается влияние радиационного излучения на ПЛИС. Описывается механизм воздействия тяжелых ионов на ПЛИС, рассматриваются преимущества и недостатки керамических и пластмассовых корпусов.*

Компании и организации, имеющие в собственности какие-либо космические активы, например спутники, постоянно стремятся выжать из них максимум возможностей. Это касается и характеристик снимков, создаваемых спутниковым оборудованием: требуются качественные изображения с высоким разрешением и высокой частотой передачи, что влечет за собой необходимость в обеспечении большего количества каналов и более высокой пропускной способности, особенно когда речь идет о мультиспектральных или гиперспектральных снимках.

Одной из главных проблем, с которой сталкиваются разработчики систем для создания спутниковых снимков высокого разрешения, является ограниченная пропускная способность канала связи с наземной станцией. К примеру, спутник на низкой околоземной орбите (НОО, LEO) способен генерировать десятки гигабит данных в секунду и совершать оборот вокруг Земли по 16 раз в день. Соглашались, передача постоянного потока информации такого объема через космические системы ретрансляции для последующей обработки данных является не совсем практичным решением.

Традиционно из такой ситуации выходили путем сжатия и хранения массивов данных изображений на спутнике с последующей последовательной

передачей через системы ретрансляции, обеспечивающие соединение с наземной станцией. Однако куда более эффективным решением стало расширение функций обработки данных на борту спутников и передача на землю уже готовых изображений вместо необработанного массива данных. Это нововведение привело к резкому увеличению требований к компонентам спутникового оборудования, касающихся скорости обработки данных и вычислительных мощностей. Кроме того, используемые компоненты по-прежнему должны удовлетворять строгим требованиям радиационной стойкости и надежности.

В процесс обработки и передачи изображений также внесли свою лепту разработки в области искусственного интеллекта и машинного обучения (AI/ML), которые позволили оптимизировать использование канала передачи, например, за счет удаления из передаваемых пакетов изображений, которые не несут полезной информации. Например, для спутников, задачей которых является мониторинг землепользования, снимки, где поверхность земли скрыта облаками, не представляют ценности, как и снимки океана без кораблей для спутников, отслеживающих маршруты движения судов. Использование функций AI/ML также позволяет автоматизировать принятие решений на борту спутника, сокращая работу оператора

и минимизируя задержку в развертывании и передаче изображений.

По мере развития космической отрасли неуклонно растет и потребность в новых технологиях, которые можно было бы использовать в спутниковом оборудовании. Однако любой применяемый компонент должен отвечать строгим требованиям надежности и устойчивости к внешним воздействиям. Кроме того, компоненты не должны быть слишком дорогими, т. к. для создания снимков поверхности Земли, отвечающих современным требованиям, часто требуются целые группировки спутников, и снижение стоимости каждого отдельного аппарата становится первостепенным фактором.

Для того чтобы подготовить электронный компонент к эксплуатации в космосе, необходимо пройти три основных этапа: оценить уровень радиационного излучения, подобрать подходящий корпус для компонента и выполнить сертификацию.

## ОЦЕНКА УРОВНЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Радиационное излучение – распространённое в космосе явление, а его уровень воздействия зависит от орбиты спутника. Чтобы гарантировать бесперебойную работу компонентов, предотвратить выход их из строя, а также не допустить нарушения работоспособности критически важных

Таблица 1. Уровень воздействия радиационных эффектов на околоземных орбитах

Орбита	Продолжительность миссии	Пример программы	Уровень SEE	Уровень TID
Низкая околоземная орбита (LEO) с малым углом наклона	2–5 лет	Международная космическая станция (МКС), науки о Земле, астрономия	низкий	низкий
Полярная LEO-орбита	2–5 лет	наблюдение за поверхностью Земли, метеорология	средний	средний
Средняя околоземная орбита (MEO)	10–15 лет	спутниковая навигация	высокий	высокий
Высокая эллиптическая орбита (HEO)	10–15 лет	высокоширотные системы связи	высокий	высокий
Геоцентрическая орбита (GEO)	10–20 лет	системы связи	высокий	высокий

систем, необходимо грамотно оценить уровень радиационного излучения. В таблице приведены обобщенные данные об уровне воздействия радиационных эффектов на разных околоземных орбитах.

Радиационные эффекты, влияющие на работу электронных компонентов в космосе, подразделяются на две основные категории: эффекты накопленной/общей ионизирующей дозы (total ionizing dose, TID) и эффекты одиночных событий (single-event effects, SEE).

Показатель TID описывает длительное накопление радиации. Этот эффект в большинстве электронных компонентов приводит к снижению работоспособности и увеличению тока утечки. В некоторых случаях TID также может вызвать полную потерю работоспособности компонента. Уровень воздействия TID варьируется из-за отклонений, допущенных в процессе изготовления полупроводниковых пластин (wafer), в связи с чем производители часто предлагают компоненты с тестированием на TID для каждой отдельной партии. Успешная разработка и применение электронных компонентов в космосе невозможна без учета и понимания воздействия на них TID-эффекта.

В свою очередь, SEE-эффект описывает воздействие на микросхему одной субатомной частицы. В космосе такими частицами обычно являются протоны или тяжелые ионы, а в авиации – нейтроны. SEE делится на несколько подкатегорий: одиночный тиристорный эффект (SEL), одиночные сбои или «мягкие ошибки» (SEU), обратимый переходной процесс (SET) и функциональный отказ (SEFI).

Одиночный тиристорный эффект (SEL) – явление, при котором происходит включение паразитной четырехслойной pnpn-структуры (тиристора), анод/катод смещается в прямом направлении из-за ионизации, вызванной тяжелым ионом, что приводит к резкому увеличению тока в цепи питания и может вызвать необратимое повреждение микросхемы.

Одиночные сбои (SEU) проявляются в виде инвертирования логического состояния запоминающей ячейки из-за импульса тока в результате ионизации и последующей рекомбинации атомов кремния во время прохождения тяжелого иона через микросхему. Разработчикам доступно несколько видов смягчения последствий SEU – тройное модульное резервирование (TMR) для запоминающих ячеек и кодирование/декодирование памяти с контролем и исправлением ошибок (EDAC).

Хотя однобитовые ошибки, возникающие в ячейках встроеной памяти, могут не оказывать серьезного воздействия на работу микросхемы, все меня-

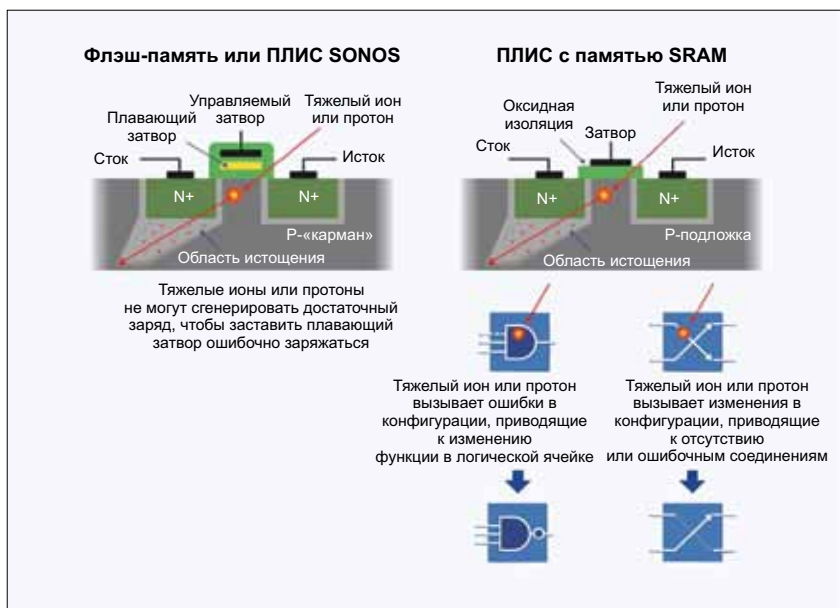


Рис. 1. Влияние тяжелых ионов на функционал ПЛИС

ется, если ошибки происходят в ПЛИС на основе памяти SRAM. В данном случае всего один тяжелый ион может вызвать серьезное изменение функционала ПЛИС (см. рис. 1), требующее проведения ремонта конфигурации, что сопровождается значительными накладными расходами.

Изменения в управляющих сигналах, вызванные эффектами единичного события в комбинаторной логике, называются переходными процессами одиночного события (SET) или обратимыми переходными процессами и могут вызвать проблемы, если переходный процесс имеется на входе в регистр в момент его синхронизации. В таком случае переходный процесс сохранится как однобитовая ошибка. По мере увеличения тактовой частоты вероятность захвата переходного процесса также увеличивается.

Любое одиночное событие, которое вызывает изменение или потерю функционала микросхемы, называется функциональным отказом (SEFI). Чем сложнее становится структура микросхемы, тем выше вероятность возникновения SEFI.

Производство и последующее развёртывание оборудования, предназначенного для эксплуатации в космосе, требует от разработчиков полного понимания радиационных эффектов. Кроме того, для точной оценки воздействия радиационного излучения разработчикам требуются данные испытаний каждой конкретной партии полупроводниковых пластин, из которых были созданы используемые в оборудовании компоненты. Однако из-за того, что испытания могут вызвать разрушающие для пластин последствия и в конечном итоге значительно сократить срок службы компонентов, тестирование

на воздействие TID-эффектов проводится на выборочной основе для каждой партии пластин. Тестирование пластин на воздействие SEE-эффектов выполняется на ранних этапах жизненного цикла компонента, т. к. уровень влияния SEE также зависит от конструкции микросхемы.

Особую осторожность следует проявлять при работе с неспециализированными компонентами, т. к. они могут быть изготовлены из разных партий полупроводниковых пластин или даже на разных заводах, что может значительно увеличить разброс характеристик с точки зрения стойкости к воздействию радиационного излучения. Без наличия строгой прослеживаемости невозможно с уверенностью утверждать, что указанная в характеристиках стойкость компонента к радиационному излучению совпадает с реальными показателями для конкретной партии. В отличие от неспециализированных компонентов, микросхемы, специально разрабатываемые для космической отрасли, полностью прослеживаются, и производители всегда готовы предоставить результаты испытаний на воздействие TID-эффектов для той или иной партии.

#### КОРПУС

Большинство микросхем, применяемых в бортовом спутниковом оборудовании, заключено в герметичные керамические корпуса. Использование именно керамических корпусов обусловлено тремя основными причинами. Первая из них касается необходимости проведения дополнительных проверок после установки микросхемы в корпус: стандарты, регулирующие производство и тестирование компонентов для использования в космических систе-

мах (например, MIL-PRF 38534, MIL-PRF 38535 и MIL-STD 883 класс В) требуют проведения визуальной проверки микросхем в корпусе перед герметизацией, что позволяет дополнительно проанализировать качество сборки.

Вторая причина заключается в преимуществе керамических корпусов над корпусами из других материалов с точки зрения выделения паров или газов под воздействием экстремальных температур или в вакууме. К примеру, пары, выделяемые пластиковыми корпусами, могут вызвать «запотевание» оптических элементов и нарушить работу спутника.

Третьей причиной, объясняющей предпочтительное использование именно керамических корпусов, является то, что корпуса этого типа лучше защищают внутренности микросхемы от проникновения влаги или жидкостей для чистки плат в процессе сборки и установки спутникового оборудования.

Благодаря описанным выше преимуществам герметичные керамические корпуса находят широкое применение в микросхемах для космической отрасли и, в частности, в решениях для обеспечения национальной безопасности или в пилотируемых космических программах.

Однако кроме преимуществ керамические корпуса имеют ряд недостатков, связанных с постоянно растущими требованиями к характеристикам микросхем. Первый из них – сложность производства микросхем с большим количеством контактов ввода/вывода. Поскольку использование корпусов с традиционным расположением выводов, например CQFP, часто не обеспечивает требуемую плотность контактов, единственным вариантом является их установка на нижней стороне корпуса микросхемы в несколько рядов. Однако установка контактов на нижней стороне корпуса может вызвать проблемы с механическим напряжением, возникающим из-за несоответствия коэффициента теплового расширения между корпусом микросхемы и печатной платой, которое может стать причиной срезания шариков припоя, особенно при циклическом нагреве и охлаждении компонента. Для решения этой проблемы при работе с керамическими корпусами с контактами на нижней стороне вместо шариков припоя применяются столбики, которые обладают большей механической гибкостью и поглощают механическое напряжение.

Второй недостаток керамических корпусов связан с их электрическими свойствами. Дело в том, что современные бортовые системы обработки сигналов должны обеспечить после-

довательный обмен данными между микросхемами и печатными платами со скоростью 10–12 Гбит/с. Керамические корпуса позволяют удовлетворить этому требованию на текущем этапе развития. Тем не менее, когда дело коснется разработки систем следующего поколения с более высокими скоростями обмена, применение керамических корпусов в их текущем состоянии может вызвать проблемы. Производители корпусов знают об этих проблемах и решают их путем использования новых технологий изготовления, которые уже проходят обкатку.

Из-за существующих трудностей, связанных с использованием керамических корпусов, многие производители оборудования для космической отрасли нацелены на выпуск микросхем в пластиковых корпусах. Главным преимуществом последних является меньшее значение паразитных параметров, что, в свою очередь, обеспечивает более высокую производительность на больших скоростях ввода/вывода. Кроме того, коэффициент теплового расширения пластиковых корпусов намного ближе к коэффициенту расширения материалов печатных плат, что резко снижает механическое напряжение на шарики припоя, устраняя необходимость в использовании столбиков, что упрощает и ускоряет процесс производства.

#### СЕРТИФИКАЦИЯ

Тесты, выполняемые во время проведения сертификационных испытаний микросхем для использования в космической отрасли, могут отличаться в зависимости от того, в каком корпусе микросхема – в керамическом или пластиковом.

Тестирование ИС в керамическом корпусе выполняется в соответствии с установленным стандартом, например

MIL-PRF 38535 или аналогичным стандартом ESA (Европейское космическое агентство). Большинство микросхем от поставщиков из США будет соответствовать требованиям именно стандарта MIL-PRF 38535. Основные этапы тестирования приведены в таблице 1 этого стандарта.

В стандарте MIL-PRF 38535 указаны два квалификационных уровня, обозначенные как QML (qualified manufacturers list – список квалифицированных производителей) класса Q и QML класса V. QML класса Q предназначен для квалификации высоконадежных оборонных приложений, а QML класса V – для высоконадежных приложений для космической отрасли. Основное различие между классами Q и V заключается в том, что к классу V относятся более строгие требования для тестов; например время, при котором устройство должно сохранять работоспособность под воздействием высокой температуры для QML класса V составляет 4000 ч, а для QML класса Q – 1000 ч.

Примерами микросхем в керамических корпусах, соответствующих QML класса Q и QML класса V являются ПЛИС семейства RTG4 от компании Microchip (см. рис. 2).

Что касается микросхем в пластиковых корпусах, то в космической отрасли нет каких-либо соглашений о едином стандарте. Как правило, при изготовлении микросхем в пластиковых корпусах, предназначенных для использования в космической отрасли, сертификация и тесты основаны на стандартах ассоциации JEDEC Solid State Technology. Основные производители и потребители микросхем для космических приложений совместно работают над определением нового стандарта QML для квалификации и проверки микросхем в пластиковых корпусах в рамках JEDEC. Когда новый стандарт QML будет



Рис. 2. Радиационно-стойкие ПЛИС семейства RTG4 от компании Microchip

окончательно согласован, вполне вероятно, многие производители микросхем в пластиковых корпусах будут ориентироваться и проводить тесты на его основе.

#### НОВЫЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ

Компании, чей вид деятельности связан со спутниковыми системами, постоянно стремятся осваивать новые рынки и расширять спектр услуг, предоставляемых клиентам, включая такие новые возможности как создание глобальных сетей связи или передача снимков поверхности Земли с высокой частотой, для чего требуется сразу несколько спутников единой группировки. Чтобы снизить затраты на развертывание большого количества спутников, разработчики часто используют компоненты, которые специально не предназначены для космоса или для эксплуатации в средах с повышенным уровнем радиации. Результатом экономии становится то, что применяемые в спутниках «гото-

вые к использованию» компоненты (Commercial Off-The-Shelf, COTS) чаще всего не рассчитаны на эксплуатацию в космосе, не соответствуют существующим стандартам или не обладают должной степенью прослеживаемости. В результате данные о воздействии радиационного излучения для компонентов из одной партии далеко не всегда совпадают с аналогичными характеристиками компонентов из другой.

Для решения этой проблемы некоторые производители микросхем предлагают радиационно-стойкие компоненты, соответствующие стандартам JEDEC, в корпусах, которые не обеспечивают полный уровень защиты согласно QML, например в BGA-корпусах. Использование таких суб-QML-компонентов является альтернативным подходом, который позволяет сэкономить средства за счет микросхем в неэкранирующих корпусах согласно классам QML. Таким образом, применение радиационно-устойчивых микросхем обеспечивает высокий уро-

вень надежности для оборудования и в то же время позволяет избежать проблем, связанных с прослеживаемостью, отсутствующей у COTS-компонентов.

Растущие потребности разработчиков из космической отрасли повышают требования к используемым микросхемам. Жесткие условия эксплуатации требуют от микросхем высокой радиационной стойкости и надежности. Компоненты для космической техники должны соответствовать определенным требованиям, в каких бы корпусах они ни выпускались – керамических или пластиковых. Производители микросхем для космической отрасли предлагают широкий ассортимент продукции, включающий в себя не только традиционные компоненты, сертифицированные согласно QML, но и суб-QML-компоненты, которые отвечают требованиям радиационной стойкости и прослеживаемости, но выполнены в менее дорогостоящих корпусах. ☐