

Радиационностойкие ПЛИС Virtex-5QV

ДМИТРИЙ ЦАРЕВ, технический консультант, «ИД Электроника»

В статье описаны основные особенности семейства радиационностойких ПЛИС Virtex-5QV. Кратко рассмотрены радиационные эффекты и методы повышения радиационной стойкости, применяемые Xilinx.

Новое семейство радиационностойких ПЛИС Xilinx Virtex-5QV предназначено для применения в космических аппаратах, когда требуется одновременно высокое быстродействие и надежность. На протяжении многих лет единственным решением для производительных космических систем было использование заказных ИС.

Новые ПЛИС характеризуются высокой плотностью, быстродействием и радиационной стойкостью. В отличие от заказных ИС они многократно программируются без больших затрат. Как и ПЛИС Virtex-5, Virtex-5QV содержат большой набор блоков системного уровня, в т.ч. ОЗУ/FIFO 36 Кбит, секции DSP второго поколения 25×18, интерфейс SelectIO, усовершенствованные схемы управления тактированием (DCM — Digital Clock Managers), тактовые генераторы ФАПЧ, а также модуль ChipSync™ для синхронизации внешних данных, состоящий из приемника, передатчика и высокоскоростной схемы тактирования.

Радиационностойкие ПЛИС Virtex-5QV обеспечивают непревзойденную защиту от одиночных сбоев (SEU), защелкиваний (SEL), одиночных отказов (SET), а также выдерживают высокие дозы ионизирующего излучения (TID).

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Неполадки в работе электронной схемы в условиях высокого радиационного фона могут быть вызваны проникновением одиночной заряженной частицы с высокой энергией, либо накоплением большой дозы излучения. Превышение допустимого порога общей накопленной дозы приводит главным образом к увеличению статического тока потребления. Токи утечки возникают между стоком и истоком n-канального полевого транзистора (паразитный краевой транзистор), между диффузионной n+/- шиной и стоком канального транзистора и т.д. Второй важный эффект — деградация уровней входных логических сигналов и динамических параметров микросхемы. Этот эффект возникает вследствие асимметричной деградации порогов напряжения n- и p-канальных транзисторов.

Словарь терминов радиационных эффектов

LET (Linear Energy Transfer) — линейная передача энергии. Рассчитывается как потеря энергии частицы вдоль трека, нормированные на плотность материала.

SEL (Single Event Latch) — тиристорный эффект, вызванный ионизацией. Переход микросхемы в состояние с высоким потреблением тока. Для восстановления требуется снятие питания.

SET (Single Event Transient) — однократный восстанавливаемый отказ. Кратковременное изменение состояния логического выхода, вызванное ионизирующим излучением.

SEU (Single Event Upset) — однократный восстанавливаемый сбой памяти. Обратимое изменение состояния регистра памяти ОЗУ или триггера, вызванное ионизацией.

SEFI (Single Event Functional Interrupt) — функциональный отказ в результате одиночного сбоя. Отказ в работе прибора, вызванный однократной ионизацией. Для устранения требуется либо снятие и восстановление питания, либо перезагрузка системы.

TID (Total Ionizing Dose) — полная поглощенная (накопленная) доза ионизирующего излучения.

Все одиночные радиационные эффекты, вызванные попаданием заряженной частицы, можно поделить на обратимые, исчезающие с прекращением воздействия, и необратимые, сохраняющиеся в течение длительного времени после окончания облучения. К одиночным эффектам относятся сбои (изменение состояния триггера или ячейки памяти), возникновение переходного процесса на выходе логической схемы, тиристорный эффект (защелкивание), пробой диэлектрика в ПЛИС и т.д.

VIRTEX-5QV

ПЛИС Virtex-5QV построены на основе архитектуры ASMBL, которая применяется в семействе Virtex-5. Virtex-5QV представляет собой первое быстродействующее интегральное SERDES-решение для применения в условиях космоса.

Последовательные приемопередатчики с частотой более 3 ГГц имеют 18 каналов и обеспечивают высокую скорость передачи данных между кристаллами, платами или законченными устройствами. Матрица содержит 836 пользовательских портов ввода-вывода, поддерживающих более 30 различных стандартов, что позволяет легко подключать внешние элементы.

ПЛИС содержат множество встроенных системных блоков, таких как модули ОЗУ/FIFO 36 Кбит, секции 25×18 DSP, быстродействующие последовательные приемопередатчики с оптимизированным энергопотреблением, а также конечные точки PCI Express.

Радиационностойкие матрицы Virtex-5QV имеют такую же архитектуру, что и коммерческие Virtex-5. Полная совместимость с Virtex-5 позволяет осуществить простой и быстрый переход на защищенные от радиационного воздействия ПЛИС без изменения печатной платы и с минимальными затратами.

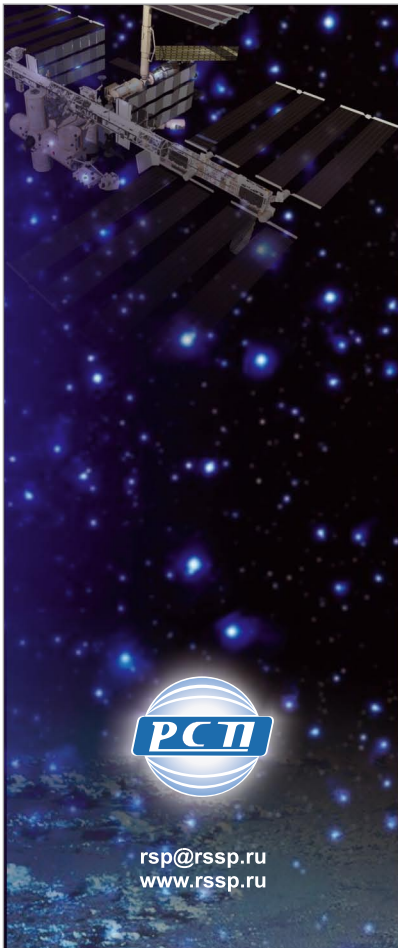
На данный момент семейство представлено одной моделью XQR5VFX130, аналогом которой в семействе Virtex-5 является XC5VFX130T. Основные ресурсы Virtex-5QV приведены в таблице 1.

РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА

Качество производственного процесса и керамических корпусов, в которые упаковываются ПЛИС, проверено временем — 20 лет непрерывной службы в аэрокосмической и оборонной технике.

В кристаллах Virtex-5QV применено несколько средств защиты от воздействия радиационного излучения. Производитель гарантирует сохранение заявленного уровня стойкости на протяжении всего срока службы ПЛИС. Каждая пластина успешно прошла испытания согласно методу 1019. Это гарантия того, что устройства имеют характеристики не хуже номинальных при накоплении максимальной дозы излучения.

Пластины содержат внутренний эпитаксиальный слой, защищающий ПЛИС от одиночных защелкиваний. Комплект фотошаблонов прошел проверку в условиях вакуума при повышенном ионизирующем излучении, после чего был испытан при максимальном напряжении питания Vcc на верхней границе температурного диапазона при плотности потока более 108 частиц/см².



Радиационно-стойкие FPGA для оборонного и аэрокосмического применения

PCP – официальный партнер компании Silica An Avnet company по поставке и продвижению радиационно стойких компонентов XILINX

Москва
т./ф. (+7 495) 781-21-82
т./ф. (+7 495) 780-36-86

Санкт-Петербург
т./ф. (+7 812) 490-02-00
т./ф. (+7 812) 404-65-32

Челябинск
т./ф. (+7 351) 267-23-28
т./ф. (+7 351) 239-80-08

Зеленоград
т./ф. (+7 495) 657-97-04

Екатеринбург
т./ф. (+7 343) 220-37-81
т./ф. (+7 343) 220-37-82

Стойкость модулей памяти и схем управления к одиночным сбоям обеспечивается схемотехнически в процессе проектирования (технология RHBD — radiation-hardening-by-design). Данная методика также может быть реализована в архитектуре приложения. Альтернативным решением является повышение стойкости в процессе производства за счет использования специальных материалов или за счет окружения элементов ПЛИС защитным слоем или маской, препятствующими прохождению заряженных частиц (технология RHBP — radiation-hardening-by-process). Этот подход традиционно используется большинством производителей, поскольку характеризуется высокой надежностью. Недостатками RHBP является чувствительность к отклонениям в производственном процессе, а также высокие производственные расходы.

Для увеличения радиационной стойкости технология RHBD предполагает использование таких приемов как тройное резервирование модулей, опрос конфигурации, добавление схем восстановления после ошибок, применение RC-фильтров для устойчивости к импульсам тока и т.д. Технология RHBD более привлекательна и в экономическом смысле.

Защиту контроллера JTAG и схемы управления конфигурацией от одиночных восстанавливаемых сбоев и отказов обеспечивает тройное резервирование. Каждый регистр управления имеет независимую дублирующую схему нахождения и исправления ошибок для корректирования

состояния в автономном режиме. Такая же защита применяется для контроллера импеданса с цифровым управлением.

Тройное модульное резервирование (TMR) является обоснованной техникой для защиты ячеек памяти от одиночных сбоев. Данный способ предполагает тройное увеличение количества ячеек памяти и применение мажоритарной схемы выбора корректно сохраненного значения. При этом отсутствие сбоев не гарантируется, поэтому рекомендуется предусмотреть механизм для восстановления корректного значения. Недостатком тройного резервирования является значительное увеличение площади. Для восстановления правильного значения предлагаются три мажоритарные схемы с обратной связью.

Каждый КЛБ содержит 8 регистров пользователя, которые изготавливаются из двух узловых регистров сбора и хранения информации. Защита от радиационного излучения реализуется схемотехническим методом (RHBD), который обеспечивает такой же уровень защиты от статических одиночных сбоев, что и в конфигурационных триггерах. Дополнительную защиту от SET в процессе динамической работы обеспечивает фильтр на входах каждого регистра.

Блоки ввода-вывода (ISERDES, OSERDES, ILOGIC, OLOGIC) оснащены регистрами сбора и хранения информации, но не имеют SET-фильтров. Модули блочной памяти ОЗУ содержат встроенные функции обратной записи и EDAC, что позволяет в автономном режиме обнаруживать и исправлять ошибки в хранящейся информации.

Таблица 1. Семейство Virtex-5QV

Модель	КЛБ			Количество DSP48E	Блочная память ОЗУ				Конечные точки PCI Express	Ethernet MAC	RocketIO GTX	Всего банков I/O	Всего I/O пользователя
	Массив	Количество секций	Макс. объем распределенной ОЗУ, Кбайт		18 Кбайт	36 Кбайт	Макс. объем, Кбайт	СМТ					
XQR5VFX130	200x56	20480	1580	320	596	298	10728	6	3	6	18	24	836

Таблица 2. Сравнение уровней радиационной стойкости семейств Virtex-4QV и Virtex-5QV

Параметр	Virtex-4QV	Virtex-5QV	Примечание
Накопленная доза (TID), крад (Si)	300	700	Мин. накопленная доза, при которой начинают проявляться радиационные эффекты
Стойкость к защелкиванию (SEL), МэВ·см ² /мг	100	100	Пороговый уровень линейной передачи энергии
Функциональный отказ	1,5·10 ⁻⁶	2,76·10 ⁻⁷	Частота возникновения отказов в элементах в день
Одиночный сбой в конфигурационной памяти	Н/д	3,8·10 ⁻¹⁰	Частота появления ошибочных разрядов в день

Таблица 4. Статистика по сбоям некоторых узлов

Узел/параметр	Количество	XC5VFX130T	XQR5VFX130	Единицы
Общая доза	–	–	>700K	Рад (Si)
Статические сбои				
Конфигурационные биты	36 млн	4 088	4,85	сбоев/устройство/год
Функциональные отказы	1	364	9 930	год/сбоев/устройство
Блочная память ОЗУ/EDAC	10,9 млн	~1.1E-6	~2.5E-11	сбоев/бит/день
Динамические сбои				
КЛБ, триггеры	80 тыс.	н/д	~1.1E-8	сбоев/бит/день
DSP48E	320	н/д	~2.2E-4	сбоев/DSP/день
MGT	18	н/д	~2.7E-4	сбоев/MGT/день
IODELAY	836	н/д	~1.1E-4	сбоев/IO/день
ФАПЧ	6	н/д	~2.7E-6	сбоев/ФАПЧ/день
DCM	12	н/д	~2.7E-6	сбоев/DCM/день

В таблице 2 сравнивается радиационная стойкость семейств Virtex-4QV и Virtex-5QV. Данные получены для конфигурационной памяти и схем управления при работе на геостационарной орбите. В таблице 3 приведены характеристики радиационностойких ПЗУ Xilinx в сравнении с моделями других производителей.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Компания Xilinx выпустила первую высокоинтегрированную радиационностойкую ПЛИС для применения в космосе. Семейство Virtex-5QV характеризуется высоким уровнем интеграции и высокой производительностью, что позволяет использовать их в сложных системах, предназначенных для эксплуатации в средах с повышенным радиационным фоном. Применение Virtex-5QV позволяет существенно сократить риск при разработке за счет стойкости ПЛИС к радиационному излучению и возможности многократного программирования, а также позволяет практически без затрат вносить изменения на последних стадиях проектирования или в уже готовый проект.

Совместимость выводов с Virtex-5 обеспечивает легкую замену ПЛИС. На одной плате допускается использование коммерческих и специализированных элементов схемы.

Представленная в семействе Virtex-5QV ПЛИС имеет те же электрические характеристики, что и аналогичная модель без радиационной защиты. Исключение составляют лишь приемопередатчики RocketIO GTX, которые в защищенном варианте имеют сниженную скорость работы: 150 Мб/с...3,125 Гб/с (в коммерческом варианте верхний предел составляет 6,5 Гб/с).

Итак, основные технические особенности Virtex-5QV:

- частота 450 МГц;
- 131 072 логические ячейки;
- не требуется утроения узлов;
- технология SelectIO;
- встроенная блочная память;
- секции DSP48E с частотой до 360 МГц;
- конечные точки PCI Express;
- трехрежимный контроллер доступа к Ethernet;

Таблица 3. Радиационностойкие ПЗУ

Модель	Производитель	Емкость, Мбит	Многократная программируемость	Доступность на рынке	Общая доза, крад	Стойкость к одиночным сбоям
XQR17V16	Xilinx	16	Нет	Да	50	RHBD
4x XQR17V16	3D Plus	64	Нет	Да	> 50	RHBD
CRAM	BAE	4	Да	Да	> 1000	RHBD
Flash MCM	Space Micro	8 тыс.	Да	Прототип	> 100	снижена
Honeywell	MRAM	16	Да	Н/д	TBD	RHBD
Aeroflex	MRAM	16	Да	Н/д	TBD	RHBD

- приемопередатчики RocketIO GTX;
 - производительность до 3,125 Гбит/с
 - диапазон рабочих температур для военных применений: –55...125°C;
 - поддержка пакета проектирования Xilinx ISE Design Suite. Некоторые узлы ПЛИС были исключены: PPC, системный мониторинг, 4 блока ввода-вывода, 2 канала аппаратных приемопередатчиков (MGT — Multi-Gigabit Transceivers). ПЛИС Virtex-5QV имеет следующие характеристики по радиационной стойкости:
 - технология RHBD;
 - стойкость к одиночным сбоям, тиристорному эффекту;
 - стойкость к излучению с высокой дозой;
 - защита тракта данных от одиночных отказов (SET);
 - защищенность модулей памяти от сбоев в 1 000 раз выше, чем у стандартных регистров-защелок;
 - гарантированная стойкость к ионизационному излучению дозой до 700 крад;
 - гарантированная стойкость к одиночным событиям до LET > 100 МэВ·см²/мг;
 - частота сбоев в ячейках памяти на геостационарной орбите равна 3,8·10⁻¹⁰ ошибочных битов в день;
 - частота появления одиночных функциональных прерываний в схемах управления на геостационарной орбите менее 1 в 10 тыс. лет;
 - стойкие к одиночным сбоям и SET триггеры на КЛБ;
 - стойкие к одиночным сбоям IOB триггеры и управление DCI;
 - встроенная схема обнаружения и коррекции ошибок, использование высокоскоростной блочной памяти с автономной обратной записью для подавления одиночных сбоев;
 - пригодность использования в космической среде или среде с повышенным фоном ионизирующего и протонного излучения.
- В таблице 4 приведена отказоустойчивость основных узлов Virtex-5QV.

ОТЛАДКА И КОНТРОЛЬ

Для удобства программирования ПЛИС Virtex-5QV можно воспользоваться готовыми макетными коммерческими платами с совместимыми по выводам элементами. Для ускорения процесса макетирования и отладки компания Xilinx предлагает набор IP-блоков, средства разработки, а также услуги по разработке.

Тестирование готовой сборки рекомендуется производить с применением продуктов DAISY.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.xilinx.com/support/documentation/virtex-5qv.htm.
2. www.xilinx.com/support/documentation/virtex-4qv.htm.
3. Никуфоров А. Ю. и др. Радиационные эффекты в КМОП ИС. — М., Радио и связь, 1994.
4. DS192. Radiation-Hardened, Space-Grade Virtex-5QV Device Overview.
5. DS692. Radiation-Hardened, Space-Grade Virtex-5QV FPGA Data Sheet: DC and Switching Characteristics.
6. UG520. Virtex-5QV FPGA Packaging and Pinout Specification.