Привет, коллеги. Сегодня я буду выступать с докладом «Космические вычисления. Защищаем бортовой компьютер вашего спутника», посвященным аппаратной части космических интегральных схем.

С начала мы рассмотрим эту тему с точки зрения обывателя и постепенно будем наращивать технические подробности.

Так как тема обширная, а время на доклад ограничено, глубоко рассмотрим только аппаратную часть, и основное внимание уделим радиационной устойчивости интегральных схем, лишь одно требование из длинного ряда, которое, однако, лучше других подходит для предмета «Архитектура компьютера».

Рассмотрим воздействие потоков заряженных частиц на элементы интегральных схем и другие причин, мешающих использованию стандартных коммерческих ИС.

Исследуем архитектурные и конструктивные особенностей интегральных схем для космических аппаратов и особых схемотехнических и технологических решений, направленных на повышение надежности и долговечности электронных компонентов, включая использование материалов, устойчивых к радиации.

После этого мы разоблачим некоторые мифы о радиационной устойчивости и подведем итоги.

Итак, поехали.

1. Представьте себя астронавтом Вы покидаете плотные слои атмосферы и устремляетесь к неизведанным мирам в космическое путешествие.
2. Перед вами бесконечная пустота и необъятный космос. **Но так ли тут пусто?**
3. Вы на миг закрываете глаза и **вдруг видите вспышку**. Может это мигнула аварийная лампочка прибора?
4. Нет, все идет в штатном режиме.
5. Закрываете снова – **опять вспышка**. Раз в пару минут яркое световое пятнышко сквозь закрытые веки. Но вскоре выясняется, что это видите не только вы, но и все члены экипажа.
6. Звучит как трейлер фантастического фильма, но на самом деле с такой ситуацией столкнулись участники легендарной миссии «Аполлон-11», впервые побывавшие на луне. После этого почти все члены экипажей космических кораблей «Аполлон» рассказывали про такие световые пятна.
7. Разгадка оказалась проста. Космос оказался не таким пустым как многие считают.
8. На самом деле он наводнен
9. маленькими заряженными частицами – в основном протонами.
10. Но встречаются и электроны, и ядра гелия, и другие более тяжелые частицы.
11. Частицы очень разных энергий летят от нашего Солнца. Какие-то летят от звезд нашей галактики Млечный Путь. Есть частицы из глубин межзвездного пространства и даже из других галактик.
12. Именно заряженные частицы, попадая на сетчатку глаза, оставляют яркие вспышки, которые и наблюдали астронавты из миссий «Аполлон».
13. Космические лучи довольно опасны, и дальше мы в этом убедимся. И они могут влиять не только на людей, но и на электронные приборы. Угроза настолько серьезная, что в микроэлектронике есть отдельное направление – радиационно-стойкое проектирование. Целое научное направление изучает, как заряженные частицы влияют на интегральные схемы, какие лучше использовать материалы, как нужно экранировать и проектировать чипы, чтобы частица не приводила к нарушению работы.
14. А что на Земле?
15. А что же защищает нас от этой беспощадной угрозы на Земле? Многие думают, что это наша атмосфера. Однако не все так просто. Главный наш защитник – это магнитосфера. Магнитное поле, как защитная оболочка вокруг Земли, экранирует большую часть заряженных частиц. *Без этого поля не было бы ни атмосферы, ни океанов, ни жизни на Земле. Если хотите представить себе, что было бы с землей без магнитосферы – посмотрите на Марс. Считается что его атмосферу и океаны просто «сдуло» солнечным ветром.*
16. Магнитное поле почти не пропускает заряженные частицы к поверхности, но и не может отразить их все обратно в космос. Значительная часть застревает посередине – в радиационных поясах Ван Аллена. Всего таких пояса два – внутренний (на расстоянии 4000 км из протонов) и внешний (на расстоянии 17 000 км из электронов)
17. А над Бразилией есть аномалия – она так и называется Бразильская Магнитная Аномалия (БМА). Там «защитный слой» магнитосферы истончается и космические аппараты, пролетающие на низких орбитах, оказываются беззащитными перед потоками космической радиации. Из всех магнитных аномалий Земли наиболее значительное влияние на потоки частиц (космических лучей) оказывает БМА. В этой области величина магнитного поля на уровне моря такая, как на высоте порядка 1000 км вне аномалий. Так, наблюдения орбитальным телескопом «Хаббл» из-за повышенного уровня радиации невозможны тогда, когда телескоп пролетает над этой аномалией.
18. Конечно, на поверхности Земли проблема космического излучения стоит не так остро. Но значит ли это, что радиационной стойкостью для микроэлектроники можно пренебречь?
19. Конечно нет
20. Существуют такие области, в которых всего одна ошибка может стоить очень дорого. Медицина, транспорт, энергетика – даже небольшой сбой контролирующего оборудования может привести к катастрофическим последствиям. Даже крохотный шанс такой ошибки недопустим. **А такой шанс есть.**
21. Хотя на Земле вероятность единичного сбоя из-за космического излучения в 300 раз ниже, чем на высоте 9000 метров, но иногда этому явлению приписывают самые необъяснимые события, которые происходят с компьютерной техникой.
22. Вы можете просмотреть отчет по одиночным сбоям за 2016 год
23. и примерный уровень ошибок из-за космического излучения в некоторых кремниевых микросхемах из исследования IBM за 1979 год.
24. В 2003 году в Бельгии проходили выборы.
25. В ходе компьютерного голосования, малоизвестная кандидатка случайно получила в одном из округов (городок Схарбек) на 4096 голосов больше, чем за неё в действительности проголосовали. После ручного пересчета голосов оказалось, что в реальности ее результат был меньше на 4096 голосов! Более того, количество голосов других кандидатов никак не изменилось! Такая разница могла получиться из-за изменения всего одного бита в регистре, который хранил результат Марии. После долгих разбирательств был сделан вывод, что самая вероятная причина ошибки – это попадание одиночной заряженной частицы в незащищенный триггер. Всего одна частица могла перевернуть исход выборов!
26. В 2013-м игрок на скорость в Super Mario 64 неведомым образом попал на недоступную обычным образом в игре платформу, которая улучшила его время в игре на несколько секунд. И до сих пор никто не смог это воспроизвести после него, включая его самого.
27. Это может указывать на то, что это могло произойти из-за одноразрядного изменения значения высоты Марио. Основная теория состоит в том, что этот переворот битов был вызван событием космических лучей, хотя вероятность такого события чрезвычайно редка.
28. Намного более опасный и страшный инцидент произошел на борту Airbus A330 направлявшемся из Сингапура в Перт в 2008 году.
29. Самолет внезапно изменил угол атаки, «упав» на 200 метров за 20 секунд, а потом сделал это ещё раз, травмировав в сумме более 100 человек на борту. Подобной ошибки ранее не встречались и не были выявлены производителем в ходе анализа безопасности. Компания «Airbus» заявила, что им не было известно о подобных инцидентах на других самолётах компании. И всё это, вероятнее всего, — из-за космических лучей, элементарных частиц с высокой энергией.
30. Самый громкий случай, связанный с космическим излучением и микросхемами произошел в 2012 году с Фобосом-Грунт, одним из наиболее амбициозных космических проектов современной России. Этот космический корабль должен был сесть на поверхность марсианской луны Фобос, собрать образцы почвы, и привезти их обратно на Землю. Но вместо этого он несколько недель беспомощно дрейфовал на низкой околоземной орбите (НОО) из-за отказа бортового компьютера перед запуском двигателей, которые должны были отправить корабль в сторону Марса.
31. В последовавшем отчёте возложили вину на тяжёлые заряженные частицы в составе галактических космических лучей, столкнувшиеся с чипами SRAM и вызвавшие отказ чипа из-за чрезмерной силы проходящего через него тока. Чтобы справиться с этой проблемой, два процессора, работавшие в компьютере ЦВМ22, запустили перезагрузку. После этого зонд перешёл в безопасный режим ожидания команд с Земли. К сожалению, инструкции так и не поступили. Если коротко, то в конкретной микросхеме произошел эффект ТЗЧ — тяжелой заряженной частицы.
32. Участники разработки, возможно, недооценили трудности работы компьютеров в космосе.
33. Как космос мешает компьютерам жить.
34. …
35. Начать разговор нужно с важного дисклеймера: радиационная стойкость не является центром мира и единственным качеством, которым должна обладать подходящая для использования в космосе или другой агрессивной среде микросхема.

Радиационная стойкость — это лишь одно требование из длинного ряда, включающего в себя надежность, расширенный температурный диапазон, устойчивость к электростатическому разряду, вибростойкость — и достоверное подтверждение всех вышеперечисленных параметров, то есть длительную и дорогую сертификацию.

1. Понятия «радиационная стойкость» и «радиационностойкая микросхема» — это грандиозные упрощения. На самом деле существует много разных источников ионизирующего излучения, и они могут влиять на функционирование электронных приборов по-разному. Соответственно, для разных применений необходима стойкость к разным наборам воздействующих факторов и разным уровням воздействия, так что «стойкая» микросхема, предназначенная для работы на низкой околоземной орбите совершенно не обязана нормально работать при разборе завалов в Чернобыле.
2. В «штуках частиц» космическое излучение состоит на 90% из протонов (т.е. ионов Водорода), на 7% из ядер гелия (альфа-частиц), ~1% более тяжелые атомы и ~1% электроны. Ну и звезды (включая солнце), ядра галактик, млечный путь — обильно освещают все не только видимым светом, но и рентгеновским и гамма излучением. Во время вспышек на солнце — радиация от солнца увеличивается в 1000-1'000'000 раз, что может быть серьёзной проблемой (как для людей будущего, так и нынешних космических аппаратов за пределами магнитосферы земли).
3. Нейтронов в космическом излучении нет по очевидной причине — свободные нейтроны имеют период полураспада 611 секунд, и превращаются в протоны. Даже от солнца нейтрону не долететь, разве что с совсем уж релятивистской скоростью. Небольшое количество нейтронов прилетает с земли, но это мелочи.
4. Ионизирующее излучение называется ионизирующим, потому что выделение в объеме вещества энергии при торможении прилетающих частиц ионизирует вещество. У каждого материала своя энергия, необходимая для ионизации и создания электронно-дырочной пары. Для кремния это 3.6 электрон-вольт, для его оксида — 17 эВ, для арсенида галлия — 4.8 эВ. Также прилетевшая частица может не ионизировать атом, а “сдвинуть” его с правильного места в кристаллической решетке (в кремнии для этого нужно передать атому 21 эВ). Созданные в веществе электронно-дырочные пары могут по-разному влиять на электрические и физические свойства и на поведение электрической схемы. Электроны, гамма и рентгеновское излучение
5. Когда гамма и рентгеновское излучение (в том числе вторичное, полученное из-за столкновения электронов с корпусом аппарата) проходит через микросхему — в подзатворном диэлектрике транзисторов начинает постепенно накапливаться заряд, и соответственно начинают медленно изменятся параметры транзисторов — пороговое напряжение транзисторов и ток утечки.
6. Другой специфический для транзисторов дозовый эффект состоит в том, что они могут (не обязательно) реагировать не только на уровень набранной дозы, но и на скорость ее набора — чем медленнее набирается доза, тем хуже стойкость. Этот эффект называется ELDRS (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity) и он сильно усложняет и удорожает тестирование КМОП-схем.
7. На разных орбитах полгощенная доза радиации разная.
8. На низкой орбите 300-500км (там где и люди летают на МКС) годовая доза может быть 100 рад и менее, соответственно даже за 10 лет набранная доза будет переносима гражданскими микросхемами. А вот на высоких орбитах >1000km годовая доза может быть 10'000-20'000 рад, и обычные микросхемы наберут смертельную дозу за считанные месяцы.
9. Обычная гражданская цифровая микросхема уже после 5000 рад может перестать нормально работать (впрочем, человек может перестать работать уже после 500-1000 рад).
10. При торможении на корпусе электронного устройства электронов, протонов, космических частиц возникают рентгеновское и гамма-излучение, тяжелые ионы. Попадая в КМОП-структуры эти частицы ионизируют затвор и подзатворный оксид (SiO2). В подзатворном окисле накапливается индуцированный излучением положительный заряд (рис.), а на границе раздела окисла с подложкой возникает паразитный проводящий слой. То есть изменяются рабочие характеристики транзисторов. Происходит смещение пороговых напряжений и увеличение токов утечки, изменяется время нарастания и спада фронтов и т.д. При этом старение интегральной схемы и степень разрушения зависят от суммарной дозы полученной радиации (Total Dose) и интенсивности облучения.
11. Помимо этого, гамма и рентгеновское излучение заставляет все pn переходы внутри микросхемы работать как маленькие «солнечные батареи» — и если в космосе обычно радиация недостаточна, чтобы это сильно повлияло на работу микросхемы, во время ядерного взрыва потока гамма и рентгеновского излучения уже может быть достаточно, чтобы нарушить работу микросхемы за счет фотоэффекта.
12. Затем — флеш/EEPROM память. Кто-то может еще помнить старые микросхемы памяти с ультрафиолетовым стиранием: Чтобы снизить стоимость, выпускалась и версия без кварцевого окна, считавшаяся однократно-программируемой. Но народные умельцы все равно умудрялись её стирать — рентгеновским излучением. Точно такой же эффект есть и в космосе — радиация мееедленно стирает данные в eeprom/flash памяти, поэтому все активно исследуют FRAM/MRAM память для космических применений (у нас этим занимается Интеграл и Ангстрем). Не стирается от радиации также память на пережигаемых и закорачиваемых перемычках — fuse и antifuse, с этим разбирается Микрон.
13. Но самая большая проблема космической электроники еще впереди.
14. Это – Тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) — протоны, альфа-частицы и ионы больших энергий
15. Эти частицы имеют такую высокую энергию, что «пробивают» микросхему насквозь (вместе с корпусом спутника), и оставляют за собой «шлейф» заряда. Возможно именно это было с Фобос-Грунтом — по официальной версии не-радиационно-стойкие импортные микросхемы памяти дали сбой уже на втором витке, а это возможно только из-за ТЗЧ (по суммарной набранной дозе излучения на низкой орбите гражданский чип мог бы еще долго работать).
16. У субатомных частиц космического излучения гигантская энергия, и в результате столкновения с материальными ядрами создаётся каскад новых частиц, которые порождают новые столкновения: пионы, нейтроны, протоны, мюоны, электроны, позитроны, фотоны.
17. Возрастает потребление питания, рассеивание тепла и может произойти термическое разрушение транзистора. Чаще всего неполадки происходят по причине случайных воздействий (Single Event Effects, SEE), когда тяжелые частицы (космические лучи, протоны, электроны, альфа-частицы, термические нейтроны и т.д.) попадают в ИС
18. В лучшем случае это может привести к программной ошибке (0 стать 1 или наоборот — single-event upset, SEU)
19. Вот как-то так
20. А это детектор космических лучей. Но мы с вами знаем, что он не будет работать, если SEU изменит while(true) на while(false)
21. Случайный сбой переключения свойственен как элементам памяти, так и стандартным схемотехническим элементам. Логический элемент может воспринимать импульс тока, вызванный излучением, как сигнал данных. Если это происходит одновременно с фронтом синхроимпульса, ложный сигнал сохраняется и может быть использован другими устройствами. Несмотря на то, что пострадавший логический элемент вернется к правильному состоянию, ложный сигнал может достигнуть памяти и изменить хранящиеся в ней данные. Чем выше частота тактовой синхронизации, тем больше вероятность SET (рис). Благодаря своему быстродействию современные приборы отреагируют на радиационный импульс, слишком короткий для предыдущих поколений ИС.
22. …в худшем — привести к тиристорному защелкиванию (single-event latchup, SEL). У защелкнутого чипа питание закорачивается с землей, ток может идти очень большой, и привести к сгоранию микросхемы. Если питание успеть отключить и подключить до сгорания — то все будет работать как обычно. Именно защелкивание ограничивает использование обычных наземных микросхем в космосе со всякими программными хитростями для увеличения надежности. Как с этим бороться мы рассмотрим в следующей части доклада.
23. Причины возникновения защелкивания – большая разность потенциалов на входе транзистора, вызванная излучением, и паразитные структуры, свойственные КМОП-технологии (пара p-n-p- и n-p-n-транзисторов образует структуру, подобную тиристору)
24. Бор используется для легирования кремния и в виде боросиликатного стекла для изоляции слоев металла. Проблема в том, что природный бор на 20% состоит из Бора-10, который очень хорошо реагирует с нейтронами с выделением альфа-частицы прямо в сердце микросхемы. Это приводило к ошибкам работы микросхем, особенно памяти.
25. Нейтроны получаются как вторичная радиация, или прилетают от земли, как мы помним в космической радиации их нет. 10B + n → [11B] → α + 7Li + 2.31 MeV. Эта одна из проблем которую удалось решить — используя для производства микросхем только изотоп 11B. Теперь нейтроны практически беспрепятственно проходят через микросхему, не вызывая ошибок. Это свойство бора кстати используется для экстренной остановки атомных реакторов — в него заливают борную кислоту, обогащенную изотопом 10B — альфа частицы там не проблема.
26. А вот теперь рассмотрим, как защитить наши интегральные схемы от частиц, излучений и всего такого.
27. … дальше лень описывать …