

УДК 53.043

## Відмова мікросхем у космосі

*Балашов К.Є., к.т.н., Семікіна Т.В.*

### Анотація

У цій роботі розглядаються умови використання мікросхем у космосі, особливості мікросхем, працюючих у космосі та причини їх відмов.

### Вступ

Космос – місце скупчення великої кількості радіації. Її джерело – Сонце та інші зорі, які постачають нам велику кількість протонів, електронів та ядра тяжких елементів. Мешканців Землі від радіації захищає магнітне поле, що збирає пролітаючі частинки в радіаційні пояси Землі (так звані пояси Ван Аллена)[1]. Вони ж - серйозна проблема для космічних апаратів, так що час, проведений ними в радіаційних поясах, намагаються мінімізувати. Тому, до мікросхеми, що знаходиться у космосі, ставляться певні умови:

- В першу чергу - підвищені вимоги до надійності (як самого кристала, так і корпусу), стійкості до вібрації і перевантажень, вологості, температурний діапазон - значно ширше, тому що військова техніка і в -40С повинна працювати, і при нагріванні до 100С.

- Потім - стійкість до вражаючих факторів ядерного вибуху - ЕМІ, великий миттєвої дози гамма / нейтронного випромінювання. Нормальна робота в момент вибуху може бути неможлива, але принаймні прилад не повинен необоротно вийти з ладу.
- І нарешті - якщо мікросхема для космосу - стабільність параметрів у міру повільного набору сумарної дози опромінення і виживання після зустрічі з важким зарядженим частинками космічної радіації (про це докладніше нижче).

### 1. Вплив космосу на мікросхему

Що відбувається, коли мікросхема потрапляє у космос? Основних ефектів два - накопичення повної поглиненої дози (Total Ionizing Dose, TID) і ефекти, пов'язані з впливом одиночних іонізуючих частинок (Single Event Effects, SEE).

*Накопичення повної поглиненої дози.*

Під дією іонізуючого випромінювання в мікросхемі відбувається утворення електронно-діркових пар. Ці пари в нормальних

умовах досить швидко рекомбінують (тобто відірваний електрон захоплюється атомом назад), проте в електричному полі дірки і електрони можуть розділятися (бо заряди протилежного знаку рухаються в поле у різні боки). Основний ізолятор, який використовується в кремнієвих мікросхемах - діоксид кремнію ( $\text{SiO}_2$ ). Рухливість електронів і дірок в  $\text{SiO}_2$  різниться на кілька порядків, тому електрони досить швидко вносяться у кремній, а дірки можуть накопичуватися в оксиді і особливо на кордоні оксиду з кремнієм.

Коли мікросхема потрапляє під вплив гамма і рентгенівського випромінювання (в тому числі вторинного, отриманого через зіткнення електронів з корпусом апарату) - в підзатворному діелектрику транзисторів починає поступово накопичуватися заряд, і відповідно починають повільно змінюватися параметри транзисторів - порогова напруга транзисторів і струм витоку[2]. Звичайна громадянська цифрова мікросхема вже після 5000 рад може перестати нормально працювати (втім, людина може перестати працювати вже після 500-1000 рад).

#### *Одиночні іонізуючі частинки*

Друга проблема полягає у впливі одиночних заряджених частинок на мікросхему. Одиночні (Тяжкі) заряджені частинки (ТЗЧ) — протон, альфа-частинки та іони великих енергій - це найбільша проблема космічної електроніки. ТЗЧ мають таку високу енергію, що

«пробивають» мікросхему наскрізь (разом з корпусом супутника), і залишають за собою «шлейф» заряду. У кращому випадку це може привести до програмної помилки (0 може стати 1 або навпаки –так званий «одиночний збій» - single-event upset, SEU), в гіршому - привести до тиристорного замикання (single-event latchup, SEL). У замкненого чіпа живлення закорочується з землею, тому може з'явитися дуже великий струм, який приведе до згорання мікросхеми. Якщо живлення встигнути відключити і підключити до моменту згорання - то все буде працювати як зазвичай.

Боротися з замиканням можна декількома способами:

1) Стежити за споживаним струмом, і швидко переключати живлення

2) Використовувати мікросхеми на сапфіровій підкладці (Silicon-On-Sapphire, SOS, в більш загальному вигляді Silicon-On-Insulator, SOI) - це виключає формування біполярних паразитних транзисторів і відповідно замикання. Програмні помилки, проте, все одно можуть бути. Пластини кремній-на-сапфірі коштують дорого, обробляти їх складно, і вони мають обмежене застосування в цивільному секторі - відповідно виробництво виходить дорогим.

3) Використовувати так званий Triple-well процес - він також дуже сильно знижує можливість замикання мікросхеми за рахунок додаткової ізоляції транзисторів рп-переходом, але не вимагає якихось особливих пластин або обладнання і відповідно

саме виробництво набагато дешевше кремнію на сапфірі.

## 2. Методи захисту

Розглянувши особливості космічних мікросхем, принципи їх побудови та види негативного впливу, стає логічним таке питання – чи існують якісь методи захисту? На жаль, практично немає[2]. Природа з усмішкою дивиться на іграшкові прискорювачі елементарних частинок людей - на великому адронному колайдері ними були (вірніше будуть) досягнуті відносно малі енергії в 7 TeV для протонів, і 574 TeV для іонів свинцю. А з галактичними космічними променями до нас іноді прилітають частинки з енергією  $3 \times 10^{20}$  eV, тобто 300000000 TeV. Звідки беруться такі частинки - ще питання, тому що це вище теоретичної межі енергії космічних частинок Грайзена - Зацепіна - Кузьміна. У більш зрозумілих одиницях, це близько 50Дж, тобто в однієї елементарної частинки енергія як у кулі дрібнокаліберного спортивного пістолета. Коли така частка стикається, наприклад, з атомом свинцю радіаційного захисту - вона просто розриває його на шматки. Осколки також матимуть гігантську енергію, і також будуть розривати на шматки все на своєму шляху. В кінцевому підсумку - чим товще захист з важких елементів - тим більше осколків і вторинної радіації ми отримуємо. Свинцем можна сильно послабити тільки відносно м'яку радіацію земних ядерних реакторів. Аналогічним ефектом володіє і гамма-випромінювання високих енергій -

воно також здатне розривати важкі атоми на шматки за рахунок фотоядерні реакції.

Через всі ці проблеми радіаційний захист з важких елементів, як на землі - в космосі не використовують. Використовують захист, який здебільшого складається з алюмінію, водню (з різних поліетиленів і інші), тому що його розбити можна тільки на субатомні частинки - а це набагато складніше, і такий захист генерує менше вторинної радіації. Але в будь-якому випадку, від ТЗЧ захисту немає, більше того - чим більше захисту - тим більше вторинної радіації від високоенергетичних частинок, оптимальна товщина виходить близько 2-3мм Алюмінію. Найскладніше що є - це комбінація захисту з водню, і трохи більше важких елементів (т.зв. Graded-Z) - але це не сильно краще чисто «водневого» захисту. В цілому, космічну радіацію можна послабити приблизно в 10 разів, і на цьому все. Аналогічним ефектом володіє і гамма-випромінювання високих енергій - воно також здатне розривати важкі атоми на шматки за рахунок фотоядерні реакції.

## 3. Приклад використання

В якості прикладу, можна сказати про космічний комп'ютер RAD750. RAD750 -радіаційно-стійкий одноплатний комп'ютер на базі однойменного процесора, виробляється компанією BAE Systems Electronic Solutions (США)[3]. Застосовується в середовищах з

підвищеною радіоактивністю, таких як супутники і космічні апарати. Він може витримати рівень радіації від 200 000 до 1 млн рад та його діапазон робочих температур сягає від  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $125^{\circ}\text{C}$ . Використовується у таких апаратах як Deep Impact, Mars Reconnaissance Orbiter, Телескоп Kepler і тд.

Його продуктивність менша за продуктивність сучасного мобільного телефону, але сягає ціни у кілька сотень тисяч доларів через його трудомістке виробництво та використання спеціальних матеріалів.

### **Висновки**

У роботі проаналізовано жорсткі умови космосу, а саме: великі перепади температури, високі рівні радіації, присутність важких і швидких літаючих тіл (комети, астероїди і тд.) та інші несприятливі

умови. Боротьба з цими проблемами забирає багато часу, роботи та коштів і є досить актуальною проблемою сучасної електроніки.

### **Література**

1. Валерий Шунков. «Физика радиационных эффектов, влияющих на электронику в космосе». Режим доступа: <https://habr.com/post/189066/>
2. Михаил Сваричевский. «Микроэлектроника для космоса и военных». Режим доступа: <https://habr.com/post/156049/>
3. Комп'ютер RAD750. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RAD750>