

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Princip měření Single Event Efektů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marcel MELIŠ**
Osobní číslo: **E10B0078P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Princip měření Single Event Efektů**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte zdroje ionizujícího záření.
2. Prostudujte vliv ionizujícího záření (SEE) na polovodičové elektronické komponenty.
3. Prostudujte možnosti měření a detekce SEE.
4. Detailně zpracujte současné metody měření SEE.
5. Navrhněte systém, který by měl umožnit měření vlivu SEE na elektronické integrované obvody.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Kraus**


Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na Single Event Efekty (SEE). Obsahuje popis zdrojů záření způsobující Single Event Efekty. Rozřazení SEE na dočasné a trvalé poruchy a popisy vzniku a principů. Jsou zde popsány fyzikální principy vzniku Single Event Efektů a rozdělení způsobu jejich testování. Stručný popis některých z urychlovačů částic a laboratorní způsoby měření SEE. Také jsou v práci popsány některé, důležité vlivy objevující se během testování. Na závěr práce jsou zmíněny pixelové a stripové detektory a jejich možné využití při měření SEE.

Klíčová slova

Single Event Efekty, SEE, Ionizační záření, LET, Linear energy transfer, těžké ionty, měření a testování SEE

Abstract

The master theses is focused on Single Event Effects (SEE). Contains a description of sources of radiation causing Single Event Effects. Contains a classification of SEE on hard and soft errors and description principles and origin. There are described physical principles of Single Event Effects and classification method of testing. Brief description of some of particle accelerators and laboratory measurement methods of SEE. Also, the work described some important factors occurs during testing. At the end of the work are discussed Strip and pixel detectors and their possible use in the measurement of SEE.

Key words

Single Event Effects, SEE, Ionizing radiation, LET, Linear energy transfer, heavy ion, measure and testing of SEE

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2013

Marcel Meliš

Obsah

| | |
|--|--|
| OBSAH | 7 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 8 |
| 1 ÚVOD | CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA. |
| 2 ZDROJE ZÁŘENÍ ZPŮSOBUJÍCÍ SEE | 10 |
| 2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP ZPŮSOBUJÍCÍ SEE | 10 |
| 2.2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA VZNIKU IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ | 10 |
| 2.3 IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ ZPŮSOBUJÍCÍ SEE | 11 |
| 2.3.1 <i>Neutronové záření</i> | 11 |
| 2.3.2 <i>Alfa záření</i> | 11 |
| 2.3.3 <i>Kosmické záření</i> | 11 |
| 2.3.4 <i>Sluneční záření</i> | 12 |
| 2.3.5 <i>Zachycené částice v magnetosféře - Van Allenovy radiační pásy</i> | 12 |
| 3 VLIV IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ NA ELEKTRONIKU | 14 |
| 3.1 GENEROVÁNÍ NÁBOJE | 14 |
| 3.2 HROMADĚNÍ NÁBOJE | 15 |
| 3.3 REAKCE OBVODU | 16 |
| 3.3.1 <i>Trvalé chyby</i> | 16 |
| 3.3.2 <i>Dočastné chyby</i> | 21 |
| 4 TESTOVÁNÍ SEE | 24 |
| 4.1 TESTOVÁNÍ V URYCHLOVAČI ČÁSTIC | 24 |
| 4.1.1 <i>Generátory pro těžké ionty</i> | 24 |
| 4.1.2 <i>Protonové generátory</i> | 25 |
| 4.2 TESTOVÁNÍ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ | 26 |
| 4.2.1 <i>Metoda s využitím pulsního laseru</i> | 26 |
| 4.2.2 <i>Soustředěný iontový paprsek</i> | 26 |
| 4.2.3 <i>Využití fragmentů ze štěpení California 252</i> | 27 |
| 4.3 SAMOTNÉ MĚŘENÍ SEE | 27 |
| 4.3.1 <i>Testování těžkými ionty</i> | 27 |
| 4.3.2 <i>Testování pomocí protonů</i> | 28 |
| 4.3.3 <i>Experimentální měření v závislosti na poloze</i> | 29 |
| 4.4 VLIV TESTOVACÍCH PODMÍNEK | 30 |
| 4.4.1 <i>Energie částic</i> | 30 |
| 4.4.2 <i>Úhel dopadajícího záření</i> | 30 |
| 4.4.3 <i>Vysoký tok částic</i> | 30 |
| 5 VYUŽITÍ STRIPOVÝCH A PIXELOVÝCH DETEKTORŮ NA MĚŘENÍ SEE | 31 |
| 5.1 STRIPOVÝ DETEKTOR | 31 |
| 5.2 PIXELOVÝ DETEKTOR | 31 |
| 5.3 VYUŽITÍ PRO MĚŘENÍ SEE | 31 |
| 6 ZÁVĚR | 32 |
| SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ | 34 |

Seznam symbolů a zkratek

| | |
|----------------|---|
| ASET..... | Analog Single Event Transient |
| CMOS..... | Complementary Metal–Oxide–Semiconductor |
| DMOS..... | Diffusion Metal Oxide Semiconductor |
| DRAM..... | Dynamic Random Access Memory |
| DSET..... | Digital Single Event Transient |
| ECC..... | Error-Correction Code |
| EEPROM..... | Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory |
| IO..... | Integrovaný Obvod |
| LET..... | Linear Energy Transfer |
| MOSFET..... | Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor |
| MUB..... | Multi-Bit Upset |
| SBU..... | Single-Bit Upset |
| SEB..... | Single Event Burnout |
| SEE..... | Single Event Effect |
| SEFI..... | Single Event Functional Interrupt |
| SEGR..... | Single Event Gaterupture |
| SEL..... | Single Event Latchup |
| SER..... | Single Event Rate |
| SES,SESB..... | Single Event Snapback |
| SET..... | Single Event Transient |
| SEU..... | Single Event Upset |
| SHE..... | Single Hard Error |
| SRAM..... | Static Random Access Memory |
| θ | úhel antoční přípravku |
| σ | citlivost přípravku na SEE |

1 Úvod

Single Event Efekty (SEE) jsou důsledky ionizace na polovodičové součástky. Tedy například na tranzistory, které jsou základem dnešních integrovaných obvodů, pamětí atd. Bez tranzistorů si dnešní výpočetní techniku nelze představit. Ovšem se současným pokrokem a stále větší a větší miniaturizací, jsou právě tyto součástky při využití například pro lety do vesmíru, na satelity nebo jen v dopravních letadlech, vystaveny stále většímu riziku. Právě miniaturizace způsobuje stále větší nárůst výskytu SEE a dokonce i objevování nových SEE. V této práci se budu věnovat právě popisu jednotlivých SEE, jejich vzniku i původu faktorů způsobujících SEE a jejich měření.

2 Zdroje záření způsobující SEE

2.1 Základní princip způsobující SEE

Obvyklou příčinou všech chyb typu Single Event Effect (dále jen SEE), je průchod vysokoenergetického iontu přes polovodivé nebo izolační materiály použité při výrobě integrovaných obvodů. Elektrony ani neutrony nemohou generovat dostatečnou energii k přímému způsobení SEE, přesto neutrony mohou způsobit SEE nepřímo při jaderném štěpení. Nejčastěji jsou SEE tedy způsobeny vysoko energetickými částicemi, jako jsou těžké ionty, protony nebo Alfa částice.[4]

2.2 Fyzikální podstata vzniku ionizujícího záření

Radioaktivita je schopnost některých atomů samovolného rozpadu (přeměny) na atomy jednodušší a vyzáření elektromagnetického záření nebo částic. Za nestabilitou některých jader atomů je, že mají nadbytek protonů nebo neutronů v jádře. Další možností je, že se jedná o tak těžké a složité prvky, že nemohou existovat ve stabilním stavu. Nuklid je soubor stejných atomů, u kterých je přesně určen počet protonů a neutronů. Nuklidy stejného prvku, u kterých atomy mají stejný počet protonů, ale různý počet neutronů se nazývají izotopy. Radionuklid je nestabilní nuklid, podléhající samovolné radioaktivní přeměně. Radioizotop je oproti tomu nestabilní izotop prvku a podléhá samovolné radioaktivní přeměně. [1]

Energie záření je důležitou charakteristikou radionuklidu nebo ionizujícího záření. Souhrn všech energií záření daného radionuklidu se nazývá energetické spektrum. Některý zářič může vysílat záření několika druhů a s různou energií.[2]

- ***Přímá ionizace***

Probíhá jen u nabitých částic, s dostatečnou energií pro přímou ionizaci pozitrony, elektrony a protony. Především částice vytvořené alfa a beta zářením. [1]

- **Nepřímá ionizace**

Pouze u nenabitých částic, tedy neutrony, fotony a záření gama (tj. fotony vytvořené v jádrech atomů). Nenabitá částice při interakcích s atomy či jejich jádry uvolňují přímo ionizující částice nebo vyvolávají jaderné přeměny provázené emisí takových částic. [1] Tedy vytváří částice dostatečně nabitá pro ionizaci. [12]

2.3 Ionizujícího záření způsobující SEE

2.3.1 Neutronové záření

Vysoko energetické neutrony, které jsou přítomné v atmosféře a na zemi, vyplývají z interakce atmosférických plynů a vysoko energetických subatomárních částic ze slunce a vesmíru. Neutron po střetnutí s atomem křemíku v polovodiči v integrovaném obvodu způsobí vznik těžkých iontů. Tyto těžké ionty mohou způsobit okamžité proudové impulsy, které způsobují změny např. logických členů, paměťových buněk atd.[5] U Paměti Vystavených neutronovému záření, je větší náchylnost na vznik SEE a chybám jako je například změna u logických členů (např. AND na NAND). [4]

2.3.2 Alfa záření

Alfa částice jsou emitovány přirozeně se vyskytujícími radioaktivními izotopy. Alfa částice jsou nejčastěji generovány nečistotami v pouzdrech integrovaných obvodů (IO), především uranem a thoriem. I s dnešními technologiemi a nejvyšší možnou čistotou křemíku je velikost příměsí dostatečná pro vznik nežádoucích efektů. Přítomnost sloučenin s Uranem (U238) a Thoriem (Th232) v pouzdře IO způsobují změny v sekvenčních obvodech (v paměťových obvodech, registrech atd.) [5]

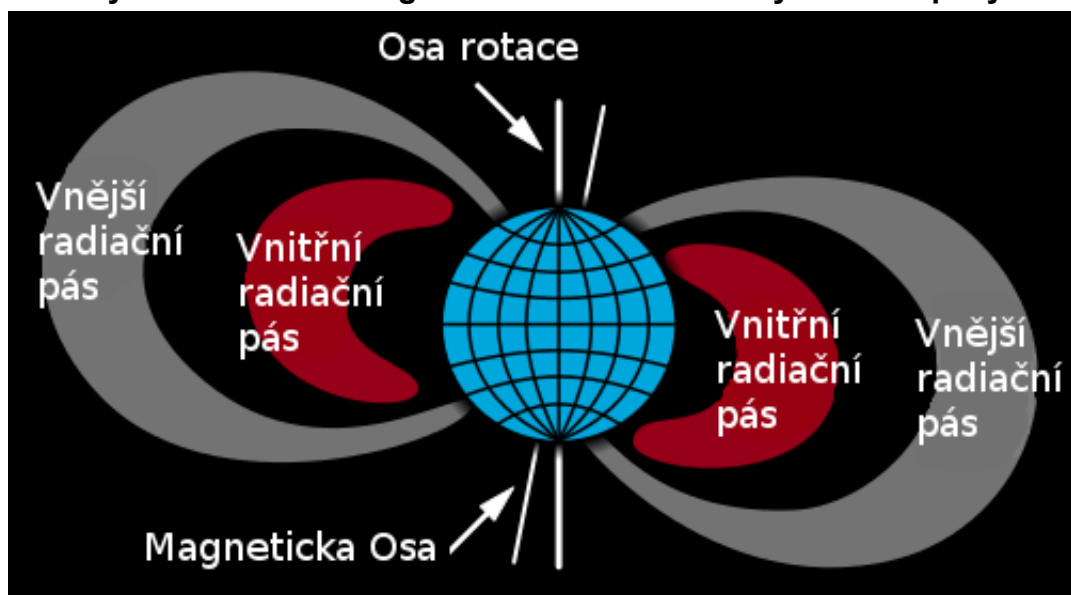
2.3.3 Kosmické záření

Kosmické záření obsahuje energetické částice. Energie kosmického záření se pohybuje od 10^9 eV do cca 10^{20} eV [13] Předpokládá se, že se jedná o zbytky z explozí supernov, pocházejících z oblasti mimo sluneční soustavu, ale někde v naší galaxii. Jedná se o nepřetržitý, nízký výskyt záření obsahuje převážně protony (87%) a alfa částice (12%) a velmi malou část tvoří těžké ionty (1%).[5]

2.3.4 Sluneční záření

Slunce v naší sluneční soustavě je zdrojem sluneční energie. Tedy i některých druhů záření způsobující SEE. Nejvíce se projevuje vliv slunce vznikem slunečních erupcí, jde o obrovské výbuchy na jeho povrchu. Uvolňující energii v řádech miliard megatun TNT, jedná se o momentální ohřev o miliony stupňů celsia a to vše v rámci minut.[4] Sluneční erupce lze pozorovat, nejčastěji poblíže slunečních skvrn, které značí větší sluneční aktivitu. Erupce uvolňují energii v mnoha formách - elektro-magnetické záření (gama záření), energetické částice (protony a elektrony) a velké množství koronální hmoty. [5]

2.3.5 Zachycené částice v magnetosféře - Van Allenovy radiační pásy



obr. 1 Van Allenovy radiační pásy (překresleno z [7])

Van Allenovy radiační pásy vznikají díky zachycování slunečního větru v magnetickém poli Země. Záření ze slunečního větru se zachycuje v magnetosféře (Obr. 1). Zachycené částice jsou odpuzovány z oblastí silného magnetického pole, kde se pole sbíhá. Vlivem toho částice létají tam a zpět mezi zemskými póly, kde magnetické pole narůstá.[6]

- **Vnější pás**

Velký vnější pás radiace se nachází ve výšce od 10 tisíc do 65 tisíc km, nejintenzivnější je ve výšce 14,5 tisíc až 19 tisíc km.[5]

Přítomnost částic ve vnějším pásu je různá. Obsahuje elektrony a různé ionty. Většina iontů je ve formě protonů, ale určité procento jsou tzv. alfa částice a kladné ionty kyslíku (O^+), podobné těm v ionosféře, ale s mnohem vyšší energií. Na hodnotu okolo 1MeV intenzita

stoupá v případě větší sluneční aktivity. Tedy v případech kdy sluneční vítr dorazí k zemi. Částice ve vnějším pásu pocházejí především ze slunečního větru. [6]

Je větší a rozptýlenější než vnitřní pás, je obklopený oblastí s nízkou intenzitou, zvanou pásový proud. Na rozdíl od vnitřního pásu jsou částice ve vnějším pásu proměnlivější a obecně mají nižší energii (méně než 1 MeV). [5][6]

- ***Vnitřní pás***

Vnitřní Van Allenův pás se rozkládá zhruba ve výšce od 1000 do 32000 km od povrchu země. Obsahuje vysoké koncentrace energetických protonů s energií přes 100 MeV, zachycených silným (ve srovnání s vnějším pásem) magnetickým polem v této oblasti. Protony s energií vyšší než 50 MeV v nižších výškách jsou důsledkem interakce neutronových částic z kosmického a slunečního záření a plynů v atmosféře. Zdrojem protonů s nižší energií je pravděpodobně difúze protonů závislá na změnách v magnetickém poli během geomagnetických bouří.[6]

Prostor mezi vnitřním a vnějším pásem je způsoben díky nízkofrekvenčním rádiovým vlnám, které případné částice vytlačují ven. Částice, které mohou do toho prostoru proniknout díky větší aktivitě slunce, zde setrvají maximálně několik dní, než jsou vytlačeny zpět do oblasti pásů.[6]

3 Vliv ionizujícího záření na elektroniku

V předchozí části byly popsány zdroje ionizujícího záření. Tato kapitola je věnována jeho vlivu na elektronické součástky a Single Event Efekty (SEE). Nejčastější příčinou pro všechny SEE, je průchod nabitého iontu přes materiály použité při výrobě integrovaných obvodů. Elektrony ani neutrony samy o sobě nedokáží generovat dostatečnou energii pro vytvoření SEE přímo, ale mohou být dodatečně nabity pomocí některého z předchozích případů, které jsou zmíněny v kapitole 1.1. Na vzniku SEE se podílí vysokoenergetické částice, jako jsou protony, alfa částice a těžké ionty. Energetické ionty, při průchodu materiálem vytvoří kolem trajektorie iontu páry elektron díra. Pokud stopa prochází skrz např. polovodičový přechod p/n nebo oxidem tranzistoru MOSFET, způsobuje řadu chyb. Ty jsou popsány v samostatné kapitole 2.1.2[5]

Vliv energetických částic na polovodičové součástky lze nejlépe pochopit, pokud si proces rozdělíme do tří částí. Generování náboje, hromadění náboje a reakce obvodu. Generování náboje závisí na průchodu iontu součástkou, na jeho energii a na vlastnosti materiálu, přes který prochází. Hromadění náboje oproti tomu závisí na elektrických parametrech materiálu, jako jsou použité napěťové hladiny a způsobu dotování. Poslední je reakce obvodu, ta závisí na typu součástky a jejím zapojení do obvodu.[5]

3.1 Generování náboje

Ionizující záření generuje náboj v polovodičovém zařízení přes dva primární mechanismy, které mohou poškodit IO nebo změnit chování IO. Jedná se o přímou a nepřímou ionizaci. Obě ionizace jsme již zmínili v kapitole 1.2, ale pouze jako princip jejich vzniku, dále se budeme zabývat spíše jejich vlivem na polovodičová zařízení.

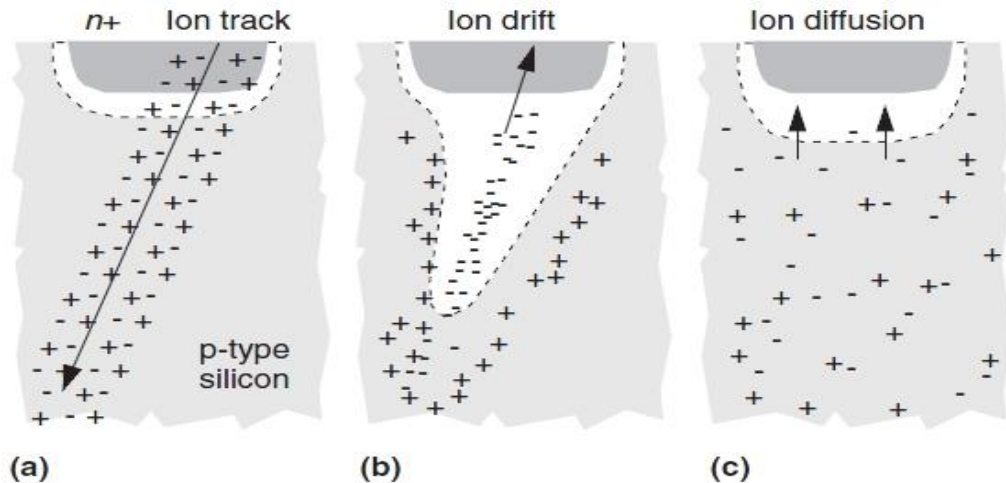
Nepřímá Ionizace: Jak již bylo zmíněno výše, nepřímá ionizace je důsledek ionizujícího záření a jeho interakcí s hmotou. Po střetu s hmotou vznikají sekundární částice. Energetické částice v tomto případě protony a neutrony mohou působit značné rušení, když projdou elastickou kolizí s jádrem v cílové součástce. Jako příklad jaderných reakcí, které mohou být způsobeny při střetnutím s IO (integrovaný obvod) lze uvést: 1) odtržení atomů křemíku Si 2) Alfa/Gama částice a odtržení přidružených jader 3) Štěpení jader, kdy se jádro rozdělí na dva oddělené prvky každý se svou dráhou a energií. Každá z těchto reakcí může produkovat

částice těžší, než byli původní neutron nebo proton. Neelastické srážky nemají tendence rozptylu částic a většího štěpení než jen v místě dopadu. U sekundárních částic a elastické srážce může nastat řetězová reakce a proto více záleží na citlivosti mikroelektrických obvodů na SEU (Single Event Upset viz kapitola 3.3.2.1). [11][21]

Přímá ionizace: Při přímé ionizaci se bavíme o situaci, kdy některá z energeticky nabitých částic pronikne skrz polovodičový materiál. Díky energii, kterou nese po proniknutí polovodičovou vrstvou, vytvoří v dráze svého průniku páry elektron-díra, čímž postupně ztrácí svoji energii. Po spotřebování energie se částice zastaví a zůstává nečinná v polovodiči. Podle energie částice se samozřejmě liší hloubka vniku zde je k měření využít tzv. „Linear Energy Transfer“ (LET). Hodnota LET vlastně popisuje ztrátu energie částice na jednotku délku v materiálu. Jednotkou LET je MeVcm^2/mg , protože ztráta energie na jednotku délky (MeV/cm) je normalizována na hustotu materiálu (mg/cm^3), takže při využití jednotky LET nezáleží na cílovém materiálu. Jednotku LET lze tedy snadno využít při přepočtu na náboj v jednotce délky. Takže kupříkladu LET pro křemík $97 \text{ MeVcm}^2/\text{mg}$ je $1\text{pC}/\mu\text{m}$. [21]

3.2 Hromadění náboje

Při proniknutí částice je nejcitlivější oblastí PN přechod. Především uzavřený PN přechod. Právě uzavřený PN dokáže velmi efektivně využít nově vzniklý náboj ve vyprázdněné oblasti. Jak je naznačeno na obr.2a při průchodu těžkého iontu skrz polovodičovou oblast se vytvoří stopa párů elektron-díra. Poté dochází k následnému „driftu“ v tomto případě elektronů, tedy jejich zpětnému sběru do vodivé oblasti (obr.2b), kdy je vytvořena hlavní proudová špička. A nakonec dochází k rozptylu zbylého náboje, který už nemá dostatečnou energii na překonání vyprázdněné oblasti. [5][21]



Obr. 2 a) Průchod iontu PN přechodem s naznačenou vyprázdňenou oblastí, b) „drift“ sběr dominantních nosičů (hlavní proudová špička) c) následný rozptyl náboje (převzato z [40])

3.3 Reakce obvodu

Jak již bylo uvedeno, ozáření může mít za následek poškození zařízení v důsledku tvorby náboje a sběru generovaného náboje. Reakce obvodu na toto ozáření může být dvojího typu. Trvalá (destruktivní) a nebo dočasná.

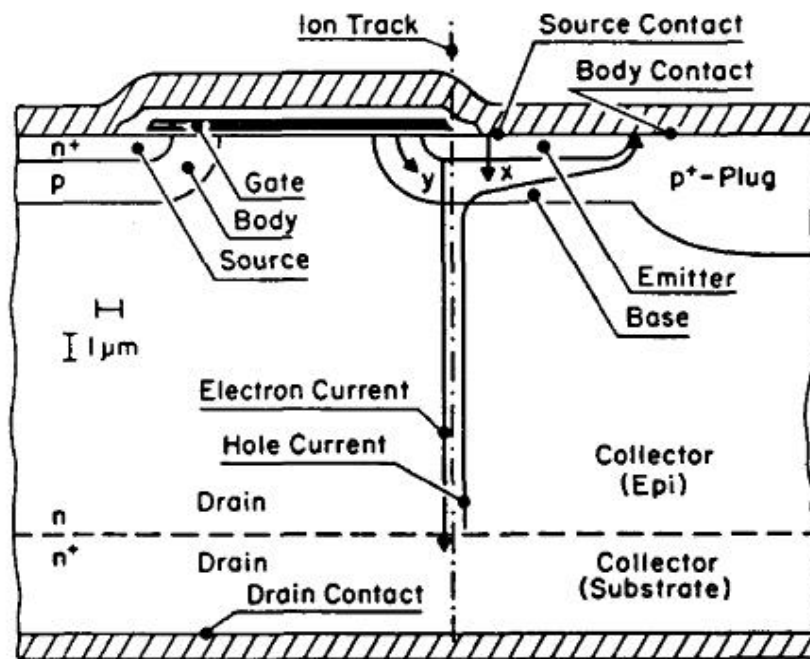
3.3.1 Trvalé chyby

V anglické literatuře se lze s nimi setkat pod pojmem „hard errors“. V zásadě jde o nevratné poškození funkčnosti obvodu, typicky zahrnuje fyzické poškození součástky. Až na SEL nebo SESB, kde lze včasnou reakcí destrukci zabránit. Jedná o nevratné poruchy. Máme zde tři hlavní typy destruktivních poruch: Single Event Burnout (SEB), Single Event Gate rupture (SEGR), Single Event Latchup (SEL), Single Event Snapback (SESB), Single Hard errors (SHE). [5][10]

3.3.1.1 Single Event Burnout (SEB)

Porucha Single Event Burnout (SEB) byla poprvé pozorována u tranzistorů MOSFET. V dnešní době se s touto poruchou lze setkat hlavně v souvislosti s výkonovými tranzistory DMOS. Jedná se o destruktivní poruchu, která je způsobena průchodem těžkého iontu. Při průchodu těžkého iontu, skrz oblast elektrody Source (S) a dotované oblasti N⁺ do substrátu na elektrodě Drain (D), za sebou vytvoří stopu obsahující páry elektron-díra, kde díky rychlému nárůstu proudu, vznikne vláknitá stopa tvořená plazmou vedoucí po dráze průniku

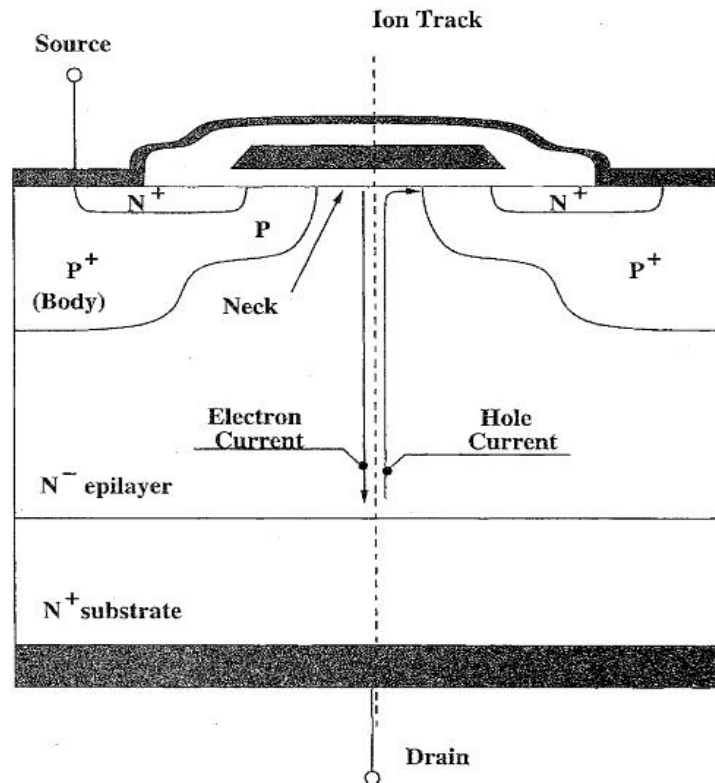
iontu. Ta vytváří zkrat mezi elektrodami S a D. Na obr. 3 lze vidět směr pohybu elektronů a děr. Náhlý nárůst proudu vede k silnému ohřevu a tepelnému poškození tranzistoru.[15][14]



obr. 3 Struktura u paralelního zapojení výkonových tranzistorů MOSFET a průchod těžkého iontu při SEB (převzato z [14])

3.3.1.2 Single Event Gate Rupture (SEGR)

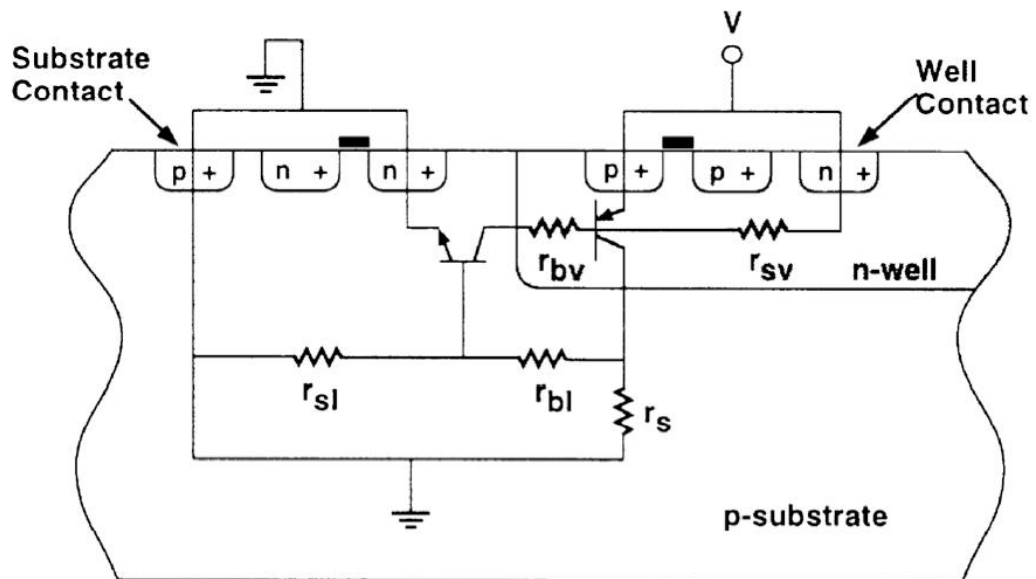
Při klasické zapojení u výkonového MOSFETu se jedná o tisíce paralelně zapojených buněk, jako jsou znázorněny na obr. 3 a obr. 4. Oblast „neck“ (obr. 4) je v podstatě oblast mezi jednotlivými buňkami. SEGR nastává právě v případě, projde-li těžký iont právě touto oblastí. Energie uložená v tomto iontu vytváří po celé své dráze (v křemíku i v jeho oxidu) páry elektron-díra. V případě, že na elektrodě Drain je přivedeno kladné napětí a jedná-li se o MOSFET s kanálem typu N, jsou páry vytvořené podél trajektorie iontu rozděleny. Díry jsou přitahovány směrem k rozhraní Si-SiO₂ a elektrony zase směrem k elektrodě Drain, tak jak je znázorněno na obr. 4. Nahromaděné díry u přechodu Si-SiO₂ a jejich náboj zrcadlený na elektrodu Gate, způsobí nárůst elektrického pole přímo v oxidu. V případě, že je elektrické pole dostatečné dojde ke spálení oxidu a zkratu z elektrody Gate přes substrát do Drain.[5][16][17]



obr. 4 Průnik těžkého iontu a tok nosičů při SEGR v MOSFET (převzato z [16])

3.3.1.3 Single Event Latchup (SEL)

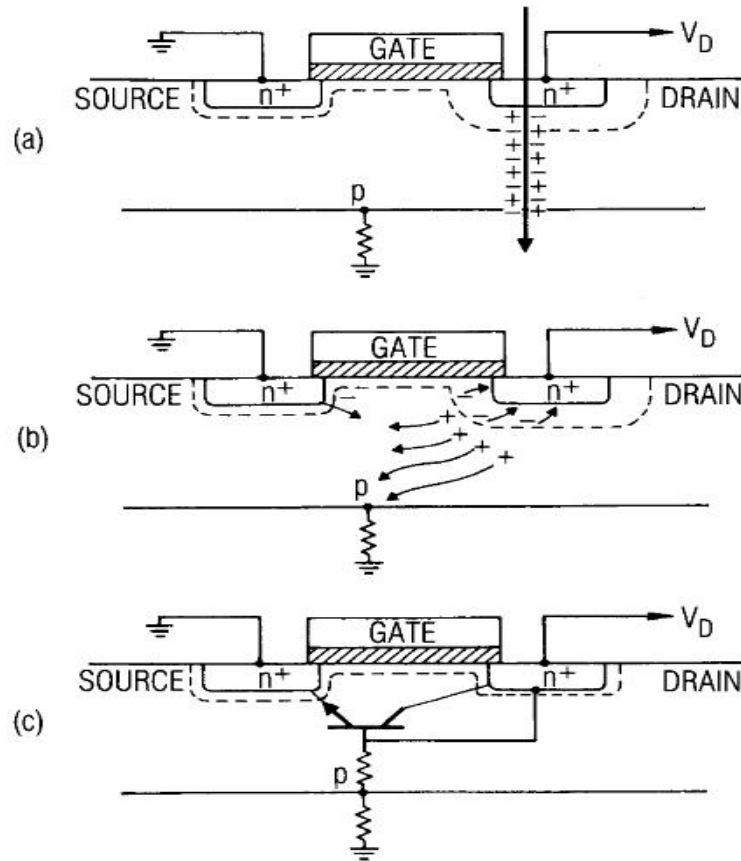
Vzniká u struktury CMOS a to kvůli parazitní struktuře (tyristoru) NPNP znázorněné na obr. 5, která je běžná u CMOS technologií. Při sepnutí této struktury dochází k vyzkratování napájecích větví. Latchup efekt lze spustit vnucením nadměrného proudu na vstup nebo na výstup, tedy do PN přechodů. Po sepnutí parazitní tyristorové struktury je jedinou možností pro jeho rozpojení odpojení obvodu od zdroje. V případě rychlé reakce nemusí dojít ke zničení součástky. V případě SEL je Latchup spuštěno po průchodu částice oblastí polovodičové jámy typu N (N-well), kde díky svojí energii ve své dráze vytvoří stopu párů elektron-díra. Ty vedou k přechodnému zvětšení proudu, když jsou nosiče přitahovány do oblasti kontaktu, což vede k sepnutí parazitní struktury zobrazené na obr. 5. [11][18][19][20]



obr. 5 Parazitní latchup struktura u CMOS (Překresleno z [11])

3.3.1.4 Single Event Snabback

SESB nebo také pouze SES. Jedná se o další z destruktivních chyb. Je velmi podobná SEL, ovšem jsou zde dva základní rozdíly. Na rozdíl od SEL se parazitní struktura způsobující zkratový proud uzavírá pouze přes tři vrstvy a ne přes čtyři jako je tomu právě u SEL. Zkrat se uzavírá z Drain s kanálem typu N do kontaktu source ve stejné vrstvě. Oproti tomu u SEL dochází ke zkratování source s kanálem typu P do Drain s kanálem typu N. Lze se s ním setkat u tranzistorů MOSFET s kanálem typu N využívaných v CMOS strukturách a u tranzistorů vyrobených technologií SOI. SESB nenastává u tranzistorů s délkou kanálu větší než $3\mu\text{m}$ [36]. Po průchodu těžkého iontu skrz Drain za sebou vytvoří pás párů elektron-díra (obr.6a). Tyto nosiče jsou poté rozděleny a přitahovány k elektrodám (obr.6b), čímž vytvoří elektrický náboj dostatečný k vytvoření proudu, který zkratuje obě elektrody přes parazitní strukturu naznačenou na obr.6c. Destruktivním účinkům SESB lze předejít včasným odpojením od zdroje nebo převrácením polarity napájení.[36][37]



Obr. 6 Princip vzniku SESB (převzato z [36]) - a) průnik těžkého iontu a vytvoření párů elektron-díra, b) následný pohyb elektronů a protonů, c) parazitní struktura způsobující SESB

3.3.1.5 Single Hard errors

Jedná se o jednu z destruktivních poruch, v anglické literatuře se lze v souvislosti s SHE také setkat s výrazem „stuck bit“ nebo-li „uvíznutí“ bitu. Lze se s ní setkat v polovodičových pamětech (SRAM, DRAM atd.). Po dostatečně velké dávce energie uložené v polovodiči může dojít k destruktivní poruše u jednotlivých buněk, kdy již nebudou schopny změnit svojí hodnotu proto výraz „uvíznutí“ bitu. SHE je způsobeno přímým průchodem jednoho nebo více iontů skrz oxid umístěný na svorce Gate. Po nasbírání dostatečné dávky záření, dojde k trvalému otevření tranzistoru a nevratnému přepnutí do otevřeného stavu. Jedná se o podobný princip narušení oxidu, jako se vyskytuje u SEGR, pouze v tomto případě jde o tranzistory využívaných v pamětech, takže daleko menší a využívající menších napětí. Jde tedy o problém s hromaděním náboje v oblasti oxidu po nárazu těžkého iontu. Nahromaděné nosiče díky zrcadlení na elektrodu Gate, zvýší elektrické pole v oxidu a může dojít k průrazu dielektrika. V tomto případě se jedná o mikroskopické změny, ale i přesto mohou způsobit nevratné „překlopení“ tranzistoru. Z toho vyplývá, že již nelze tranzistor změnit. Proto

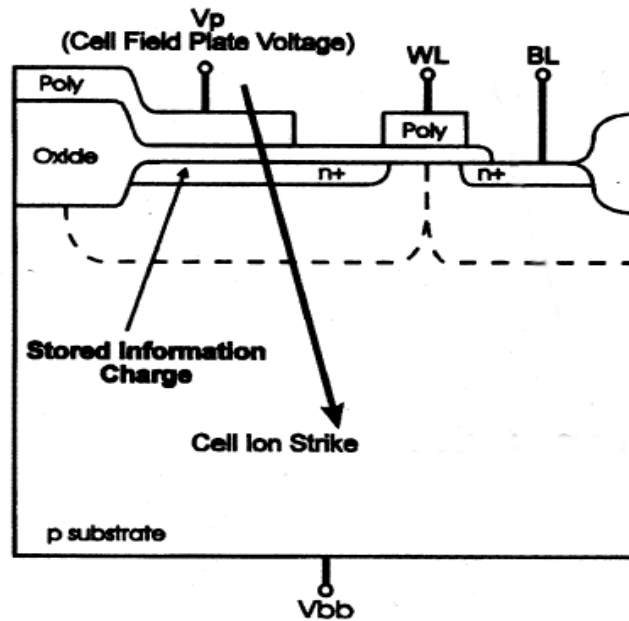
následně v paměti funguje jako neměnný bit. Tato porucha se objevila až se zmenšováním tranzistorů používaných v pamětech, kdy se objevuje u tranzistoru s tloušťkou oxidu pod $0,5\mu\text{m}$ [33].[34][35]

3.3.2 Dočastné chyby

Jedná se o nedeštruktivní chyby, které vznikají po vystavení IO ionizaci. Především se do této skupiny řadí falešné signály a přechodné proudy, které mohou například způsobit problémy u rozhodovacích úrovní, změnit hodnotu v paměťové buňce atd. Tyto chyby jsou v anglické literatuře označovány jako „soft errors“. Do této skupiny patří poruchy Single Event Transient (SET), Single Event Upset (SEU), Multi Bit Upset (MBU), Single Event Functional Interrupt (SEFI). Dočasné chyby se na rozdíl od těch deštruktivních mohou vyskytnout vícekrát, a proto je zde zavedena SER (Single Event rate) tedy v podstatě ukazatel chybovosti u jednotlivých IO. SER je udáváno v jednotce FIT (failures in time), která určuje počet vyskytnutých chyb za 10^9 hodin provozu zařízení. [28]

3.3.2.1 Single Event Upset (SEU)

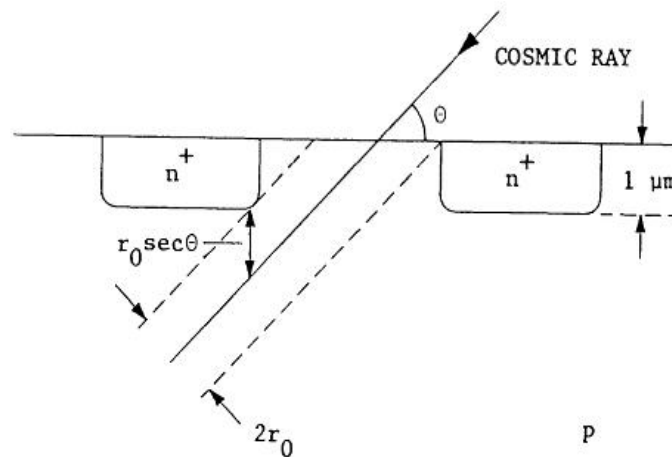
Jedná se o jednu ze „soft“ poruch, tedy nedeštruktivních. V anglické literatuře se lze také setkat s označením „single bit-upset“. Na rozdíl například od SEB nebo SEGR, se lze s SEU setkat běžně i v letových hladinách pro leteckou dopravu. SEU je změna uložené hodnoty (bitu) v paměti. Proto když se bavíme o SEU, bavíme se o paměťových buňkách, registrech atd. Jak již bylo zmíněno několikrát, částice po průchodu polovodičovou vrstvou za sebou vytvoří stopu párů elektron-díra. V tomto případě dojde k vytvoření přechodného zvýšení náboje. A právě tento náboj nám v případě SEU způsobí změnu uložené hodnoty. Kupříkladu změnu z uložené 0 na 1. Z toho lze tedy snadno odhadnout, že nejčastěji jsou napadány právě paměti typu SRAM a DRAM. Na obr. 7 je vidět průchod nabití částice skrz paměť DRAM, při které je způsoben SEU (Cell ion strike). Iont prochází skrz oblast, ve které je uložena hodnota. Hodnota je u tohoto příkladu uložena v paměti DRAM, tedy je využita parazitní kapacita tranzistoru a po průchodu částice dojde ke změně náboje. SEU lze opravovat pomocí ECC (error-correction code). Jedná se o speciální kód ke kontrole dat uložených v dynamických pamětech.[41][37][40]



obr. 7 Průchod nabité částice skrz paměť DRAM při SEU (převzato z [41])

3.3.2.2 Multi Bit-upset (MBU)

Jedná se o chybu podobnou SEU, akorát v tomto případě není změněna pouze jednoho bitu ale celého bitového slova. Tato chyba musí být vyvolána jednou částicí, protože kdyby každou z chyb vyvolala jiná částice, jednalo by se pouze o několik SEU. MBU většinou způsobí částice, projde-li pod určitým úhlem skrz nebo okolo několika buněk v paměti, tak jak je naznačeno na obr. 8, kde způsobuje poruchu ve dvou bitech v jedné paměti. Díky přenosu náboje způsobeného vzniklými páry elektron-díra, může způsobit změnu v uložení buňce např. inverzi z uložené hodnoty 0 na 1. Na obr. Je naznačen pouze dvoubitová porucha, ale v pamětech DRAM, kde je osazení tranzistory realizováno ve větší hustotě, může dojít až k několikanásobné změně hodnot. Stejně jako u SEU lze i tyto chyby opravovat pomocí ECC.[29][30]



Obr. 8 Multi Bit-upset v tomto případě dvou bitový způsobený průchodem částice (převzato z [29])

3.3.2.3 Single Event Functional Interrupt (SEFI)

Jak naznačuje název, jedná se o poruchu, která vede k selhání funkčnosti obvodu. SEFI je v podstatě souhrnný výraz pro všechny přerušení během ozařování zařízení. Vyskytuje se v mikroprocesorech, v A/D převodnicích, lze se s ním setkat například i u paměti (např. DRAM, EEPROM atd.). Je způsoben jednou částicí stejně, jako je tomu v případě SEU. Odhalit SEFI je náročnější, protože jeho výskyt nedoprovází náhlá proudová špička, jako je tomu třeba u SEL nebo SESB. V případě paměti ho lze dokonce zaměnit s SEU, pouze dlouhodobějším pozorováním (opakovaná chyba na stejné adrese) lze SEFI odhalit. Odhalení samotné příčiny SEFI se odvíjí od složitosti testovaného zařízení. Je samozřejmé, že u paměti lze důvod špatné hodnoty odhalit daleko jednodušeji než přerušení u mikroprocesoru, kde toto přerušení může způsobit více faktorů. Většinou doprovází, některé běžněji se vyskytující poruchy, například v paměťových buňkách SEL. SEFI lze odstranit pouze znovu přeprogramováním nebo resetováním postiženého zařízení. SEFI nejčastěji způsobuje chyby typu: 1) Nereagování na příkazy „read“ a „write“ u paměti DRAM (nelze hodnoty číst ani zapisovat) 2) opakované špatné bity v bitovém slově i po odeznění záření (EEPROM) 3) Příkaz k zastavení po SEU způsobeného v procesoru a jeho setrvání do restartování zařízení (mikroprocesory). Ačkoliv SEFI většinou doprovází některé z ostatních chyb, jeho výskyt není tolik běžný jako například u chyb SEU a to i během vlivů záření. [31][32]

3.3.2.4 Single Event Transient (SET)

SET způsobuje změnu výstupu některého z hradel. Jde o hromadění náboje v citlivém uzlu logických obvodů, dokud jeho hodnota nepřekročí hraniční hodnotu a nezpůsobí přechodný impulz. Z toho vyplývá, že ačkoliv může také ovlivnit uložené hodnoty v pamětech jako SEU,

nedosahuje toho přímo, ale například přivedením pulzu způsobeného SET na klopný obvod během hodinového pulzu. Chybě typu SET lze předejít dostatečně vysokou rozhodovací úrovní, které by impulz nedosáhl. Bohužel v dnešní době zmenšování napájecích napětí a tedy i rozhodovacích úrovní je stále náročnější tento falešný signál rozeznat. U SET rozlišujeme dva druhy poruch a to Analog Single Event Transient (ASET) a Digital Single Event Transient (DSET). [21][27]

Analog Single Event Transient (ASET):

Jedná se o druh SET. Objevuje se především v lineárních bipolárních IO, komparátorech atd. Nejvíce citlivé je použití darlingova zapojení při využití bipolárních tranzistorů. [39]. Stejně jak bylo zmíněno u SET, vytváří přechodnou hodnotu, které může dále ovlivnit připojené obvody.[21]

Digital Single Event Transient (DSET):

Jedná se o poddruh SET, který se vyskytuje v IO. V CMOS logických hradlech, v křemíkových bipolárních tranzistorech použitých v logických obvodech atd. [27]

4 Testování SEE

Při měření SEE je důležitým ukazatelem rozsah testovaného LET a množství vyslaných částic. Při testování celého rozsahu hodnot LET je zapotřebí urychlovač částic. Proto před měřením je důležité zhodnotit jak cenu, přístupnost tak i časovou náročnost jednotlivých testů. V této kapitole se budu věnovat jednotlivým testům a několika význačnějším zařízením, která se využívají na tyto měření.

4.1 Testování v urychlovači částic

4.1.1 Generátory pro těžké ionty

Těžké ionty, které jsou převážně z kosmického záření a solárních, větrů lze simulovat pomocí různých urychlovačů.

4.1.1.1 Van de Graaffův urychlovač

Prvním z těchto urychlovačů je Van de Graaffův urychlovač. Jedná se o dva Van de Graaffovi generátory s iontovou trubicí. Dokáže vytvářet elektrické pole přibližně až do hodnoty 10MeV/u (megaelektrovolty na atomovou hmotnostní konstantu). Je schopný celkem rychle měnit různé druhy iontů a je o něco málo nákladnější na provozování než ostatní generátory. Jeho výhodou je, že zvládá i menší hodnoty LET pro testování jednotlivých zařízení. Nevýhodou Van de Graaffova generátoru je jeho omezený rozsah vytvořené energie, proto je v některých případech nemožné využít částice s vyšším protonovým číslem.[22][23]

4.1.1.2 Cyklotron

Dalším z využívaných urychlovačů je cyklotron. K urychlování částic dochází pomocí elektrických a magnetických polí. Tento urychlovač zvládá urychlovat velké množství různých iontů a to ve velkém energetickém spektru 10-100MeV/u. Díky velké energetické kapacitě urychlovače, lze měnit ionty a jejich energie podle potřeby pro testování daného zařízení. Nevýhodou toho to urychlovače je ovšem zdlouhavá změna druhů iontu a jejich energií.[22][23][24]

4.1.1.3 Synchrotron

Synchrotron je vysoko energetický generátor, dosahuje hodnot 100-1000 MeV/u. Proto se hodí i k testování vesmírných podmínek bez stínění. Princip je stejný, jako u cyklotronu akorát magnetické pole je modulováno tak, aby částice zvyšovaly svou energii, ale neměnily křivku svého pohybu. Tyto vysoko energetické generátory jsou skvělé právě na simulaci vesmírného prostředí bohužel jejich budování a udržování je velmi nákladné a obsluha je velmi složitá.[22]

4.1.2 Protonové generátory

Jedná se v podstatě o stejné urychlovače jako v případě těžkých částic. Jediný rozdíl je v tom, že na způsobení SEE potřebuje energeticky silně nabitý proton v rozmezí 10-500MeV. Proton s menší energií bohužel nedokáže dané poruchy vyvolat. Proto je potřeba protonů se stejnou energií, jako jsou ze solárního větru nebo v radiačním pásu země. Jediný způsob je tedy využívat pouze vysoko energetické urychlovače částic.[22][23]

4.2 Testování v laboratorním prostředí

Testování v urychlovačích částic je mnohdy nákladné a zdouhavé, proto v některých případech testů lze využít některých z níže uvedených testů proveditelných v laboratorním prostředí.

4.2.1 Metoda s využitím pulsního laseru

Pomocí laserového paprsku a změně jeho vlnové délky a intenzity, lze simulovat průnik těžkého iontu skrz IO. Tato metoda je díky nastavitelné intenzitě laseru vhodná právě pro určování časových a prahových hodnot SEE. Dále lze laserový paprsek synchronizovat například s hodinovým signálem IO a testovat zranitelnost obvodu SEE právě během hodinového signálu. [22][23] Bohužel i při využívání pulsního laseru narážíme na jistá omezení:

- 1) Laserem nelze dosáhnout různé počáteční dráhy iontů a protonů. Ta nám ovlivňuje hodnotu LET a je proto náročnější na určení prahové hodnoty způsobující SEE.[22]
- 2) Měření průniků částic není možné provádět přímo. Je nutné citlivé body v IO dopočítávat s pomocí nákresů obvodu.[22]
- 3) Laser nedokáže proniknout skrz kov. Tento problém vzniká hlavně v případě, že jsou citlivé body na SEE pokovovány.[22]

4.2.2 Soustředěný iontový paprsek

Jeho velkou výhodou je možnost korigování množství částic a jejich šíři. Využívá se zde metoda elektromagnetické čočky, která dokáže zaměřit iontový paprsek přímo na rozhraní PN. Zde je IO skenován a zaznamenává energetické výkyvy, které vznikají po dopadu těžkých iontů.[26] Proto může být využit při testování jednotlivých citlivých míst v IO. Díky této metodě lze i snadno vylučovací metodou určit body citlivé na SEU, vysláním pouze jedné částice. Nevýhodou toho to měření je, že s průnikem pouze jedné jediné částice se v reálném použití daného IO nesetkáme.[22][23]

4.2.3 Využití fragmentů ze štěpení California 252

Californium je velmi užitečným zdrojem záření právě pro laboratorní testy. Californium během štěpení dosahuje dvou energetických hodnot a to 80MeV a 110MeV.[23] A jeho hodnota LET dosahuje průměrně hodnot okolo 42 MeVcm²/mg. Při využívání California a jeho štěpných fragmentů je jeho hlavní nevýhodou jeho hloubka průniku, která je značně nízká (např. u křemíku jen něco okolo 18 μm) a rychlá ztráta energie. Proto při jeho využívání je nutné brát ohled na měřené SEE a nevyužívat ho v případech, kdy je nutný hlubší průnik částice jako je například u SEL, kdy částice proniká hlouběji do substrátu. Přesto je využití California levnou a rychlou možností pro testování IO například před testováním v urychlovačích.[22][23]

4.3 Samotné měření SEE

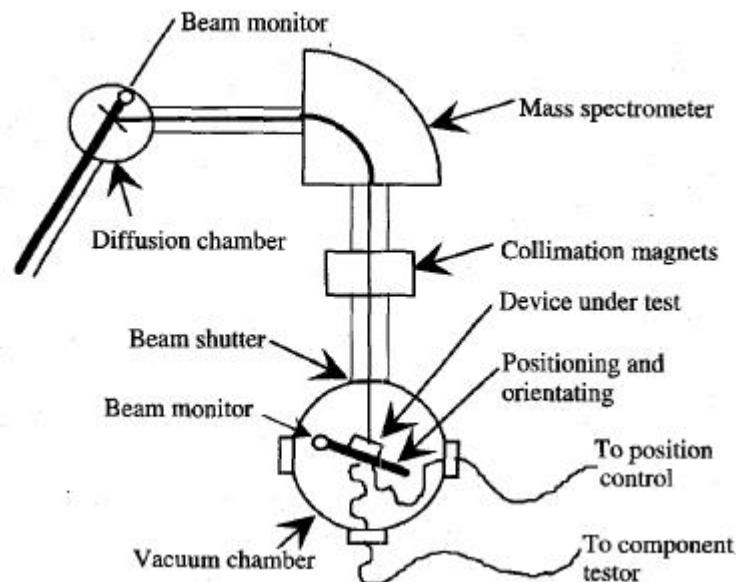
Pro testování se nejčastěji využívá urychlovač, který poskytuje dostatečný rozsah, jak energií, tak i druhů částic. Urychlovače částic pro vysoko energetické částice jsou velmi drahé a náročné na obsluhu, proto se zde budu více zabývat urychlovači pro nižší a střední energii částic (Van de Graaffův urychlovač a cyklotron), které jsou v praxi využívány častěji. Samozřejmě pro protonové testování musí být vždy využity vysoko energetické urychlovače.

4.3.1 Testování těžkými ionty

Paprsek využitý při testování těžkými ionty musí být samozřejmě bez jakýchkoliv znečišťujících příměsí a musí mít přesně definovaný druh vysílaných částic, energii (tedy LET), a množství iontů, které „protečou“ danou oblastí. Tok iontů by se měl pohybovat v rozmezí 10²-10⁵ iontu/(cm²s). LET částic by mělo být v rozsahu 0,7-40 MeVcm²/mg s hloubkou vniku při kolmém dopadu větší než 40μm. Pro nastavení paprsku na tyto hodnoty se využívá 1) měření toku a plynulosti toku částic spojení scintilačního detektoru a fotonásobiče nebo povrchový detektor Si (počítání částic v reálném čase). 2) energetické omezovače nastavené před zahájením testu. Mezi vybavení potřebné k testování patří: 1) Vakuová komora s potřebnými kolektorovými průchodkami pro napájení a přenos signálu. Samozřejmě s dosimetry pro nastavení potřebných vlastností paprsku a jeho nastavení na

měřenou část. 2) Držák na vzorek a jeho možnosti nastavení. 3) Zaměřovače a klapky k ovládání paprsku[22][23]

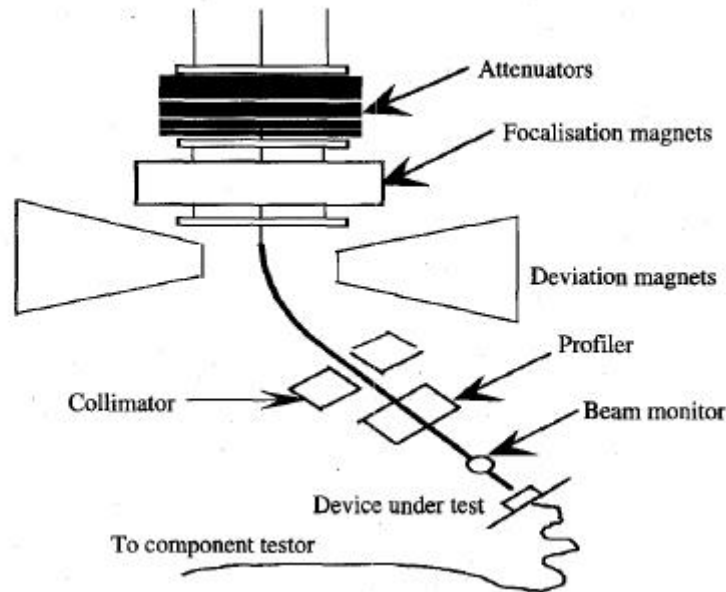
Na obr. 9 vidíme využitou tzv. nepřímou metodu, kdy paprsek prochází skrz zlatou folii, kde dochází k omezování toku a jeho rozptylu.



obr. 9 Ukázka měření pro těžké ionty středních hodnot energie (IPN Orsay, Francie) část "Mass spectrometer" slouží k vybírání druhu záření z několika různých izotopů (převzato z [22])

4.3.2 Testování pomocí protonů

Důležitým parametrem pro testování SEE za pomoci protonů jsou: 1) energie částic a jejich rozlišení, 2) tok protonů, ten se obvykle pohybuje v hodnotách 10^8 - 10^9 částic/cm²s. Vzhledem k vysoké energii protonů generovaných cyklotronem (10-500MeV) lze paprsek využívat i ve vzduchovém prostředí. energii protonů lze modifikovat využitím tlumičů z různých materiálů (Titanium, Aluminum atd.) a o různé tloušťce. Konečná energie se spočítá jako ztráta v tlumičích a ve vrstvě vzduchu, kterou proton musel projít. Za účelem odstranění sekundárního záření (gamma paprsky, neutrony, zbylé částice po jaderných reakcích) je dobré umístit mezi tlumiče a zkušební desku vychylovací magnety. Obr. 10 zobrazuje urychlovač částic s názvem SATURN a jeho uspořádání při měření SEE.[22][23]



obr. 10 Urychlovač SATURN pro měření pomocí protonů (CEA-Saclay) (převzato z [22])

4.3.3 Experimentální měření v závislosti na poloze

Především u částic se střední hodnotou energie je toto testování důležité, kvůli ne zrovna velké hloubce vniku. Zařízení je vystaveno paprsku při normální pokojové teplotě. Zatímco pozice a úhel měřeného přípravku je měněna za pomoci motorizovaného nástavce. Testovací systém mezitím vyhodnocuje případné chyby. Proudový zdroj je samozřejmě monitorován a v případě náhlého vzrůstu protékajícího proudu (tedy vzniku SEL) odpojí zařízení od napájení, aby zabránil destrukci. Po odeznění efektu je znovu měření spuštěno a začíná nové měření. [22][23]

Měření přípravku je prováděno paprskem částic, který má známé složení i energii. Díky tomu můžeme porovnat počet chyb SEE a tok vyzářených částic. Přehled SEE (SEE cross-section) je počet chyb SEE na jednotku toku částic a děleno úhlem, pod kterým paprsek dopadá na měřený prvek (θ je úhel dopadajícího paprsku vzhledem ke kolmé ose čipu). [22][23][24] Citlivost na SEE lze tedy popsat následujícím vzorcem:

$$\sigma = \frac{\text{počet SEE}}{\text{tok částic} \left[\frac{\text{počet částic}}{\text{cm}^2} \right] \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

Samozřejmě i LET je závislé na úhlu dopadu, protože na úhlu závisí energie předaná danému vzorku. To lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$LET(\theta) = \frac{LET(0)}{\cos \theta} \quad (2)$$

4.4 Vliv testovacích podmínek

Během testování nesmíme zapomínat i na vliv prostředí a podmínky, které během testování panují. Je nutné je započítat do měření a podle možností i výsledky přizpůsobit.

4.4.1 Energie částic

U nízko a středně energetických zařízení se předpokládá, že při simulaci vesmírného prostředí lze určit hromadění náboje pomocí určení LET. Tento předpoklad je, pravdivý jen v určitých podmínkách. Významné rozdíly lze zaznamenat protože: 1) LET je spojená se ztrátou energie při srážce iontu, ale ne všechna energie je v oblasti způsobující SEE, 2) LET je pouze průměrná hodnota a není zde započítáno statistické vyjádření hodnoty. Některé studie také prokázali, že hromadění náboje je rozdílné pro částice se stejnou LET, ale rozdílnými energiemi.[23] Také vedlejší přenos náboje při průniku těžkého iontu může způsobit další chyby a to od SEE až po některé závažnější.[22][23][24]

4.4.2 Úhel dopadajícího záření

Dráha částice má také vliv na reakci obvodu, tím je myšleno, že LET je ovlivněno úhlem, pod kterým částice dopadají. I přesto, že je náboj uložen v citlivé části zařízení nemusí přechodná amplituda odpovídat měřítku nahromaděného náboje a to právě v závislosti na úhlu dopadu. To může vést až k tomu, že data nebudou odpovídat vzorci $LET(\theta) = LET(0^\circ)/\cos(\theta)$, proto při experimentálním měření musí být použito dostatečné množství částic (energií), aby došlo k překrývání hodnot a vyloučili se chyby, před přechodem na další druh iontů. To samé platí při postupné změně LET.[22][23]

4.4.3 Vysoký tok částic

Tato podmínka nás zajímá například v případech pulsních paprsků částic, kdy okamžitá hodnota vyzářeného toku částic je daleko větší než průměrná hodnoty u citlivých zařízení. Rozsah toku musí být vybrán, aby odpovídal dosimetru a statistické hodnotě pro měřené chyby. Ve skutečnosti se musí tok těžkých iontů a protonů udržovat relativně nízko, aby bylo možné upravit chybovost na testeru, rychlostí odpovídající SEU a aby nedošlo k několika stejným SEU během jednoho testu. Lze zde totiž pozorovat několika násobné zaseknutí bitu

v SRAM, kdy oxid na Gate u tranzistoru v paměťové buňce několikrát zasáhne částice.[22][23][24]

5 Využití stripových a pixelových detektorů na měření SEE

5.1 Stripový detektor

Využívá pro měření dráhy a energie procházejících iontů stejného efektu, který způsobuje SEE. Tedy vytváření párů elektron-díra v dráze průniku iontu skrz polovodičovou vrstvu. Polovodičová vrstva je rozdělena do pruhů „stripů“ ty slouží ke sběru náboje a určení polohy. Pro získání všech prostorových informací je nutné umístit stripy oboustranně. Stripy jsou od sebe odděleny pomocí vrstev SiO₂ kvůli zamezení přeskočení náboje mezi jednotlivými stripy. Stripy mají šířku v rozsahu desítek až stovek μm . [38]

5.2 Pixelový detektor

Principiálně funguje stejně jako stripový detektor. Hlavním rozdílem je, že zde dostáváme rovnou dvou rozměrnou informaci díky rozdělení do matice pravoúhelníků. Částice jsou snímány právě těmito body „pixely“. Největším problémem při malých rozměrech pixelů je odvod náboje z něj. To je vyřešeno pomocí techniky flip chip, kdy se pod plošky připraví chip, jehož vstupní plošky kopírují pixely a jsou vodivě spojeny.[38] Díky této technologii by bylo možné CMOS strukturu měřenou na SEE, rovnou připojit k této využitě na zaznamenávání částic. Nemělo by se jednat o propojený systém a to kvůli tomu, že případné chyby v záznamu procházejících částic, které by mohly vyplívat z SEE by byli nežádoucí a mohly by způsobit značné chyby. Proto by bylo vhodné pixelový detektor raději propojit i se stripovým kvůli ověřování údajů.

5.3 Využití pro měření SEE

Stripové nebo pixelové detektory lze využít při měření SEE díky jejich vlastnosti změřit dráhu a energii prošlých částic. Díky přesnosti, kterou detektory nabízejí lze změřit důležité hodnoty pro SEE. Ať je to energie nebo dráha, která je nutná pro způsobení jednotlivých SEE nebo citlivé body. Zrovna body citlivé na SEE jsou pro celkové pochopení SEE a jejich vlivu na obvod velmi důležité. Jak již bylo několikrát zmíněno v předchozích kapitolách dráha

pronikajícího iontu má značný vliv na reakci obvodu. Nejen místo dopadu, ale i úhel, pod kterým daná částice dopadá. Díky stále většímu počtu integrovaných součástek na stále menší ploše je i celkem pravděpodobné, že pod určitými úhly lze zaznamenat více poruch a to nejen stejného druhu. Samozřejmě se musí brát v potaz energie částice a její následná ztráta v materiálu. Přesto úhel a dráha dopadu jsou důležitou informací při modelování SEE. Při využití těchto detektorů je ovšem kladen velký důraz na kvalitu měřících přístrojů a na záznam jednotlivých údajů. Především kvůli následnému porovnávání údajů a jejich správnému vyhodnocení. Záznam průchodů iontů a následné porovnávání s naměřenými SEE lze použít pouze při koncentrovaném paprsku, protože při větším svazku vyzářených částic by měření bylo zbytečné. A to kvůli nemožnosti detekovat částicí působící například SEU.

6 Závěr

I přesto že se lze se zářením způsobující SEE setkat i v pozemním využití IO, nejvíce ho lze pozorovat v oblasti vesmírného prostoru. Jak je zmíněno v kapitole 1.3.5 nejvíce částic, je obsaženo v magnetosféře. Tedy ve Van Allenových pásech, kde dochází zachycování nejen kosmického záření, ale především i slunečního větru. Van Allenovi pásy jsou velmi významnou oblastí, způsobují problémy především letů do kosmu a družicovým systémům. A to díky vysoce nabytým částicím (vnější pás okolo 1MeV, vnitřní pás až okolo 100MeV).

Hlavním zdrojem SEE jsou Alfa částice, těžké ionty, neutrony a protony jejich vytvoření a zdroje jsou detailněji popsány v kapitole 1.3. Neutrony a protony na rozdíl od ostatních SEE většinou způsobují nepřímou ionizaci, protože na přímou nemají dostatek energie. Během přímé ionizace při modelování SEE je pro nás důležitá hodnota LET tedy energie ztracená na jednotku délky při průniku pevnou látkou. LET se udává v jednotkách MeVcm^2/mg . Vše je detailněji popsáno v kapitole 2.1.

Právě přímá a nepřímá ionizace je základem generování náboje, který se podílí na SEE. Další důležitým principem je hromadění náboje, které probíhá v polovodičové vrstvě po průchodu těžkých iontů, před vznikem samotné SEE. Pro lepší pochopení ho lze rozdělit na tři části. Na průnik iontu do polovodiče a vytvoření „stopy“ párů elektron-díra. „Driftu“ neboli zpětného sběru nově uvolněných elektronů, tedy i vytvoření přechodné proudové špičky a následného rozptylu zbylého náboje.

Nejdůležitější je ovšem reakce obvodu ta se liší podle místa zásahu iontu a zasažené části. Tyto reakce se rozdělují na „hard“ a „soft“ chyby. „Hard“ chyby jsou destruktivní tedy trvalé. Patří sem například Single Event Burnout, který způsobuje vyhoření tranzistoru, nejčastěji se s ním v dnešní době setkáme u výkonových tranzistorů DMOS. Dále sem patří například SEL. Ten způsobuje sepnutí parazitní tyristorové struktury, která je běžná u struktury CMOS. Další jsou například SEGR atd. všechny jsou detailněji popsány v kapitole 2.3.1.

Do „soft“ poruch, které jsou v kapitole 2.3.2. Patří třeba SEU, který způsobuje změnu v uložené hodnotě v paměťové buňce nebo SET, který způsobuje přechodný proud na výstupu logických hradel.

Testování SEE se provádí několika různými způsoby. Buď v urychlovačích nebo v laboratorním prostředí pomocí například pulsních laserů nebo pomocí štěpných fragmentů California252. (kapitola 3.2)

Urychlovače jsem rozdělil na dvě základní kategorie. Na generátory těžkých iontů a na protonové generátory. Toto rozdělení vychází z toho, že na ionizaci pomocí protonů je zapotřebí daleko větších energetických hodnot a to 10-100MeV. A těch dokáží dosáhnout jen některé urychlovače. (např. cyklotron nebo synchrotron). Jsou zde popsány nejvíce využívané urychlovače používané právě pro měření SEE. (kapitola 3.1)

Samotné měření je také rozdělené na měření těžkými ionty a protony. Díky rozdílnosti v energiích je potřeba i mírně jiného přístupu i vybavení k těmto měřením. Důležitou součástí je ovšem experimentální měření, kde je zmíněno, že při vzniku SEE záleží nejen na zdroji záření a na energii nebo LET částice, ale také na úhlu dopadu. Ten nám velmi ovlivňuje právě i hodnotu LET. (kapitola 3.3)

V kapitole 4 využití stripových a pixelových detektorů při měření SEE navrhuji jejich případné využití při detekci SEE. Tedy využití jejich vlastnosti rozpoznat místo průniku iontu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MACHTL, Karel. Polovodičové součástky jako dozimetry. In: Pedagogická fakulta Jihočeské univerzity: Fakulta fyziky [online]. 2002 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Polovodicove%20soucastky%20jako%20dozimetry.pdf>
- [2] ULLLMANN, Vojtěch. Ionizující záření. In: Jaderná a radiační fyzika [online]. 2000 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>
- [3] Ionizující záření. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Ionizující_záření
- [4] Single Event Effects: Mechanisms and Classification. In: NICOLAIDIS, Michael. Soft errors in modern electronic systems [online]. New York: Springer, c2011 [cit. 2013-04-29]. Frontiers in electronic testing, 41. DOI: 978-1-4419-6992-7. Dostupné z: <http://www.springer.com/978-1-4419-6992-7>
- [5] BALASUBRAMANIAN, Anupama. MEASUREMENT AND ANALYSIS OF SINGLE EVENT INDUCED CROSSTALK IN NANOSCALE CMOS TECHNOLOGIES [online]. Nashville, Tennessee, 2008 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: http://etd.library.vanderbilt.edu/ETD-db/available/etd-08202008-122228/unrestricted/AnupamaBalasubramanian_PhDdissertation_2008.pdf. Dissertation. Faculty of the Graduate School of Vanderbilt University.
- [6] Van Allenovy radiační pásy. In: IHY 2007 Mezinárodní heliofyzikální rok 2007 [online]. 2007 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://ihy2007.astro.cz/index.php/souvislosti/van_allen_belts/
- [7] Van Allenovy pásy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Van_Allen_radiation_belt.svg
- [8] Single Event Effects Summary. In: Single Event Effects (SEE) symposium [online]. 2012 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/SEE/2012/seesummary.cfm>
- [9] GAILLARD, Rémi. Single Event Effects: Mechanisms and Classification. [online]. s. 27 [cit. 2013-05-07]. DOI: 10.1007/978-1-4419-6993-4_2. Dostupné z: http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-1-4419-6993-4_2
- [10] AMUSAN, Oluwole Ayodele. EFFECTS OF SINGLE-EVENT-INDUCED CHARGE SHARING IN SUB-100 NM BULK CMOS TECHNOLOGIES [online]. Nashville, Tennessee, 2009 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://etd.library.vanderbilt.edu/available/etd-02162009-141344/>. Disertační. Faculty of the Graduate School of Vanderbilt University.
- [11] JOHNSTON, A.H. The influence of VLSI technology evolution on radiation-induced latchup in space systems. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1996, vol. 43, issue 2, s. 505-521 [cit. 2013-05-13]. DOI: 10.1109/23.490897. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=490897>
- [12] ŠVEC, Jiří. Radioaktivita a ionizující záření: doplňující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářeními [online]. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005, 36 s. [cit. 2013-05-13]. ISBN 80-866-3462-0. Dostupné z: <http://www.fbi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fbi/050/cs/sys/resource/PDF/studijni-materialy/zareni.pdf>
- [13] Kosmické záření. In: PROUZA, Michael. Kosmické záření [online]. 2001 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www-hep2.fzu.cz/Auger/cz/kosmzar.html>

- [14] HOHL, Jakob H. a Kenneth F. GALLOWAY. Analytical Model for Single Event Burnout of Power MOSFETs. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1987, vol. 34, issue 6, s. 1275-1280 [cit. 2013-05-22]. DOI: 10.1109/TNS.1987.4337465. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4337465>
- [15] TITUS, J.L. a C.F. WHEATLEY. Experimental studies of single-event gate rupture and burnout in vertical power MOSFETs. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1996, vol. 43, issue 2, s. 533-545 [cit. 2013-05-22]. DOI: 10.1109/23.490899. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=490899>
- [16] MOURET, I., P. CALVEL, M. ALLENSPACH, J.L. TITUS, C.F. WHEATLEY, K.A. LABEL, M.-C. CALVET, R.D. SCHRIMPF a K.F. GALLOWAY. Measurement of a cross-section for single-event gate rupture in power MOSFETs. IEEE Electron Device Letters [online]. 1996, vol. 17, issue 4, s. 163-165 [cit. 2013-05-27]. DOI: 10.1109/55.485161. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=485161>
- [17] BREWS, J.R., M. ALLENSPACH, R.D. SCHRIMPF, K.F. GALLOWAY, J.L. TITUS a C.F. WHEATLEY. A conceptual model of a single-event gate-rupture in power MOSFETs. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1993, vol. 40, issue 6, s. 1959-1966 [cit. 2013-05-27]. DOI: 10.1109/23.273457. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=273457>
- [18] MIYAHIRA, Tetsuo F. a Farokh IROM. Results of Single-Event Latchup Measurements Conducted by the Jet Propulsion Laboratory. 2008 IEEE Radiation Effects Data Workshop [online]. IEEE, 2008, s. 53-57 [cit. 2013-05-29]. DOI: 10.1109/REDW.2008.16. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4638614>
- [19] HUTSON, John M., R. D. SCHRIMPF a L. M. MASSENGILL. The Effects of Scaling and Well and Substrate Contact Placement on Single Event Latchup in Bulk CMOS Technology. 2005 8th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems [online]. IEEE, 2005, PC24-1-PC24-5 [cit. 2013-05-29]. DOI: 10.1109/RADECS.2005.4365577. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4365577>
- [20] SHOGA, M. a D. BINDER. Theory of Single Event Latchup in Complementary Metal-Oxide Semiconductor Integrated Circuits. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1986, vol. 33, issue 6, s. 1714-1717 [cit. 2013-05-29]. DOI: 10.1109/TNS.1986.4334671. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4334671>
- [21] DODD, P.E. a L.W. MASSENGILL. Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 2003, vol. 50, issue 3, s. 583-602 [cit. 2013-05-30]. DOI: 10.1109/TNS.2003.813129. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1208578>
- [22] DUZELLIER, S. a R. ECOFFET. Recent trends in single-event effect ground testing. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1996, vol. 43, issue 2, s. 671-677 [cit. 2013-06-04]. DOI: 10.1109/23.490910. Dostupné z: <http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=490910&queryText%3DRecent+Trends+in+Single-Event+Effect++Ground+Testing>
- [23] KOGA, R. Single-event effect ground test issues. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1996, vol. 43, issue 2, s. 661-670 [cit. 2013-06-04]. DOI: 10.1109/23.490909. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=490909>

- [24] REED, Robert A., Robert A. WELLER, Ronald D. SCHRIMPF, Marcus H. MENDENHALL, Kevin M. WARREN a Lloyd W. MASSENGILL. Implications of Nuclear Reactions for Single Event Effects Test Methods and Analysis. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 2006, vol. 53, issue 6, s. 3356-3362 [cit. 2013-06-04]. DOI: 10.1109/TNS.2006.885950. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4033831>
- [25] O'BRYAN, Martha, Christian POIVEY, Scott KNIFFIN, Stephen BUCHNER, Ray LADBURY, Timothy OLDHAM, James HOWARD, Kenneth LABEL, Anthony SANDERS, Melanie BERG, Cheryl MARSHALL, Paul MARSHALL, Hak KIM, Anthony DUNG-PHAN, Donald HAWKINS, Martin CARTS, James FORNEY, Tim IRWIN, Christina SEIDLECK, Stephen COX, Mark FRIENDLICH, Ryan FLANIGAN, Dave PETRICK, Wes POWELL, Jeremy KARSH a Mark BAZE. Compendium of Single Event Effects Results for Candidate Spacecraft Electronics for NASA. 2006 IEEE Radiation Effects Data Workshop [online]. IEEE, 2006, č. 53, s. 19-25 [cit. 2013-06-04]. DOI: 10.1109/REDW.2006.295463. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4077277>
- [26] METZGER, S., J. DREUTE, W. HEINRICH, H. ROCHER, B.E. FISCHER, R. HARBOE-SORENSEN a L. ADAMS. Heavy ion microscopy of single event upsets in CMOS SRAMs. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1994, vol. 41, issue 3, s. 589-592 [cit. 2013-06-04]. DOI: 10.1109/23.299804. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=299804>
- [27] NARASIMHAM, Balaji, Matthew J. GADLAGE, Bharat L. BHUVA, Ronald D. SCHRIMPF, Lloyd W. MASSENGILL, William Timothy HOLMAN, Arthur F. WITULSKI a Kenneth F. GALLOWAY. Test Circuit for Measuring Pulse Widths of Single-Event Transients Causing Soft Errors. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing [online]. 2009, vol. 22, issue 1, s. 119-125 [cit. 2013-06-04]. DOI: 10.1109/TSM.2008.2010742. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4773476>
- [28] JESD89A. Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices. JEDEC STANDART, Říjen 2006. Dostupné z: <http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/jesd89a.pdf>
- [29] MARTIN, R. C., N. M. GHONIEM, Y. SONG a J. S. CABLE. The Size Effect of Ion Charge Tracks on Single Event Multiple-Bit Upset. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1987, vol. 34, issue 6, s. 1305-1309 [cit. 2013-06-05]. DOI: 10.1109/TNS.1987.4337470. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4337470>
- [30] MAKIHARA, A., H. SHINDOU, N. NEMOTO, S. KUBOYAMA, S. MATSUDA, T. OSHIMA, T. HIRAO, H. ITOH, S. BUCHNER a A.B. CAMPBELL. Analysis of single-ion multiple-bit upset in high-density DRAMs. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 2000, vol. 47, issue 6, s. 2400-2404 [cit. 2013-06-05]. DOI: 10.1109/23.903783. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=903783>
- [31] GUERTIN, S.M., J.D. PATTERSON a D.N. NGUYEN. Dynamic SDRAM SEFI detection and recovery test results. 2004 IEEE Radiation Effects Data Workshop (IEEE Cat. No.04TH8774) [online]. IEEE, 2004, s. 62-67 [cit. 2013-06-06]. DOI: 10.1109/REDW.2004.1352906. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1352906>

- [32] KOGA, R., S.H. PENZIN, K.B. CRAWFORD a W.R. CRAIN. Single event functional interrupt (SEFI) sensitivity in microcircuits. RADECS 97. Fourth European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (Cat. No.97TH8294) [online]. IEEE, 1998, s. 311-318 [cit. 2013-06-06]. DOI: 10.1109/RADECS.1997.698915. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=698915>
- [33] JOHNSTON, A.H., G.M. SWIFT a D.C. SHAW. Impact of CMOS scaling on single-event hard errors in space systems. 1995 IEEE Symposium on Low Power Electronics. Digest of Technical Papers [online]. IEEE, 1995, s. 88-89 [cit. 2013-06-06]. DOI: 10.1109/LPE.1995.482476. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=482476>
- [34] SWIFT, G.M., D.J. PADGETT a A.H. JOHNSTON. A new class of single event hard errors [DRAM cells]. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1994, vol. 41, issue 6, s. 2043-2048 [cit. 2013-06-06]. DOI: 10.1109/23.340540. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=340540>
- [35] POIVEY, C., T. CARRIERE, J. BEAUCOUR a T.R. OLDHAM. Characterization of single hard errors (SHE) in 1 M-bit SRAMs from single ion. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1994, vol. 41, issue 6, s. 2235-2239 [cit. 2013-06-06]. DOI: 10.1109/23.340568. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=340568>
- [36] KOGA, R. a W.A. KOLASINSKI. Heavy ion induced snapback in CMOS devices. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 1989, vol. 36, issue 6, s. 2367-2374 [cit. 2013-06-06]. DOI: 10.1109/23.45450. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=45450>
- [37] DODD, P.E., M.R. SHANEYFELT, D.S. WALSH, J.R. SCHWANK, G.L. HASH, R.A. LOEMKER, B.L. DRAPER a P.S. WINOKUR. Single-event upset and snapback in silicon-on-insulator devices and integrated circuits. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 2000, vol. 47, issue 6, s. 2165-2174 [cit. 2013-06-06]. DOI: 10.1109/23.903749. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=903749>
- [38] DOLEŽAL, Z. Polovodičové detektory v jaderné a subjaderné fyzice. In: [online]. 2008 [cit. 2013-06-06]. Dostupné z: http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~dolezal/teach/semicon/semi_p.pdf
- [39] ADELL, P., R.D. SCHRIMPF, H.J. BARNABY, R. MAREC, C. CHATRY, P. CALVEL, C. BARILLOT a O. MION. Analysis of single-event transients in analog circuits. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 2000, vol. 47, issue 6, s. 2616-2623 [cit. 2013-06-06]. DOI: 10.1109/23.903817. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=903817>
- [40] BAUMANN, R. Soft Errors in Advanced Computer Systems. IEEE Design and Test of Computers [online]. 2005, vol. 22, issue 3, s. 258-266 [cit. 2013-06-06]. DOI: 10.1109/MDT.2005.69. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1438282>
- [41] DODD, P.E. a L.W. MASSENGILL. Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics. IEEE Transactions on Nuclear Science [online]. 2003, vol. 50, issue 3, s. 583-602 [cit. 2013-06-06]. DOI: 10.1109/TNS.2003.813129. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1208578>