

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv ionizačního záření na životnost polovodičových
součástek**

Pavel Totzauer

2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel TOTZAUER**
Osobní číslo: **E09B0337P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Vliv ionizačního záření na životnost polovodičových součástek**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Popište druhy ionizačního záření a způsoby interakce v materiálech.
2. Popište degradační procesy, které probíhají v polovodičových součástkách vystavených působení ionizačnímu záření.
3. Zjistěte velikost dávky radiace, která s velkou pravděpodobností způsobí poruchu pro běžné polovodičové součástky.
4. Vyhledejte polovodičové součástky se zvýšenou odolností proti ionizačnímu záření.
5. Porovnejte odolnost běžných polovodičových součástek a součástek se zvýšenou odolností proti efektům radiace.

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. Michael Holík**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michael Holík**
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

L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná bakalářská práce se zabývá vlivy ionizujícího záření na polovodičové součástky. Nejprve jsou popsány různé druhy záření vyskytující se v možných oblastech využití součástek. Dále se práce zabývá degradačními procesy v polovodičích způsobeny právě ionizujícím zářením s větším důrazem na vlivy způsobené celkovou absorbovanou dávkou záření. Vlivy způsobené SEE jsou popsány pouze okrajově, jelikož jsou součástí jiných prací. V poslední části je zohledněn postup při návrhu zařízení a vlivy, které je nutné uvažovat. Na konci práce je uvedeno několik příkladů záření odolných součástek používaných v dnešní době.

Klíčová slova

ionizační záření, polovodiče, kosmické záření, beta záření, alfa záření, neutrony, degradační procesy, stínění

Abstract

Totzauer, Pavel. Influence of ionization radiation on semiconductors [Vliv Ionizačního záření na životnost polovodičových součástek]. Pilsen, 2013.

Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering.

Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Ing. Michael Holík,

The presented bachelor thesis deals with the effects of ionizing radiation on semiconductor devices. At first it describes various types of radiation occurring in the possible areas of component application. Furthermore the thesis deals with degradation processes in semiconductors caused by ionizing radiation with a greater emphasis on effects caused by total absorbed dose of irradiation. The effects caused by SEE are discussed only in passing, as they are part of other thesis. The last part is taken into account in the process of designing equipment and the factors that should be considered. At the end there are a few examples of radiation resistant components used nowadays.

Key words

Ionization radiation, semiconductors, cosmic rays, beta rays, alpha rays, neutrons, degradation processes, shielding

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto 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 práce, je legální.

V Plzni dne 6.6.2013

Pavel Totzauer

.....

podpis

Obsah

OBSAH	IV
SEZNAM SYMBOLŮ	1
ÚVOD	2
1. POPIS IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	3
1.1 ÚVOD DO IONIZAČNÍHO ZÁŘENÍ.....	3
1.2 DRUHY IONIZAČNÍHO ZÁŘENÍ.....	3
1.2.1 Zářením přímo a nepřímo ionizující	3
1.2.2 Zářením vlnové a korpuskulární	4
1.3 VLASTNOSTI JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ ZÁŘENÍ	4
1.3.1 Zářením alfa.....	4
1.3.2 Zářením beta.....	5
1.3.3 Zářením gama a záření X.....	7
1.3.4 Neutronové záření.....	10
1.3.5 Kosmické záření	11
2. DEGRADAČNÍ PROCESY V POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTKÁCH	14
2.1 ÚČINKY ZÁŘENÍ NA POLOVODIČE	14
2.2 VLIV NA SOUČÁSTKY	17
2.2.1 Účinky na diody	17
2.2.2 Vliv na tranzistory.....	22
2.2.3 Vliv na integrované obvody.....	26
3. POSTUP PŘI NÁVRHU ZAŘÍZENÍ V PROSTŘEDÍ S RADIACÍ	27
3.1 POTŘEBY TRHU.....	27
3.2 STUPNĚ RADIČNÍ OCHRANY.....	28
3.3 ALTERNATIVNÍ CESTY PŘI NÁVRHU RADIČNÍ OCHRANY	28
3.3.1 Využití stínění.....	28
3.3.2 Stínění gama záření.....	29
3.3.3 Stínění neutronového záření.....	29
3.4 POTLAČOVÁNÍ VLIVŮ ZÁŘENÍ NA FUNKČNOST.....	30
4. ZÁŘENÍ ODOLNÉ SOUČÁSTKY	31
4.1 VÝZNAM RADIČNÍ ODOLNOSTI.....	31
4.2 ZÁSTUPCI ZÁŘENÍ ODOLNÝCH SOUČÁSTEK.....	31
ZÁVĚR	33
POUŽITÁ LITERATURA	1
PŘÍLOHY	3

Seznam symbolů

OZ	Operační Zesilovač
GBP	Gain Bandwidth Product
ENOB	Effective Number Of Bits
Gsps	Gigasamples per second
Msp	Megasamples per second
LOCOS	Local Oxidation Of Silicon
MOS	Metal Oxide Semiconductor
MIS	Metal Insulator Semiconductor
JFET	Junction Field Effect Transistor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
SEE	Single Event Effects
SEU	Single Event Upsets
SEL	Single Event Latchup
TID	Total Ionizing Dose
RHA	Radiation Hardness Assurance
TVL	Tenth Value Layer
NIEL	Non Ionizing Energy Loss
eV	elektron Volt
rad	Radiation Absorbed Dose
Gy	Gray
LED	Light Emitting Diode
h	Planckova konstanta ($6.626 * 10^{-34}$ J.s)
c	rychlost elektromagnetického záření ve vakuu ($3 * 10^8$ m.s-1)

Úvod

Tato práce se zabývá vlivem ionizačního záření na polovodiče. Je rozdělena na 4 části, ve kterých jsou postupně popsány druhy ionizačního záření, degradační procesy v polovodičích, postup při návrhu zařízení v radiačním prostředí a na závěr je uvedeno několik příkladů součástech využívaných v dnešní době.

Řešení problému ionizačního záření je nutné pro správný a pokud možno bezchybný chod různých zařízení dnešního života. Vliv ionizačního záření nejvíce postihuje oblasti letectví, telekomunikace, průzkumu vesmíru a armády. Všechny tyto, a další, oblasti pracují v určitém druhu radiačního prostředí. Pro správný chod veškerých systémů je nutné zohlednit faktory prostředí a najít způsob, jak se proti nim bránit.

Při vypracovávání jsem nejprve popsal vlivy prostředí, tj. různé druhy ionizačního záření, což je nutné k porozumění další části – degradačních procesů v polovodičích. Po seznámení s těmito procesy je možné postoupit do dalšího kroku, kterým je návrh obvodu schopného pracovat v radiačním prostředí.

V práci je uvedeno několik zdrojů, ve kterých jsou popsány specifické oblasti účinků na různá zařízení. Tyto práce se většinou zakládají na experimentálním testování dané problematiky.

1. Popis ionizující záření

V této části si přiblížíme ionizační záření, které je děleno na několik kategorií. Také si popíšeme různé druhy záření a jejich účinky na materiály.

1.1 Úvod do ionizačního záření

Nejprve si řekneme, co vlastně reprezentuje pojem ionizace. Ionizace představuje převedení volného atomu nebo molekuly na iont (kladný nebo záporný) odtržením jednoho či více elektronů (případně připojením tohoto elektronu či elektronů k neutrálnímu atomu). Nastává v látkách při zvýšené teplotě (například v plameni) nebo, v našem případě, nárazem urychlených částic či fotonů [5].

Ionizující záření je tok hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření mající natolik vysokou energii, že jsou schopny ionizovat atomy prostředí nebo excitovat jejich jádra [1,2]. Pro běžné druhy záření *fotonového* (X a γ), *elektronového* (e^-) a *alfa* se za energetickou hranici ionizujícího záření bere energie 5 keV.

Složitější situace je u *neutronového* záření, kde i velmi pomalé neutrony vstupují do jader a prostřednictvím jaderných reakcí mohou vyvolávat sekundárně ionizaci (a to i zpožděně či dlouhodoběji - aktivace jader, vznik radionuklidů). Podobně není definována prahová energie u záření b^+ , kde i velmi pomalé pozitrony anihilují s elektrony za vzniku tvrdého ionizujícího záření [3].

1.2 Druhy ionizačního záření

Ionizační záření dělíme z hlediska dvou pohledů. Tím prvním je mechanismus interakce s hmotou (záření přímo a nepřímo ionizující). Druhým pohledem je hledisko klidové hmotnosti částic m_0 kvant tohoto záření (záření vlnové a korpuskulární). Klidová hmotnost m_0 je hmotnost částice měřená v inerciální vztažné soustavě, v níž je částice v klidu [2].

1.2.1 Záření přímo a nepřímo ionizující

Kvanta tohoto druhu záření nesou elektrický náboj a proto přímo vyražení či vytrhávají Coulombickými elektrickými silami elektrony z atomů. Patří sem záření alfa, b^- a b^+ , protonové záření p^+ atd [2].

Kvanta nepřímo ionizujících záření naproti tomu nejsou elektricky nabitá. Svou kinetickou energii předávají v látce nejprve nabitým částicím (většinou elektronům, někdy

atomovým jádrům) a ty teprve přímými účinky na atomy látku ionizují. Do této skupiny patří především fotonové záření rentgenové a gama, dále též záření neutronové [2].

1.2.2 Záření vlnové a korpuskulární

Vlnové záření duální charakter (má vlastnosti jak elektromagnetického vlnění, tak i vlastnosti částic o nulové hmotnosti). Rozeznáváme fotonové záření γ a rentgenové záření. Z fyzikálního hlediska jde v podstatě o stejný typ záření, rozdíl je ve vlnové délce a v tom, že záření γ vzniká v atomovém jádře (přirozená a umělá radioaktivita) a rentgenové záření vzniká interakcí elektronu z obalu s těžkými atomy v materiálu anody (rentgenové přístroje, betatron, lineární urychlovač) [1,2].

Kvanta korpuskulárního záření mají klidovou hmotnost $m_0 > 0$. Jedná se o proud hmotných částic pohybujících se rychlostí menší než rychlost světla, která si zachovávají svou existenci i po zastavení pohybu. Podle hmotnosti dělíme částice na těžké (alfa částice), středně těžké (mezony) a lehké částice (elektrony, pozitrony) [1,2].

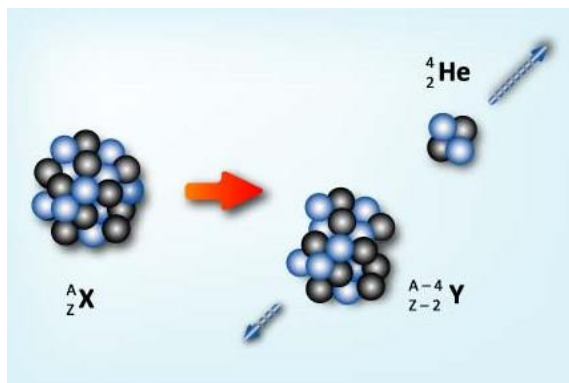
1.3 Vlastnosti jednotlivých druhů záření

1.3.1 Záření alfa

Jako první si probereme zástupce přímo ionizujícího záření, a to *záření alfa*. Tok záření alfa je tvořen rychle letícími jádry helia ${}^4_2\text{He}$ (tzv. heliony). Tyto heliony vznikají při alfa přeměně. Při této přeměně jádro původního radionuklidu ztratí 2 protony a 2 neutrony a tím vznikne jádro nového prvku s nukleonovým číslem $A-4$ a protonovým číslem $Z-2$ a samozřejmě také helion. V periodické tabulce prvků se tedy vyzařující prvek posune o 2 místa doleva [6,7]. Tento proces se dá tedy zapsat vztahem:



kde A je nukleonové číslo, Z protonové číslo, X je radionuklid před proměnou a Y nový radionuklid po proměně.



Obr. 1.1 Alfa přeměna; převzato z [8], upraveno

Samotná α -částice má nejvyšší hmotnost ($6,656 \cdot 10^{-27}$ kg) a nejvyšší elektrický náboj (díky dvěma kladně nabitým protonům) ze všech běžných částic. Jejich náboj se pohybuje v rozmezí 4 až 10 MeV. Díky těmto vlastnostem částice alfa při průchodu hmotným prostředím silně ionizují. Při ionizaci vytváří kladné a záporné ionty vyražením elektronu z elektronového obalu atomu. Během vyražení jednoho elektronu takto alfa částice ztratí energii 32,5 eV. Celkový počet iontů vytvořených na dráze alfa částice je tedy řádově 10^5 [7].

Dolet záření je silně omezen rychlou ztrátou energie ionizací. Uvádí se, že ve vzduchu při energii částice 10 MeV je dolet kolem 10 cm. Obecně v plynech je dolet několik centimetrů, v hustších prostředích (voda, pevné látky) zlomky milimetrů. Odstínit záření alfa tedy nebude větší problém [7,9,3].

1.3.2 Záření beta

Beta záření je dvojího druhu. Z jádra se mohou uvolňovat buď rychlé elektrony nebo pozitrony. Tok těchto částic má spojitě energetické spektrum (tj. jsou v něm zastoupeny částice s energiemi v rozsahu blízkému nule až maximální hodnotě charakteristické pro daný nuklid) se značným rozsahem energií (až k 16,6 MeV pro ^{12}N) [7].

Ve srovnání s alfa zářením je záření beta relativně malé a lehké. To je důvodem k jejich velmi klikaté dráze letu. Částice se totiž při ionizaci vlivem odpuzivých elektrických sil odráží od atomů, takže jejich skutečná dráha letu je mnohem delší než dolet. Z toho důvodu se udává střední dolet beta částic, který je závislý, stejně jako u alfa částic, na energii [10,2,7]. Bližší porovnání hodnot energií a doletu nabízí následující tabulka.

Tab. 1.1 Střední dolet beta částic, zdroj [11]

W (β) [MeV]	R _s [mm] - vzduch	R _s [mm] - hliník
10 ⁻²	1,3	6 * 10 ⁻⁴
10 ⁻¹	1,01 * 10 ²	5 * 10 ⁻²
1	3,06 * 10 ³	1,52
10	3,9 * 10 ⁴	19,2

Při průchodu beta částic hmotným prostředím mohou nastat tyto jevy:

a) *Elastický rozptyl*

Jde o změnu směru pohybu nízkoenergetických částic beta záření vlivem elektrických sil na povrchu atomového jádra či elektronech v elektronovém obalu atomu [7].

b) *Ionizace*

Je hlavní příčinou ztráty energie částic záření při pohybu prostředím. Při ionizaci ztratí beta částice množství energie shodné s pohybovou energií elektronu spolu s energií potřebnou k uvolnění částice z atomu. Na své dráze (ve vzduchu) vyprodukuje beta částice 50 až 150 iontových párů na jeden centimetr [4].

c) *Brzdné záření*

Je to elektromagnetické záření emitované při brzdění pohybujícího se elektronu elektrostatickým polem jádra (prakticky shodný jev jako při vzniku rentgenova záření v RTG lampách). Při tomto zabrzdění se uvolňuje pronikavé záření ve směru původního pohybu částice. Intenzita záření je úměrná atomovému číslu absorbujícího materiálu a energii elektronů (nižší u menších a větší u vyšších atomových čísel) [7,10].

Na začátku této kapitoly jsme řekli, že beta záření je dvojího druhu, a to β^- a β^+ . Obě tyto částice mají velice podobný cyklus „života“. Na své dráze budou odrážet, ionizovat a ztrácet energii až do doby, než se zastaví. V tom bodě se jejich osud rozdělí. Elektron se po vyčerpání energie buď stane volným elektronem, nebo se spojí s kladně nabitým iontem. Pozitron se ovšem po ztrátě energie nemohou existovat v okolí elektronů. Po vyčerpání energie bude proto přitažen k elektronu a tzv. anihiluje (obě částice zaniknou). Při tomto procesu vzniknou 2 fotony gama záření, každý o energii 512 keV, což je energie ekvivalentní klidové hmotnosti elektronu nebo pozitronu. Skutečnost, že v místě β^+ záření vzniká i toto tvrdé γ záření, je nutné brát na zřetel při projektování stínění [4,7,2].

1.3.3 Záření gama a záření X

Tímto se dostáváme k zástupcům nepřímo ionizujících záření. Tyto dva druhy záření zahrneme do jedné kategorie z důvodu jejich shodné fyzikální povahy, tj. že jsou to obě *fotonová* záření mající velmi podobné fyzikální vlastnosti [2]. To bylo prokázáno experimenty, ze kterých vyplynulo, že více převažuje charakter korpuskulární než vlnový [12]. Liší se pouze způsobem svého vzniku. Záření γ vzniká při jaderných procesech. Naproti tomu rentgenové záření má svůj původ v rentgenkách, kde vzniká zabrzděním rychle letících elektronů v těžkých kovech. Záření gama je, stejně jako záření X, elektromagnetické záření. Vlnová délka je u těchto záření v rozsahu 10^{-9} až 10^{-13} metru [13].

Energie fotonů je dána vztahem:

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{rov. 1.2})$$

kde h – Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s),

c – rychlost elektromagnetického záření ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹),

λ – vlnová délka záření.

Velikost této energie je charakteristická pro daný radionuklid zvlášť. Číselně se tato hodnota pohybuje v rozmezí několika desítek keV až jednotek MeV [7].

Jelikož je fotonové záření nepřímo ionizující, jeho interakce s prostředím je silně odlišná od interakcí přímo ionizujících částic. Při průchodu látkou fotony předávají dostatečnou energii uvolněným částicím k tomu, aby jim stačila k ionizaci a excitaci prostředí [7,14]. Interakce s látkou probíhá různými způsoby. My si popíšeme 3 typy které probíhají když látkou je křemík [18].

a) Fotoefekt

Fotoefekt je proces, při kterém foton předá veškerou svou energii elektronu v některé energetické hladině atomu absorbujícího prostředí a sám zaniká. Tento elektron je emitován z atomu kinetickou energií rovnou rozdílu energií fotonu a své vlastní vazební energie. Pokud je tento elektron na některém vnitřním orbitu, na jeho místo se posune elektron z vyššího orbitu a přebytek energie se vyzáří ve formě fotonu. Tento foton má však velmi nízkou energii a je pohlcen v blízkém okolí. Fotoefekt lze z toho důvodu považovat za úplnou absorpci fotonového záření [7]. Kinetická energie emitovaného elektronu se dá zapsat za pomoci Einsteinovy rovnice:

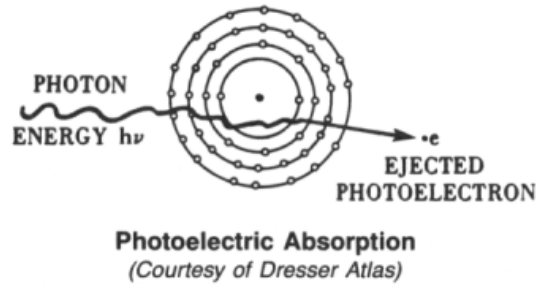
$$E_{kin} = h\nu - E_v \quad (\text{rov. 1.3})$$

kde $h\nu$ – energie dopadajícího fotonu (viz rov. 1.2 výše),

E_v – vazební energie elektronu v dané slupce.

Z rovnice (1.3) vyplývá, že fotoefekt je možný pouze v případě, že energie dopadajícího fotonu je vyšší než vazební energie elektronu. Pravděpodobnost fotoefektu roste s vyšší vazební energií, tj. je nejvyšší na slupce nejbližší jádru [12].

Zákon zachování hybnosti je zachován při předáním části hybnosti zbylému atomu. To je důvod, proč není fotoefekt možný u volných elektronů [4,15].



Obr. 1.2 Schéma fotoefektu, převzato z [16]

Fotoefekt je nejčastějším typem interakce pro fotony s nízkou energií (přibližně do 0,5 MeV) a jeho pravděpodobnost roste s vysokým protonovým číslem (viz. Obr. 1.5) [4,7].

b) Comptonův rozptyl

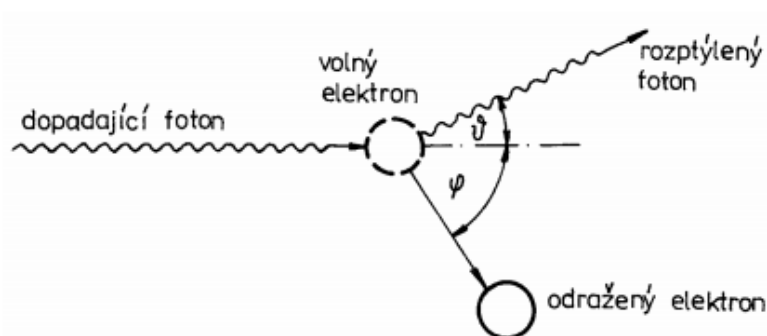
Dominantní typ interakce pro fotony, s energií mezi 0,3 MeV a 3 MeV, s látkou s malým atomovým číslem se nazývá Comptonův rozptyl. Je to interakce fotonů s volnými nebo slabě vázanými elektrony (energie fotonu musí být větší než vazební energie elektronu v atomu). Při srážce fotonu a elektronu foton předá část své energie elektronu, pružně se od něho odrazí a pokračuje v pohybu jiným směrem s menší energií (tj. větší vlnovou délkou). Zůstatková energie fotonu závisí na úhlu rozptylu, což můžeme vidět v Comptonově vzorci (1.4) [2,4,7,14].

$$E_{\gamma'} = E_{\gamma} / [1 + \left(\frac{E_{\gamma}}{m_{oe}c^2}\right) * (1 - \cos \vartheta)] \quad (\text{rov. 1.4})$$

kde m_{oe} – klidová hmotnost elektronu,

ϑ – rozptylový úhel,

E_{γ} – energie dopadajícího fotonu.



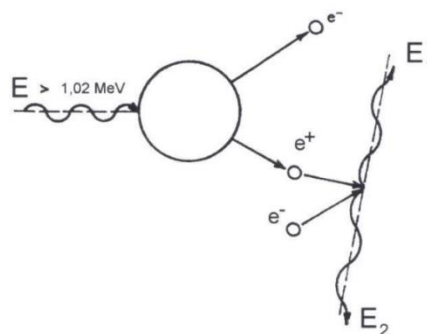
Obr. 1.3 Schéma Comptonova rozptylu, převzato z [7]

c) Tvorba elektron-pozitronových párů

Třetím způsobem interakce je tvorba párů. Ta se uplatňuje nejvíce u vysoce nabitých fotonů a materiálů s velkým protonovým číslem.

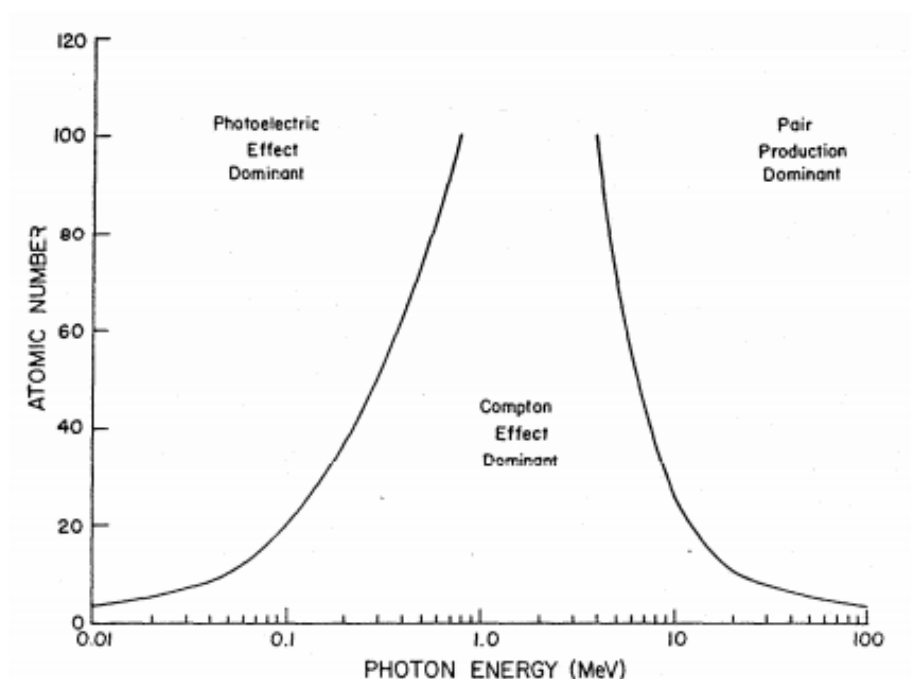
Dvojice elektronů (elektron-pozitron) může vzniknout, pokud je v elektrickém poli atomového jádra zcela pohlcen foton s energií vyšší než klidová energie dvou elektronů, tj. 1,024 MeV. Tato vzniklá dvojice poté podstupuje procesem popsaným již v kapitole 1.3.2, tj. že zabrzděný elektron v látce zůstává a pozitron anihiluje za vzniku dalšího záření.

Produkce párů, nicméně není moc pravděpodobná při energiích pod 5 MeV. Přítomnost atomového jádra je nutná pro převzetí části hybnosti fotonu (součet hybností vzniklého páru je totiž menší). [2,4,7,14].



Obr. 1.4 Tvorba elektron-pozitronového páru, převzato z [14]

Následující obrázek by měl osvětlit při jakých energiích a protonových číslech se uplatňuje jaký typ interakce z této trojice. Pro křemík je hranicí změny typu interakce z fotoefektu na Comptonův rozptyl energie 250 keV [17].



Obr. 1.5 Závislost energie fotonu a atomového čísla látky na převažujícím efektu interakce, převzato z [4]

1.3.4 Neutronové záření

Jako neutronové záření se rozumí proud pohybujících se neutronů. Neutrony jsou elementární částice bez elektrického náboje. Vznikají při jaderných reakcích a to hlavně v jaderných reaktorech. Díky tomu, že nemají vlastní náboj, tak nemohou ionizovat látku přímo. Ionizují až sekundární částice vzniklé při interakci atomových jader s neutrony [2,19].

Interakce neutronů a atomových jader probíhá čtyřmi způsoby:

a) Pružný rozptyl

Je nejpravděpodobnějším druhem interakce s látkou u rychlých neutronů (energie mezi 0,5 – 10 MeV). Když rychlý neutron předá atomovému jádru část své energie, odrazí se od tohoto jádra (pružná srážka) a pokračuje v pohybu s menší energií. Jádro, kterému předal část své kinetické energie, je ve vybuzeném stavu a pohybuje se prostředím, přičemž ho ionizuje a excituje okolní atomy. Největší předaná energie od neutronu je pro prvky s malým atomovým číslem [2,19].

b) Nepružný rozptyl

Lze ho též popsat jako „dočasný záchyt a znovuemisi jádrem“ [15]. Neutron opět při svém pohybu předá část energie atomovému jádru. Tím zanechává toto jádro v excitovaném stavu. Při návratu jádra do počátečního stavu se vyzáří foton gama záření, který se již řídí

svými vlastními mechanismy popsanými v předchozí kapitole 1.3.3 [2,15].

c) Radiační záchyt

Při radiačním záchytu neutron vstupuje do jádra a již v něm zůstává vázán, na rozdíl od předchozích dvou rozptylů. Toto složené jádro se emisí jednoho či několika fotonů záření gama snaží zbavit energie, kterou získalo od neutronu. Tyto vyzářené fotony poté vyvolávají ionizaci prostředí. A to i dlouhodobě, protože jádra s absorbovaným neutronem jsou často radioaktivní a sami se rozpadají, přičemž vyzařují další ionizující záření [2].

Radiačního záchytu se nejčastěji účastní pomalé tepelné neutrony s energiemi kolem 0,002 až 0,5 eV [2].

d) Jaderná reakce

Po vstupu neutronu do jádra je vyzářena jiná částice než foton, a to například proton nebo částice alfa. Tyto vyzářené částice poté látku ionizují [2].

Pro zjednodušení jsou v následující tabulce 1.2 rozděleny hlavní vlivy s důrazem na typ interakce.

Tab. 1.2 Rozdělení typu interakce v závislosti na energii, zdroj [35]

Velikost energie	Typ interakce	Hlavní efekt v Si a SiO ₂	Menšinový efekt v Si a SiO ₂
Nízká	Radiační záchyt	Pružné srážky, poruchy mřížky	Ionizace
Veliká	Pružný rozptyl		

1.3.5 Kosmické záření

Má dvě složky – primární a sekundární. *Primární kosmické záření* má svůj původ ve vesmíru. Je tvořeno z galaktického a solárního záření plus záření radiačních pásů Země (Van Allenovy pásy) [15,20]. Tyto tři složky si teď blíže popíšeme.

a) Galaktické záření

Z 85% se skládá z protonů, z 11% z jader helia, 3% jsou elektrony a jedno procento zaujímají těžší jádra prvků z periodické tabulky. Zdroj má v hlubokém vesmíru, kde byly tyto částice urychleny, přičemž získali vysokou energii. Ta se pohybuje v rozmezí 0,1 až 1 GeV na jednu částici [15,20].

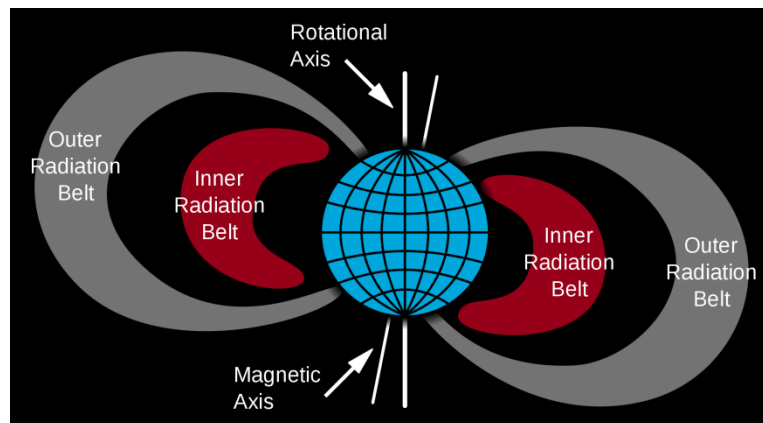
b) Sluneční záření

Z naprosté většiny je tvořeno protony pocházejícími ze slunečních erupcí. Jen malou část (do 5-10%) zaujímají ionty helia. Energie protonů je 0,5 až 3,5 keV [15].

c) Van Allenovy pásy

Jsou to oblasti nabitých částic kolem Země. Vznikly zachycením částic magnetickým polem kolem naší planety. Tyto pásy končí v úhlu 65° nad rovníkem, výše se nenacházejí.

Existují 2 pásy kolem naší planety. A to pás vnější, který je ve vzdálenosti 10 až 65 tisíc kilometrů od Země, a pás vnitřní, vzdálen zhruba 650 až 6300 kilometrů. Ve vnějším pásu se nevyskytují vysoce nabitě částice (nad 1 MeV). Výskyt nabitých částic je značně závislý na magnetických bouřích. Ve vnitřním pásu jsou, na rozdíl od vnějšího, koncentrovány vysoce nabitě částice ve vysoké koncentraci (protony s energií nad 100 MeV, poté elektrony a další částice s nižšími energiemi v řádu jednotek až desítek keV) [20,21,22].

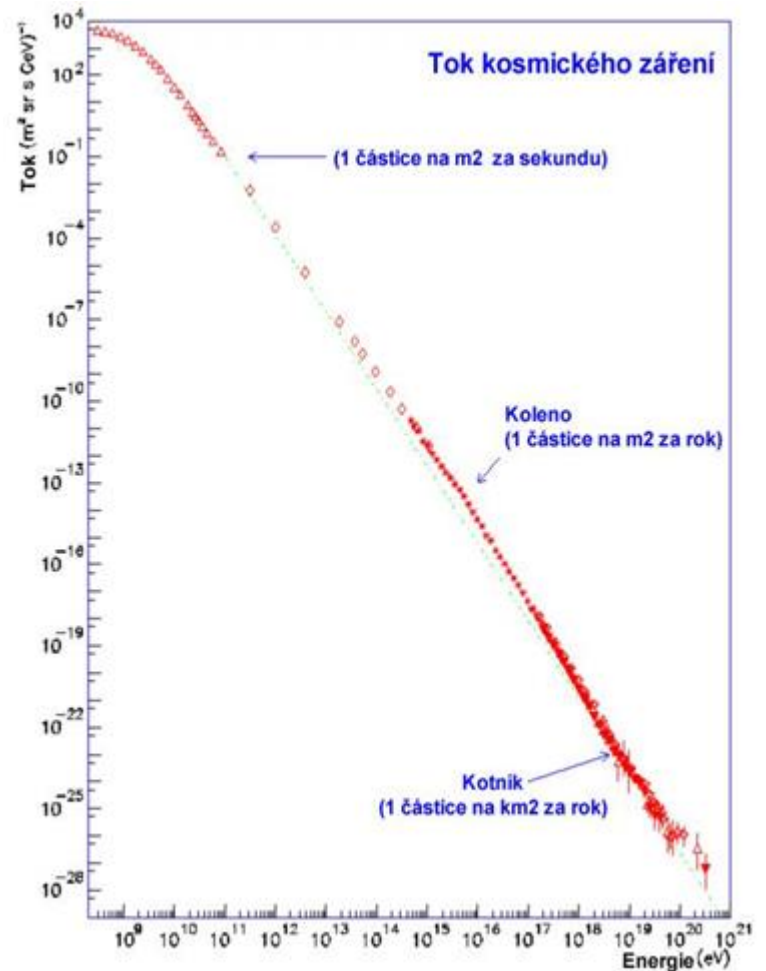


Obr. 1.6 – Van Allenovy pásy, převzato z [23]

Ačkoliv bylo výše řečeno, že jsou dva Van Allenovy pásy, nejnovější průzkumy ukázaly (zpráva publikovaná na [24] 28. 2. 2013), že zde byl, minimálně po dobu 4 týdnů, třetí pás složený z vysokoenergetických elektronů (>2 MeV), a to ve vzdálenosti cca 20 tisíc kilometrů. Ten byl sice poté anihilován jednou ze slunečních erupcí, ale i tak je to důkaz, že Van Allenovy pásy jsou více komplexní, než jsme si mysleli [24].

Co se týče zastoupení různě energeticky nabitých částic, s rostoucí energií rychle klesá pravděpodobnost výskytu částice. Proto nalezneme spoustu částic např. s energií 1 GeV (zhruba $10^4/\text{sec.}/\text{m}^2$ částic) na rozdíl od vysokoenergetických částic s energií 10^{16} eV kterých je jen několik částic na m^2 za rok. Ojedinelé jsou částice s energiemi 10^{20} eV, které detekujeme jednou za několik let [2].

Na následujícím obrázku (obr. 1.7) je zobrazeno spektrum primárního záření. Tvar této křivky je přirovnáván k lidské noze díky podobnému tvaru. V oblasti „kotníku“ (tj. částic velmi velkou energií jsou data málo úplná kvůli malému počtu vyhodnocených částic [2]).



Obr. 1.7 Energetické spektrum primárního záření, převzato z [25]

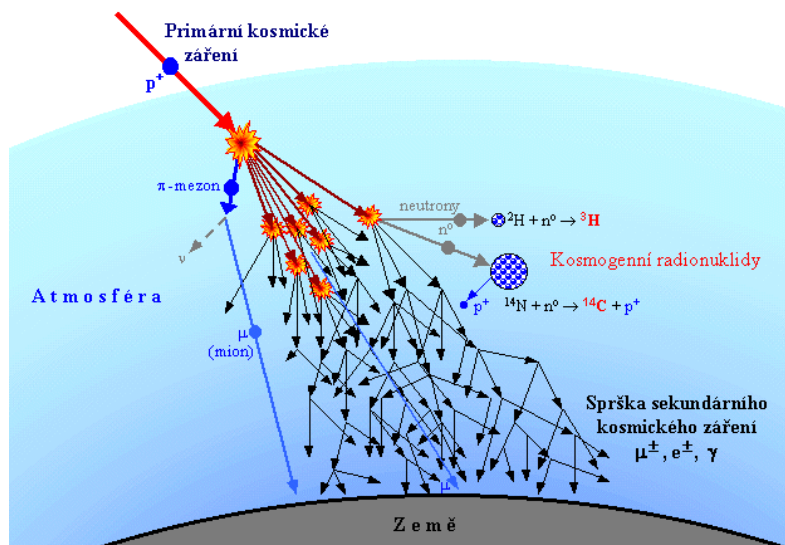
Z výše řečeného už víme, že *sekundární kosmické záření* vzniká při interakci primárního záření se Zemskou atmosférou. Interakcí s jádry atomů vzduchu vzniká celé spektrum různých částic – neutrony, deuterony, tritony, rychlé protony, π -mezony a mnoho dalších. Většina těchto částic je nestabilních a na cestě atmosférou se rozpadají na další částice (kvanta gama, elektrony, miony, neutrina, ...) [2,15,20].

Tyto interakce s atmosférou probíhají nejčastěji ve výšce kolem 30 kilometrů. Srážky probíhají v kaskádě, ve které vysoce energeticky nabitě částice (tj. protony) neustále reagují, dokud energie vytvořených sekundárních částic neklesne zhruba na úroveň 80 MeV. V této chvíli interakce nevedou ke vzniku nových částic ale pouze k absorpci [2,15,20].

V úrovni mořské hladiny můžeme sekundární kosmické záření dělit na měkkou (energie do 100 MeV – elektron-fotonová sprška) a tvrdou (energie větší než 500 MeV – mionová a hadronová sprška) složku [2,15].

Na obrázku 1.8 můžeme vidět kaskádovitý vznik sekundárního záření v naší

atmosféře.



Obr. 1.8 Vznik sekundárního kosmického záření v atmosféře Země, převzato z [2]

2. Degradční procesy v polovodičových součástkách

V této kapitole si popíšeme nejprve obecně účinky záření na polovodiče a poté vlivy na jednotlivé typy součástek.

2.1 Účinky záření na polovodiče

Vlivem vystavení dávce záření dochází v součástkách k přechodným nebo trvalým změnám charakteristik. To ovlivňuje funkčnost nejen součástky ale i celého obvodu. Citlivost na vliv záření závisí na druhu záření a velikosti dávky [15]. Velikost dávky se udává v jednotkách rad nebo gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$) referovaných k absorpčnímu materiálu [26].

Efekty, vznikající v ozářeném polovodiči tvořící trvalé změny, jsou tyto:

a) Ionizace

Ionizace je proces, při kterém se vytvoří iont odebráním nebo přidáním elektronu neutrálnímu atomu. V polovodičích kovalentního typu ionizace vytváří volné nosiče náboje (elektrony a díry). Důsledkem ionizace jsou přechodné jevy některých fyzikálních vlastností, zejména zvýšení vodivosti [15]. V kovových vazbách ionizace zvyšuje kinetickou energii elektronu nebo excituje elektron na vyšší energetickou hladinu. Ten se ale po krátké chvíli vrací na svou normální energetickou hodnotu [27]. Ionizace od částic se dělí na přímou a nepřímou (viz výše). Finální efekt ionizace nezávisí jenom na velikosti dávky záření, ale také

na napětí, teplotě a délce ozáření [26].

b) Tvorba nečistot

Pod tímto pojmem se skrývá přetváření jader, tedy změnění chemické podstaty a tím chemických vlastností materiálu. To se využívá při výrobě, např. dopování křemíku fosforem vzniklým při ozařování neutrony [15].

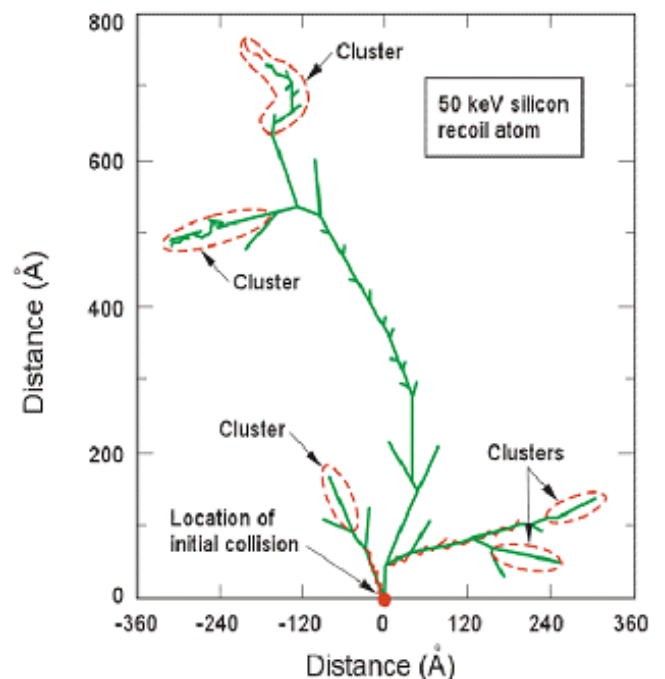
c) Pružné srážky mezi částicí a jádrem atomu

Tyto srážky mohou být zprostředkovány elektromagnetickými (pro nabitě částice) i jadernými (pro neutrony) silami. Při dostatečné energii částic dojde k vyražení jádra atomu z krystalické mřížky. Toto jádro s sebou vezme i elektronový obal. Pouze elektrony ve vnějších slupkách (slabě vázané) mají šanci k odtržení od jádra. V krystalické mřížce se utvoří vakance a vyražený atom je mimo mřížkovou polohu (v defektní poloze). Takováto porucha se nazývá Frenkelova bodová porucha [15].

V případě, že atom při srážce obdrží energii potřebnou právě k vysunutí atomu z mřížkové polohy, může dojít, při vhodném směru, k jeho srážce s jiným atomem v mřížce. Tento atom vyrazí a zaujme jeho místo. Tento vyražený atom se může opět srazit s dalším atomem v mřížce a zaujmout zase jeho polohu... Tento jev se nazývá fokusovaná kolize. Skládá se z celé řady postupných srážek [15].

Každá částice nebo foton schopná předat energii kolem 21 eV atomu křemíku může tento atom uvolnit z krystalické mřížky. A jelikož částice mají mnohem větší energii a většinou necestují sami, tak se vytváří shluky defektů. To platí hlavně pro neutrony. Například neutron o energii 1 MeV předá kolem 60 keV atomu křemíku což uvolní zhruba tisíc dalších atomů v oblasti kolem 0,1 μm [26].

Pro ukázkou na obrázku 2.1 kaskádové srážky neutronu s energií 1 MeV v křemíku ukazující vytvořené shluky poruch.

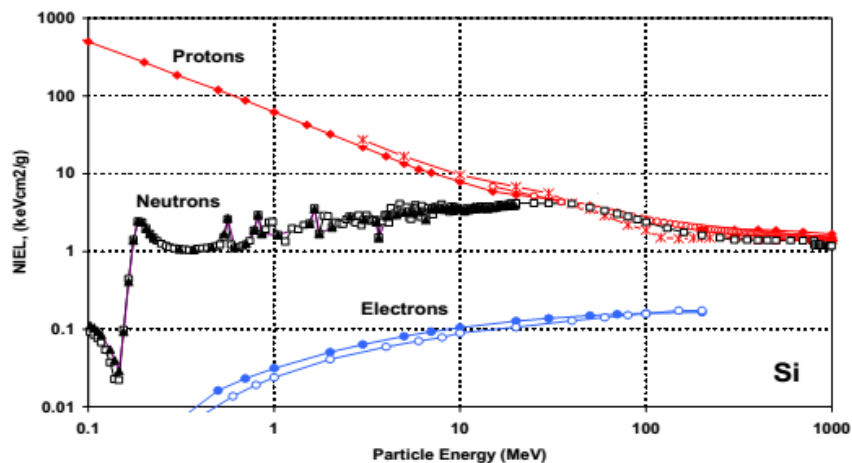


Obr. 2.1 Kaskádová srážka neutronu v křemíku, převzato z [28]

Tyto srážky se v materiálu projevují třemi způsoby [26]:

- Tvorba stavů v zakázaném pásu, které usnadňují přechod elektronu z valenčního do vodivostního pásu tj. zvýšení proudu v závěrném směru PN přechodu, v propustném směru usnadňují tyto stavy rekombinaci*
- Změna hustoty dopování materiálu*
- Tvorba stavů v blízkosti hranice dvou páسů, které usnadňují zachycování náboje*

Energie potřebná k přesunutí atomu může být vyčíslena z neionizačních energetických ztrát (NIEL – Non Ionizing Energy Loss) [27]. Na hodnotě NIEL je závislá koncentrace defektů. Pouze 0,1% celkové energie se totiž podílí na těchto přesunech a srážkách atomů. NIEL nám tedy udává množství kinetické energie uvolněné do látky. Jeho jednotky jsou keVcm^2/g [28]. Na následujícím obrázku je porovnání hodnot NIEL různých částic o různých energiích.



Obr 2.2 Hodnoty NIEL v křemíku pro různé částice, převzato z [28]

d) Teplotní klín

Jelikož interakce v polovodičovém materiálu probíhají podél krátké dráhy, veškerá ztráta energie se děje na značně omezeném území. Částice, které již nemají dostatek energie k ionizování dalších částic, přeměňují zbylou energii na teplo. To vede k velkému tepelnému ohřevu oblasti a tím i k lokálnímu roztavení a opětovnému vychladnutí materiálu. Vzniká tím oblast poruch, tzv. teplotní klín. To je důležitý faktor hlavně u interakcí rychlých neutronů nebo štěpných fragmentů, kdy dochází k ohřevu jak přímo při interakci primárních částic, tak i při kaskádních sekundárních srážkách [15].

2.2 Vliv na součástky

V dalších podkapitolách se podíváme na účinky na konkrétních typech součástek. Z rozsahových důvodů zde budu uvádět pouze některé vlivy a naměřené hodnoty. Ke zbylým zde uvedu alespoň zdroj, kde jsou blíže popsány nebo uvedeny výsledky měření.

2.2.1 Účinky na diody

Jako první tu máme diody jakožto základní polovodičový prvek - PN přechod. Sledovaným parametrem je u diod závěrný klidový proud. Ten je spojen s vytvářením poruch v zakázaném pásu. Klidový proud po ozáření se dá popsat následující rovnicí

$$I_R = I_0 + \alpha * \Phi * A_d \quad (\text{rov. 2.1})$$

kde I_0 je klidový proud před ozářením,

α je koeficient poškození na základě druhu záření

Φ je počet částic dopadající na plochu za daný čas (tok částic)

A_d je tloušťka aktivní plochy.

Je to ale velmi zobecněná a zjednodušená rovnice. Předpokládá například pouze pokojovou teplotu, takže pro jiné teploty se musí přepočítávat, protože klidový proud je parametr závislý na teplotě. I v jiných parametrech než teplota je značně benevolentní [26].

V praxi se využívá sledování závěrného klidového proudu pro potřeby dozimetrie. Změny tohoto proudu radiací jsou velice snadno reprodukovatelné a tudíž komerčně využitelné [26].

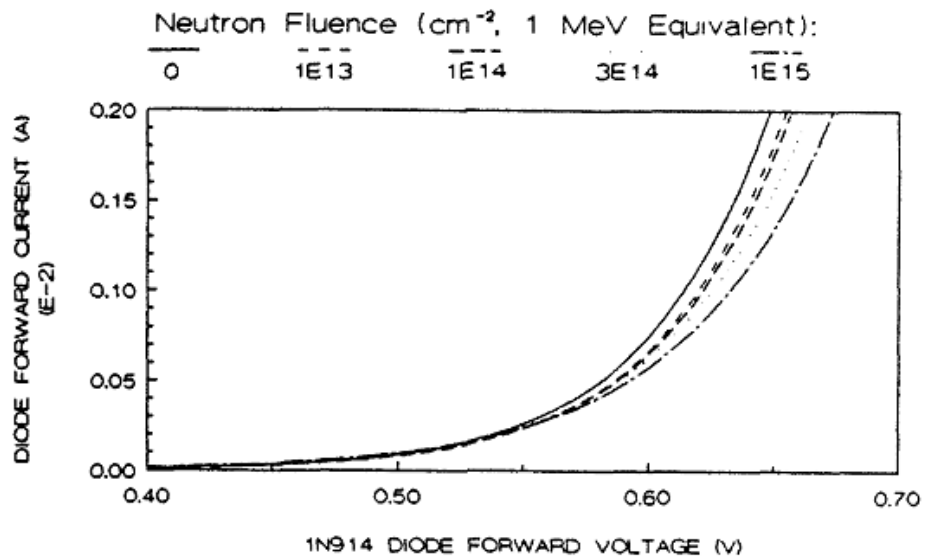
Vliv neutronového záření na V-A charakteristiky diod byl zkoumán v práci Neutron Radiation Induced Degradation of Diode Characteristics, která slouží jako zdroj pro následující část. Práce je dostupná v [30].

Několik skupin součástek (usměrňovací, PIN a Schottkyho diody) bylo ozařováno neutrony o různých tocích částic o energii 1 MeV. Degradace elektrických parametrů a eventuální zničení součástky začíná při toku 10^{11} - 10^{12} n/cm². Největším důvodem degradace charakteristik diod od neutronového ozařování je omezení životnosti minoritních vodičů. To vede k omezení vodivosti v propustném směru. Dalším zdrojem degradace charakteristik je vznik přebytkového proudu v propustném směru kvůli nově vzniklým rekombinačním centrům.

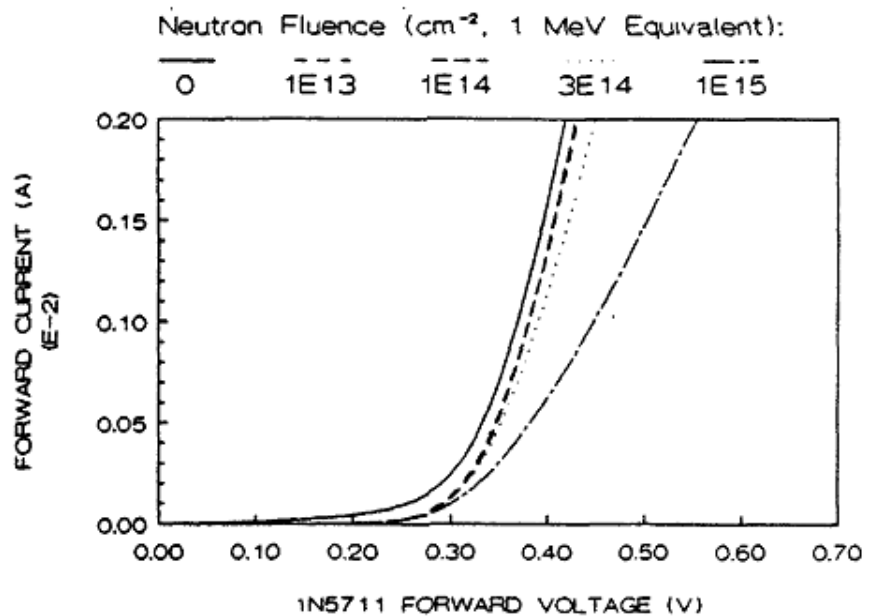
První skupinou byly diody 1N914 (rychlá spínací dioda) a Schottkyho diody 1N5711. Společným faktorem byl posuv charakteristik po ozáření směrem k vyšším napětím.

Charakteristiku propustného směru pro jednotlivé diody můžete vidět na obr. 2.3 a 2.4 níže. Z naměřených charakteristik je vidět jasný posuv v oblasti prahového napětí což samozřejmě může ovlivnit správnou funkci.

Na grafech je vždy neozářená charakteristika plnou čarou; přerušované, čerchované a tečkované charakteristiky jsou po ozáření různou dávkou.



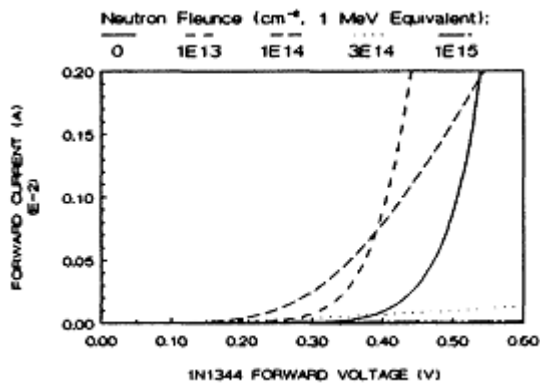
Obr. 2.3 Charakteristika propustného směru diody 1N914, převzato z [30]



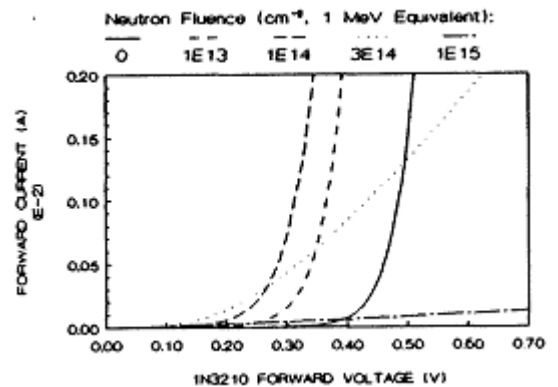
Obr. 2.4 Charakteristika propustného směru diody 1N5711, převzato z [30]

Druhou skupinou jsou usměrňovací diody 1N1344, 1N3210, 1N4006 a 1N5404. U nich je směr posuvu charakteristik obráceně oproti první skupině. Charakteristiky jsou nejprve

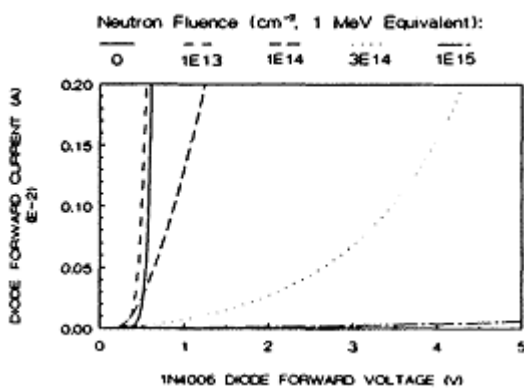
posunuty směrem k nižším napětím, ale po určitém stupni ozáření se začnou posouvat opět směrem nahoru (při stejném proudu). Průběhy jsou zobrazeny na následujících charakteristikách. Vliv ozáření je z pohledu na ně zcela patrný.



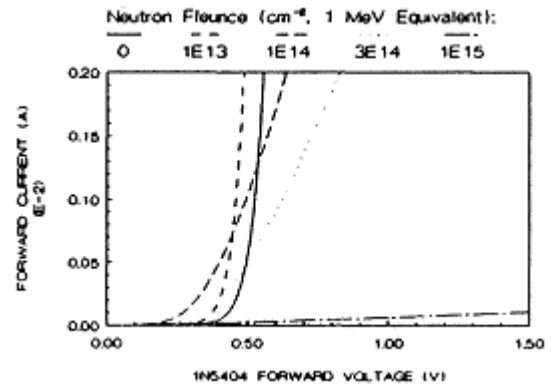
Obr. 2.5 Char. diody 1N1344, zdroj [30]



Obr. 2.6 Char. diody 1N3210, zdroj [30]

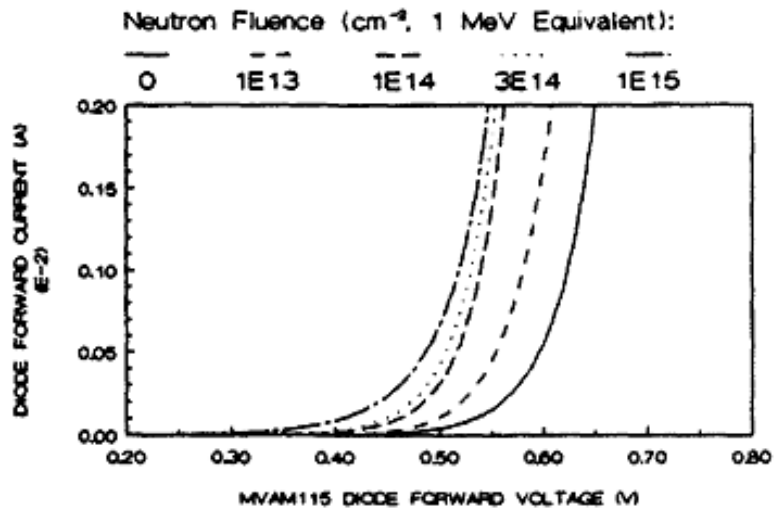


Obr. 2.7 Char. diody 1N4006, zdroj [30]

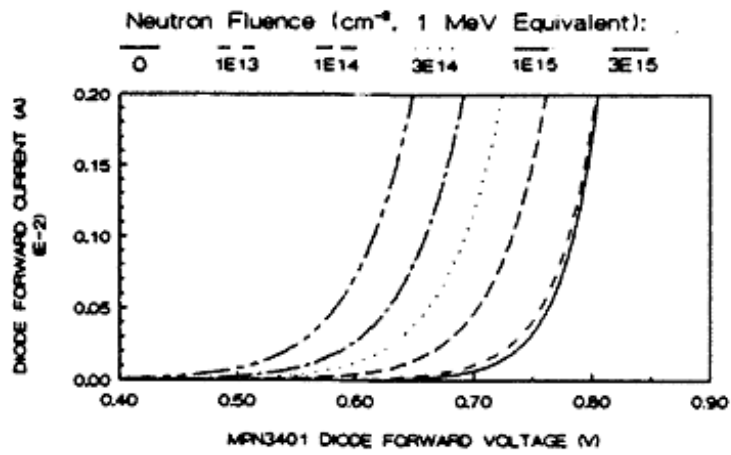


Obr. 2.8 Char. diody 1N5404, zdroj [30]

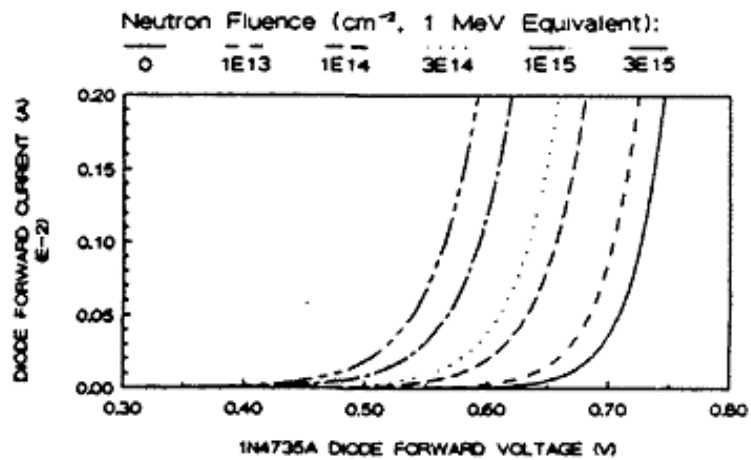
Třetí měřenou skupinou byly zástupci varikapů (MVAM 109 a 115), Zenerových diod (1N4735A a 1N4751A) a PIN dioda MPN3401. U této skupiny byly charakteristiky posunuté směrem k nižším hodnotám napětí pro všechny úrovně ozáření.



Obr. 2.9 Char. varikapu MVAM115, převzato z [30]



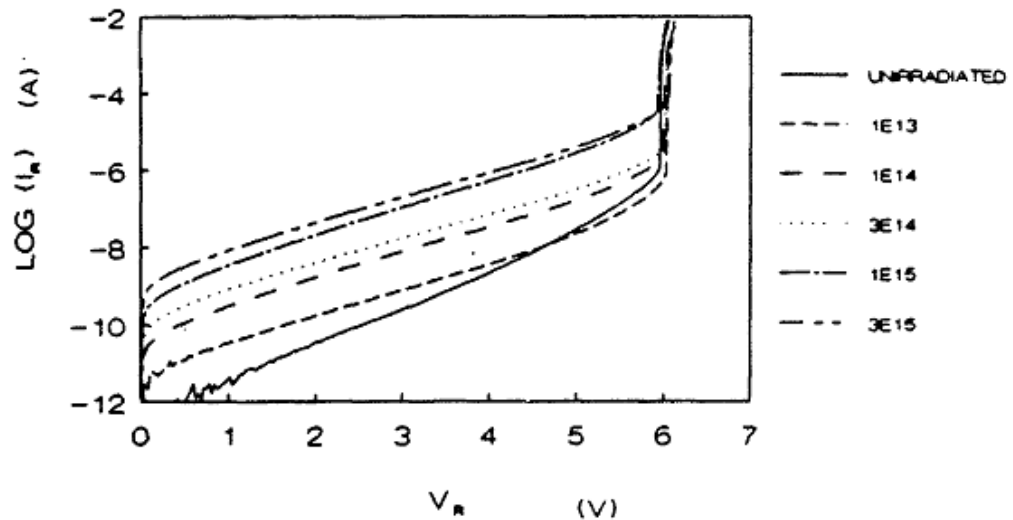
Obr. 2.10 Charakteristika PIN diody MPN3401, převzato z [30]



Obr. 2.11 Charakteristika Zenerovy diody 1N4735A, převzato z [30]

U Zenerových diod se samozřejmě měřil vliv ozáření na charakteristiku v závěrném

směru, jakožto běžně používané zapojení (např. napěťové stabilizátory). Sledovala se změna závěrného proudu při stálém napětí. Ten narůstal se vzrůstajícím tokem neutronů. To můžeme vidět na následujících charakteristikách. Kvůli malým hodnotám je proud zobrazen v logaritmickém měřítku [30].

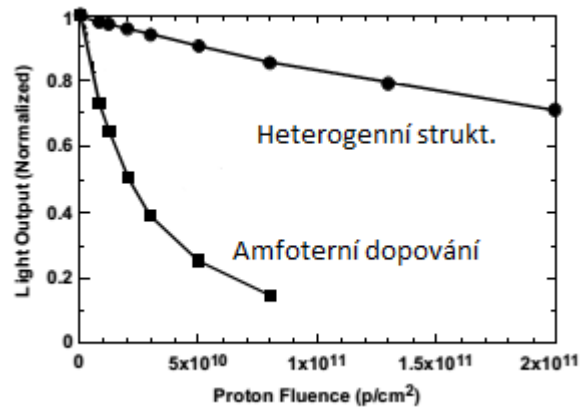


Obr. 2.12 Závěrná část charakteristiky Zenerovy diody 1N4735A, převzato z [30]

Velice podobný tvar má i charakteristika druhé měřené diody (1N4751) která se liší v Zenerově napětí (1N4735A má $U_z = 6,2V$, 1N4751 má $U_z = 30V$).

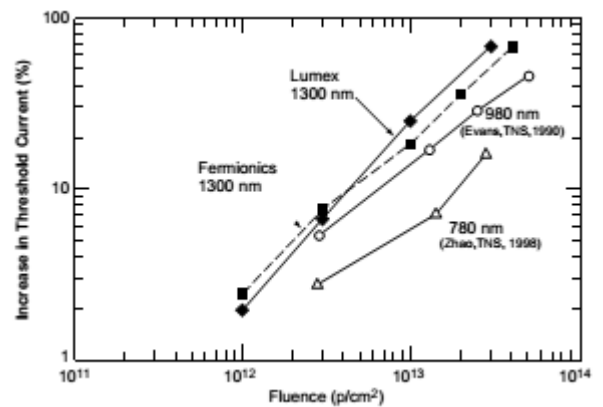
Podobné efekty na charakteristiky diod má i ozařování protony. Pro bližší informace jsou dostupné studie [29] a [31] a další, ve kterých se ozařovalo protony o energiích 16, 27 a 203 MeV o různě intenzivních tocích.

Jediným rozdílem LED a laserových diod oproti běžným diodám je v materiálu. Pro LED a laserové diody se používají různé sloučeniny Galia, Arsenu, hliníku, fosforu a India. I když tedy materiálem není křemík, jako u ostatních polovodičů, procesy v těchto diodách jsou prakticky shodné s těmi v polovodiči. Hlavním vlivem poruch jsou pružné srážky a kolize částic v mřížce. Hodně zde záleží na výrobním procesu. Některé procesy při výrobě LED diod, jako například amfoterní dopování, jsou hodně náchylné na poškození oproti jiným, byť třeba méně účinným procesům, které jsou ale odolnější vůči záření (např. heterogenní struktury). Vliv ozařování tokem protonů o energiích 50 MeV na světelný výkon těchto dvou procesů je znázorněn na obr. 2. 13. [32]



Obr. 2.13 Porovnání vlivu na 2 výrobní procesy LED diod, převzato a upraveno z [32]

U laserových diod nejde o vliv záření na výstupní výkon, ale o vliv na prahový proud. Zde opět vliv při ozáření protony. Za zmínku stojí celkem vysoké hodnoty toků záření potřebné k ovlivnění prahového proudu [32].



Obr. 2.14 Vliv ozáření protony na prahový proud laserových diod, převzato z [32]

2.2.2 Vliv na tranzistory

Další skupinou součástek, logicky navazující po diodách, jsou tranzistory. Jako první si popíšeme zástupce bipolárních tranzistorů.

a) Bipolární tranzistory

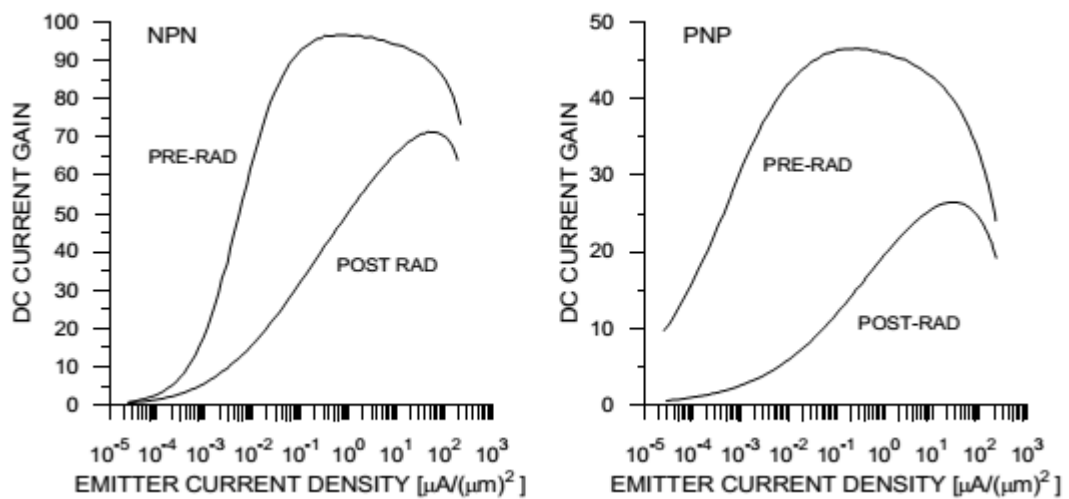
Hlavním důsledkem poškození bipolárních tranzistorů je degradace proudového zesilovacího činitele h_{FE} . To se děje díky pružným srážkám a vyražení atomů z mřížky a tvorbě stavů v zakázaném pásu. Přejít báze-emitor je orientován v propustném směru, takže začíná převažovat rekombinace díky větší koncentraci nosičů ve vodivostním pásu. Pravděpodobnost rekombinace závisí na době průchodu skrz oblast přechodu, takže zmenšení šířky báze vylepší odolnost vůči záření. Šířka báze je silně spjatá s rychlostí tranzistoru, takže omezení proudového zesilovacího činitele se váže nepřímou úměrou s mezním výkonovým

kmitočtem f_T . To je vyjádřeno v následující rovnici. Z výše řečeného lze jednoduše vyvodit, že malé tranzistory (rozměrově malé) jsou méně náchylné na ozáření, než ty velké [26].

$$\frac{1}{\beta_{DC}} = \frac{1}{\beta_0} + \frac{\Phi}{f_T} \quad (\text{rov. 2.2})$$

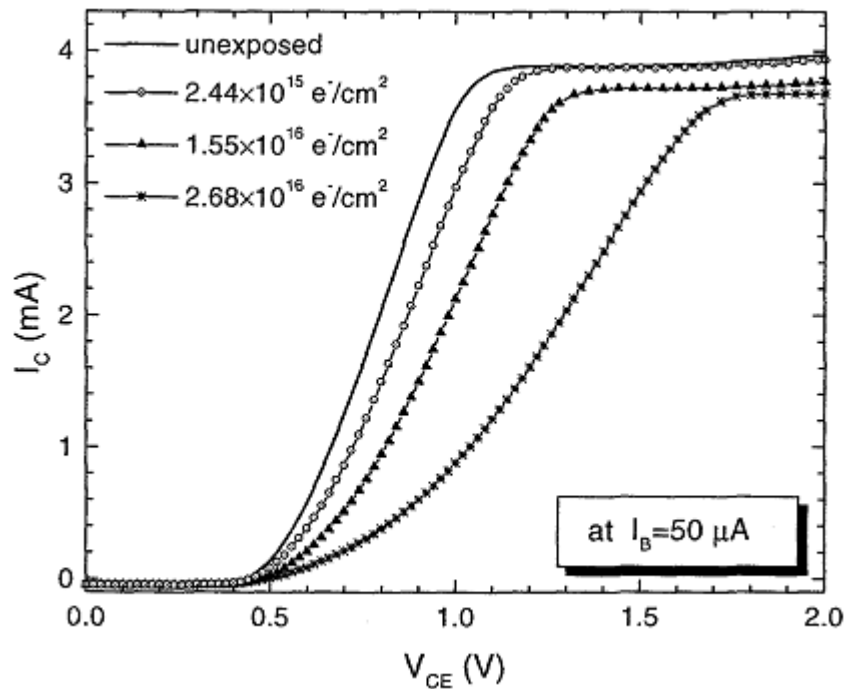
Vliv ozáření na proudový zesilovací činitel můžeme vidět na obr. 2.15. Z grafů je jasně pozorovatelný větší vliv ozáření na menší proudy než na velké.

Změny v dopování substrátu způsobené ozářením mají na bipolární tranzistory zanedbatelný efekt [26].



Obr. 2.15 Vliv ozáření tokem $1,2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ (800 MeV protony) na proudový zesilovací činitel u NPN a PNP tranzistorů, převzato z [26]

Vliv jiných druhů záření než toku protonů se zabývá např. velice obsáhlá práce [33] ve které jsou ozařovány tranzistorové struktury různými druhy záření. Pro příklad zde uvedu graf výstupní charakteristiky při ozařování toky elektronů (tj. beta záření).



Obr. 2.16 výstupní charakteristika tranzistorové struktury po ozáření tokem elektronů, převzato z [33]

b) Unipolární MIS tranzistory

Vlivem ionizačního záření dochází k dvěma jevům v MIS strukturách.

i. Vzniká kladný nekompensovaný náboj ve vrstvě dielektrika

Vlivem ionizačního záření vznikají v dielektriku páry elektron-díra. Jelikož elektrony jsou pohyblivější než díry, jsou elektrony přesouvány v závislosti na polaritě do kovu nebo polovodiče, přičemž nechávají díry v dielektriku. Tímto se vytváří kladný nekompensovaný náboj. Tento nově vzniklý náboj působí změny v prahovém napětí tranzistoru. Náboj se vytváří shodně při ozařování různými druhy záření, nicméně pro každý typ vzniká různě veliký (při stejném toku) [34].

ii. Vytváří se přídavné povrchové stavy v hraniční oblasti mezi polovodičem a dielektrikem

Vytváření povrchových stavů má za následek omezení pohyblivosti nosičů v kanálu což má za následek snížení strmosti tranzistoru [34].

Polarizace hradla při ozařování nemá vliv na změnu znaménka přírůstku u prahového napětí. Velikost přírůstku je ovšem pozorována vyšší při kladné polarizaci než při záporné [34].

c) Tranzistory typu JFET

JFETy jsou docela necitlivé jak na ionizaci, tak i na změny v mřížce. To díky své struktuře. Vodivý kanál od Source ke Drainu je patřičně dopován, typicky jako N. Řídící elektroda (Gate) je dopována opačně, tedy jako P. Po přiložení záporného napětí na elektrodu se vyprázdňená oblast rozšíří na úkor vodivého kanálu čímž změní velikost protékajícího proudu. S vzrůstajícím napětím se vyprázdňená oblast nejvíce rozšiřuje u Drainu. Vzniká jednostranná deformace kanálu.

Důležitými fakty jsou, že charakteristiky JFETu jsou definovány geometrií a úrovní dopování kanálu. Typické úrovně dopování jsou 10^{15} - 10^{18} cm^{-3} takže efekty způsobené radiačními vlivy, jsou malé. Měření ukázala velmi dobrou odolnost vůči záření. Vliv toku většího než 10^{14} neutronů/ cm^2 a ionizačních dávek až 100 Mrad měly jen minimální vliv na zisk. Šumová imunita se pro nízké kmitočty (do 100 kHz) změnila pouze o řád, u vyšších kmitočtů byl už vliv minimální [26].

Svodový proud vznikající ve vyprázdňené oblasti hradla vlivem ozáření má velký vliv na vstupní proud hradla. Měření po ozáření 100 Mrad tokem vysokoenergetických elektronů ($\Phi=10^{15}$ cm^{-2}) ukázala stonásobné zvýšení tohoto proud z původních 70 pA.

d) Tranzistory typu MOSFET

Klíčovou částí MOSFET tranzistorů je vrstvička oxidu mezi hradlem Gate a vodivým kanálem. Ta je značně náchylná na účinky záření. Nejvíce se projevuje ionizace, která způsobuje nárůst náboje na rozhraní křemíku a oxidu. To vede ke změnám několika důležitých parametrů MOS tranzistorů ovlivnitelných zářením. Tím nejdůležitějším je prahové napětí. Posuv tohoto napětí ovlivňuje v analogových obvodech nastavení pracovních bodů a u číslicových spínací časy. U NMOS tranzistorů je znaménko posuvu záporné (napětí se snižuje), u PMOS se prahové napětí posouvá nahoru (znaménko kladné). Tento posuv prahového napětí nemá vliv na tvar charakteristiky [26,35].

Jelikož je tento posuv spjat s vrstvičkou oxidu, přímo se nabízí možnost jak omezit vliv záření a to zmenšením tloušťky této vrstvičky. Zmenšení této vrstvičky je dokonce požadavek při zmenšování výrobního procesu. Tudíž zlepšování integrace zmenšováním výrobního procesu přispívá k vylepšování odolnosti vůči ionizačnímu záření [26].

Dalším ovlivnitelným parametrem je strmota. Ta je ovlivňována zachycenými náboji které zpomalují pohyblivost nosičů náboje v kanálu. Čím větší hustota zachycených nábojů, tím větší zpomalení nosičů [26,35].

2.2.3 Vliv na integrované obvody

Integrované obvody zastupují mnoho druhů součástek. Společným faktorem je ale miniaturizace spolu se seskupováním do jednoho pouzdra. To přináší jinou skupinu problémů než je tomu u diskretních polovodičových součástek.

Izolační bariéry mají za úkol potlačit křížové vazby mezi integrovanými zařízeními. To se provádí několika základními technikami [26]:

a) Izolační ostrůvky

Izolační hradba je vytvořena závěrně orientovanými PN přechody. To zároveň tvoří jak ohmické tak kapacitní oddělení. Používáno dříve pro bipolární tranzistory, dnes pro NMOS a PMOS [26,36,37].

b) Izolace oxidem

Vrstvy oxidu s pečlivě kontrolovanými vlastnostmi rozhraní zbavují sousední křemíkový substrát pohyblivého náboje. Používáno dříve u MOS [26,37].

c) Lokální oxidace na křemíku

Technologie LOCOS, využívaná v dnešní době v různých podobách. Lokalizované vrstvičky oxidu izolující nanášené v různých vrstvách [37].

d) Izolace příkopem

Moderní způsob izolace. Fyzicky vytvořený příkop mezi zařízeními [37].

Tyto izolační oxidové vrstvy jsou tenčí než vrstvy u MOS tranzistorů. Jsou tedy více náchylné na vlivy záření. Procesy vlivu záření jsou stejné jako u MOS tranzistoru v předchozí podkapitole. Proto je zde nebude více rozebírat.

U integrovaných obvodů se více než jinde dostávají na povrch efekty záření ovlivňující přímo chod a funkci zařízení. Tyto efekty (SEE) jsou vyvolávané jedinou energetickou částicí, která má buď nedestruktivní, nebo destruktivní vliv na zařízení. SEU je nedestruktivní, původce soft errorů (změny stavů v logických obvodech, změna stavu paměťové buňky,...). Tyto chyby se dají napravit resetem obvodu. Původce tvrdých, potencionálně destruktivních chyb, je označován zkratkou SEL. Jeho výsledkem je nárůst proudu nad možnosti zařízení, což musí být okamžitě řešeno resetem napájení. Další možné důsledky na integrovaných obvodech zahrnují vyhoření výkonových mosfetů, roztržení hradel, zamrznutí bitů, vznik šumu a další [38]. Blíže popsány jsou např. v [35].

3 Postup při návrhu zařízení v prostředí s radiací

V této kapitole se budeme věnovat procesu výběru radiačně odolných součástek a jejich rozdělení. Také nastíníme další možnosti při návrhu záření odolných obvodů a potlačení vlivu záření na správnou funkčnost zařízení.

3.1 Potřeby trhu

Stejně jako většina věcí, i radiaci odolné součástky jsou závislé na poptávce na trhu. A nejen na něm. Ještě více jsou závislé na výrobní technologii. Čím více se bude zmenšovat výrobní proces součástek, tím více si budeme muset dávat pozor, kam kterou součástku použijeme – aby to vůbec přežila. Se zmenšováním součástek a výrobou komplexních zařízení na chipu se součástky stávají více náchylné k poškození. K jejich pozměnění postačí méně nabitě částice a i méně časté efekty, které dnes nejsou problémem, budou často zabráňovat správné funkci. Pro správný výběr vhodné součástky je potřeba znát dokonale prostředí, kde bude součástka usazena. Různá prostředí mají různé požadavky ohledně radiační ochrany. Následující tabulka (Tab. 3.1) přiřazuje k typické aplikační oblasti úroveň potřebného stupně radiační ochrany. Z informací v tabulce jasně vyplývá, že hlavní aplikační oblastí je průzkum vesmíru (družice, sondy) a taktické vojenské využití. Pozemní využití je velmi omezeného rozsahu.

Z tabulky také je možné získat přehled o velikostech dávky potřebné pro poruchu/destrukci zařízení.

Tab. 3.1 Velikost radiační dávky různých aplikačních oblastí, zdroj [18]

Aplikace	Celková dávka (TID)	Neutrony [neutronů/cm ²]	SEU [mg/cm ²]	SEL [mg/cm ²]
Letectví	30 krad	10 ¹³	1 GeV	1 GeV
Nízká orbita	20 – 50 krad	Dle použití	40 MeV	100 MeV
Vysoká orbita	100 krad – 1 Mrad	Dle použití	40 MeV	100 MeV
Komerční satelity	20 – 100 krad	-	40 MeV	100 MeV
Strategické systémy	1 Mrad	10 ¹⁴	40 MeV	100 MeV
Jaderné elektrárny	5 * 10 ⁸ rad	-	-	-

3.2 Stupně radiační ochrany

Hodnota radiační odolnosti součástek, jak je vidět výše, se udává v jednotkách krad, případně Gray (1 rad = 0,01 Gy; 1 krad odpovídá absorbované energii 10J v 1 kg látky). Tím je myšlena celková absorbovaná dávka záření (TID). Toto je nejčastěji udávaná hodnota u radiačně odolných součástek. Druhou informací udávanou u odolných součástek bývá hodnota ochrany pro efekty SEE. Ta se ale využívá pouze u zařízení, na které má SEE a jeho podskupiny, vliv. Primární informací ohledně odolnosti tedy je celková absorbovaná dávka.

Stupně radiační odolnosti vůči záření jsou normalizovány kvůli zajištění shody se specifikacemi, a to v několika stupních RHA (tab. 3.2) [17].

Tab. 3.2 Kategorie ochrany RHA, zdroj [17]

Jméno	M	D	P	L	R	F	G	H
TID [krad]	3	10	30	50	100	300	500	1000

3.3 Alternativní cesty při návrhu radiační ochrany

Při návrhu tedy musíme jako první uvážit prostředí, ve kterém bude dané zařízení pracovat. Znalost prostředí nám dodá informace o vlivech na zařízení, která zohledníme při výběru použitých součástek. Může se však stát, že pro naši aplikaci nebude dostupná potřebná součástka. Ne všechny druhy součástek jsou totiž dostupné v radiačně odolném modelu. Anebo pro nás bude daná součástka moc drahá nebo nedostupná. To se může stát vzhledem k jejich omezenému použití, tudíž i výrobě. V tu chvíli máme několik možností. Změnit návrh zařízení, protože některé výrobní procesy jsou méně náchylné na záření než jiné (viz. kapitola 2) nebo se mohou projevat jiným, pro naši aplikaci méně důležitým, vlivem. Nebo využijeme obyčejné součástky, které podrobíme ozařování charakteristickému pro naše použití. Z výsledků poznáme, které součástky jsou jak náchylné na záření a jak přesně se to projevuje na jejich elektrických vlastnostech.

Obyčejné součástky ale obecně nemají takovou odolnost. Běžné součástky vykazují trvalou změnu parametrů při dávkách od 10^4 Gy (10^6 rad) [15]. Tato hodnota ale opět záleží na výrobním procesu, typu součástky a druhu záření.

3.3.1 Využití stínění

Poslední variantou, která nám zbývá k uvážení, je použití stínění. To lze velmi efektivně použít na některé druhy záření, které lze snadno odstínit, jako například alfa nebo

beta. Pro jiné to však bude velmi obtížné. Problém také může skýtat velikost materiálu potřebného k efektivnímu odstínění. Proto se se stíněním nedá moc počítat u malých satelitů putujících např. na oběžnou dráhu. I tak je ale použití stínění většinou více ekonomicky šetrnější metodou. Druh materiálu je volen dle potřebné míry utlumení, odolnosti vůči radiaci, požadované velikosti a samozřejmě dostupnosti [35].

3.3.2 Stínění gama záření

Dopadající fotony ztrácí energii hlavně díky ionizaci. Svou energii ztrácí exponenciálně v závislosti na hloubce materiálu x viz. následující rovnice.

$$I(x) = I(0)e^{-\mu x} \quad (\text{rov. 3.1})$$

kde I jsou hodnoty záření před a po průchodu materiálem,

μ je lineární útlumový koeficient [cm^{-1}].

Útlum závisí na atomovém čísle použitého materiálu a jeho hustotě. Tudíž jsou používány materiály s větší hustotou pro svou lepší schopnost stínit gama záření. Pro rozlišení se využívají koeficienty hodnot desetinné šířky materiálu (TVL). V tabulce 3.3 najdete několik příkladů těchto hodnot u používaných materiálů [35].

Tab. 3.3 Koeficienty TVL v závislosti na materiálu, zdroj [35]

Materiál	Atomové číslo	TVL [cm]	
		0,5 MeV	0,8 MeV
Olovo	82	1,4	2,6
Měď	29	4,0	5,0
Železo	26	4,8	5,9
Hliník	13	14,0	16,0
Beton	-	15,0	18,0

3.3.3 Stínění neutronového záření

Jelikož neutrony nejsou nabitě částice, je jejich stínění o něco složitější. Pro úspěšné odstínění je potřeba udělat komplexní návrh ochrany. Tento návrh zahrnuje tři kroky [35]:

- Zpomalení průchozích vysokoenergetických neutronů
- Absorbování zpomalených neutronů
- Proces utlumování sekundárně vytvořeného gama záření ve stínícím materiálu

Ačkoliv z přechozí kapitoly víme, že olovo je dobrý stínící materiál, u neutronového záření to již neplatí. Olovo má extrémně malou schopnost absorbovat neutronové záření, takže přes něj neutrony snadno projdou. Proces zpomalování totiž vyžaduje takové materiály, ve kterých budou energetické ztráty kolizemi co největší. Neutrony by měly kolidovat s částicemi o podobné hmotnosti, jako například jádru vodíku (tj. protony). Z tohoto důvodu nelze použít žádné prvky s vysokým atomovým číslem. Proces zpomalování v nich prostě není dostatečně efektivní [35].

Pozor se ale musí dát na přílišně dobré zpomalení neutronů v materiálu. Pokud bychom dokázali zpomalit většinu neutronů najednou v malém prostoru, budou v tomto materiálu probíhat v hojném počtu vyvolané sekundární reakce [35].

3.4 Potlačování vlivů záření na funkčnost

Vlivy záření se dají vykompenzovat na úrovni funkčnosti obvodu, a to z důvodů, které byli zmíněny již výše. Ekonomické náročnosti a dostupnosti součástek potřebných vlastností. Hlavním důvodem jsou vlivy na správnost dat při jejich přenosu. V obraně využívají následující možnosti [35]:

a) Nadbytečné obvody

Pokud máme obvod, u kterého si nejsme jisti výdrží, dá se s výhodou použít jeho znásobení s vyhodnocováním odlišnosti výsledků z těchto obvodů. To je velice výhodné hlavně pro levné součástky. Používá se zdvojování nebo ztrojování obvodů. Z hlediska správné funkce je statisticky lepší použít ztrojování (ze dvou výsledků se těžko určuje správnost kterého) [35].

b) Detekce a oprava chyb

Zde se využívají v hojném počtu přenosové kódy – detekční a opravné. Opravné kódy jsou samozřejmě výhodnější, nicméně potřebují více nadbytečných bitů při přenosu, takže jsou méně efektivní. Typičtí zástupci takových kódů [35]:

- i. Paritní bity – nízká redundance, jednoduché, bez možnosti opravy
- ii. Hammingův kód – oprava jedné chyby, detekce max. dvou, větší redundance
- iii. Reed-Solomon kód – detekce a oprava shluku chyb, primárně na ochranu bloku dat, pomalý

c) Pročišťování paměti

Týká se mnohonásobných chyb vzniklých vlivem SEU. Ty se mohou akumulovat do takové míry, že je detekční a opravné kódy nebudou schopny opravovat. Akumulování chyb zabraňuje právě pročišťování paměti. To se zakládá na periodickém čtení kódového slova z paměťového bloku. Při detekci chyby v bloku dat se daný blok přehraje správnými daty [35].

d) Reinitializace obvodu

V časových úsecích se dá obvod restartovat a tím nastavit paměti, klopné obvody atd. do počátečního stavu. Tím se úplně zbavíme vlivu předchozích chyb [35].

4. Záření odolné součástky

V této kapitole najdeme vybrané zástupce radiačně odolných součástek a obvodů od předního výrobce polovodičových součástek Texas Instruments.

4.1 Význam radiační odolnosti

Informace o odolnosti vůči záření není u součástek jen tak. Výrobce nám zaručuje spolehlivost a funkčnost součástky nebo zařízení do udávaného limitu záření. V tomto limitu by se neměla projevit změna výkonových charakteristik, která by ovlivnila funkčnost.

Sami výrobci si své součástky často dělí do kategorií Radiation-Tolerant a Radiation-hard. Tyto dvě kategorie pouze rozlišují odolnost na nižší a vyšší.

4.2 Zástupci záření odolných součástek

Následuje skromný výběr součástek z portfolia Texas Instruments. Zbytek je možný ke zhlédnutí na stránkách výrobce www.ti.com nebo přímo ve formátu pdf v [39].

Tab. 4.1 Zdroje referenčního napětí, zdroj [39]

Název	Odolnost [krad]	Přesnost [%]	Napěťová reference [V]	Výstupní proud [mA]	Pouzdro
LM 4050QML	100	0.1	3.3	15	10-CS0IC
TL 1431-SP	30	0.4	2.5	20	T046-2
LM136-2.5QML	100	2.5	2.5	10	T046-3

Tab. 4.2 Komparátory a OZ, zdroj [39]

Typ	Název	Odolnost [krad]	Doba odezvy/ GBP [μ s/MHz]
Komparátor	LM111 QML	50	0.2
Komparátor	LM119 QML	100	0.05
OZ	LM101 AQML	50	1.0
OZ	LM124-SP	40	1.2

Tab. 4.3 Logické obvody, zdroj [39]

Název	Typ	Odolnost [krad]
SN54AC14-SP	Schmittův KO	50
SN54AC02-SP	4x NOR	50
SN54AC74-SP	D KO	100

Tab. 4.4 A/D převodníky, zdroj [39]

Název	Odolnost	Vzorkovací rychlost	ENOB
ADC08D1520QML	300	1.5 GSPS	9.0
ADS5444-SP	100	250 MSPS	11.3

Závěr

V práci jsem zpracoval popis druhů ionizačního záření, kde větší část byla věnována kosmickému záření, jakožto hlavnímu vlivu v důležité oblasti používání polovodičových součástek – průzkumu vesmíru a komunikačním družicím.

V kapitole dva jsem se zabýval popisem degradačních procesů v polovodičích, ze kterých jsem poté vycházel při popisu základních stavebních prvků polovodičových obvodů - diod, tranzistorů a integrovaných obvodů. Tento popis je zaměřen převážně na vlivy na Volt-Ampérové charakteristiky s uvedenými příklady reálných měření vybraných typů součástek.

Ve třetí kapitole jsem nastínil problematiku návrhu obvodu pro použití v oblasti s ionizačním zářením. K úspěšnému návrhu je potřeba znát potřeby cílového prostředí, což jsem uvedl v tabulce 3.1. Také jsem uvedl alternativní možnosti využívané při návrhu obvodů pro práci v prostředí se zářením.

Oproti původnímu zadání jsem se odchýlil v bodě 3. zadání – zjištění velikosti dávky pro poruchu běžné součástky. To je věc velice specifická, závisující na použité výrobní technologii. Některé technologické postupy výroby ochrany proti ionizačnímu záření přirozeně pomáhají, byť to není původně zamýšleno. Je tedy možné, že vlivy na součástky, byť stejného druhu (např. MOS tranzistory), jsou odlišné. V několika případech jsem na tento fakt poukázal při popisu degradačních vlivů v kapitole dva.

Původní bod 5. zadání jsem zahrnul do podkapitoly 4.1 s tím, co nám radiační odolnost zaručuje. Opět je lepší najít přímá data pro součástky s námi požadovanými parametry. Tabulkové porovnání hodnot součástky běžné a odolné podobných parametrů by nepřineslo nic než prázdná data, jelikož nehledáme součástky pro specifické použití. Testování více kusů daného typu je výhodnější z hlediska lepšího statistického náhledu na odolnost běžných součástek. To je i nastíněno v kapitole tři. V kapitole dva je také možné vidět na grafech charakteristik vliv různých druhů záření na součástky, z čehož je možné odvodit vliv na funkci dané součástky.

Použitá literatura

- [1] Radiobiologie: *Ionizující záření* [online]. [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/13/131.html>
- [2] RNDr. Vojtěch Ullmann: *1.6. Ionizující záření* [online]. [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>
- [3] Portál 2. LF: *Radiační ochrana v nukleární medicíně* [online]. [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://mefanet-motol.cuni.cz/download.php?fid=1562>
- [4] TESEC: *Radiation Interaction* [online]. [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.tesec-int.org/TechHaz-site%2008/Radiation-interaction.pdf>
- [5] Fukátko, T. *Detekce a měření různých druhů záření*. Praha: BEN, 2006. ISBN 80-7300-193-4
- [6] Jaderná energie: *Ionizující záření* [online]. [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k22.htm>
- [7] Švec, J. *Radioaktivita a ionizující záření*. Ostrava: SPBI, 2005. ISBN 80-86634-62-0.
- [8] Katedra fyziky Přf OU: *Multimediální encyklopedie atomové a kvantové fyziky* [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/mmfiz/jm/img/small/17.jpg>
- [9] Radiobiologie: *1.4.1 záření alfa* [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/141.html>
- [10] Radiobiologie: *1.4.2 záření beta* [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/142.html>
- [11] Converter: *Dolet beta částic* [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/dolet-beta.htm>
- [12] Musílek, L. *Úvod do fyziky ionizujícího záření*. Praha, SNTL, 1979.
- [13] Radiobiologie: *1.4.5 Rentgenové záření* [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/145.html>
- [14] Radiobiologie: *1.4.3 záření gama* [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/143.html>
- [15] Šeda, J. *Dozimetrie ionizujícího záření*. Praha, SNTL, 1983.
- [16] FESAus [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://fesaus.org/glossary/lib/exe/fetch.php?media=terms:glsp73f1.gif>
- [17] Texas Instruments: *Radiation Owner's Manual – Glossary of Measurement Terms* [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://www.ti.com/ww/en/hirel/space/files/ROM_Overview_Glossary.pdf
- [18] Texas Instruments: *Radiation Owner's Manual – Issues, Environments, Effects (cont.)* [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://www.ti.com/ww/en/hirel/space/files/ROM_Issues.pdf
- [19] Radiobiologie: *1.4.4 Neutrony* [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/144.html>
- [20] Radiobiologie: *4.2.1 Kosmické záření* [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/4-kapitola/42/421.html>
- [21] IHY 2007: *Val Allenovy radiační pásy* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://ihy2007.astro.cz/index.php/souvislosti/van_allen_belts/
- [22] redOrbit.com: *Van Allen Radiation Belt* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.redorbit.com/education/reference_library/space_1/solar_system/2574610/van_allen_radiation_belt/
- [23] Prof. Robert B. Laughlin: *The Deep Space Radiation Environment* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph241/copeland2/images/f1big.png>

- [24] sciencemag.org: *A Long-Lived Relativistic Electron Storage Ring Embedded in Earth's Outer Van Allen Belt* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.sciencemag.org/content/340/6129/186.abstract>
- [25] Česká skupina projektu AUGER: *Kosmické záření* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www-hep2.fzu.cz/Auger/cz/TOKZAR.jpg>
- [26] Spieler, H.: *Introduction to Radiation-resistant Semiconductors Devices and Circuits* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www-physics.lbl.gov/~spieler/radiation_effects/rad_tutor.pdf
- [27] Holbert, K. E.: *Radiation effects and damage* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://holbert.faculty.asu.edu/eee560/RadiationEffectsDamage.pdf>
- [28] Hopkinson, G., Poivey, C.: *Displacement Damage, Mechanism and Effects* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: space.epfl.ch/webdav/site/space/shared/industry_media/05%20DD%20issue3.pdf
- [29] Bisello, D. a kolektiv: *Radiation Damage of Standard and Oxygenated Silicon Diodes by 16 and 27 MeV Protons* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://rd48.web.cern.ch/rd48/technical-notes/rosetn00-08.pdf>
- [30] Khanna, S. M., Pepper, G. T., Stone, R. E.: *Neutron Radiation Induced Degradation of Diode Characteristics* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a263277.pdf>
- [31] Harris, R. H., Frasca, A. J., Patton, M. O.: *Displacement Damage Effects on the Forward Bias Characteristics of SiC Schottky Barrier Power Diodes* [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=1589216&tag=1>
- [32] Johnston, A. H.: *Radiation Damage of Electronic and Optoelectronic Devices in Space* [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: http://nepp.nasa.gov/docuploads/D41D389D-04D4-4710-BBCFF24F4529B3B3/Dmg_Space-00.pdf
- [33] Shatalov A.: *Radiation effects in III-V semiconductors and heterojunction bipolar transistors* [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/handle/1957/33262>
- [34] Marciniak, W.: *Polovodičové součástky typu MIS*. Praha, SNTL, 1979.
- [35] Makowski, D.: *The Impact of Radiation on Electronic Devices with the Special Consideration of Neutron and Gamma Radiation Monitoring* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://jra-srf.desy.de/sites/site_jra-srf/content/e86/e575/e605/infoboxContent608/care-thesis-06-004.pdf
- [36] Olivka, P.: *Technologie výroby číslíkových obvodů* [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://poli.cs.vsb.cz/edu/arp/down/technologie.pdf>
- [37] Saraswat: *Integrated circuit isolation technologies* [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.stanford.edu/class/ee311/NOTES/Isolation.pdf>
- [38] NASA, Radiation Effects and Analysis: *Single Event Effects* [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/see.htm>
- [39] Texas Instruments: *Space Products* [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/sg/sgzt006b/sgzt006b.pdf>

Přílohy