

Oponentský posudek na bakalářskou práci

Studium radiační odolnosti monolitických křemíkových detektorů

Autor práce: Václav Trličík

Posuzovaná bakalářská práce se zabývá problematikou radiačního prostředí na orbitě Země a možností mapovat toto prostředí pomocí polovodičových křemíkových detektorů. Experimentální část je věnována zjišťování radiačního poškození monolitických křemíkových detektorů vyvinutých na FJFI ČVUT.

Podle zadání bakalářské práce bylo jejím cílem charakterizovat ionizující záření v kosmickém prostředí, popsat polovodičové detektory záření, prostudovat vlivy radiačního záření na jejich vlastnosti a nakonec experimentálně ověřit radiační odolnost vyvinutých monolitických detektorů.

Práce je členěna do 5 kapitol, které jsou strukturované v souladu se zadáním práce, a včetně úvodu a závěru má 65 stran. Práce navíc obsahuje také přílohu s grafy s naměřenými výsledky, které nebyly vloženy přímo do hlavního textu práce.

První kapitola osahuje podrobný popis kosmického záření, popisuje jeho zdroje a složení v různých zemských výškách (sférách Země), vysvětluje, jak je kosmické záření ovlivňováno např. atmosférou, magnetickým polem Země nebo Slunečními erupcemi. Popisuje energetické spektrum kosmického záření, jeho toky a složení.

Ve druhé kapitole autor hodnotí výhody polovodičových materiálů v částicových detektorech, popisuje vlastnosti p-n přechodu jako detekčního media a vysvětluje princip detekce a formování signálu při průchodu detekované částice. Jsou zde popsány různé druhy polohově citlivých detektorů a způsob určování polohy částice procházející těmito detektory. Vysvětluje rozdíl mezi hybridním a monolitickým typem detektoru a detailně popisuje využití MOSFET tranzistorů pro detekci částic. V této kapitole je popsán monolitický pixelový detektor vyvinutý FJFI ČVUT, jehož radiační odolnost byla zkoumána v experimentální části práce.

Třetí kapitola je věnována základním mechanismům interakcí částic s hmotou. Je popsán rozdílný princip detekce nabitých částic, elektronů a fotonů v závislosti na jejich energii.

V kapitole 4 autor popisuje různé mechanismy radiačního poškození křemíkových detektorů a jeho důsledky. Je popsáno jak ionizační poškození, tak i mechanismus poruchy krystalové mřížky v závislosti na typu částice a její energii.



V praktické části práce (kapitola 5) jsou prezentována měření vlastností monolitického pixelového detektoru vyvinutého na FJFI ČVUT a vyrobeného pomocí 180 nm SOI-CMOS technologie. Jsou zkoumány změny jeho vlastností po ozáření. Bylo měřeno několik integrovaných struktur vzájemně se lišících typem technologie tranzistoru (PMOS nebo NMOS), velikostí kanálů a jestli je nebo není implementována vysoko-napěťová p-jáma. Vzorky byly postupně ozařovány zářením gama ze zdroje ^{60}Co a průběžně měřeny. Obdržely celkovou absorbovanou dávku 38 kGy. Byly zjišťovány volt-ampérové charakteristiky testovacích struktur pro různé hodnoty napětí hradla V_{GS} a stanovováno prahové napětí tranzistorů V_T . Dále byly sledovány změny proudové spotřeby během a po ukončení ozařování.

Závěrečná část shrnuje hlavní získané výsledky práce. Byla pozorována změna kolektorového proudu I_{DS} s ozářením, přičemž při nulovém napětí hradla byla tato změna výraznější než při maximálním napětí hradla $V_{GS} = 1.8$ V. Měřené volt-ampérové charakteristiky testovacích struktur tranzistorů a celková proudová spotřeba studovaných vzorků naznačují, že radiační poškození při určité radiační dávce saturuje. Vliv implementace vysoko-napěťové p-jámy na snížení proudu byl nevýznamný.

Bakalářská práce je sepsána přehledně a srozumitelně, má dobrou strukturu a dostatečný rozsah. Práce má kvalitní teoretický základ, který svědčí o tom, že student pronikl do problematiky kosmického záření a polovodičových detektorů. Kladně hodnotím aktuálnost zvoleného tématu - použití nových monolitických křemíkových detektorů pro monitorování kosmického záření na oběžné dráze.

Vybraná literatura obsahuje jak klasické publikace, tak nejnovější články v oboru. Dle seznamu použité literatury se autor seznámil s velkým množstvím materiálu.

Grafická úroveň práce je velmi dobrá. Obsahuje mnoho schematických obrázků, grafů a tabulek s kvalitním grafickým zpracováním a správně použitou citací.

K předložené celkově velice dobré bakalářské práci mám pouze tyto připomínky a dotazy k vysvětlení u obhajoby:

- Pro další vědeckou práci autorovi doporučuji věnovat větší čas jazykové stránce textu. Používání hovorových výrazů ve vědeckém textu, čímž bakalářská práce zajisté je, není vhodné. (Např.: ... *pro účely tohoto měření je **tohle** rozpětí hodnot dostatečné, ... čip se dvěma pixelovými **a** maticema*). V textu se objevují i občasné gramatické chyby (např. *tyto měření sloužily, ... které byly urychleny*) a v některých částech práce jsou použity formulace, které nejsou dostatečně přesné (např. na str. 47 kapitola 5.3.1. Měření temného proudu: *Tohle měření charakterizuje závěrný (temný) proud tranzistoru po ozáření.*)



- Jedním z cílů práce bylo zjišťování vlivu „annealingu“ na ozářené detektory. V práci chybí teoretický popis pojmu annealing. Popište, co si pod pojmem annealing představujete.
- V teoretické části na str. 42 zmiňujete změnu proudu způsobenou neionizačním poškozením polovodiče. O jaký proud se jedná? Byl tento proud zjišťován také na testovaných čipech X-CHIP-02 a X-CHIP-03? Jestli ano, choval se podle očekávání/teorie?
- Vysvětlíte rozdíl mezi v textu uváděnými proudy: svodový proud, temný proud, I_{DS} proud.
- V experimentální části chybí detailnější popis prováděných měření. Měřilo se v laboratoři nebo na místě ozařování? Jaké byly použity přístroje? Např. čím byly měřeny nízké proudy do desítek pA? Jaká je teplotní závislost proudu? Jaká byla teplota při měření a při ozařování? Jak bylo zajištěno, aby jednotlivá měření proudu mezi ozařováními byla prováděna při stejné teplotě popř., jakou chybu do velikosti proudu vnáší případné rozdílné teploty při jednotlivých měření.
- Pokud byl zjišťován vliv annealingu na chování čipů, pak v práci chybí alespoň hrubý odhad teploty, jaké byly čipy během pozastavení ozařování vystaveny.
- Práce je psaná v češtině, proto by měly být pojmy, u kterých existuje český název, alespoň jednou pojmenovány českými výrazy (např. *...je myšleno napětí na gate V_{GS} , při kterém začne procházet výraznější množství proudu z drain*).
- Při prvním použití veličiny je nutné jí nejprve zavést – popsat, co znamená. (např. I_{DS}).
- Jak lze vysvětlit výrazně vyšší kolektorové proudy I_{DS} při napětí hradla $V_{GS} = 1.8V$ než při napětí $V_{GS} = 0V$.

Celkově lze konstatovat, že předložená práce splnila své zadání a cíl a odpovídá požadavkům kladeným na bakalářskou práci v plném rozsahu. Bakalářskou práci doporučuji k obhajobě a navrhuji ji hodnotit stupněm **B – velmi dobře**.

V Praze dne 27. 8. 2020

Ing. Marcela Mikeščíková, Ph.D.