

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ústav elektroniky a fotoniky

**NÁVRH A ANALÝZA MODERNÝCH VÝKONOVÝCH
ELEKTRONICKÝCH PRVKOV PODPORENÁ MODELOVANÍM
A SIMULÁCIOU**

**DESIGN AND CHARACTERISATION OF ADVANCED POWER
DEVICES SUPPORTED BY MODELLING AND SIMULATION**

Autoreferát dizertačnej práce

Stupeň kvalifikácie: vedecko-akademická hodnosť philosophiae doctor

V odbore doktorandského štúdia: 5-2-13

Elektronika

Študijný program:

Mikroelektronika

Evidenčné číslo: FEI-10842-11951

Meno: Ing. Patrik Príbytný

Školiteľ: prof. Ing. Daniel Donoval, DrSc.

Bratislava 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na pracovisku Ústavu elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava.

Predkladateľ: **Ing. Patrik Príbytný**
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava
Ilkovičová 3
812 19 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Daniel Donoval, DrSc.**
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava
Ilkovičová 3
812 19 Bratislava

Oponenti: Ing. Jozef Osvald, DrSc., Elektrotechnický ústav SAV
Ing. Jan Halaj CSc. , Semikron s.r.o., Vrbové

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:

Pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia
vymenovanou predsedom odborovej komisie

v odbore 5-2-13 Elektronika

študijný program Mikroelektronika

V knižnici Ústavu elektroniky a fotoniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD
Dekan FEI STU

Obsah

1. ÚVOD	5
2. PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU	7
3. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	11
4. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY A PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	12
5. ZÁVER	17
6. SUMMARY	18
7. POUŽITÁ LITERATÚRA	19
8. ZOZNAM VLASTNÝCH PUBLIKÁCIÍ.....	22

1. Úvod

Elektrická energia našla na začiatku minulého storočia uplatnenie v mnohých oblastiach techniky. Úžitková hodnota elektrickej energie sa výrazným spôsobom zvyšuje s možnosťou meniť jej parametre t.j. napätie, prúd, frekvenciu. Prvý usmerňovač bol vyrobený približne v roku 1880 a slúžil hlavne ako zariadenie pre dobíjanie telefónnych batérií. Kvalitatívnym krokom bolo objavenie nelineárnych vlastností elektrického oblúka v ortuťových parách a ich aplikácia v ortuťovom usmerňovači v roku 1920. Už v dvadsiatych rokoch došlo k hromadnému nasadzovaniu ortuťových usmerňovačov. Revolúcia v elektronike sa začala v roku 1947 objavom nelineárnych vlastností P-N prechodu. V roku 1948 bol vynájdený prvý kremíkový tranzistor v Bellových telefónnych laboratóriách. Na jeho vývoji sa podieľali páni Bardeen, Bratain a Schockley. V silnoprúdovej elektrotechnike došlo v päťdesiatych rokoch po krátkom období germaniových diód a tranzistorov k všeobecnému použitiu súčiastok na báze kremíka. Postupne vznikli výkonové diódy, tyristory (1955), výkonové tranzistory (1964) a rada ďalších modifikovaných súčiastok. Bol to začiatok novej éry výkonovej elektroniky [1].

Zlepšovanie životnej úrovne stále zvyšuje dopyt po energii najmä v elektrickej forme. Výkonová elektronika efektívne napomáha pri úspornom využívaní elektrickej

energie, čím sa znižuje jej spotreba. Polovodičové zariadenia sa používajú ako spínače pre premenu energie alebo jej spracovanie. Vysoká účinnosť a nízke straty predurčujú využitie výkonových prvkov pre širokú oblasť aplikácií. V súčasnosti sa nové výkonové súčiastky a výkonové prvky v elektronických systémoch vyvíjajú tak, aby boli ešte účinnejšie a lepšie spĺňali požiadavky pre kontrolu výkonu a energie. K dynamickému rozvoju dnešných polovodičových súčiastok významne prispieva rozsiahle používanie počítačových automatických návrhových prostriedkov.

S prevádzkou polovodičových súčiastok je spojený stratový výkon, vznikajúci na súčiastke, ktorý má za následok vznik Jouleovho tepla a zvýšenie teploty a objemu súčiastky. Pri prekročení určitého kritického stratového výkonu dochádza k nárastu teploty súčiastky do hodnoty, kedy dôjde k prekročeniu kritickej teploty s následným tepelným prierazom súčiastky. Okrem toho, veľa parametrov súčiastok je nepriaznivo ovplyvňovaných narastajúcou teplotou a preto je dôležité venovať pozornosť tepelnému manažmentu. Tepelný manažment zohráva pri návrhu, konštrukcii a výrobe elektronických súčiastok veľmi dôležitú úlohu. To je spôsobené tým, že v zmenšujúcich sa rozmeroch je integrovaný stále väčší výkon. Preto je potrebné, aby bol riešený odvod tepla s ohľadom na zaistenie spoľahlivej funkcie a životnosti každého zariadenia. Je dôležité pochopiť a riešiť konkrétne prípady pomocou vytvárania náhradných tepelných obvodov a v náväznosti na to dokázať modelovať tepelné pomery. Správanie a vlastnosti polovodičových súčiastok sú dané ich geometriou a koncentračným profilom. Hlavným cieľom simulácie je vytvoriť model virtuálnej štruktúry s rovnakými parametrami, ako má reálna štruktúra. Veľký pokrok a výkonnosť počítačového hardvéru a softvérových balíkov dovoľuje simulovať polovodičové štruktúry nielen v jednom smere, ale aj v dvoj a trojrozmernom priestore. S rastúcimi nárokmi na elektrické zariadenia a ich cenu je potrebné vyvíjať a navrhovať nové polovodičové systémy, alebo optimalizovať existujúce polovodičové prvky. Simulácie sú ekonomicky výhodné, pretože nahrádzujú drahé a zdĺhavé experimentálne práce pri snahe overiť nové postupy a dosiahnuť zlepšenie parametrov súčiastky. Kvôli potrebe zachovania konkurencieschopnosti sú na výkonové prvky kladené požiadavky znižovania výrobných nákladov, pričom vlastnosti jednotlivých štruktúr sa majú neustále zlepšovať.

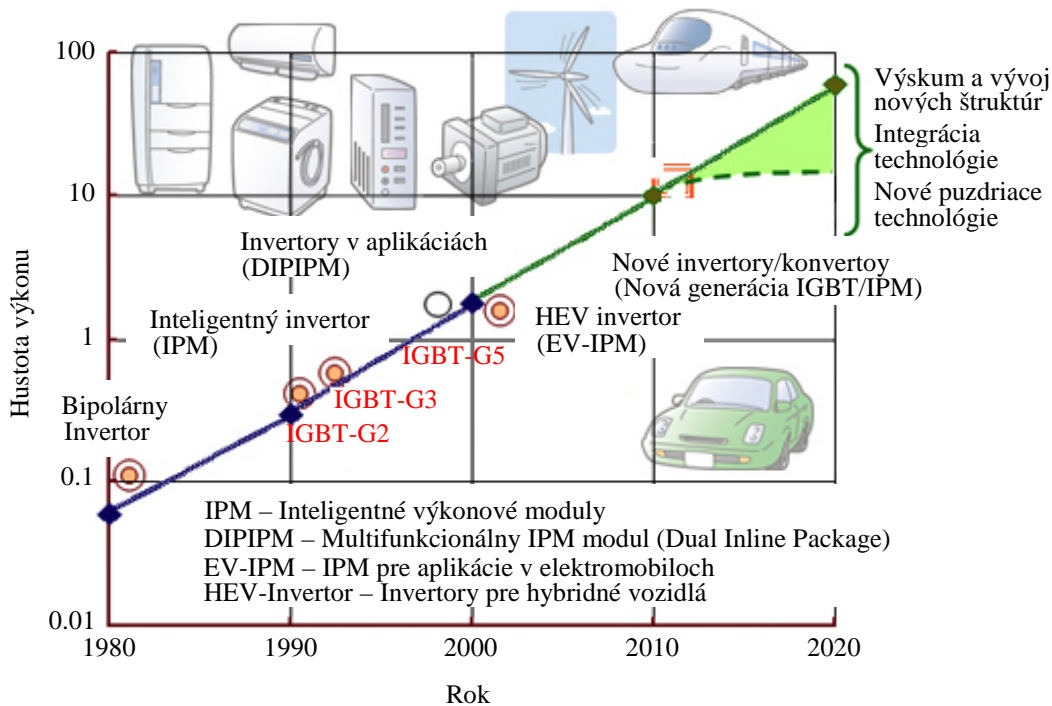
Cieľom predloženej dizertačnej práce je získanie nových poznatkov o elektro-fyzikálnych vlastnostiach výkonových polovodičových prvkov. Proces vývoja je

podporený 2 / 3-D modelovaním a simuláciou koncentračných profilov a elektrických charakteristík pomocou softvéru spoločnosti SYNOPSIS Sentaurus [2]. Výstup simulácií sme porovnávali s experimentálnymi výsledkami na pripravených štruktúrach, následkom čoho je optimalizácia technologického postupu prípravy a konštrukcie rôznych typov štruktúr výkonových modulov. V práci sa pozornosť zameriava na výkonové moduly a ich diódové čipy. Práca je členená do niekoľkých kapitol, ktoré sú usporiadané nasledovne:

Úvodná kapitola obsahuje teóriu popisujúcu konštrukciu a vybrané vlastnosti základných výkonových prvkov a modulov, ako aj analýzu aktuálnych trendov v danej oblasti. V nasledujúcej kapitole sú popísané metódy zlepšujúce vlastnosti polovodičových súčiastok. V tretej kapitole je popísaný princíp počítačovej simulácie, úvod do modelovania procesov a elektro - fyzikálnych vlastností elektronických systémov. Záverečná kapitola, najrozsiahlejšia časť práce, obsahuje množstvo simulácií a experimentálnych výsledkov doplnených komentárom a diskusiou.

2. Prehľad súčasného stavu

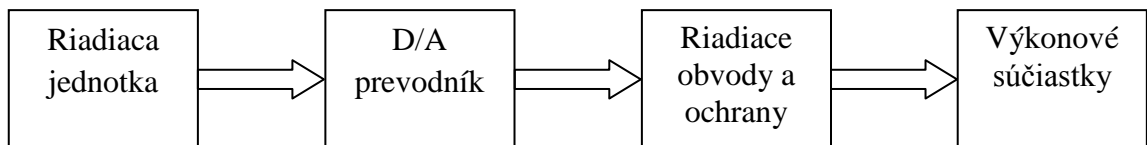
Výkonová elektronika už našla významné miesto v moderných technológiách a ponúka nám revolučné ovládanie výkonu a energie. Vzhľadom k neustále zlepšujúcej napäťovej, prúdovej zaťažiteľnosti a spínacím vlastnostiam výkonových polovodičových súčiastok sa ich možnosti aplikácie neustále rozširujú. Výkonové prvky sa používajú v mnohých aplikáciách ako napríklad: riadenie vo svetelnej technike, napájacie zdroje pre riadenie pohybu, priemyselná automatizácia, preprava, skladovanie energie, megawatové priemyselné pohony, prenos elektrickej energie a distribúciu. V súčasnosti môžeme sledovať rýchly rozvoj výkonovej elektroniky, ktorá umožňuje ovládanie stále väčších výkonov a v spojení s výpočtovou technikou umožňuje rozvoj automatizovaných systémov riadenia, robotiky a pod. Toto napredovanie výkonovej elektroniky je spojené s vývojom a zdokonaľovaním výkonových prvkov, ktorými sú polovodičové súčiastky a integrované štruktúry. Polovodičové súčiastky sú v dnešnej dobe integrálnou súčasťou nielen výpočtovej a komunikačnej techniky, spotrebnej elektroniky, lekárskej elektroniky, ale aj mnohých aplikácií rôznych technologických zariadení a systémov v priemysle a domácnosti.



Obr. 1 Vývoj a plánovaný rast hustoty výkonu vo výkonovej elektronike.

Nároky, ktoré sú kladené na výkonové súčiastky neustále narastajú. Zväčšujú sa požiadavky na spoľahlivosť, rýchlu operačnú schopnosť, veľké medzné prúdy a záverné napätie, nízke straty, vysokú integráciu, nízke výrobné náklady, vysokú odolnosť a prevádzky schopnosť pri vysokých teplotách a frekvenciách [3], [4]. Na obrázku 1 je zobrazený vývoj výkonovej elektroniky po súčasnosť a predpokladaný vývoj v budúcnosti.

Výkonové polovodičové súčiastky sú obvykle súčasťou systému, ktorým sa ovláda premena elektrickej energie napájacieho zdroja na iné formy energie, ako napríklad: mechanickú, tepelnú a pod. Ako je schematicky znázornené na obrázku 2, celý takýto systém je možné rozdeliť na blok logického riadenia, blok prevodu logického signálu na riadiaci signál pre výkonové súčiastky, blok výkonových súčiastok, ovládanie zariadení, blok ochrany proti preťaženiu súčiastok a senzory správnej funkcie zariadenia, ktoré sú spojené spätnou väzbou s blokom logického riadenia. Ak sú obvodové riešenia s výkonovými polovodičovými súčiastkami realizované z diskretných súčiastok, vyžadujú si relatívne veľký objem daný veľkosťou puzdier a chladičov. Pritom je potrebné riešiť odvod tepla zo súčiastok, ktoré pracujú na rozdielnych potenciáloch a je nutné, aby boli elektricky izolované. Prepojenie súčiastok vodičmi vnáša ďalšie prídavné parazitné indukčnosti, ktoré môžu mať rôzne nepriaznivé vplyvy.



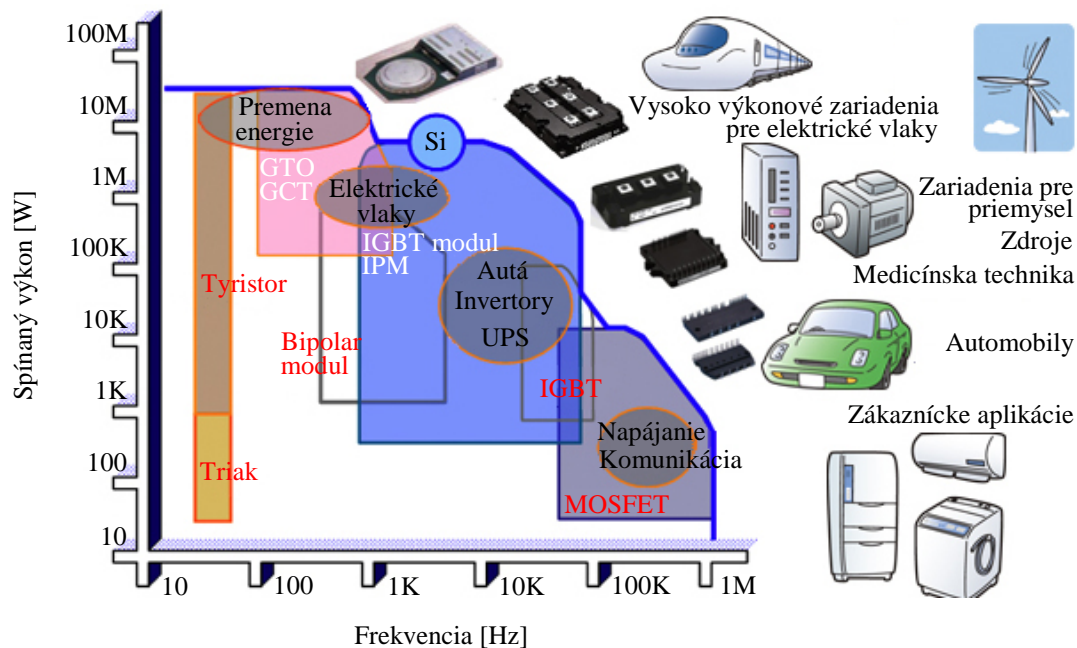
Obr. 2 Schematické znázornenie výkonového polovodičového systému.

Z hľadiska zjednodušenia obvodových riešení, montáže a úspory materiálu (puzdier, chladičov, izolačných a spojovacích materiálov) a z hľadiska zmenšenia objemu zaťaženia, je výhodné spájať súčiastky, alebo časti zariadení do funkčných celkov realizovaných v spoločnom puzdre. Pritom môže ísť o integráciu rôzneho typu súčiastok.

Stupeň integrácie jednotlivých častí zariadení môže byť rôzny. Tranzistory VDMOS, tranzistory IGBT, tyristory GTO a pod. sú integrované štruktúry, obsahujúce v jednom čipe veľké množstvo paralelne spojených málo výkonových elementárnych štruktúr (tranzistory VDMOS obsahujú aj antiparalelné diódy), ale sú uvažované ako jedna súčiastka z hľadiska aplikácie v obvode. Ak sú súčiastky spájané do funkčných celkov, môžeme hovoriť o:

- Spojení niekoľkých výkonových súčiastok do jedného puzdra (tzv. moduly, [5], [6], [7]).
- Spojenie častí logických, riadiacich obvodov a výkonových súčiastok do jedného celku (tzv. výkonové integrované obvody) [8].
- Integrácia logických obvodov, prevodníkov a riadiacich obvodov (tzv. ASUC - Application Specific Integrated Circuit, [9], [10]).
- Spojenie výkonových súčiastok a senzorov, doplnených ochrannými a riadiacimi obvodmi s určitými funkciami (tzv. SMART, SOFT a INTELLIGENT POWER, inteligentné výkonové súčiastky a obvody, inteligentné výkonové moduly IPM, [11], [12]).

Prvé výkonové zapojenia mali štruktúru, v ktorej sa integrovalo mnoho diskretných polovodičových súčiastok. Aby bolo možné jednoduchšie a efektívnejšie využívať možnosti výkonových súčiastok, bol vytvorený výkonový modul. V takomto výkonovom module sa nachádza zapojenie hlavného obvodu prostredníctvom výkonových diód, tyristorov a IGBT štruktúr.



Obr. 3 Polia aplikácie jednotlivých výkonových prvkov vzhľadom na frekvenciu spínania a spínaného výkonu.

V ďalšom období bolo do takýchto modulov integrované riadenie a ochranné funkcie, čím vznikli inteligentné výkonové moduly (IPM). Na obr. 3 vidíme možnosti aplikácií jednotlivých výkonových prvkov vzhľadom na frekvenciu spínania a spínaného výkonu [13], [14], [15]. K dynamickému rozvoju dnešných polovodičových súčiastok významne prispieva rozsiahle používanie počítačových automatických návrhových prostriedkov CAD. Technológia CAD je venovaná simulácii výrobného procesu a funkčnému správaniu sa jednotlivých, alebo niekoľkých súčiastok. Pomáha lepšie pochopiť vnútorné elektro - fyzikálne správanie sa nových štruktúr, pri ktorých sa snažíme vývojom zlepšovať ich vlastnosti. Simulácie celkovo znižujú cenu vývoja, nahradzujú drahé a zdĺhavé experimentálne práce pri snahe dosiahnuť zlepšenie parametrov súčiastky. Simulačné programy využívajú modely reálnych súčiastok alebo zjednodušené modely. V simulačnom programe vieme vytvoriť model polovodičovej súčiastky odpovedajúci skutočnosti a v ďalšom kroku daný model kalibrovať a doladiť pomocou meraných charakteristík a vlastností prvku. Tieto postupy sa využívajú nielen vo vývoji, ale aj v praxi pri optimalizácii a znižovaní ceny konečného výrobku. Modelovanie a simulácia nahradzuje mnohé experimenty a tým umožňuje zefektívniť úsilie vynaložené na výskum [16], [17], [18], [19].

3. Ciele dizertačnej práce

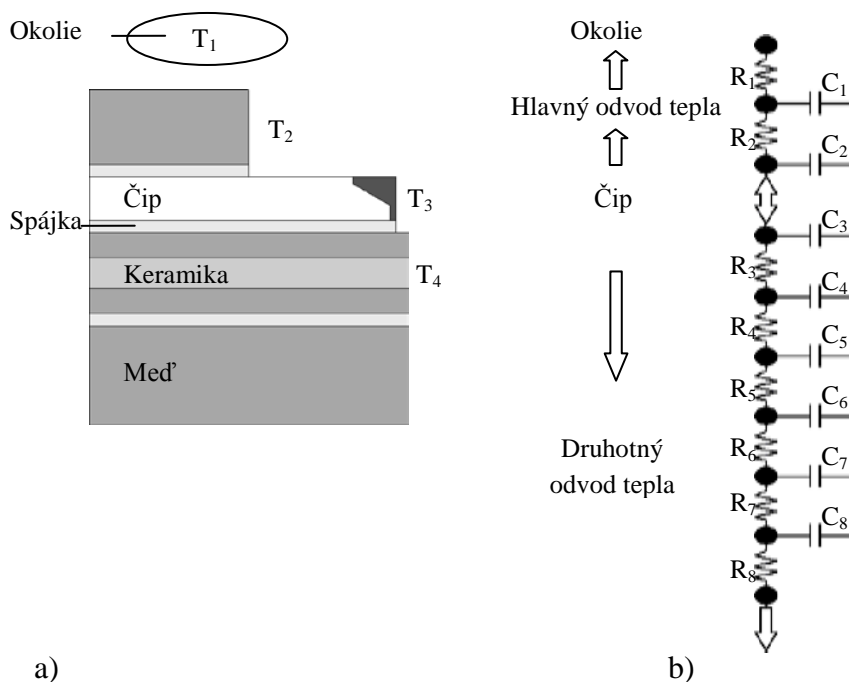
Vzhľadom na aktuálnu problematiku v oblasti výkonových prvkov je práca zameraná na analýzu a návrh moderných výkonových elektronických súčiastok a modulov podporená modelovaním a simuláciou. Z toho vyplynuli pre dizertačnú prácu nasledovné čiastkové úlohy a ciele:

- Získať nové poznatky o správaní výkonových prvkov a spoznať ich elektro - fyzikálne vlastnosti. Ako aj oboznámiť sa s vlastnosťami materiálov a štruktúr za rôznych podmienok.
- Navrhnuť modely štruktúr výkonových súčiastok s podporou 2 / 3-D modelovania a simulácie koncentračného profilu a elektro - tepelných charakteristík rôznych typov výkonových prvkov. Modelovať elektro - tepelné vlastností vzhľadom na celé puzdro súčiastky s odvodom tepla do priestoru.
- Porovnaním výsledkov simulácie a experimentálnych meraní optimalizovať elektro - fyzikálne modely a kalibrovať ich parametre tak, aby bola dosiahnutá dobrá zhoda medzi meraniami a simuláciami pre statické a dynamické vlastnosti daného výkonového prvku.
- Podľa výsledkov simulácií optimalizovať čipy výkonových modulov tak, aby dosahovali požadované vlastnosti pri elektro – tepelnom namáhaní v puzdre súčiastky.
- Dosiahnuté poznatky použiť pri modelovaní, návrhu a analýze nových výkonových prvkov.

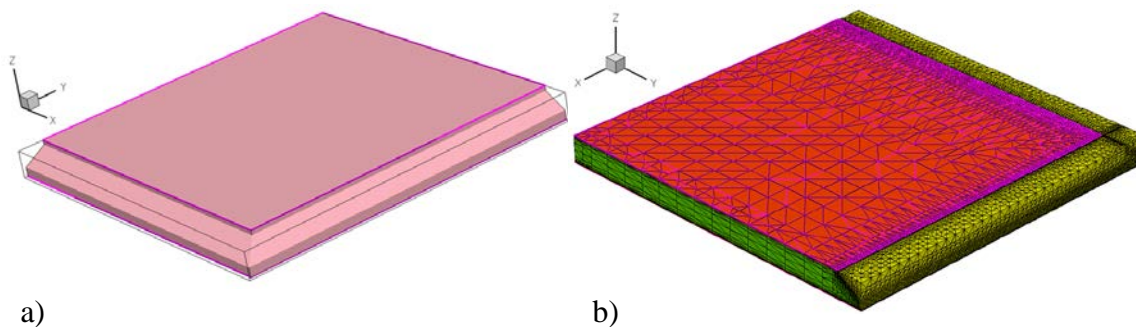
4. Dosiahnuté výsledky a prínos dizertačnej práce

V predloženej práci som v úvode experimentálnej časti popísal elektro - fyzikálne vlastnosti a konštrukciu skúmanej výkonovej diódy a výkonového modulu slúžiaceho zároveň ako puzdro diódových čipov. Všetky typy čipov, ktoré sme analyzovali sú vytvorené na N type substrátu dvoma N^+ a P^+ vysoko dotovanými oblasťami. Pre merania boli k dispozícii zapuzdrené, ako aj nezapuzdrené štruktúry výkonových diód P^+NN^+ vyrobených obojstrannou difúziou do $63 \Omega\text{cm}$, $350 \mu\text{m}$ hrubého kremíka (Obr. 5). Aktívna plocha čipu je $9,8 \text{ mm} \times 9,8 \text{ mm}$ a celková plocha čipu s rezom a pasiváciou je $10,3 \text{ mm} \times 10,3 \text{ mm}$. Vzhľadom na veľkosť štruktúry je 2-D simulácia celej štruktúry veľmi náročná na použitý výpočtový výkon a simulačný čas. Preto sme zmenili rozmer simulovanej štruktúry, aby jej dĺžka v osi x bola $2450 \mu\text{m}$ Obr. 4 (štvrtina celkového rozmeru, zvyšnú plochu sme vykompenzovali areafaktorom v simulátore). Treba si však uvedomiť, že aj takto upravená štruktúra je veľká a obsahuje veľa výpočtových bodov.

V ďalšej kapitole pomocou statického difúzno - driftového modelu a termodynamického modelu popisujem kalibráciu simulácie diódovej štruktúry a verne ňou modelujem reálnu výkonovú súčiastku. Kalibráciou sme dosiahli veľmi dobrú zhodu medzi meraním a simuláciou.



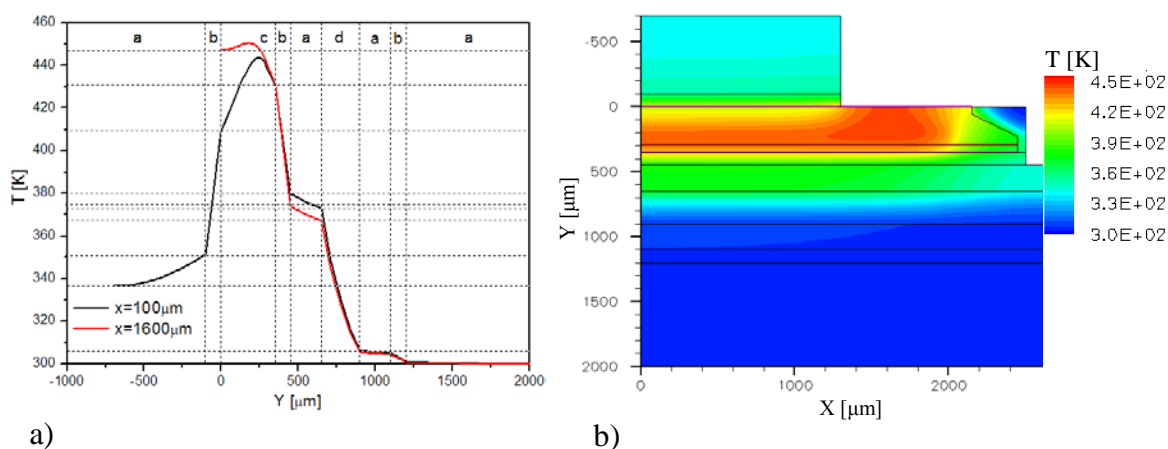
Obr. 4 a) Rez štruktúrou v puzdre. b) Tepelná RC sieť.



Obr. 5 a) Usporiadanie diódy, b) 3D profil čipu skúmanej štruktúry.

Pomocou variácie doby života nosičov náboja v SRH a Augerovej rekombinácii bola vyladená volt - ampérová charakteristika [20], [21]. Určili sme kritickú teplotu a navrhli 2-D simulácie elektrických vlastností za požadovaných podmienok [22]. Potom bol vytvorený elektrotepelný model štruktúry z odporovej a kapacitnej siete (Obr. 4 b). Týmto sme boli schopní analyzovať rozloženie teploty v štruktúre počas simulácií. Treba brať do úvahy, že prezentované výsledky platia pre čip, ktorý je testovaný prúdovým impulzom danej dĺžky. To znamená, že čip nie je zaťažovaný neustálou prevádzkou, ale polperiodovým prúdovým impulzom s danou časovou dĺžkou. A preto sa tu uplatňujú tepelné kapacity majúce vplyv na rozdielne šírenie tepla.

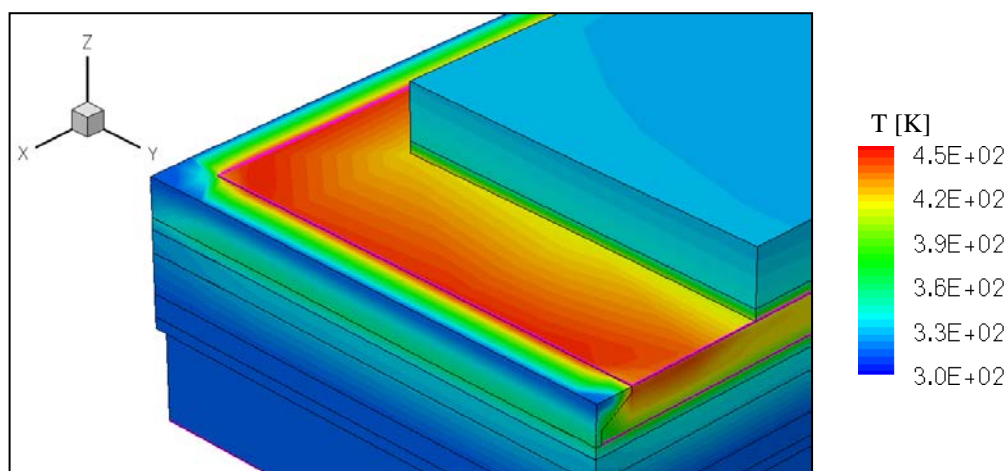
Modelovaním elektrotepelného správania výkonovej diódy v puzdre s ďalšími pridanými vrstvami nám umožňuje optimalizovať vlastnosti daného prvku (Obr. 6). Zistili sme, že teplota pri maxime prúdového impulzu sa nedokázala šíriť tak, aby hlavný chladič (základná medená platňa) bol efektívne využívaný.



Obr. 6 a) Teplota v reze štruktúrou a b) 2D simulácia rozloženia teploty v čipe a v ďalších vrstvách pri prúdovom impulze 3100 A, v čase $7,5 \times 10^{-3}$ s.

Keramik v DCB doske má dostatočne vysoký tepelný odpor a tepelnú kapacitu, čím bráni prechodu tepla. Vytvorili sme simuláciu štruktúry so zmeneným rozmerom horného katódového kontaktu. Výsledkom simulácie je, že pri upravenom rozmere kontaktu, maximálna teplota čipu klesne o 25 K [23], [24], [25], [26]. Následne sme sa zamerali na modelovanie a simuláciu vplyvu zmien jednotlivých geometrických parametrov čipu, vo výrobnom procese, na elektrické parametre výkonových diód. Sústredili sme sa na vplyv skosenia hrany čipu v elektrotepelných simuláciách. So zväčšovaním uhla skosenia sa nám obmedzujú možnosti s manipuláciou hĺbky a šírky rezu. So znižovaním uhla rezu sa plocha rezu zväčšuje a tým sa obmedzuje aktívna plocha diódy. Preto sme k simuláciám pristupovali tak, aby výsledkom bolo optimálne riešenie. Podľa odsimulovaných štruktúr vieme povedať, že uhly skosenia do 30° a od 90° nie sú vhodné pre diódové čipy namáhané takýmto stresom. Čím má čip menší uhol skosenia hrany, tým je elektrické pole viac vtláčané do štruktúry a tým je maximálna teplota vyššia.

V poslednej kapitole je popísaný trojdimenzionálny model štruktúry. V tejto kapitole sme skúmali pomocou modelovania a simulácií vybrané štruktúry, ktoré boli modelované v trojrozmernom priestore. Skúmali sme vplyvy zmien na elektrické parametre vyhodnotené v predchádzajúcich kapitolách. Vytvorením celkového 3-D modelu výkonovej diódy s elektro - fyzikálnymi vlastnosťami reálnej štruktúry získavame ucelený pohľad na priebeh vnútorných dejov a charakteristík danej súčiastky [27], [28].



Obr. 7 3-D simulácia rozloženia teploty v čipe a v ďalších vrstvách pri prúdovom impulze 2700 A, v čase $7,5 \times 10^{-3}$ s.

Použitie termodynamického modelu v popise štruktúry nám umožnilo modelovať priebeh rozloženia teploty v 3-D simuláciách skúmaného prvku (Obr. 7). Pridanie a spojenie jednotlivých vrstiev s čipom umožňuje prostredníctvom simulácií pohľad na elektrotepelný systém puzdra ako na jeden celok.

Výsledkom simulácií je trojdimenzionálny model reálneho, skúmaného prvku a vhodne zvolenej, upravenej štruktúry, ktorú sme vytvorili pomocou výsledkov analýz z predošlých kapitol. Štruktúry sú simulované za rovnakých podmienok. Prínosom 3D simulácií je pohľad do objemu štruktúry, kde sú jasne vidieť a ľahko sa identifikujú miesta s vysokou prúdovou hustotou a miesta, kde teplota dosiahla svoju kritickú hodnotu. V konečnom dôsledku dobrá zhoda medzi simuláciou a meraním poukazuje na správnosť výsledkov simulácií a výber vhodných fyzikálnych modelov.

Najdôležitejšie dosiahnuté výsledky dizertačnej práce možno definovať v nasledovných bodoch:

- Získali sme nové poznatky o elektro - fyzikálnych vlastnostiach a správaní sa rôznych typov výkonových súčiastok a modulov v závislosti od ich použitia, zapojenia, výberu technológie, ako aj spôsobu ich merania a testovania.
- Navrhli sme nové modely štruktúr výkonových diód v spojení s tepelným manažmentom výkonového modulu ako celku. Tieto modely sú vhodné pre 2 / 3-D elektrotepelne simulácie elektrických a tepelných charakteristík.
- Porovnaním simulovaných a experimentálne nameraných výsledkov sme extrahovali a následne kalibrovali elektro - fyzikálne parametre v modeloch pre simuláciu elektrických vlastností, a to v SRH a Augerovej rekombinácii so zmenou času života nosičov.
- Analyzovali sme vplyv fluktuácií vybraných parametrov, najmä tepelnej siete jednotlivých oblastí a geometrie na elektro - tepelné vlastnosti analyzovaných štruktúr.
- Na základe dosiahnutia veľmi dobrej zhody medzi simulovanými a experimentálne nameranými výsledkami na pôvodných štruktúrach sme navrhli a optimalizovali nové typy štruktúr vo viacerých modifikáciách s požadovanými elektrickými vlastnosťami prierazného napätia a odolnosti na stres spôsobený prúdovým impulzom.

5. Záver

Správanie a vlastnosti polovodičových súčiastok sú dané ich geometriou a koncentračným profilom. Hlavným cieľom simulácie procesu výroby je vytvoriť model virtuálnej štruktúry s rovnakými parametrami, ako má reálna štruktúra. Veľký pokrok a výkonnosť počítačového hardvéru a softvérových balíkov dovoľuje simulovať polovodičové štruktúry nielen v jednom smere, ale aj v dvoj a trojrozmernom priestore. S rastúcimi nárokmi na elektrické zariadenia a ich cenu je potrebné vyvíjať a navrhovať nové polovodičové systémy alebo optimalizovať existujúce vyrábané polovodičové prvky. Simulácie nahrádzujú drahé a zdĺhavé experimentálne práce pri snahe overiť nové postupy a dosiahnuť zlepšenie parametrov súčiastky.

Na splnenie predsavzatých cieľov bolo potrebné okrem množstva experimentov poznať a vedieť interpretovať fyzikálne procesy prebiehajúce v polovodičových štruktúrach, a to z dôvodu správneho a efektívneho využitia počítačových simulácií. Všetky tieto vedomosti sú zhrnuté v teoretickej časti tejto práce v prvých troch kapitolách. V poslednej, najrozsiahlejšej kapitole je popísaná experimentálna časť práce. Použitím vhodných fyzikálnych modelov sme simulovali elektrotepelné vlastnosti výkonovej diódy. Tieto modely boli v 2-D simuláciách vyhodnocované z viacerých hľadísk, aby sa minimalizoval nesúlad medzi simuláciou a realitou. Najskôr bol model kalibrovaný a určili sa okrajové podmienky ako kritická teplota a maximálne elektrické pole (tieto podmienky platia rovnako aj pre 3-D simuláciu). Ďalej sme analyzovali tepelný systém výkonového modulu a vplyv geometrických zmien čipu na celkové vlastnosti štruktúry. Nakoniec sme zvolili vybrané štruktúry, ktoré boli analyzované a simulované v trojrozmernom priestore.

V mojej práci je prezentovaných niekoľko celkových analýz výkonových diód a modulov, pričom pre hlbšiu fyzikálnu analýzu experimentálnych výsledkov sme použili 2/3-D modelovanie a simuláciu v prostredí programových nástrojov umožňujúcich simuláciu technologických procesov a elektrických vlastností polovodičových prvkov vyvinutých spoločnosťou Synopsys. Pretože väčšina dnes používaných metód testovania odolnosti štruktúr končí zničením testovaného prvku, simulácie vystupujú do popredia ako efektívny nástroj na nedeštruktívne testovanie, analýzu kritických oblastí a optimalizáciu elektrických parametrov súčasných alebo vyvíjaných výkonových polovodičových prvkov.

Problematika a výsledky obsiahnuté v práci boli riešené s podporou Centra excelentnosti pre smart technológie, systémy a služby, ITMS 26 24 01 20 005 a s podporou projektov ENIAC JU No. 120214, VEGA 1/0742/08, VEGA 1/0866/11.

6. Summary

Power modules are widely used in switching mode power supply circuits as output drivers for industrial and automotive electronic control systems. In this work we present a systematic analysis and study of static and dynamic electrical properties of power diode commonly used for power modules. Demand for optimization of electrical parameters, device ruggedness and reliability determination is ever increasing. We performed the non-isothermal mixed-mode simulations and 2/3-D circuit simulations, which are in excellent agreement with the measured data. The results from numerical simulations contribute to a physical interpretation of obtained data by unique insight into the device structure. In addition, this insight helps us to calibrate the models and model parameters, and consequently to optimize structure design, geometric dimensions and fabrication processes. Finally, the experimental results are summarized.

Statics simulation was used for calibration of power diode model parameters and showed very good correlation with experimental results. Thermodynamic simulation allows analysis of the influence of the structure edge termination profile upon the electrical properties of the analyzed diode. Changed structure shows the best results withstanding the highest value current pulse. Lowering the diode temperature by structure shape and corresponding better thermal management will allow withstanding higher current pulses and suppressing the damage of the analyzed structure by thermal breakdown. Good agreement between simulation, measurement and theoretically evaluated critical temperature for diode structure well confirms the validity of our approach.

Keywords:

power electronic device, geometry optimization, electro-thermal models, thermodynamic simulation, thermal management, power dissipation.

7. Použitá literatura

- [1] V. Benda: “Výkonové Polovodičové Součástky a Integrované Štruktúry“, ČVUT Praha, 1994.
- [2] Synopsys, user manual, Version F-2011.09, September 2011.
- [3] M. H. Rashid: “Power Electronics Handbook“, third edition, Copyright © 2011 Elsevie.
- [4] D. Hart: “Power Electronics“, Copyright © 2011 by The McGraw-Hill Companies.
- [5] R. P. Colino, W. W. Sheng: “ Power Electronic Modules: Design and Manufacture“, CRC Press; 1 edition, ISBN-13: 978-0849322600, June 2004.
- [6] V. K. Khanna: “Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT Theory and Design (IEEE Press Series on Microelectronic Systems)“, Wiley-IEEE Press; 1 edition, ISBN-13: 978-0471238454, August 2003
- [7] B. J. Baliga: “Power Semiconductor Devices“, Boston: PWS Publishing Company, 1996.
- [8] I. Batarseh: “Power Electronic Circuits“, Wiley; 1 edition, ISBN-13: 978-0471126621, April 2003.
- [9] N. Horspool, P. Gorman.: “The ASIC Handbook“, Prentice Hall; 1 edition, ISBN-13: 978-0130915580, May 2001.
- [10] K. Golshan: “Physical Design Essentials: an ASIC Design Implementation Perspective“, New York: Springer 2007. ISBN 0-387-36642-3.
- [11] J. Nye: “Studies Soft Power, Smart Power and Intelligent Power“, 2010, University of Karachi.
- [12] S. Jinrong, et. all.: “Design and Realization of Special Hybrid Intelligent Power Module Based on Thyristor“, Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), 2010 International Conference, Vol. 1, pp. 478 – 481.

- [13] Xiao Cao: “Planar Power Module With Low Thermal Impedance and Low Thermomechanical Stress“, Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE 2012, Vol. 2, pp. 1247 – 1259.
- [14] S. Igarashi: “Design of high reliability packaging for Fuji High Power Module“, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference, pp. 1–6.
- [15] K. Weidner, M. Kaspar; N. Seliger: “Planar Interconnect Technology for Power Module System Integration“, Integrated Power Electronics Systems (CIPS), March 2012 7th, pp. 1–5.
- [16] SYNOPSIS, Sentaurus Workbench User Guide, Version F-2011.09, September 2011.
- [17] K. Hess, J.P. Leburton, U. Ravaioli: “Computational Electronics: Semiconductor Transport and Device Simulation“, Springer; Softcover reprint of hardcover 1st ed. 1990 edition, ISBN-13: 978-1441951229, December 2010.
- [18] X. Marie, N. Balkan: “Semiconductor Modeling Techniques“, Springer; 2012 edition, ISBN-13: 978-3642275111, June 2012.
- [19] Sdevice: Sentaurus Device - SYNOPSIS, User manual, F-2011.09, September 2011.
- [20] J. Cornu, S. Schweitzer, and O. Kuhn: “Double Positive Beveling: A better Edge Contour for High-Voltage Devices“, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 21, pp. 181–184, 1974.
- [21] A. Rogalski, K. Adamiec, J. Rutkowski: “Narrow-Gap Semiconductor Photodiodes“, SPIE Press Monograph Vol. PM77, 2000, ISBN-10: 0819436194.
- [22] X. Gao, et. all.: “Optimization of on-chip ESD protection structures for minimal parasitic capacitance“, Microelectronics Reliability 43, 725 2003.
- [23] M. Moran, H. Shapiro: “Fundamentals of Engineering Thermodynamics“, sixth edition, New York, Hoboken: Copyright © 2008 John Wiley & Sons. ISBN-13 978-0471-78735-8.

- [24] B. Callen: “Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics”, second edition, Copyright © 1985, by John Wiley & Sons, Inc.
- [25] Y. Çengel, M. Boles: “Thermodynamics: An engineering approach”, (2nd edition). McGraw-Hill (New Jersey, 1994).
- [26] F. Incropera, D. DeWitt: “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, (4th Edition), John Wiley and Sons (New York, 1996)
- [27] H. Zhang, et. al.: “Reliability assessment for a double-sided cooling power electronics module“, Prognostics and System Health Management (PHM), 2012 IEEE, pp. 1–6.
- [28] I. Swan, et. al.: “A Fast Loss and Temperature Simulation Method for Power Converters, Part II: 3-D Thermal Model of Power Module“, Power electronics, IEEE, January 2012, pp. 258–268.

8. Zoznam vlastných publikácií

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

1. Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Beňo, Peter - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: "Analysis of Reliability and Optimization of ESD Protection Devices Support by Modeling and Simulation", In: Microelectronics Reliability. - ISSN 0026-2714. - Vol. 52 (2012), s. 1031-1038
2. Príbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Molnár, Marián: "Electro-Thermal Analysis and Optimization of Edge Termination of Power Diode Supported by 2D Numerical Modeling and Simulation", In: Microelectronics Reliability. - ISSN 0026-2714. - Vol. 52 (2012), s. 463-468

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

3. Príbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Molnár, Marián: Electro-thermal Analysis And Optimization of Edge Termination of Power Diode Supported by 2-D/3-D Numerical Modeling and Simulation. In MicroTherm 2013 : MICROTECHNOLOGY AND THERMAL PROBLEMS IN ELECTRONICS. 25th - 28th of June 2013 Lodz, Poland.
4. Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Šatka, Alexander- Kováč, Jaroslav - Marek, Juraj - Molnár, Marián - Príbytný, Patrik: Electro-thermal Analysis And Optimization of Edge Termination of Power Diode Supported by 2-D/3-D Numerical Modeling and Simulation. In MicroTherm 2013 : MICROTECHNOLOGY AND THERMAL PROBLEMS IN ELECTRONICS. 25th - 28th of June 2013 Lodz, Poland.
5. Príbytný, Patrik - Mikolášek, Miroslav - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Molnár, Marián - Nemeč, Michal: Analysis and optimization of silicon Heterojunction solar cell with back contact arrangement by 2-D numerical modeling and simulation. In WOCSDICE 2013 : 37th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Warnemunde, Germany, 26-29 June, 2013.
6. Molnár, Marian - Palankovski, Vasil - Donoval, Daniel - Kuzmík, Jan - Kováč, Jaroslav - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Selberherr, Siegfried:

- Characterization of $\text{In}_{0.12}\text{Al}_{0.88}\text{N}/\text{GaN}$ HEMTs at elevated temperatures supported by numerical simulation. In WOCSDICE 2013 : 37th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Warnemunde, Germany, 26-29 June, 2013.
7. Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Šatka, Alexander- Kováč, Jaroslav - Marek, Juraj - Molnár, Marián - Príbytný, Patrik: A new equivalent circuit model of InAlN/GaN E-HEMT. In WOCSDICE 2013 : 37th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Warnemunde, Germany, 26-29 June, 2013.
 8. Marek, Juraj - Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Temperature Dependent Cauer RC Network for More Accurate SPICE-Like Circuit Simulations of Power MOSFET with Parasitic Elements. In: ISPS '12 : 11th International Seminar on Power Semiconductors. Prague, Czech Republic, 29.-31.8.2012. - Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2012. - ISBN 978-80-01-05100-9. - S. 207-212
 9. Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Power Transistor Models with Temperature Dependent Parasitic Effects for SPICE-Like Circuit Simulation. In: 28th International Conference on Microelectronics : Niš, Serbia and Montenegro, 13-16 May, 2012. - Piscataway : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-0235-7. - S. 255-260
 10. Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Education of Electronic Devices Supported by 3-D Simulations. In: EWME 2012 : 9th European Workshop on Microelectronics Education. Grenoble, France, May 9-11, 2012. - : EDA Publishing, 2012. - ISBN 978-2-35500-019-5. - S. 6-9
 11. Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Molnár, Marián - Príbytný, Patrik - Kováč, Jaroslav - Kordoš, Peter: Analysis of the Leakage Current of AlGaN/GaN Schottky Diode Dependent on Ohmic Contact PAD Electrode Position. In: WOCSDICE 2011 : 35th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Catania, Italy, May 29 - June 1, 2011. - Catania : CNR-IMM, 2011. - S. 127-128

12. Príbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj: Electro-Thermal Analysis and Optimization of Edge Termination of Power Diode by 2D Numerical Modeling and Simulation. In: ISPS '10 : 10th International Seminar on Power Semiconductors. Prague, Czech Republic, 1.-3.9.2010. - Prague : Czech Technical University, 2010. - ISBN 978-80-01-04602-9. - S. 159-164

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

13. Molnár, Marian - Palankovski, Vasil - Donoval, Daniel - Kuzmík, Jan - Kováč, Jaroslav - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Selberherr, Siegfried: Modeling and characterization of In_{0.12}Al_{0.88}N/GaN HEMTs at elevated temperatures. In ADEPT 2013 : Advantages in Electronic and Photonic Technologies. High Tatras, Spa Novy Smokovec, Slovakia, 2-5 June, 2013.
14. Príbytný, Patrik - Mikolášek, Miroslav - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Molnár, Marián - Nemeč, Michal: Recombination mechanisms in a-Si/c-Si heterojunction solar cells studied by 2D numerical modeling and simulation. In ADEPT 2013 : Advantages in Electronic and Photonic Technologies. High Tatras, Spa Novy Smokovec, Slovakia, 2-5 June, 2013.
15. Marek, Juraj - Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Power MOSFET spice like model for more accurate thermal simulations. In ADEPT 2013 : Advantages in Electronic and Photonic Technologies. High Tatras, Spa Novy Smokovec, Slovakia, 2-5 June, 2013.
16. Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Three-dimensional electro-thermal circuit model for power devices. In ADEPT 2013 : Advantages in Electronic and Photonic Technologies. High Tatras, Spa Novy Smokovec, Slovakia, 2-5 June, 2013.
17. Príbytný, Patrik - Mikolášek, Miroslav - Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Molnár, Marián - Nemeč, Michal: Optimization of Silicon Heterojunction Solar Cell Contacts by 2D Numerical Modelling and Simulation. In: Renewable Energy Sources : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013. - ISBN 978-80-89402-64-9. - S. 451-454

18. Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: 2/3-D Circuit Electro-Thermal Model of Power MOSFET for SPICE-Like Simulation. In: ASDAM 2012 : 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012. - Piscataway : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-1195-3. - S. 179-182

19. Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Petrus, Miroslav - Stuchlíková, Ľubica - Chvála, Aleš - Molnár, Marián - Príbytný, Patrik: Degradation of the Low Voltage Power MOSFET Electrical Parameters During Multipulse UIS Test. In: ASDAM 2012 : 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012. - Piscataway : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-1195-3. - S. 183-186

20. Dubecký, František - Príbytný, Patrik - Vanko, Gabriel - Zaťko, Bohumír - Gombia, Enos - Baldini, Michele - Hrkút, Pavol - Nečas, Vladimír - Donoval, Daniel: Novel Concepts of Soft X-Ray Detector Based on Semi-Insulating GaAs. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 29-32

21. Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Low Voltage Power Transistor Model for Spice-Like Electro-Thermal Circuit Simulation. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 223-226

22. Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Determining of the Failure Mechanism during UIS Test Combining Single and Multipulse UIS Test. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 313-316

23. Príbytný, Patrik - Dubecký, František - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Molnár, Marián: Analysis and Optimization of Silicon Detector Supported by Electro-Physical Modeling and Simulation. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 349-352

24. Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Molnár, Marián: Modelovanie a simulácia technologického procesu výroby a elektrických vlastností polovodičových prvkov. In: Fotonika 2012 : 7.výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Bratislava, 9. 2. 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-970493-3-1. - S. 46-47

25. Príbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Molnár, Marián: Analysis and Optimization of Power Diode Supported by Electro-Thermal Modeling and Simulation. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011. - Žilina : Žilinská univerzita, 2011. - ISBN 978-80-554-0386-1. - S. 155-159

26. Molnár, Marián - Donoval, Daniel - Kováč, Jaroslav - Marek, Juraj - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik: Analysis of Electrical Properties of In_{0.12}Al_{0.88}N/GaN HEMT Transistor Supported by TCAD Modeling and Simulation. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011. - Žilina : Žilinská univerzita, 2011. - ISBN 978-80-554-0386-1. - S. 188-191

27. Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Characterisation of Thermal Equivalent Circuit for SPICE-like Electro-Thermal Model of Power MOSFET. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011. - Žilina : Žilinská univerzita, 2011. - ISBN 978-80-554-0386-1. - S. 90-93

28. Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Analysis of a Low Voltage Vertical Power MOS Transistor Failure

- During UIS Test Supported by 2-D and 3-D Simulations. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011. - Žilina : Žilinská univerzita, 2011. - ISBN 978-80-554-0386-1. - S. 94-97
29. Molnár, Marián - Donoval, Daniel - Kováč, Jaroslav - Marek, Juraj - Florovič, Martin - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik: Analysis of Electrical Properties of In_{0.12}Al_{0.88}N/GaN Hemt Transistor Supported by TCAD Modeling and Simulation. In: ELITECH'11 : 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 17 May, 2011. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2011. - ISBN 978-80-227-3500-1. - S. 1-6
 30. Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik: Analysis of a Low Voltage Vertical Power Transistor during Multipulse UIS Test. In: APCOM 2010. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 16th International Conference. Malá Lučivná, Slovak Republic, 16.-18.6.2010. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2010. - ISBN 978-80-227-3307-6. - S. 81-84
 31. Príbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj: Analysis and Optimization of Power Diode Supported by Electro-Thermal Modelling and Simulation. In: APCOM 2010. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 16th International Conference. Malá Lučivná, Slovak Republic, 16.-18.6.2010. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2010. - ISBN 978-80-227-3307-6. - S. 101-104
 32. Príbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj: Optimalization of Power Diode by 2D Simulation. In: ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-227-3303-8. - CD-Rom

Meno autora: **Patrik Príbytný**

Názov práce:

“NÁVRH A ANALÝZA MODERNÝCH VÝKONOVÝCH ELEKTRONICKÝCH
PRVKOV PODPORENÁ MODELOVANÍM A SIMULÁCIU”

Náklad: 12 ks

Dizertačná práca spolu s autoreferátom je uložená na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave.

Termín vytlačenia: 2013