

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Robert Szoboloszký

Autoreferát dizertačnej práce

CHARAKTERIZÁCIA VÝKONOVÝCH PRVKOV NA BÁZE GaN A SiC

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: elektronika a fotonika

v študijnom odbore

5.2.13 elektronika

Miesto a dátum: Bratislava, August 2019

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Robert Szobolovszký

Autoreferát dizertačnej práce

CHARAKTERIZÁCIA VÝKONOVÝCH PRVKOV NA BÁZE GaN A SiC

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: elektronika a fotonika

v študijnom odbore

5.2.13 elektronika

Miesto a dátum: Bratislava, August 2019

Na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Robert Szobolovszký Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: Doc. Ing. Jaroslav Kováč, PhD.
 Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: Ing. Milan Ťapajna, PhD., Institute of Electrical Engineering SAS, Bratislava prof. Ing. Miroslav Husák, CSc., Dept. of Microelectronics FEE CTU in Prague

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:.....h.

NaFakulte elektrotechniky a informatikySlovenskej technickej univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec

dekan FEI STU

Obsah

1	Úvod	1	
2	Prehľad súčasného stavu Prehľad skúmaných prvkov a metodika merania		
3			
	3.1 Základná charakteristika PiN diód	8	
	3.2 Štruktúry skúmaných SiC PiN diód	9	
	3.3 Základna charakteristika AlGaN/GaN HEMTov	10	
	3.4 Štruktúry skúmaných AlGaN/GaN HEMT vzoriek	12	
	3.5 Metodika merania	13	
4	Experimentálne výsledky	16	
5	Záver	26	
6	Hlavné prínosy dizertačnej práce	29	
7	Summary	30	
8	Zoznam použitej literatúry	33	
9	Zoznam publikácií	36	

1 Úvod

Základom elektrotechnického priemyslu sú polovodičové mteriály bez ktorých by svet ako ho dnes poznáme nebol možný. S pomädzi všetkých známych polovodičov je do dnešných dní stále dominantným materiálom kremík vďaka zvládnutej technológií a všestrannosti v rôznych aplikáciách od bežných domácich spotrebičov až po robustný vojenský hardvér [1]. Úspech kremíku je v súčasnosti poháňaný aj vysokým dopytom v oblasti IT [2]. Trend používania prvkov na báze kremíka zostane aj naďalej v mnohých aplikáciách, aj napriek tomu, že v určitých aplikáciách táto technológia dosahuje svoje fyzikálne limity. Vo svete sa každým rokom zvyšujú nároky na elektronické zariadenia, medzi ktoré patrí energetická účinnosť aj komfort. V oblasti komunikačných systémov sa nároky pre budúce bezdrôtové riešenia, vyžadujúce väčšiu šírku pásma, vyššiu rýchlosť, odolnosť a účinnosť, zvyšujú už od doby prvých mobilných telefónov. Pre výkonové aplikácie je situácia podobná kde napríklad pre konverziu elektrickej energie, riadenia elektrických pohonov pre elektromobily a riešenia nabíjacích staníc vznikol na priemyselnom trhu veľký segment z dopytom pre nové výkonové prvky. Okrem kremíkovej technológie sa technológia a výskum zameral na polovodiče s veľkou šírkou zakázaného pásma (WBG z angl. Wide Band Gap). Medzi spomínané polovodiče patrí aj nitrid gália (GaN) a karbid kremíka (SiC), ktorých vlastnosti a aplikačný potenciál sú známe už pomerne dlho.

Technológia na báze nitridov, z ktorých je najrozšírenejší nitrid gália (GaN), ponúka teoreticky vyššie hustoty výkonu a vyššiu prevádzkovú účinnosť v porovnaní s technológiou Si. Prielom v oblasti aplikácie GaN vo výkonových aplikáciách nastal vo využití tohto materiálu v tranzistoroch s vysokou pohyblivosťou elektrónov (HEMT z angl. High Electron Mobility Transistor). Táto technológia našla uplatnenie na trhu najmä s MMIC (z angl. Monolithic Microwave Integrated Circuit) prvkami vo vysokofrekvenčnej oblasti [3] a s prvkami pracujúcimi v submilimetrovom pásme vo vývoji [4]. Technológia na báze GaN je ďalej vhodná aj pre vesmírne aplikácie vďaka veľkej šírke zakázaného pásma, chemickej stabilite a mechanickým vlastnostiam ktoré ho predurčujú na použitie v náročných prostrediach. V poslednej dobe našli prvky na báze GaN uplatnenie aj v spínacích aplikáciách kde získali značnú pozornosť v oblasti meničov (spínane zdroje, nabíjačky, invertory) [5].

Veľká výhoda GaN sa zachováva aj v optoelektronických aplikáciách, kde sa používajú pre výrobu elektroluminiscenčných diód (LED z angl. Light Emitting Diode), alebo laserov vďaka svojej priamej pásmovej štruktúre. Diódy na báze GaN zjednodušili aj výrobu energeticky účinných bielych LED.

Od začiatkov výskumu výkonových prvkov založených na GaN a presnejšie HEMT, bolo zistené, že existuje mnoho obmedzení, ktoré bránia tejto technológii dosiahnuť svoj potenciál. Disperzné účinky, degradácie a mnohé ďalšie javy, ktorých negatívny dopad je urýchľovaný pri zvýšených teplotách v konečnom dôsledku obmedzuje dlhodobú stabilitu a znižujú spoľahlivosť. Je preto nutné skúmať a optimalizovať tepelné vlastnosti štruktúr na báze GaN.

Ako už bolo spomínané, GaN nie je jediný WBG materiál vhodný pre vysoko výkonové a vysokonapäťové aplikácie. Technológia prvkov na báze SiC je vyspelejšia ako GaN a v určitých aplikáciách ponúka lepšie vlastnosti. Na rozdiel od GaN technológie, SiC nemôže byť použitý, alebo je nevhodný ako aktívny prvok v HEMT a LED štruktúrach. Je však mimoriadne vhodný pre vysokonapäťové a silové aplikácie v ktorých GaN technológia nedosiahla značný rozmach [6]. V súčasnosti sú využívané čoraz viac obnoviteľné zdroje energie, ako sú solárne elektrárne využívajúce fotovoltaické články, kde je nutné transformovať výstupný jednosmerný prúd na striedavý prúd vhodný pre distribučnú sieť. Nárast elektromobilov v automobilovom priemysle kde je potrebný budič alebo menič na efektívne riadenie DC (z angl. Direct Current) motora bez komutátora alebo AC (Alternating Current) indukčného motora, vyžadujú nové prvky založené na WBG polovodičových materiáloch ako je SiC. V prípade SiC prvkov je termálny manažment kľúčový a obmedzuje ich integráciu z pohľadu maximálneho stratového výkonu na jednotku plochy.

Za účelom merania teplotných vlastností predložených štruktúr sú použité rôzne metódy medzi ktoré patrí mikro-Ramanovská termometria, IR termovízia, snímanie pomocou mikro termistorov a Schottkyho kontaktov. Komplexná analýza štruktúr je neskôr pomocou simulačného programu analyzovaná a výstupné údaje vplyvu vrstiev sú použité pre návrh optimalizácie prípravy prvkov a štruktúr na báze GaN a SiC..

2 Prehľad súčasného stavu

SiC je polovodič skladajúci sa z prvkov piatej skupiny periodickej tabuľky a disponuje veľkou šírkou zakázaného pásma. Tento materiál bol jedným z prvých WBG polovodičov, ktorého výskum začal už koncom päťdesiatych rokov (**Obr. 1**). Prvá zmienka o SiC bola v roku 1824, kedy švédsky chemik J. J. Berzelius teoreticky predpovedal existenciu chemickej väzby Si-C [7]. Proces syntézy SiC bol najprv vykonaný náhodne E. G. Achesonom pri pokuse syntetizovať diamant [8]. Na začiatku roku 1900 bol SiC vyrobený ako brúsny materiál spracovaním kremenného piesku a grafitu [9]. Táto zlúčenina získala pozornosť v roku 1907, keď H. J. Round pozoroval elektroluminiscenciu tohto materiálu pri pripojení zdroja s napätím 10 V na kryštáli SiC, ktoré začali produkovať žlté, zelené a modré záblesky svetla [10]. Tento experiment neskôr zopakoval O. V. Losev v roku 1923, čím potvrdil elektroluminiscenciu [11]. Pozorovania elektroluminiscencie viedli k vynálezu prvých svetelných diód. SiC nie je priamym polovodičov bol tento materiál použitý v sedemdesiatych rokoch na výrobu žltých LED [12].



Obr. 1 Počet publikácií za rok pre kľúčové slová SiC, SiC diódy a SiC tranzistory podľa portálu "Web of science"

SiC kryštalizuje v sfaleritovej, klencovej a najčastejšie v špeciálnej hexagonálnej kryštálovej fáze s názvom wurtzite. SiC má schopnosť kryštalizovať v rôznych formách, ktoré sa menia len v poradí usporiadania kremíka a uhlíka v jednom smere. Tento jav bol neskôr pripisovaný špeciálnemu typu jednorozmernému polymorfizmu vrstiev v SiC nazývanému polytypizmus [13].

Hoci existuje veľké množstvo variácií SiC, len niekoľko z nich sa vyrába v reprodukovateľnej forme a ešte menej je vhodných ako polovodiče pre elektronický priemysel. Dostupné polytypy SiC používané v priemysle sú 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC. Z dostupných polytypov je 4H-SiC v súčasnosti najpoužívanejším. Hlavnými dôvodmi sú cenová a technologická zrelosť z pomädzi ostatných polytypov. Medzná intenzita prierazného poľa pre SiC ($E_{br} = 0,3 \text{ MV/cm}$) je 10-krát vyššia ako pre Si. Táto vlastnosť umožňuje použitie prvkov na báze SiC vo vysoko výkonných aplikáciách s vyššími napájacími napätiami. Väčšia šírka zakázaného pásma ďalej umožňuje SiC prvkom pracovať pri vyšších teplotách. Garantovaná prevádzková teplota súčasných SiC prvkov je v rozsahu od 150 °C do 175° C kde je limitným parametrom materiál zapuzdrenia prvku. Správnym zapuzdrením môžu pracovať SiC prvky aj pri teplote vyššej ako 200 °C [14, 15].

Prvé vysokonapäťové (400 V) SiC diódy so Schottkyho bariérou (SBD z angl. Schottky Barrier Diode), boli publikované Bhatnagarom a kol. [16] už v roku 1992 a poukázali na vynikajúce elektrické vlastnosti oproti podobným prvkom na báze Si. Zdokonaľovaním materiálového výskumu SiC boli prvé SBD komerčne dostupné v roku 2001 spoločnosťami Infineon, Cree, Microsemi Co. a IXYS Co. Tieto prvky poskytovali prakticky nulové časy zotavenia a zároveň dosahovali blokovacie napätia nad 1 kV. Problémy s mikrorúrkovitými defektami v roku 2007 znížil výrobca Cree pod hodnotu 0,1 cm⁻² [17] vďaka čomu bol posunutý aj prah blokovacieho napätia vyrábaných štruktúr. V roku 2011 bol komerčne dostupný aj prvý SiC MOSFET od Cree schopný blokovať 1,2 kV [18]. Výskum v spínacích prvkoch, hlavne pre SiC MOSFET a JFET ukázali, že prvky optimalizované pre napäťovú oblasť 600 V je možné v porovnaní s Si MOSFETom vyrobiť s rovnakými vlastnosťami na čipe s veľkosťou 1/5 plochy. Menovité blokovacie napätie pre SiC MOSFET môže byť až 15 kV [19]. V UHF (z angl. Ultra High Frequency) a radarových aplikáciách sú komerčne dostupné statické indukčné tranzistory na báze SiC s pulzným výkonom do 2,2 kW od 406 MHz do 450 MHz [20]. Bipolárne prvky, ako sú PN diódy s blokovacím napätím 3,3 kV a PiN diódy s blokovacím napätím 6,5 kV a vyšším, sú dnes už tiež komerčne dostupné. Menovité blokovacie napätie pre IGBT na báze SiC môže byť až 22.6 kV [19].

GaN je polovodičový materiál zlúčeniny prvkov z III. a V. skupiny periodickej tabuľky. Kryštalická štruktúra môže byť wurtzit, sfalerit alebo halit. GaN prevažne rastie v hexagonálnej kryštalickej štruktúre wurtzit. Ďalšie dve kryštalické štruktúry je možné narásť na substrátoch, kde orientácia povrchovej kryštalinity poskytuje predispozíciu pre rast takejto GaN epitaxnej vrstvy. Napríklad GaN môže byť rastený vo sfaleritovej štruktúre na kubických substrátoch z GaAs [21]. GaN bol najprv syntetizovaný v roku 1932 interakciou amoniaku (NH₃) s kvapalným Ga pri vysokej teplote [22]. Z dôvodu vtedajších technologických obmedzení kryštalického rastu sa pokrok vo výskume tohto materiálu spomalil. V roku 1969 bol GaN veľkoplošne narastený na zafírovom substráte pomocou chemickej depozície z pár (CVD z angl. Chemical Vapour Deposition). Tieto vzorky vykazovali vysokú vodivosť, ktorá bola spôsobená kontamináciou kyslíkom alebo dusíkom predstavujúce donorové prímesi. Prvý substrát s vodivosť ou P-typu bol vyrobený náhodne pomocou Mg prímesi [23]. Objavovanie vodivosti typu P pre GaN v roku 1980 začalo novú éru LED s vysokou svietivosť ou [24].



Obr. 2 Počet publikácií za rok pre kľúčové slová rozličných III-N zlúčenín a GaN tranzistorov podľa portálu "Web of science"

Ďalším krokom bol vývoj ternárnej zlúčeniny InGaN, ktorá sa preukázala neskôr ako nevyhnutný materiál pri vývoji modrých laserov [25]. V nasledujúcom desaťročí bola navrhnutá zliatina AlGaN ako kandidát pre výkonovú elektroniku. Podľa portálu "Web of science" sa výskum zameraný na tento materiál, zároveň s GaN, prejavil prudkým nárastom publikácií už od začiatku 90. rokov (**Obr. 2**). Na základe prvých výsledkov z výskumu nitridov bol preukázaný veľký potenciál GaN pre optické a elektronické aplikácie. Základná GaN heteroštruktúra s AlGaN bariérovou vrstvou vďaka vysokému prieraznému napätiu, hustoty nosičov náboja a pohyblivosti, vytvorila základ pre budúce vysokofrekvenčné a vysoko výkonové elektronické prvky. Najbežnejšie použitie heteroštruktúry AlGaN/GaN vo výkonovej elektronike je dnes v podobe HEMT prvkov, ktorých model bol publikovaný v práci od Kahan et. al. v roku 1993 [26]. Z hľadiska výstupného výkonu a prevádzkovej frekvencie, dokázali HEMTy na báze GaN úspešne prekonať zosilňovače LDMOS na báze Si v pásmach nad 2 GHz [27]. Prvky na báze GaN dokážu pracovať spoľahlivejšie v náročnom prostredí, kde teplota môže presiahnuť 200 °C. Vyššie prierazné napätie materiálu umožňuje výrobu prvkov s menšími a tenšími driftovými oblasťami, čo má za následok nižší špecifický odpor výkonových prvkov. Vďaka tomu je možné vytvoriť prvky s rovnakým prúdovým zaťažením ako vyrobené z kremíku avšak na podstatne menšej ploche čo znižuje vstupné a výstupné kapacity. Okrem toho, pri vyššej saturačnej rýchlosti nosičov umožňujú spínacie prvky podstatne rýchlejší prechod do stavu zopnutia. Prvky na báze GaN majú nižší odpor v zopnutom stave, nižšie straty pri spínacom režime a dosahujú vyššie frekvencie za podobných podmienok ako prvky z Si [28].

Problém GaN materiálu pre elektrotechnický priemysel je nutnosť epitaxného rastu na substráty z iného materiálu. Proces výroby GaN substrátov sa podstatne vyvinul od prvej syntetizovanej vzorky. Z mnohých použiteľných metód sú priemyselnými štandardmi chemická depozícia z pár organokovových zlúčenín (MOCVD) a epitaxia molekulovým zväzkom (MBE). Z týchto dvoch metód je MOCVD najrozšírenejšou technikou. Dôvodom je vyššia rýchlosť rastu epitaxnej vrstvy a škálovateľnosť pri produkcii väčšieho množstva viacvrstvových heteroštruktúr [29, 30]. Laterálne HEMT štruktúry na báze GaN sa zvyčajne vyrábajú z epitaxných vrstiev, ako napríklad AlGaN/GaN, rastených na vhodných substrátoch. Najbežnejšími substrátmi sú Al₂O₃ (zafír), SiC a Si. SiC, a presnejšie 4H-SiC, je najdrahšia dostupná alternatíva, ktorá má však dobrú tepelnú vodivosť (3,7 W/cmK) a najmenší rozdiel v tepelnej rozťažnosti (25 %) [31, 32]. V tejto štúdii bude okrem prirodzeného 4H-SiC skúmaný aj dopad obohateného 4H-SiC obsahujúceho iba jeden typ izotopu kremíka ²⁸Si a uhlíka ¹²C za účelom zvýšenia tepelnej vodivosti. Podľa predbežnej správy projektu OSIRIS môže byť tepelná vodivosť vyššia o 23,6 % v a-smere a 16,7 % v c-smere oproti prirodzenému 4H-SiC.

SBD, PN, PiN diódy, MOSFETy a IGBT prvky založené na 4H-SiC sú v súčasnosti najpoužívanejšie pre aplikácie s vysokým výkonom, s výnimkou vysokofrekvenčných aplikácií, kde prvky na báze GaN vynikajú. Ďalším hlavným dôvodom pre použitie SiC materiálu oproti GaN je v technologickom raste kde prvky na GaN môžu byť len planárne kvôli epitaxiálnemu rastu. GaN priamy polovodičový materiál, ktorý má veľmi krátku dobu života nosičov náboja, a preto nie je vhodný pre výrobu bipolárnych prvkov.

Ciele dizertačnej práce

Na základe analýzy súčasného stavu v oblasti charakterizácie prvkov a štruktúr na báze GaN a SiC pre výkonovú elektroniku, boli stanovené nasledovné ciele dizertačnej práce:

- Získať nové poznatky v oblasti charakterizácie prvkov a štruktúr na báze GaN a SiC pre výkonovú elektroniku
- Analyzovať a vyvinúť metódy charakterizácie pre meranie elektro-fyzikálnych vlastností prvkov a štruktúr na báze GaN a SiC pre výkonovú elektroniku.
- Vyšetriť vplyv vlastností SiC substrátu na elektrotepelné vlastnosti prvkov a štruktúr na báze GaN a SiC.
- Použiť získané poznatky pre návrh optimalizácie prípravy prvkov a štruktúr na báze GaN a SiC.

3 Prehľad skúmaných prvkov a metodika merania

Exituje veľké množstvo elektronických výkonových prvkov vyrábaných na báze GaN, alebo SiC. Táto práca bola zameraná na analýzu vzoriek výkonových SiC PiN diód a AlGaN/GaN HEMTov. Každý prvok je charakterizovaný teoreticky a je stručne uvedený aj popis vzoriek, ktoré tvorili základ predloženej práce. Na analýzu vlastností vzoriek bola v prvom rade použitá elektrická charakterizácia. Pomocou elektrickej charakterizácie boli zistené základné informácie o predložených vzorkách. Okrem elektrickej charakterizácie boli neskôr skúmané aj tepelné vlastnosti vzoriek. Z prvotnej elektrickej charakterizácie boli vybrané vzorky, s podobnými vlastnosť ami, za účelom skúmania ich tepelných vlastností. Meranie teploty na malých rozmeroch s vysokým priestorovým rozlíšením je náročnou, ale podstatnou úlohou pri skúmaní výkonových elektronických prvkov. Štruktúry, ktoré sa bežne používajú v prípade SiC PiN diód a AlGaN/GaN HEMTov majú vyššie nároky z pohľadu priestorového rozlíšenia, aby bolo možné s istotou určiť laterálne, alebo vertikálne tepelné gradienty. Boli preto použité rôzne metódy za účelom extrahovania lokalizovanej teploty vzoriek pri zaťažení. Údaje extrahované z početných meraní pomohli lepšie prispôsobiť simulačný model, z ktorého boli získané ďalšie dôležité informácie.

3.1 Základná charakteristika PiN diód

PiN dióda je špeciálny typ diódy, ktorá sa skladá z slabo dopovanej (intrizickej) oblasti N^- uloženej medzi silne dopované oblasti N^+ a P^+ . Táto slabo dopovaná oblasť má v základnom stave vysoký odpor a rovná sa prakticky odporu vlastného polovodiča čím dosahuje svoje jedinečné vlastnosti v oblasti napäťového blokovania. Na druhú stranu, problém intrizickej vrstvy spočíva v nutnosti jej nasýtenia nosičmi náboja v priepustnom smere a v schopnosti zadržovania elektrického náboja. Tieto javy sú časovo závislé a frekvenčne obmedzujú využitie PiN diód v usmerňovacích aplikáciách vzhľadom na spínacie straty. Tento jav sa dá využiť napríklad v prípade ovládania vysokofrekvenčných signálov kde sa PiN diódy používajú často ako spínače aj pri veľmi vysokých prenášaných výkonoch. V súčasnosti sú PiN diódy základnou časťou mnohých vysokonapäťových zariadení, kde unipolárne prvky ako sú Schottkyho bariérové diódy (SBD) alebo bipolárne PN diódy dosahujú svoje praktické limity. Diódy PiN sa bežne používajú v oblastiach, kde sú požadované veľmi vysoké hodnoty blokovacieho napätia (> 10 kV) [33].

V priepustnom smere je možné prúdový prenos zhrnúť do troch mechanizmov. Pri veľmi nízkych úrovniach prúdu je dominantný proces rekombinácie v oblasti ochudobnenia. Pri zvyšovaní napätia nad určitú hodnotu začne dochádzať k injekcii nosičov do neutrálnych oblastí P⁺ a N⁺ čím začne prevládať difúzny transportný mechanizmus prúdu. Ďalším zvyšovaním napätia sa vďaka dvojitej injekcii nosičov náboja z oblastí P⁺ a N⁺, nazývaných aj emitory, prekročí vlastná koncentrácia intrizickej oblasti a vzniká tak vodivostná modulácia ktorá rapídne zníži odpor intrizickej oblasti [33]. Vodivostnú moduláciu je možno analyzovať skúmaním diferenciálneho odporu podľa vsťahu

$$R_{on,diff} = \frac{dV_F}{dJ_F} \tag{1}$$

Jednotlivé mechanizmy prúdového transportu je možné odhaliť analýzou volt-ampérových charakteristík a skúmaním priebehu faktora ideality pomocou vzťahu

$$\eta = \frac{1}{\left(\frac{d\ln(J_F)}{dV}\right)\frac{kT}{q}}$$
(2)

V prípade závernom smere sú injektované nosiče nosiče vytláčané preč z intrizickej vrstvy, čím vznikne oblasť ochudobnenia, ktorá má schopnosť blokovať vysoké napätia. Avšak pri veľmi vysokých záverných napätiach vzniká proces nárazovej ionizácie kedy nosiče náboja získajú dostatočnú kinetickú energiu na vytvorenie nových elektrón-dierových párov kolíziou s atómami v kryštalickej mriežke. Tento proces je násobiaci, končiaci lavínovým prierazom v štruktúre [33] a obmedzuje využitie PiN diód vzhľadom na maximálne elektrické pole v danej štruktúre. Táto oblasť však nebola skúmaná v tejto práci.

Proces generácie elektrón-dierových párov je podnietený aj teplotou a preto je dôležité dostatočne chladiť aktívne oblasti PiN diód. V tejto práci bola skúmaná možnosť využitia izotopicky čistého ²⁸Si¹²C pre zlepšenie tepelnej vodivosti substrátu a driftovej oblasti.

3.2 Štruktúry skúmaných SiC PiN diód



Všetky vzorky SiC PiN diód mali rovnakú štruktúru, ako je možné vidieť aj na Obr. 3.

Obr. 3 Štruktúra skúmaných PiN diód a legenda vysvetľujúca kód vzorky

Celkovo bolo skúmaných 5 skupín vzoriek (D1, D2, D3, D4, D5) narastených na rovnakom prirodzenom SiC substráte. Tieto skupiny sa odlišovali rôznymi kombináciami izotopicky čistých a prirodzených SiC vrstiev použitých vo vyrovnávacej a driftovej vrstve. Dôvodom zmeny materiálu v týchto vrstvách bola skúmaná schopnosť výslednej štruktúry viesť stratové teplo do chladiča. Ďalší rozdiel bol v procese rastu kedy boli vzorky pripravované buď v jednej inštitúcii alebo v spolupráci s ďalšou. Týmto bola skúmaná aj závislosť a reprodukovateľnosť daných štruktúr od rozdielneho technologického procesu dvoch inštitúcií. Celkovo boli prijaté dve série vzoriek so spomínanými štruktúrami (α , β). Prehľad analyzovaných štruktúr je možné vidieť v tabuľke **Tab. 1**.

Skupina	Identifikátor	Vyrovnávacia vrstva N ⁺	Driftová vrstva N⁻			Vrstva P ⁺ /P ⁺⁺
vzoriek		100 µm	100 µm	cm ⁻³	Inštitúcia	2 μm
1	D1- a (1,2,3,4,5)	Izotopicky čistý	Prirodzená	2.65×10 ¹⁴	LiU/ASC	Prirodzená
2	D2- a (1,2,3,4,5)	Izotopicky čistý	Prirodzená	2.83×10 ¹⁴	LiU/ASC	Prirodzená
3	D3-α(1,2,3,4) D3-β(1)	Prirodzený	Prirodzená	5.50×10 ¹⁴	LiU	Prirodzená
4	D4- α (1,2,3,4) D4- β (1,2,3,4)	Prirodzený	Prirodzená	2.48×10 ¹⁴	LiU/ASC	Prirodzená
5	D5- α (1,2,3,4) D5- β (1,2,3,4,5,6)	Izotopicky čistý	Izotopicky čistá	3.00×10 ¹⁴	LiU	Prirodzená

Tab. 1 Prehľad analyzovaných vzoriek 4H-SiC PiN diód

3.3 Základna charakteristika AlGaN/GaN HEMTov

Materiály na báze III-nitridov disponujú výrazným polarizačným efektom. V Prípade GaN a AlGaN tieto materiály rastú väčšinou v hexagonálnej kryštalickej fáze wurtzite. V tejto fáze vzniká nábojová nesymetria v c-smere vďaka čomu vzniká spontánna polarizácia, ktorá spôsobuje hromadenie náboja [34] na stranách nitridovej vrstvy a vznik vnútorného elektrického poľa. Táto polarizácia vzniká prirodzene bez externých vplyvov [35] a nazýva sa spontánna polarizácia. Je závislá od polarity rastenej vrstvy a celkovo sú rozlišované 2 polarity označené ako Ga polarita alebo N polarita.

Okrem spontánnej polarizácie vzniká pri ťahových alebo tlakových pnutiach kryštalickej mriežky aj ďalší typ polarizácie nazývaný piezoelektrická polarizácia. Tieto pnutia vznikajú pri nesúlade mriežkovej konštanty vrstiev heteroštruktúry [36]. Výsledná polarizácia jednej materiálovej vrstvy je výslednicou spontánnej a piezoelektrockej polarizácie. V závislosti od typu deformácie môže mať piezoelektrická polarizácia aj záporný príspevok k celkovej polarizácii [35].

Rozdiel celkovej polarizácie medzi jednotlivými vrstvami vytvára výsledný viazaný náboj na rozhraní čo je špecifické pre AlGaN/GaN heteroštruktúry. Tento jav ma významný vplyv na vytváranie dvojdimenzionálneho elektrónového plynu (2DEG), ktorý vzniká pri kompenzácii viazaného náboja pomocou voľných elektrónov. Takto vzniká vysoká plošná koncentrácia elektrónov v kvantovej jame na rozhraní AlGaN/GaN heteroštruktúry, dosahujúca až 2x10¹³ cm⁻² [35]. Vytvorenie kanála pomocou 2DEG je charakteristickou vlastnosťou tranzistora s vysokou pohyblivosťou elektrónov.

Treba avšak dodať, že aj povrchové stavy majú významný vplyv pre vytvorenie spomínaného kanálu [37, 38].



Obr. 4 Zjednodušená štruktúra AlGaN/GaN HEMTu

Takto vytvorený kanál sa vytvorí na heterorozhraní v GaN vrstve bez akýchkoľvek úmyselných dopantov. Tento kanál je prítomný bezprostredne po raste, a preto vzniknuté prvky budú ochudobňovacieho typu. Jednoduchý náčrt vzniknutého HEMTu možno vidieť na **Obr. 4**. Ovplyvňovanie kanálu je možné rôznymi spôsobmy z ktorých je veľmi rozšírená metóda modulácie kanála pomocou Schottkyho kontaktu ako je znázornené na **Obr. 5**.



Obr. 5 Vplyv napätia privedeného na Schottkyho kontakt na koncentráciu nosičov v kanály

Pre GaN HEMT môžeme zadefinovať dve základné typy obmedzení. Vlastné (intrizické) obmedzenia vychádzajúce z použitého materiálu, a technologické. Technologické obmedzenia môžu byť riešené rôznymi úpravami návrhu, ako napríklad technológie field plate, rôznou dielektrikou hradla, zahĺbením štruktúry, krycími vrstvami, dopáciou bariérovej alebo vyrovnávacej vrstvy.

Pokiaľ ide o vnútorné obmedzenia, ako napríklad prúdový kolaps a sebazahrievanie, prípadné elektricky aktívne pasce atď., tak tie sú neoddeliteľnou súčasťou všetkých HEMT na báze AlGaN/GaN heteroštruktúr bez ohľadu na zloženie a nie je možné ich úplne odstrániť [39, 40, 41, 42, 43]. Prednosťou tranzistorov typu HEMT je ich rýchlosť prechodu zo zopnutého do vypnutého stavu. Táto schopnosť je priamo spätá s pohyblivosťou nosičou náboja v kanáli. Tá závisí od prípadných prekážok ktoré sa môžu vyskytnúť počas dráhy elektrónov v kanále. V prípade kanálu vzniknutého polarizačnými procesmi sú eliminované vplyvy ionizovaných prímesi na mechanizmus rozptylu a prípadnému zníženiu výslednej pohyblivosti [44]. Okrem spomínaného rozptylu sú definované aj ďalšie, ktorých dominantný vplyv na pohyblivosť je závislý od teploty [45]. V prípade teplôt nad 110 K, čo je prípad väčšiny tranzistorov v zariadeniach, majú na rozptylový mechanizmus dominantný vplyv optické fonóny [46]. Úroveň akým tento jav vplýva na vlastnosti tranzistorov typu HEMT je závislý od teploty a je prítomný pri jednosmerných aj striedavých aplikáciách. Tieto obmedzenia sú avšak vratného charakteru a teda pomocou správneho tepelného manažmentu je možné ich redukovať v dostatočnej miere.

Problémom sebazahrievania je, že okrem spomínaného vplyvu na pohyblivosť má vplyv aj na dlhodobú spoľahlivosť AlGaN/GaN HEMTov. Degradačné procesy v HEMT štruktúrach sú veľmi závislé od teploty kanála. Degradácia je jav ktorý je nevratný a spôsobuje trvalé poškodenie tranzistora. Bola vytvorená dlhodobá štúdia kde bola skúmaná stredná doba do výskytu poruchy HEMTov na báze GaN, kde bola zistená priama korelácia medzi kratším časom výskytu poruchy a teplou vzorky [47, 48]. Pri návrhu je preto veľmi dôležité zvládnuť tepelný manažment pre efektívnejšie odvádzanie tepla z aktívnej oblasti prvku. Výber nosného substrátu s dobrými tepelnými vlastnosťami je v prípade rastu AlGaN/GaN heteroštruktúr veľmi dôležitý a z dostupných možností je preto SiC ideálnou voľbou. Jeho prednosti ako nosného substrátu sú spomenuté vyššie a preto bol v predložených vzorkách skúmaný vplyv aj izotopicky čistého 4H-SiC rovnako ako v prípade SiC PiN diód.

3.4 Štruktúry skúmaných AlGaN/GaN HEMT vzoriek

Vzorky HEMTov pozostávali z troch štruktúr s označením SL2525, SL2527, SL2973 s AlGaN/GaN heterorozhraním ako je možné vdieť na **Obr. 6**. Zo spomínaných štruktúr boli zhotovené rôzne prvky z ktorých boli skúmané GTLM, FAT FET a 2x150 µm HEMTy. Rozdiely medzi štruktúrami možno vidieť na **Obr. 6**. Pre dané prvky boli skúmane elektrické a tepelné vlastnosti. Vzorky na štruktúrach SL2525 a SL2973 mali veľmi podobnú štruktúru s rozdielom v SiC epitaxnej vrstve, ktorá predstavovala prirodzený variant pre SL2525 a izotopicky čistý variant pre štruktúru SL2973.



Obr.6 Štruktúry skúmaných AlGaN/GaN HEMT vzoriek

Pre oba prípady prvkov boli v tejto práci skúmané vplyvy izotopicky čistého SiC na teplotné vlastnosti štruktúr. V tuhých kryštalických látkach je možné ovplyvňovať ich fyzikálne vlastnosti zmenou pomeru izotopov v ich objeme. V prípade nekovových kryštalicky tuhých látok spôsobuje náhodné rozdelenie izotopov v kryštalickej mriežke obmedzenie prechodu tepla. Tento jav je známy ako izotopická porucha a spôsobuje zhoršenie tepelnej vodivosti. Tepelná vodivosť SiC je veľmi vysoká a závisí od plytypu a smeru v kryštalickej rovine. Hodnota tepelnej vodivosti SiC materiálu sa pohybuje v rozsahu od 3,50 do 4,90 Wcm⁻¹K⁻¹. Napriek tejto vysokej hodnote je z hľadiska vývoja výkonnejších polovodičových prvkov na substrátoch z SiC nutné túto hodnotu ďalej zvyšovať. Zlepšenie šírenia tepla v SiC, alebo v akomkoľvek inom polovodiči sa dá dosiahnuť izotopickým obohatením, ktoré znižuje negatívny vplyv ťažších izotopických prímesí a teda pomáha redukovať izotopické poruchy [49].

3.5 Metodika merania

Na elektrickú charakterizáciu vzoriek bol použitý parametrický analyzátor polovodičov Agilent 4155C a Keithley 2612B SMU. V prípade vysoko prúdových meraní bol pre Agilent 4155C použité hardvérové rozšírenie Agilent 41501A/B, pozostávajúce z vysoko výkonovej vymeriavacej jednotky (HPSMU) a generátora impulzov. HEMT prvky pri meraní nekontrolovateľne oscilovali čo v určitých prípadoch poškodzovalo Schottkyho hradlový kontakt. Aby boli oscilácie eliminované boli navrhnuté filtre pre hradlový aj drainový kontakt HEMTov. Drainový filter pozostával z C-L-C dolnopriepustného filtra s medznou frekvenciou ~ 650 kHz. Hradlový filter bol navrhnutý ako dolnopriepustný C-R-C filter s medznou frekvenciou ~ 100 kHz. Implementácia oboch filtrov umožnila I-V merania nutné k elektrickej charakterizácii prvkov a nastavovanie pracovného bodu tranzistorov v prípade elektrotermálnej analýzy.

Pre elektrotermálnu analýzu štruktúr všetkých prvkov boli použité rôzne metódy umožňujúce presné meranie lokálnej teploty. Metóda ktorá dosahovala najlepšie priestorové rozlíšenie bola mikro-Ramanovská spetroskopia vo viditeľnej oblasti spektra. Pre tento účel bol použitý systém MonoVista 750 CRS s argónovým laserom Ar⁺ naladeným na vlnovú dĺžku 514 nm s priemerom meracej stopy ~1 µm. Snímanie spektra Ramanovského rozptylu bolo dosiahnuté pomocou monochromátora s mriežkou 1500 drážok/mm a výsledný signál bol snímaný pomocou CCD kamery s termoelektrickým chladením. Meranie bolo uskutočňované ožarovaním vzorky laserovým zväzkom kolmo na rovinu kryštalografickej podstavy v konfokálnej konfigurácii snímania spätného rozptylu. Užitočný signál bol zberaný pomocou LWD objektívu so zväčšením 80x, alebo 100x pre dosiahnutie čo najlepšieho laterálneho rozlíšenia. Pre meranie priemernej teploty boli využité mikro termistory s rozmerom 600x300 µm, ktoré boli lepené pomocou teplovodivého lepidla na určité oblasti vzorky. V prípade SiC PiN diód bola použitá aj termovízna kamera Flir655c s rozlíšením 640x480 a teplotnou citlivosťou >30 mK. Merania prebiehali v stacionárnom stave po ustálení povrchovej teploty. Spolu s kamerou bol použitý aj objektív T198066 so zväčšením 1,5x čím bolo dosiahnuté priestorové rozlíšenie meracieho systému 25 µm/pixel. V prípade GTLM HEMT prvkov boli využité okolité Schottkyho kontakty ako teplotné senzory. Výhodou Schottkyho kontaktov ako senzorov je ich presná poloha a rozmery na meranej štruktúre.

Jadrom experimentu skúmajúceho tepelné vlastnosti predložených vzoriek bol základný predpoklad prechodu tepla z teplého konca vzorky na chladič pri konštantnom dodávanom výkone. V prípade oboch prvkov bol zdroj tepla lokalizovaný v bezprostrednej blízkosti povrchu vzorky. To umožňovalo merať teplotu pomocou spomínaných metód. Jednoduchý chladič z hliníka predstavoval veľké rozmery, príliš dlhé časy ustálenia teploty, nepresnosti spôsobené teplotnými výkyvmi v laboratóriu, vlhkosťou vzduchu a celkovo by vyžadoval

monitorovanie počas celého merania. Všetky teplotné merania by sa preto nezaobišli bez špeciálne navrhnutého tepelne kompenzovaného držiaku vzoriek. Tento držiak pozostával z Peltierovho elementu umiestneného na špeciálne vyrobenom vodou chladenom bloku a PID regulátora. Vodou chladený blok bol optimalizovaný tak aby ho bolo možne vložiť do pripraveného otvoru v Ramanovskom mikroskope. Na vodou chladenom bloku bola umiestnená aj elektronika nutná pre meranie teploty pomocou termistorov umiestnených v montážnej platni kde bola upevňovaná meraná vzorka (Obr. 7). Na tomto bolku boli umiestnené aj konektory pre pripojenie elektrických zdrojov potrebných pre nastavenie pracovného bodu vzoriek. Regulátor pre Peltierov element pozostával z mikroprocesora s programom regulácie a vypisovania užitočných dát na zobrazovaciu jednotku s užívateľským rozhraním pre nastavovanie požadovanej teploty. Snímanie výstupných napätí z termistorov bolo riešené prevzorkovávaním A/D prevodníka v mikroprocesore pre dosiahnutie rozlíšenia 0,1 °C. Na teplotne kompenzovanej platni boli umiestnené montážne diery pre EGIDE puzdra obsahujúce vzorky. Takto zhotovený držiak umožňoval priame meranie teploty povrchu vzorky pri konštantnej teplote montážnej platne od nastaveného stratového výkonu daného prvku a bolo tým pádom možné stanoviť, ktorá štruktúra dosahuje lepšie tepelné parametre. Pracovný bod prvkov bol nastavovaný pomocou SMU Keithley typ 2400 a externého zdroja Rigol DP832. Usporiadanie jednotlivých prístrojov bolo závislé od meranej vzorky a prvku. Pre kalibračné merania a merania vyžadujúce väčší rozsah teplôt ako bol schopný dodať Peltierov element boli využité rôzne vyhrievacie podstavce ako Linkam THMS600 a Att system A150.



Obr.7 Štruktúry skúmaných AlGaN/GaN HEMT vzoriek

Pre tepelné simulácie bol použitý softvérový nástroj Sentaurus TCAD (z angl. Technology Computer Aided Design) vyvinutý spoločnosťou Synopsys. V práci sú diskutované 2D a 3D simulácie AlGaN/GaN HEMT prvkov a SiC PiN diód. Pre tento účel boli všetky štruktúry modelované v softvéri podľa layoutu dodaného výrobcami jednotlivých štruktúr. Aby sa dosiahli rovnaké výsledky v simulačnom programe ako v prípade reálnych meraní boli tepelné vodivosti vrstiev náležite upravované aby odzrkadľovali namerané údaje dosiahnuté vybranými metódami.

4 Experimentálne výsledky

Ako prvé boli skúmané elektrické vlastnosti 10 kV PiN diód na báze SiC z prvej série vzoriek medzinárodného projektu OSIRIS. Výsledné J-V charakteristiky pre päť rôznych diódových štruktúr odhalili veľké rozdiely nameraných prúdov pri vyšších priepustných napätiach (**Obr. 8a**). Diferenciálny odpor vypočítaný z nameraných J-V charakteristík mal podobný priebeh pre všetky vzorky ako je vidieť na **Obr. 8b**.



Fig. 8 Elektrické vlastnosti vybraných vzoriek pri izbovej teplote; a) J-V charakteristiky v priepustnom smere a b) vypočítaný diferenciálny odpor

Nameraný úbytok napätia pri 120 A/cm² bol podobný vo väčšine vzoriek s hodnotami v rozsahu 3,6 až 3,66 V. Rovnako aj diferenciálny odpor sa pohyboval pri danej prúdovej hustote v rozsahu 2,65 až 3,79 m Ω cm². Vzorky zo skupiny D4, v ktorej bol prirodzený SiC použitý ako substrát aj ako driftová vrstva, vykazovali najvyšší úbytok napätia, až 4,09 V, a najvyššiu hodnotu diferenciálneho odporu 5,4 m Ω cm². Zhoršené vlastnosti mohli byť spôsobené nízkou kvalitou kontaktov, alebo parazitickým sériovým odporom v štruktúre. Taktiež je možné pripísať zhoršené vlastnosti vzoriek D4 rôznemu technologickému procesu výrobcov, ktorý sa podieľali na procese výroby prvkov, a odhaľuje problémy s injekciou nosičov náboja do driftovej oblasti.

Analýza faktora ideality v závislosti od zmeny napätia (**Obr. 9**) v priepustnom smere poukázala na značnú odlišnosť od teoretického predpokladu. Tieto problémy boli viditeľné už pri J-V meraniach v rozsahu od 1,5 do 2,5 V, kde sú charakteristiky viditeľne skreslené. Vzorky zo skupiny D5, D4 a D3 mali podobné hodnoty faktora ideality v oblasti rekombinačného prúdu, ktorá bola vidiťelná v rozsahu od 1,8 V do 2,05 V atransport náboja je rýchlo prekonaný iným mechanizmom po hodnotu napätia 2,55 V.



Fig. 9 Priebeh faktora ideality od pripojeného napätia v priepustnom smere

Vzorky zo skupiny D1 a D2 vykazovali pravdepodobne superpozíciu rekombinačného a pascou asistovaného transportu náboja. Podľa viacerých publikácií môže vyšší príspevok prúdu súvisieť s procesmi rekombinácie v oblasti priestorového náboja. Tento proces je priamou indikáciou elektricky aktívnych pascí v epitaxných vrstvách štruktúr týchto prvkov, ktoré opäť poukazujú na nedokonalý technologický proces alebo degradáciu počas prepravy medzi rôznymi aparatúrami v priebehu rastu. Ukázalo sa, že z pomedzi dvoch dobre známych hlbokých defektov, ktoré boli pozorované v materiáli 4H-SiC s označením Z_{1/2} a EH_{6/7}, má práve pasca Z_{1/2} rozhodujúci vplyv na vývoj prúdového mechanizmu v oblasti s nízkym až stredným napätím v priepustom smere. Prítomnosť tejto pasce v meraných štruktúrach bola potvrdená výskumným tímom skúmajúcim pasce pomocou metódy DLTFS. Všetky vzorky však vykazovali podobné vlastnosti v okolí 2,6 V, kde dominuje kombinácia difúzneho a rekombinačného prúdového mechanizmu. Všetky vyššie uvedené vlastnosti boli overené aj druhou sériou vzoriek, z pomedzi ktorých boli porovnávané iba vzorky zo skupiny D5, D4 a D3.

Výsledky z elektrickej charakterizácie boli použité na výber vhodných vzoriek s podobnými elektrickými vlastnosťami za účelom vyhodnotenia ich elektrotermálnych vlastností. V prípade SiC diód bolo pozorované, že väčšina generovaného tepla je sústredená

na rozhraní P^+/N^- vrstiev, ktoré je umiestnené približne 6 µm od povrchu anódového kontaktu. Na základe toho bola v prípade termistorov meraná teplota anódového kontaktu a v prípade mikro-Ramanovskej termometrie a IR termovízie bola snímaná oblasť v okolí hrany anódového kontaktu.

Z meraní vzoriek prvej série sa ukázalo, že elektrotermálne vlastnosti SiC diód so štruktúrou obsahujúcou izotopicky čisté vrstvy vykazujú vyššej tepelnej vodivosť a tým nižšiu teplotu v meraných bodoch (**Obr. 10a**). Pomocou hodnoty stratového výkonu a hraničných teplôt štruktúry bolo možné jednoduchým výpočtom zistiť hodnotu celkového tepelného odporu. Ako je možno vidieť na **Obr.10b**, výpočet tepelného odporu potvrdil lepšie elektrotermálne vlastnosti štruktúr skupiny D1 a D5 obsahujúce izotopicky čisté vrstvy v porovnaní so štruktúrami skupiny D3 a D4 obsahujúce iba vrstvy prirodzeného SiC.



Obr. 10 a) Teplota odmeraná pomocou termistorov a b) vypočítaný celkový tepelný odpor vybratých vzoriek SiC diód ako funkcia rozptylovaného výkonu

Vzorky zo skupiny D1, D2 a D4 však vykazovali nestabilitu pri elektrickej aj elektrotermálnej analýze. Na potvrdenie lepších tepelných vlastností izotopicky čistého SiC bola prijatá druhá séria vzoriek, ktorá obsahovala iba prvky na štruktúre D5 s izotopicky čistými vrstvami a prvky na štruktúre D3 a D4 z prirodzeného SiC. Porovnanie druhej série vzoriek na štruktúre D3 a D5 potvrdilo nižší tepelný odpor štruktúry D5 (**Obr. 11a**). Použitím IR termovízie a mikro-Ramanovskej termometrie sa toto tvrdenie potvrdilo jednorozmerným rastrovaním na povrchu diódy a pomocou simulačného programu Sentaurus. So simulačným modelom prispôsobeným pre referenčnú štruktúru skladajúcu sa z prirodzeného SiC bola zvýšená tepelná vodivosť driftovej a substrátovej vrstvy tak, aby zodpovedala meraniu štruktúry obsahujúcej izotopicky čisté vrstvy. Zistilo sa, že navýšenie tepelnej vodivosti o +16% v c-smere a +33% v a-smere pre prirodzený SiC, vykazujú

simulácie podobné údaje teplotných profilov ako merané tepelné profily získané pomocou IR termovízie a Ramanovskou termometriou (**Obr. 11b**).



Obr. 11 Porovnanie simulácie a nameranej teploty pomocou Ramanovej termometrie a IR termovízie od rozptyľovaného výkonu a) v jednom bode b) rastrovaním

Ďalej bola uskutočnená simulácia všetkých vrstiev za účelom odhalenia ich vplyvu na teplotu PN priechodu diódy (**Obr. 12**). Ako referenčný model bol použitý najlepší prípad štruktúry D5, obsahujúcej izotopicky čisté vrstvy.



Obr. 12 a) Vplyv hrúbky substrátu na rôzne štruktúry b) Vplyv hrúbky spájky na teplotu referenčnej štruktúry

Ukázalo sa, že tepelný tok pre danú geometriu analyzovaných vzoriek možno rozdeliť do laterálneho a vertikálneho smeru. Použitím Sn spájky vykazujúcej relatívne vysoký tepelný odpor v kombinácií so znižovaním hrúbky substrátu presúva primárny tok tepla do vertikálneho smeru, čo spôsobuje zvýšenie teploty PN priechodu kvôli navýšeniu celkového tepelného odporu štruktúry. Pre úplne novú štruktúru bola odporúčaná modifikácia spočívajúca v kombinácií redukcie hrúbky substrátu a použitie vysoko tepelne vodivej spájky alebo iného spojovacieho materiálu medzi čipom a nosníkom. Na záver bol

simulovaný aj vplyv veľkosti plochy čipu referenčnej štruktúry na teplotu PN priechodu. Tu bolo zistené, že zväčšovanie rozmerov veľkosti čipu oproti referenčnej 3x3 mm zníži teplotu PN priechodu, avšak kvôli vysokej cene SiC technológie sa tento prístup neodporúča.

Analýza prvkov na báze GaN pozostávala z výskumu rôznych HEMT štruktúr. Rozdiel medzi štruktúrami bol najmä vo vzdialenejších vrstvách od AlGaN/GaN heterorozhrania, ktoré pozostávali z epitaxných vrstiev SiC. Celkovo boli skúmané 3 odlišné štruktúry označené ako SL2525, SL2973 a referenčná SL2527 štruktúra. Najprv boli skúmané Schottkyho kontakty na hradlách FAT HEMT prvkov pomocou I-V charakteristík pre rôzne teploty hradla. Zistilo sa, že výška Schottkyho bariéry bola vyššia pre prvky na SL2525 štruktúre oproti SL2527 a aj vyšší príspevok tunelovacieho prúdu pre SL2527 bol spôsobený rozdielnou výškou Schottkyho bariéry.



Obr. 13 a) Výška Schottkyho barriery a b) Tunelovací prúd cez Schottkyho kontakt pre vzorky SL2525 a SL2527

Podľa výrobcu nebola hrúbka vrchnej krycej vrstvy GaN rovnaká vo všetkých predložených štruktúrach. Dospelo sa preto k záveru, že hrúbka krycej vrstvy ovplyvňuje výšku bariéry. Táto hypotéza bola potvrdená aj meraním GTLM HEMT prvkov na štruktúrach SL2525, Sl2527 a SL2973. Bolo zistené, že prahové napätie má hodnotu -2,8 V pre SL2973, -2,5 V pre SL2525 a -2,0 V pre SL2527 štruktúru, ako možno vidieť na **Obr. 14**. Je možné preto poukázať na priamu koreláciu s hrúbkou vrchnej krycej vrstvy, ktorá bola 3 nm v SL2973, 2,5 nm v SL2525 a 1,5 nm v SL2527 štruktúre.

Z dôvodu posunutého prahového napätia bol saturačný prúd pri danom predpätí hradla vyšší pre prvky na SL2973 a SL2525 štruktúrach. Mnoho viac-hradlových prvkov bolo poškodených kvôli zlej depozícii kovových vrstiev, čo spôsobilo skraty alebo prerušenia hradlovej elektródy. Napriek tomu boli tieto prvky použité pre elektrotermálnu analýzu.



Obr. 14 Prenosové charakteristiky GTLM prvkov na SL2525, SL2527 a SL2973 štruktúrach

Podobne ako v prípade analýzy SiC PiN diód bola uskutočnená elektrotermálna analýza všetkých AlGaN/GaN štruktúr. Boli použité merania pomocou mikro-termistora, susedného Schottkyho kontaktu a mikro-Ramanovskej termometrie. Najskôr bola vykonaná analýza GTLM prvkov na štruktúrach SL2525 a SL2527. Pomocou mikro-Ramanovskej termometrie boli vyhodnotené teploty GaN a SiC vrstiev. Teplota klesá smerom do hĺbky prvku pričom horná vrstva GaN vykazovala o ~ 33% vyššiu teplotu ako vrstva SiC ~6 µm pod povrchom. Štruktúry SL2525 a SL2527 majú veľmi podobné elektrotermálne vlastnosti čo bolo zistené mikro-Ramanovskou termometriou pomocou bodových meraní (**Obr. 15a**) a rastrovania celej štruktúry prvku (**Obr. 15b**).



Obr. 15 Elektrotermálna anlýza pomocou Ramanovskej termometrie a) bodové merania a b) rastrovanie na povrchu vzoriek

Rozloženie teploty sa náhle mení z hodnoty 160 °C, v tesnej blízkosti hradla, na 80 °C v priestore medzi drainom a hradlom kde bolo vykonané bodové meranie. Vzdialenosť medzi týmito miestami je približne 2 µm. Rovnaké merania boli uskutočnené aj pre 2x150 µm HEMT prvky. V dôsledku poškodenej vzorky SL2527 boli hradlá oboch prvkov pripojené k source elektróde. V prípade vzorky SL2525, ktorá mala čiastočne funkčnú hradlovú elektródu, bol pozorovaný veľký teplotný rozdiel medzi ľavou a pravou stranou

tranzistora, ako možno vidieť na Obr. 16a.



Obr. 16 Teplotné profily pre 2x150 μm HEMT prvky na a) SL2525 a b) SL2527 štruktúrach pri stratovom výkone 4 W

Rozdiel teplôt poukazoval na problémy s možným prerušením hradlovej elektródy v určitom bode, čo spôsobilo nekontrolované správanie zvyšku kanála. Toto poškodenie má za následok vysoký drainový prúd aj pre vysoké záporné predpätia hradla. Pre štruktúru SL2527, bol výkon rozdelený rovnomerne na obidve časti tranzistora, kvôli chýbajúcej hradlovej elektróde, a vykazoval takmer rovnakú teplotu na oboch stranách tranzistora (**Obr. 16b**). Maximálne merané teploty boli ~ 205 °C pre vzorku SL2525 a ~ 187 °C pre vzorku SL2527 blízko pravej hradlovej elektródy. Vplyv izotopicky čistej SiC vrstvy bol skúmaný iba pre GTLM prvky na štruktúre SL2973. Meranie ukázalo, že maximálna pozorovaná teplota pre štruktúru SL2973 bola 130,8 °C, čo je o 17,2 % menej v porovnaní so štruktúrou SL2525. To možno pripísať vyššej tepelnej vodivosti izotopicky čistej SiC vrstvy. Kvôli obmedzeniu viditeľnosti pre mikro-Ramanovskú metódu nebolo možné zmerať maximálnu teplotu kanála pod hradlom. Preto boli uskutočnené tepelné simulácie za účelom odhadu maximálnej teploty kanála.



Obr. 17 Teplotný profil získaný rastrovaním na povrchu vzorky SL2973

V rámci celkovej analýzy prvkov bola predvedená aj exemplárna analýza 8-hradlového HEMTu, kde bola ukázaná možnosť použitia susednej Schottkyho diódy v kombinácii s tepelnými simuláciami na odhad teploty kanála. Teplota získaná touto metódou v rozsahu stratového výkonu od 1 do 3 W mala relatívnu odchýlku \pm 9% oproti meraniam získaných pomocou Ramanovskej termometrie. Táto metóda bola predvedená ako jednoduchý spôsob odhadu teploty kanála aj v prípade zapuzdrených prvkov.

3D tepelné simulácie boli vykonané v softvéri Synopsys TCAD Sentaurus. Na nastavenie materiálových konštánt pre model boli použité predchádzajúce namerané termálne údaje.



Obr. 18 Porovnanie nameraných a dsimulovaných údajov rozloženai teploty na povrchu GTLM prvkov na štruktúrach a) SL2527, SL2525, b) SL2973

Po úspešnej úprave modelu bolo zistené, že maximálna teplota bola 155°C pre prvky na SL2525, SL2527 štruktúre, a 140 °C pre prvky na štruktúre SL2973 (**Obr. 18**), čo svedčí o rozdiele 9,6 %. Vynikajúce elektrotermálne vlastnosti štruktúry SL2973 boli potvrdené zvýšením tepelnej vodivosti epitaxnej vrstvy SiC na substráte štruktúry SL2525 o 19 % v c-smere, tak, aby odsimulovaná hodnota zodpovedala nameraným údajom.

Použitie všetkých nameraných údajov pri úprave simulačného modelu umožnilo dôkladnejšiu analýzu štruktúry a kvantifikáciu vplyvu jednotlivých vrstiev na referenčnú štruktúru SL2525. Bol vytvorený simulačný model 2-hradlového a 50-hradlového HEMT prvku, pri ktorom bola vyhodnotená zmena hrúbky a tepelnej vodivosti každej vrstvy pre pulznú a kontinuálnu prevádzku za účelom návrhu optimalizácie štruktúry.



Obr. 19 Teplotné rozloženie bod hradlovou elektródou pri kontinuálnej a pulznej prevádzke pre a) 2-hradlový a b) 50-hradlový HEMT

Simulácie ukázali, že pri impulzných podmienkach presahujúcich 5 ms je rozloženie teploty v štruktúre totožné s kontinuálnou prevádzkou (CW) ako je možne vidieť na **Obr. 19**. Pri každom simulovanom modeli dochádza k mierne odlišnému rozloženiu teploty v jednotlivých vrstvách. Pre 2-hradlové prvky je najväčší rozptyl tepla v horných vrstvách GaN a SiC zatial čo pre 50-hradlové prvky, je zásadný rozptyl tepla vo vrstve CuMo nosníka. Väčší tepelný gradient bol zistený v 2-hradlovom modeli, zatiaľ čo v 50-hradlovom modeli



Obr.20 Vplyv zmeny hrúbok vrstiev na teplotu kanála pre a) 2-hradlový a b) 50-hradlový HEMT

je teplo rovnomernejšie rozdistribuované. Tento jav sa dá vysvetliť anizotropiou tepelného toku v simulovaných modeloch. Tepelné presluchy medzi hradlami spolu s väčšími rozmermi aktívnej oblasti znižujú laterálny tepelný tok, čo spôsobuje zvyšovanie teploty vo zvislom smere v prípade 50-hradlového modelu. Ukázalo sa, že maximálna teplota kanála klesá so zvyšujúcou sa hrúbkou SiC a GaN v dôsledku zmeny laterálneho tepelného odporu v kombinácií s nízko tepelne vodivými vrstvami AuSn a TBR. Zmenšovaním hrúbok CuMo nosníka AuSn spájky sa teplota kanálu znižuje, ako možno vidieť na **Obr.20**.



Obr.21 Vplyv zmeny tepelnej vodivosti vrstiev na teplotu kanála pre a) 2-hradlový a b) 50-hradlový HEMT

Bol skúmaný aj vplyv tepelnej vodivosti na všetky vrstvy v rozsahu od -25 % do +25 % referenčnej (prirodzenej) hodnoty. Zvyšovaním tepelnej vodivosti všetkých vrstiev v simulácii sa teplota kanálu znižovala podľa očakávania (**Obr.21**). Ukázalo sa však, že práve SiC substrát má značný vplyv na tepelnú odozvu. Použitím SiC s vyššou tepelnou vodivosťou až o 25% ako prirodzený SiC je možné dosiahnuť zníženie teploty o 8,3% pre 2-hradlové, a o 9% pre 50-hradlové HEMTy. Zmena tepelnej vodivosti GaN vrstvy má výraznejší vplyv v prípade prvku s 2 hradlami kvôli laterálnemu tepelnému toku. Bol skúmaný aj vplyv vyššej tepelnej vodivosti na operačný režim oboch modelov tranzistora. V tejto simlácii bola hodnota tepelnej vodivosti nastavená vyššie o 25 % ako nominálna hodnota. Pri impulznej prevádzke s časom 5 µs sa zistilo, že tepelná vodivosť GaN vrstiev v oboch modeloch má dominantný vplyv na zníženie teploty kanála. So zvyšujúcou sa šírkou impulzu sa vplyv GaN vrstvy znižuje a pre dobu pulzov nad 5 ms sa teploty ustália ako pri kontinuálnej prevádzke, pričom v tomto prípade boli najvplyvnejšími vrstvami práve hlboké vrstvy SiC pre oba typy HEMT modelov.

V tejto práci bolo ukázané, že použitie izotopicky čistých vrstiev už v dobre zavedenej technológii SiC má význam pre ďalšie znižovanie teploty kanálov vyrábaných prvkov.

5 Záver

Do polovodičových štruktúr skúmaných v tejto práci boli vkladané už od začiatku výskumu veľké nádeje v oblasti vysokovýkonných a vysokofrekvenčných aplikácií, lebo v súčasnosti sú prvky vyrobené z týchto materiálov už dlhšie známe na trhu elektronického priemyslu. Polovodičový materiál GaN si okrem aplikácie v LED a LD prvkoch, našiel svoje miesto vo vysokofrekvenčných aplikáciách moderných komunikačných zariadení a taktiež v spínacích aplikáciách. Na druhej strane má SiC dominantné postavenie v aplikáciách kde je nutné pracovať s vysokým výkonom v oblasti premeny elektrickej energie a vysokých napätí. Tieto prvky majú veľký potenciál pre budúcnosť elektrických zariadení pre ktoré sa predpokladá ešte vyššia hustotou výkonu na jednotku objemu. Preto sa časť výskumu zapodieva aj riešením tepelného manažmentu pre budúce elektronické prvky v zariadeniach budúcnosti. Jednou z možností ktorá je skúmaná v tejto práci, je implementácia izotopicky čistých vrstiev do štruktúr na báze WBG materiálov. Výhodou tejto implementácie je možnosť existujúcich zariadení na výrobu elektronických prvkov, bez väčšieho zásahu do systému, využiť izotopicky čisté prekurzory priamo kompatibilné s danou technológiou. Vplyv týchto vrstiev na tepelné a elektrické parametre výsledných prvkov sú jednou z atraktívnych oblastí dnešného výskum. Cieľom tejto práce bolo analyzovať vplyv izotopicky čistého SiC substrátu a medzivrstiev na elektrické a tepelné vlastnosti SiC PiN diód a AlGaN/GaN HEMTov pomocou rôznych metód.

Boli zmerané elektrické vlastnosti celkovo dvoch sérií vzoriek 10 kV PiN diód na báze SiC. Výsledkom J-V meraní v priepustnom smere bolo odhalenie veľkých prúdových odchýlok pre každú z piatich diódových štruktúr. Vypočítaný diferenciálny odpor z nameraných J-V charakteristík mal pre všetky vzorky podobný vývoj v závislosti od pretekajúcej prúdovej hustoty. Tým bola potvrdená vlastnosť intrizickej vrstvy ktorá pri nízkych napätiach má veľmi vysoký odpor a po vodivostnej modulácii sa hodnota odporu extrémne zníži. Analýza faktora ideality v závislosti od premenlivého napätia v priepustnom smere poukázala na značnú odlišnosť od teoretického predpokladu. Ukázalo sa, že z pomedzi dvoch dobre známych hlbokých defektov ktoré boli pozorované v materiáli 4H-SiC, s označením $Z_{1/2}$ a EH_{6/7}, má práve pasca $Z_{1/2}$ rozhodujúci vplyv na vývoj transportu náboja v oblasti s nízkym až stredným napätím v priepustom smere. Prítomnosť tejto pasce v meraných štruktúrach bola potvrdená výskumným tímom pomocou metódy DLTFS.

Elektrotermálna analýza bola realizovaná využitím mikro termistorov, IR termovízie a mikro-Ramanovskej termometrie. Z meraní vzoriek prvej série sa ukázalo, že elektrotermálne vlastnosti SiC diód so štruktúrou obsahujúcou izotopicky čisté vrstvy vykazujú nižšiu teplotu, čo možno pripísať vyššej tepelnej vodivosti. Pre potvrdenie lepších tepelných vlastností izotopicky čistého SiC bola prijatá druhá séria vzoriek, ktorá obsahovala iba prvky na štruktúre obsahujúce izotopicky čisté vrstvy a prvky na štruktúrach z prirodzeného SiC. Porovnanie druhej série vzoriek potvrdilo nižší tepelný odpor štruktúry obsahujúcej izotopicky čisté vrstvy SiC. Použitím IR termovízie a mikro-Ramanovskej termometrie sa toto tvrdenie potvrdilo pomocou jednorozmerného rastrovania na povrchu diódy, ktoré bolo pripísane vyššej tepelnej vodivosti izotopicky čistých epitaxných vrstiev. Pomocou simulačného program Sentaurus bola simulovaná referenčná štruktúra s prirodzeným SiC využitím dvoch odlišných spôsobov. Čisto tepelná simulácia vykazovala nezrovnalosti v porovnaní s nameranými údajmi. Zistilo sa, že elektrotermálna simulácia lepšie kopíruje správanie reálneho prvku, kvôli nerovnomernej generácii tepla na rozhraní P⁺/N vrstiev. Výsledkom simulácie bol návrh štruktúry pre zlepšenie termálnych vlastností založený na redukcii hrúbky substrátu a úpravy spojovacieho materiálu medzi čipom a nosníkom prvku.

Analýza prvkov na báze GaN pozostávala z výskumu rôznych HEMT prvkov na báze AlGaN/GaN heteroštruktúry. Rozdiel medzi štruktúrami bol najmä vo vzdialenejších vrstvách od heterorozhrania, ktoré pozostávali z epitaxných vrstiev SiC. Celkovo boli skúmané 3 odlišné štruktúry označené ako SL2525, SL2973 a referenčná SL2527 štruktúra. Zistilo sa, že výška Schottkyho bariéry bola vyššia pre prvky na SL2525 štruktúre oproti SL2527 a príspevok tunelovacieho prúdu bol vyšší pre SL2527 spôsobený rozdielnou výškou bariéry. Podľa výrobcu nebola hrúbka vrchnej krycej vrstvy GaN konzistentná vo všetkých štruktúrach a bola odhalená priama spojitosť medzi hrúbkou krycej vrstvy a výškou bariéry. Podobne ako v prípade analýzy SiC PiN diód bola uskutočnená elektrotermálna analýza všetkých AlGaN/GaN štruktúr. Boli použité merania pomocou mikro-termistora, susedného Schottkyho kontaktu a mikro-Ramanovskej termometrie. Pre túto analýzu boli použité GTLM a 2x150 µm HEMT prvky na všetkých štruktúrach. V rámci celkovej analýzy bola predvedená možnosť použitia susednej Schottkyho diódy v kombinácii s tepelnými simuláciami na odhad teploty kanála. Táto metóda sa ukázala ako uspokojivá pre odhadnutie teploty kanála v prípadných zapuzdrených prvkoch.

Vplyv izotopicky čistej SiC vrstvy na štruktúre SL2973 bol skúmaný iba pre GTLM prvky, pretože neboli k dispozícii žiadne viachradlové HEMT prvky. Vďaka predchádzajúcim skúsenostiam bolo použité iba rastrovanie pomocou mikro-Ramanovskej termometrie naprieč tranzistorom. Meranie ukázalo, že maximálna pozorovaná teplota pre štruktúru obsahujúcu izotopicky čistú SiC vrstvu bola 130,8 °C, čo je o 17,2 % menej v porovnaní so štruktúrou obsahujúcou iba prirodzené SiC vrstvy. Kvôli obmedzeniu viditeľnosti pre mikro-Ramanovskú metódu boli uskutočnené tepelné simulácie všetkých štruktúr pre odhad maximálnej teploty v kanály. 3D tepelné simulácie boli vykonané v softvéri Synopsys TCAD Sentaurus. Na nastavenie tepelných konštánt pre simulovaný model boli použité predchádzajúce termálne údaje získané z Ramanovskej termometrie na GTLM a 2x150 µm HEMT prvkoch a susedného Schottkyho kontaktu na GTLM prvkoch. Vynikajúce elektrotermálne vlastnosti štruktúry SL2973 boli potvrdené zvýšením tepelnej vodivosti epitaxnej vrstvy SiC na substráte štruktúry SL2525 o 19 % v c-smere tak, aby zodpovedali nameraným údajom. Získaná hodnota mierne nadhodnocuje teoretické predpoklady, čo je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené chybou merania pomocou Ramanovskej termometrie pri rastrovaní vzorky.

Aplikácia všetkých nameraných údajov pri úprave simulačného modelu umožnilo dôkladnejšiu analýzu referenčnej štruktúry a kvantifikáciu vplyvu jednotlivých vrstiev. Simulácie ukázali, že pri impulzných podmienkach presahujúcich 5 ms je rozloženie teploty v štruktúre totožné s kontinuálnou prevádzkou (CW) a dochádza k odlišnému rozloženiu teploty v jednotlivých vrstvách skúmaných modelov. Pre 2-hradlové prvky je najväčší rozptyl tepla v horných vrstvách GaN a SiC zatial čo pre 50-hradlové prvky, je zásadný rozptyl tepla vo vrstve CuMo nosníka. Ukázalo sa, že maximálna teplota kanála klesá so zvyšujúcou sa hrúbkou SiC a GaN v dôsledku zmeny laterálneho tepelného odporu v kombinácií s nízko vodivými vrstvami AuSn a TBR. Zvyšovaním tepelnej vodivosti všetkých vrstiev v simulácii sa teplota kanálu znižovala podľa očakávania. Ukázalo sa však, že práve SiC substrát má značný vplyv na tepelnú odozvu. Použitím SiC s vyššou tepelnou vodivosťou až o 25% ako prirodzený SiC je možné dosiahnuť zníženie teploty o 8,3% pre 2-hradlové a o 9% pre 50-hradlové HEMTy.

6 Hlavné prínosy dizertačnej práce

Hlavné prínosy dizertačnej práce súvisiace s cielmi dizertačnej práce:

- Boli získané nové poznatky v oblasti elektrickej a elektrotepelnej charakterizácie SiC PiN diód a tranzistorov typu HEMT na báze GaN prostredníctvom analýzy nameraných dát
- Bola vyvinutá metóda charakterizácie teplotne závislých elektrických meraní prvkov na báze GaN a SiC s teplotou stabilizovanou pomocou na mieru vyrobeného tepelne kompenzovaného držiaka vzoriek
- Bola vyvinutá metóda charakterizácie elektrotepelných vlastností prvkov na báze GaN a SiC počas ich prevádzky pomocou mikro-Ramnanovskej termomentrie, termistorov a IR termovízie s využitím na mieru vyrobeného tepelne kompenzovaného držiaka vzoriek stabilizujúcim teplotou nosníka
- Bol vyšetrený vplyv tepelnej vodivosti prirodzeného a izotopicky čistého SiC substrátu za pomoci merania reálnych prvkov a simulačného nástroja pre GaN tranzistory typu HEMT na SiC a pre SiC PiN diódy
- Bol vytvorený návrh optimalizácie pre štruktúry SiC PiN diód a multi-hradlových tranzistorov typu HEMT na báze GaN zameraný na vylepšenie teplotného manažmentu týchto prvkov pomocou simulačného nástroja využitím získaných poznatkov z predchádzajúcich experimentov

7 Summary

This work deals with devices based on WBG semiconductor materials, GaN and SiC. Since dawn of these semiconductor materials, high potential was expected from them in the area of high power and high frequency applications. Today devices made from these materials have found their target market. The GaN semiconductor material, excluding LEDs and LD applications, found their place in high frequency switching applications in switch mode power supplies or in receivers and transceivers of modern communication equipment. On the other hand, SiC has a dominant footing in high power traction, photovoltaic, energy conversion and high voltage applications. Since these devices are supposed to be used in future with even greater power density handling the research in thermal management solutions are one of the utmost importance for future appliances and other electronic devices. One approach studied in this work is the incorporation of isotope enriched layers of the constituent device. This eliminates complicated mitigate technological modifications by availability of isotope enriched precursors directly compatible with the technology. However, the influence of these layers on thermal and, if used in the active layer, electrical parameters of final devices are attracting today's research. The goal of the dissertation thesis was to analyze the influence of isotope pure SiC substrate and interlayers on electrical and thermal properties of SiC PiN diodes and AlGaN/GaN HEMTs by a selection of various methods.

The electrical properties of two samples batches of 10 kV class HV-PiN diodes based on SiC were measured. The I-V measurements revealed large current deviations at high bias voltages for five distinctive diode structures and the differential resistance calculation from measured J-V characteristics showed consistent development for all samples with initially high value due to resistive drift region and after conductivity modulation it quickly decreased. The analysis of ideality factor showed several distortions at varying bias voltages. It was shown that two common deep level defects observed in 4H-SiC material which labelled $Z_{1/2}$ and EH_{6/7} from which $Z_{1/2}$ is crucial in the development of current transport in low to medium forward bias. The presence of this trap in used structures was confirmed by other team researching traps using DLTFS measurements. The electrical characterisation was used to pick appropriate samples with similar forward J-V characteristic for electrothermal evaluation.

The electrothermal analysis was done using simple micro thermistor measurements, IR thermal imaging and micro Raman thermometry. From the first batch it was shown that electrothermal properties of SiC diodes show a decrease in measured temperature for diode structures with isotope pure layers which can be assigned to higher thermal conductivity. To confirm the superior thermal properties of isotope pure SiC a second batch, where devices with only isotope pure structure and only natural structure have been received. The second batch comparison of devices confirmed lower thermal resistance of device on structure consisting of isotopic pure SiC. Using IR thermal imaging and micro Raman thermometry a one-dimensional scan across the diode surface was done. In all measurements the measured temperature of devices on isotopic pure SiC structure was lower than on natural SiC structure, which was attributed to to higher thermal conductivity of isotopic SiC epitaxial layers. With the help of Sentaurus simulation program the reference natural structure was simulated using two methods. The pure thermal simulation method showed high discrepancy from measured data. The electrothermal simulation was found to represent better the physical device and the reason was found out to be an uneven heat generation distribution at the P^+/N^- junction. For a completely new sample structure a combination of substrate thickness reduction and, more importantly, a more thermally conductive solder, or other bonding material, between the chip and lead frame was advised.

The analysis of GaN devices consisted of variety of HEMT layouts with a common AlGaN/GaN heterostructure. The differentiation was in the deeper layers from the heterojunction consisting of epitaxial SiC layers. A total of 3 distinctive structures marked as SL2525, SL2973 and reference SL2527 structures were evaluated. It was found that the Schottky barrier height was higher in devices on SL2525 than for SL2527 structures and the contribution of the tunnelling current was higher for SL2527 due to the difference of barrier height. According to the manufacturer the top cap layer thickness made from GaN was not consistent across all structures. It was therefore concluded that the thickness of cap layer influences the barrier height. Similarly, to the SiC PIN diode the electrothermal analysis of all AlGaN/GaN structures was done. Here however the micro thermistor measurements, neighbouring Schottky junctions and micro Raman thermometry were used. This analysis was used for GTLM and 2x150 µm HEMT layouts on all structures. The analysis of 8-gate HEMT was given, showing a possibility to use a neighbouring Schottky diode in conjunction with thermal simulations to estimate the channel temperature and it was shown to be a satisfactory method for estimating the channel temperature of encapsulated devices.

The influence of isotope pure SiC layer was investigated only for GTLM layout on SL2973 structure since no multi-gate HEMTs were available. Because of previous discoveries a micro Raman scan across the transistor was used. The measurement has shown that the maximum observed temperature for device on isotope pure SiC structure was 17.2 % less in comparison to natural SiC structure. However, because of visibility restrictions for micro Raman, the maximum channel temperature which occurs under gate electrode was not observed. Therefore, thermal simulations of all structures were made. The 3D thermal simulations were performed in Synopsys TCAD Sentaurus software. To adjust the model data obtained by Raman thermometry and neighbouring Schottky contacts on GTLM and 10x150 μ m HEMTs were used. The superior electrothermal properties of isotopic pure structure were validated by increasing the thermal conductivity of top SiC layer on substrate of natural SiC structure by 19 % in c-direction to match measured data. The value obtained overestimates slightly the theoretical data most likely due to Raman thermometry measurement error when scanning the sample.

Utilization of all measured data in simulation model adjustment gave the opportunity to analyse the structure more thoroughly and quantify the influence of constituent layers on reference natural SiC structure for their optimization draft. The simulations showed that at pulsed conditions exceeding 5ms the temperature distribution in the structure is identical to the CW operation and the heat dissipation occurs differently for simulated models. For the 2-gate device most heat dissipation occurs in the top GaN and SiC layers and for the 50-gate device most heat dissipation occurs in the CuMo lead frame layer. The maximum channel temperature was shown to decrease with the increasing thickness of SiC and GaN due to spreading thermal resistance alteration and low conductivity of AuSn and TBR layers as observed for SiC diodes. From the simulations generally by increasing the thermal conductivity of all layers the channel temperature decreases as expected. However, it was shown that the SiC substrate has a considerable influence on the thermal response. By introducing SiC with higher thermal conductivity up to 25 % than natural SiC, devices reach about 8.3 % and 9 % lower temperature for 2- and 50-gate HEMT, respectively. It is therefore shown that isotope enrichment introduction in already well-established SiC technology is a viable option to decrease the channel temperatures of produced devices.

8 Zoznam použitej literatúry

- [1] IWAI, Hiroshi. Future of silicon integrated circuit technology. In: Industrial and Information Systems, 2007. ICHS 2007. International Conference on. IEEE, 2007. p. 571-576.
- [2] AUTH, Chris, et al. A 10nm high performance and low-power CMOS technology featuring 3 rd generation FinFET transistors, Self-Aligned Quad Patterning, contact over active gate and cobalt local interconnects. In: 2017 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). IEEE, 2017. p. 29.1. 1-29.1. 4.
- [3] FUNG, A., et al. Gallium nitride amplifiers beyond W-band. In: 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). IEEE, 2018. p. 150-153.
- [4] MICOVIC, Miro, et al. Ka-Band LNA MMIC's Realized in Fmax> 580 GHz GaN HEMT Technology. In: 2016 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). IEEE, 2016. p. 1-4.
- [5] KIM, Katherine A., et al. Opening the box: Survey of high power density inverter techniques from the little box challenge. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2017, 2.2: 131-139.
- [6] CHOW, T. Paul. Progress in high voltage SiC and GaN power switching devices. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, 2014. p. 1077-1082.
- [7] BERZELIUS, Jons Jakob. Untersuchungen über die Flussspathsäure und deren merkwürdigsten Verbindungen. *Annalen der Physik*, 1824, 77.6: 169-230.
- [8] ACHESON, Goodrich Eugene. (1892) British Patent 17:911
- [9] ACHESON, Goodrich Eugene. Production of Artificial Crystalline Carbonaceous Materials," *United States Patent* 492,767 (28.02.93), 1893
- [10] ROUND, Henry J. A note on carborundum. In: *Semiconductor Devices: Pioneering Papers*. 1991. p. 879-879.
- [11] LOSSEV, O. V. CII. Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1928, 6.39: 1024-1044.
- [12] VLASKINA, S. I. Silicon carbide LED. Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics, 2002.
- [13] BRAUMHAUER, H. Uber die Kristalle des Carborundum, 1912. Z. Kryst, 50: 33-39.
- [14] CHEUNG, Rebecca. Silicon carbide microelectromechanical systems for harsh environments. World Scientific, 2006.
- [15] Rohm semiconductor. (2014). SiC Power Devices and Modules, Application Note [Online]. Availible: http://www.mouser.com/pdfdocs/ROHM_sic_appli-e.pdf

- [16] BHATNAGAR, M.; MCLARTY, Peter K.; BALIGA, B. J. Silicon-carbide highvoltage (400 V) Schottky barrier diodes. *IEEE Electron Device Letters*, 1992, 13.10: 501-503.
- [17] LAPEDUS, Mark. *Cree buys Intrinsic for \$46 million*, [Online]. Availible: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1162166
- [18] Cree Launches Industry's First Commercial Silicon Carbide Power MOSFET; Destined to Replace Silicon Devices in High-Voltage Power Electronics, [Online]. Availible: http://www.cree.com/news-media/news/article/cree-launches-industry-sfirst-commercial-silicon-carbide-power-mosfet-destined-to-replace-silicon-devices-inhigh-voltage-1200-v-power-electronics
- [19] JI, Shiqi; ZHANG, Zheyu; WANG, Fred. Overview of high voltage SiC power semiconductor devices: Development and application. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2017, 1.3: 254-264.
- [20] Microsemi. (2010). 0405SC-2200M, Datasheet [Online]. Availible: https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/5592-0405sc-2200m-rev-a-1-3-pdf
- [21] NOVIKOV, S. V.; FOXON, C. T.; KENT, A. J. Zinc-blende (cubic) GaN bulk crystals grown by molecular beam epitaxy. *physica status solidi* (*c*), 2011, 8.5: 1439-1444.
- [22] JOHNSON, W. Cetal. JB Parsons, and MC Crew. J. Phys. Chem, 1932, 36: 2561.
- [23] PANKOVE, JACQUES I. A Historical Survey of Research on Gallium Nitride. *GaN* and *Related Materials*, 1997, 1: 1
- [24] NAKAMURA, Shuji, et al. High-brightness InGaN blue, green and yellow lightemitting diodes with quantum well structures. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995, 34.7A: L797.
- [25] NAKAMURA, Shuji, et al. InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996, 35.1B: L74.
- [26] ASIF KHAN, M., et al. High electron mobility transistor based on a GaN-Al_xGa_{1-x}N heterojunction. *Applied Physics Letters*, 1993, 63.9: 1214-1215.
- [27] NAGY, Walter, et al. Linearity characteristics of microwave-power GaN HEMTs. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2003, 51.2: 660-664.
- [28] WANG, Fei, et al. Advances in power conversion and drives for shipboard systems. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103.12: 2285-2311.
- [29] PEARTON, Stephen J. (ed.). GaN and Related Materials II. CRC Press, 2000.
- [30] PELZEL, Rodney. A comparison of MOVPE and MBE growth technologies for III-V epitaxial structures. In: CS MANTECH Conference, USA. 2013. p. 105-108.

- [31] PODDER, Amit Kumer, et al. Substrate effects on channel temperature distribution of AlGaN/GaN HEMT. In: 2017 3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT). IEEE, 2017. p. 1-4.
- [32] PEARTON, Stephen J. (ed.). GaN and Related Materials II. CRC Press, 2000.
- [33] BALIGA, B. Jayant. *Fundamentals of power semiconductor devices*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [34] SHIN, Donggyu, et al. Spontaneous inversion of in-plane polarity of a-oriented GaN domains laterally overgrown on patterned r-plane sapphire substrates. *Journal of Applied Crystallography*, 2013, 46.2: 443-447.
- [35] AMBACHER, O., et al. Pyroelectric properties of Al (In) GaN/GaN hetero-and quantum well structures. *Journal of physics: condensed matter*, 2002, 14.13: 3399.
- [36] WAGNER, J.-M.; BECHSTEDT, F. Properties of strained wurtzite GaN and AlN: Ab initio studies. *Physical Review B*, 2002, 66.11: 115202.
- [37] SMORCHKOVA, I. P., et al. Polarization-induced charge and electron mobility in AlGaN/GaN heterostructures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *Journal of applied physics*, 1999, 86.8: 4520-4526.
- [38] IBBETSON, James Paul, et al. Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaN/GaN heterostructure field effect transistors. *Applied Physics Letters*, 2000, 77.2: 250-252.
- [39] BINARI, Steven C.; KLEIN, P. B.; KAZIOR, Thomas E. Trapping effects in GaN and SiC microwave FETs. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90.6: 1048-1058.
- [40] BINARI, Steven C.; KLEIN, P. B.; KAZIOR, Thomas E. Trapping effects in GaN and SiC microwave FETs. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90.6: 1048-1058.
- [41] VETURY, Ramakrishna, et al. The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaN/GaN HFETs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48.3: 560-566.
- [42] WEIMANN, Nils G., et al. Scattering of electrons at threading dislocations in GaN. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83.7: 3656-3659.
- [43] MENEGHINI, Matteo, et al. Trapping phenomena and degradation mechanisms in GaN-based power HEMTs. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2018, 78: 118-126.
- [44] DINGLE, R., et al. Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices. *Applied Physics Letters*, 1978, 33.7: 665-667.
- [45] BENBAKHTI, Brahim, et al. Effects of self-heating on performance degradation in AlGaN/GaN-based devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56.10: 2178-2185.

- [46] ZHANG, X. B., et al. Influence of electron-phonon interaction on the optical properties of III nitride semiconductors. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2001, 13.32: 7053.
- [47] SINGHAL, S., et al. Reliability of large periphery GaN-on-Si HFETs. *Microelectronics Reliability*, 2006, 46.8: 1247-1253.
- [48] GOTTHOLD, D. W., et al. Time-dependent degradation of AlGaN/GaN heterostructures grown on silicon carbide. *Journal of electronic materials*, 2004, 33.5: 408-411.
- [49] LUNDQVIST, Björn, et al. Thermal conductivity of isotopically enriched silicon carbide. In: 19th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). IEEE, 2013. p. 58-61.

9 Zoznam publikácií

FAI Redakčné a zostavovateľské práce knižného charakteru (bibliografie, encyklopédie, katalógy, slovníky, zborníky...)

Počet záznamov: 1

FAI01 NEVŘELA, Juraj (ed.) - MIČJAN, Michal (ed.) - NOVOTA, Miroslav (ed.) - KOVÁČ, Jaroslav jr. (ed.) - <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> (ed.). International workshop on devices and applications project: Escel ju Osiris. Bratislava, Slovakia. December 14-15, 2017. 1.vyd. Bratislava: Desidia Tech 1.t.d, 2017. 42 s. ISBN 978-80-972928-1-2. [20 %]

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- ADC01 FLOROVIČ, Martin <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> KOVÁČ, Jaroslav jr. -KOVÁČ, Jaroslav - CHVÁLA, Aleš - JACQUET, Jean-Claude - DELAGE, Sylvain Laurent. Rigorous channel temperature analysis verified for InAlN/AlN/GaN HEMT. In *Semiconductor Science and Technology*. Vol. 34, No. 6 (2019), Art. no. 065021 [7] s. ISSN 0268-1242. [15 %]
- ADC02 CHVÁLA, Aleš <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> KOVÁČ, Jaroslav jr. -FLOROVIČ, Martin - MAREK, Juraj - ČERNAJ, Ľuboš - DONOVAL, Daniel -KOVÁČ, Jaroslav - DUA, Christian - DELAGE, Sylvain Laurent - JACQUET, Jean-Claude. Advanced characterization techniques and analysis of thermal properties of AlGaN/GaN multifinger power HEMTs on SiC substrate supported by three-dimensional simulation. In *Journal of Electronic Packaging*. Vol. 141, No. 3 (2019), Art. no. 031007 [7] s. ISSN 1043-7398. [10 %]
- ADC03 LAURENČÍKOVÁ, Agáta ELIÁŠ, Peter HASENÖHRL, Stanislav KOVÁČ, Jaroslav jr. - SZOBOLOVSZKÝ, Robert - KOVÁČ, Jaroslav. GaP nanocones

covered with silver nanoparticles for surface-enhanced Raman spectroscopy. In *Applied Surface Science*. Vol. 461, (2018), s. 149-153. ISSN 0169-4332. **[10 %]**

ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

ADM01 <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> - ŠIFFALOVIČ, Peter - HODAS, Martin - PELLETTA, Marco - JERGEL, Matej - SABOL, Dušan - MACHA, Marek - MAJKOVÁ, Eva. Waste heat recovery in solid-state lighting based on thin film thermoelectric generators. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Vol. 18, (2016), s. 1-5. ISSN 2213-1388. [30 %]

ADN Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

Počet záznamov: 1

ADNOI FLOROVIČ, Martin - <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> - KOVÁČ, Jaroslav jr. - KOVÁČ, Jaroslav - CHVÁLA, Aleš - JACQUET, Jean-Claude - DELAGE, Sylvain Laurent. Channel temperature analysis of AlGaN/GaN HEMTs in quasi-static and pulse operation mode. In *Journal of Electrical Engineering*. Vol. 69, No. 5 (2018), s. 390–394. ISSN 1335-3632. [15 %]

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 CHVÁLA, Aleš <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> KOVÁČ, Jaroslav jr. -FLOROVIČ, Martin - MAREK, Juraj - ČERNAJ, Ľuboš - PRÍBYTNÝ, Patrik -DONOVAL, Daniel - KOVÁČ, Jaroslav - DELAGE, Sylvain Laurent -JACQUET, Jean-Claude. Analysis of thermal properties of power multifinger HEMT devices. In *InterPACK 2018: ASME 2018 International technical conference and exhibition on packaging and integration of electronic and photonic microsystems. San Francisco, CA, USA. August 27-30, 2018.* New York, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2018, Art. no. 8256 [8] s. ISBN 978-0-7918-5192-0. [10 %]
- AFC02 KOVÁČ, Jaroslav jr. <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> FLOROVIČ, Martin KOVÁČ, Jaroslav CHVÁLA, Aleš. Determination of on chip temperature distribution of devices for power and microwave applications under operation. In OK 18: 29th Conference and exhibition on optical communications 2018. Prague, Czech Republic. October 25-26, 2018. Prague: Agentura Action M, 2018, [4] s. ISBN 978-80-86742-50-2. [10 %]
- AFC03 MAREK, Juraj CHVÁLA, Aleš BENKO, Peter SZOBOLOVSZKÝ, Robert KOVÁČ, Jaroslav jr. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica. Advanced power electronics in e-learning. In Distance learning, simulation and communication 2017: International conference. Selected papers. Brno, Czech Republic. May 31-June 2, 2017. Brno: University of Defence, 2017, S. 100-105. ISBN 978-80-7231-415-7. [5 %]
- AFC04 STUCHLÍKOVÁ, Ľubica <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> BENKO, Peter KOVÁČ, Jaroslav jr. HRBÁČEK, Jiří. E-learning course as the first step to a mysterious world of science and technology. In *Distance learning, simulation and communication 2017 [elektronický zdroj]: International conference. Brno, Czech Republic. May 31-June 2, 2017.* Brno: University of Defence, 2017, CD-ROM, S. 325-330. ISBN 978-80-7231-416-4. [20 %]

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 FLOROVIČ, Martin <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> KOVÁČ, Jaroslav ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava KORDOŠ, Peter. Analysis of the current transients by monitoring lateral current evolution in AlGaN/GaN structure. In ADEPT 2016: 4th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-23, 2016. 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2016, S. 253-256. ISBN 978-80-554-1226-9. [20 %]
- AFD02 FLOROVIČ, Martin <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> KOVÁČ, Jaroslav jr. -KOVÁČ, Jaroslav - CHVÁLA, Aleš - JACQUET, Jean-Claude - DELAGE, Sylvain Laurent. Channel temperature analysis of power AlGaN/GaN HEMT. In ADEPT 2017: 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017. 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2017, S. 36-39. ISBN 978-80-554-1342-6. [20 %]
- AFD03 FLOROVIČ, Martin SZOBOLOVSZKÝ, Robert KOVÁČ, Jaroslav jr. -KOVÁČ, Jaroslav - CHVÁLA, Aleš - JACQUET, Jean-Claude - DELAGE, Sylvain Laurent. Application of Quasi-static I-V characterization for channel temperature determination in InAlN/GaN HEMT. In ASDAM 2018: 12th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. November 13-16, 2016. 1. ed. Danvers: IEEE, 2018, S. 159-162. ISBN 978-1-5386-7488-8. [15 %]
- AFD04 FLOROVIČ, Martin <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> KOVÁČ, Jaroslav jr. KOVÁČ, Jaroslav CHVÁLA, Aleš JACQUET, Jean-Claude DELAGE, Sylvain Laurent. Channel temperature determination of HEMT in quasi-static operation. In ADEPT 2019: 7th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Štrbské Pleso, Slovakia. June 24-27, 2019. 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2019, S. 55-58. ISBN 978-80-554-1568-0. [15 %]
- AFD05 CHVÁLA, Aleš KOVÁČ, Jaroslav KOVÁČ, Jaroslav jr. FLOROVIČ, Martin <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> MAREK, Juraj PRÍBYTNÝ, Patrik DELAGE, Sylvain Laurent JACQUET, Jean-Claude DONOVAL, Daniel. Characterization of thermal properties of power HEMT devices. In *ADEPT 2017: 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017.* 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2017, S. 24-27. ISBN 978-80-554-1342-6. [8 %]
- AFD06 KOVÁČ, Jaroslav Jr. <u>SZOBOLOVSKÝ, Robert</u> KÓSA, Arpád -STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - KOVÁČ, Jaroslav. Transfer of knowledge from scientific research projects towards middle school scholars. In *ICETA 2015: 13th IEEE international conference on emerging eLearning technologies and applications. Starý Smokovec, Slovakia. November 26 - 27, 2015.* Danvers: IEEE, 2015, S. 201-206. ISBN 978-1-4673-8534-3. [20 %]

- AFD07 KOVÁČ, Jaroslav jr. <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> CHVÁLA, Aleš KOVÁČ, Jaroslav FLOROVIČ, Martin. Raman spectroscopy as an effective tool for temperature distribution measurement. In ADEPT 2017: 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017. 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2017, S. 28-31. ISBN 978-80-554-1342-6. [20 %]
- AFD08 KOVÁČ, Jaroslav jr. <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> KOVÁČ, Jaroslav FLOROVIČ, Martin. Analysis of 4H-Sic diode structure using micro-raman setup. In ADEPT 2018: 6th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 18-21, 2018. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, S. 29-32. ISBN 978-80-554-1450-8. [30 %]
- AFD09 LAURENČÍKOVÁ, Agáta HASENÖHRL, Stanislav ELIÁŠ, Peter KOVÁČ, Jaroslav jr. <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> NOVÁK, J. Ag decorated GaP nanocones for SERS. In ADEPT 2018: 6th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 18-21, 2018. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, S. 204-207. ISBN 978-80-554-1450-8. [10 %]
- AFD10 NEVŘELA, Juraj <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava KOVÁČ, Jaroslav. Surface modification by UV-nanoimprint lithography for increase of hydrophility. In ADEPT 2017: 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017. 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2017, S. 96-99. ISBN 978-80-554-1342-6. [10 %]
- AFD11 NEVŘELA, Juraj ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> KOVÁČ, Jaroslav NOVÁK, Jozef. Zvyšovanie účinnosti tandemových solárnych článkov pomocou periodicky usporiadaných nanodrôtov. In *Fotonika 2017: 12. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia.* 09.-10. február 2017. Bratislava: Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 74-77. ISBN 978-80-972238-1-6. [25 %]
- AFD12 NOVÁK, Jozef HASENÖHRL, Stanislav ELIÁŠ, Peter LAURENČÍKOVÁ, Agáta - KOVÁČ, Jaroslav jr. - <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> - NEVŘELA, Juraj. Preparation of nanocones for SERS applications. In ADEPT 2017: 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017. 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2017, S. 1-4. ISBN 978-80-554-1342-6. [15 %]
- AFD13 PETRUS, Miroslav <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> KÓSA, Arpád. Deep level transient fourier spectroscopy with optical excitation powerful tool for defect characterization in wide bandgap semiconductors. In *ELITECH'16 [elektronický zdroj]: 18th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. June 8, 2016.* 1. vyd. Bratislava: STU, 2016, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-4561-1. [35 %]

- AFD14 PETRUS, Miroslav <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> HARMATHA, Ladislav KÓSA, Arpád STUCHLÍKOVÁ, Ľubica KOVÁČ, Jaroslav. Characterization of AlGaN/GaN HEMT structures by deep level transient Fourier spectroscopy with optical excitation. In *APCOM 2016: Proceedings of 22nd international conference on applied physics of condensed matter*. *Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 22-24, 2016.* 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016, S. 289-292. ISBN 978-80-227-4572-7. [20 %]
- AFD15 PETRUS, Miroslav <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> STUCHLÍKOVÁ, Ľubica KÓSA, Arpád HARMATHA, Ladislav KOVÁČ, Jaroslav. Deep level transient fourier spectroscopy with optical excitation for AlGaN/GaN HEMT structure investigation. In ADEPT 2016: 4th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-23, 2016. 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2016, S. 195-198. ISBN 978-80-554-1226-9. [20 %]
- AFD16 STUCHLÍKOVÁ, Ľubica KÓSA, Arpád SZOBOLOVSZKÝ, Robert PETRUS, Miroslav HARMATHA, Ladislav DELAGE, S. L. KOVÁČ, Jaroslav. Investigation of AlGaN/GaN Schottky structures by deep level fourier transient spectroscopy with optical excitation. In ASDAM 2016: 11th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. November 13-16, 2016. Danvers: IEEE, 2016, S. 145-148. ISBN 978-1-5090-3081-1. [20 %]
- AFD17 <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> BORIŠ, Martin. Elektrónkový slúchadlový OTL zosilňovač. In ŠVOČ 2012 [elektronický zdroj]: Zborník vybraných prác, Bratislava, 25. apríl 2012. Bratislava: FEI STU, 2012, s.CD-ROM, s. 385-389. ISBN 978-80-227-3697-8. [70 %]
- AFD18 <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> BORIŠ, Martin. Impulzný menič na účely budenia Teslovej cievky s audiomoduláciou. In ŠVOČ 2013 [elektronický zdroj]: Zborník vybraných prác, Bratislava, 23. apríl 2013. 1. vyd. Bratislava: FEI STU, 2013, s.CD ROM, s. 347-352. ISBN 978-80-227-3909-2. [70 %]
- AFD19 SZOBOLOVSZKÝ, Robert KOVÁČ, Jaroslav Jr. HAŠKO, Daniel KOVÁČ, Jaroslav. Electrical characterization of surfaces using advanced AFM techniques. In ADEPT 2016: 4th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-23, 2016. 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2016, S. 183-186. ISBN 978-80-554-1226-9. [70 %]
- AFD20 <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> KOVÁČ, Jaroslav Jr. HAŠKO, Daniel. Charakterizácia polovodičových štruktúr pomocou EFM. In 19. Škola vákuovej techniky: Vákuum a nové materiály. Štrbské Pleso, Slovensko. 9.-12. november 2016. Bratislava: Slovenská vákuová spoločnosť, 2016, S. 115-118. ISBN 978-80-971179-7-9. [70 %]

AFD21 <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> - FLOROVIČ, Martin - KOVÁČ, Jaroslav -CHVÁLA, Aleš - KOVÁČ, Jaroslav jr.. Temperature measurement of GaN based HEMTs using on-chip electrical characterization. In *ADEPT 2017: 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017.* 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2017, S. 68-71. ISBN 978-80-554-1342-6. [60 %]

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

Počet záznamov: 1

BEE01 CHVÁLA, Aleš - <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> - KOVÁČ, Jaroslav jr. -FLOROVIČ, Martin - MAREK, Juraj - ČERNAJ, Ľuboš - PRÍBYTNÝ, Patrik -DONOVAL, Daniel - DELAGE, Sylvain Laurent - JACQUET, Jean-Claude -KOVÁČ, Jaroslav. Analysis of thermal properties of power HEMT on SiC substrate. In WOCSDICE 2018: 42nd Workshop on compound semiconductor devices and integrated circuits held in Europe. Bucharest, Romania. May 14-16, 2018. Bucharest: IMT Bucharest, 2018, S. 10-11. [10 %]

BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- BEF01 CHVÁLA, Aleš KOVÁČ, Jaroslav KOVÁČ, Jaroslav jr. FLOROVIČ, Martin SZOBOLOVSZKÝ, Robert MAREK, Juraj PRÍBYTNÝ, Patrik DELAGE, Sylvain Laurent JACQUET, Jean-Claude DONOVAL, Daniel. SiC and GaN based devices electrothermal modelling. In *International workshop on devices and applications project: Escel ju Osiris. Bratislava, Slovakia. December 14-15, 2017.* 1.vyd. Bratislava: Desidia Tech 1.t.d, 2017, S. 34-35. ISBN 978-80-972928-1-2. [10 %]
- BEF02 KOVÁČ, Jaroslav KOVÁČ, Jaroslav jr. <u>SZOBOLOVSZKÝ, Robert</u> FLOROVIČ, Martin. SiC and GaN based devices electro-thermal properties. In *International workshop on devices and applications project: Escel ju Osiris. Bratislava, Slovakia. December 14-15, 2017.* 1.vyd. Bratislava: Desidia Tech l.t.d, 2017, S. 23-27. ISBN 978-80-972928-1-2. [25 %]