

Miesto a dátum: Bratislava, 06.07.2015

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Jana Vereš Benkovská

Autoreferát dizertačnej práce

**ELEKTRICKÁ CHARAKTERIZÁCIA ŠTRUKTÚR
NA BÁZE PROGRESÍVNYCH POLOVODIČOVÝCH MATERIÁLOV**

na získanie akademickej hodnosti philosophiae doctor, PhD.

v doktorandskom študijnom programe: Mikroelektronika

Miesto a dátum: Bratislava, 06.07.2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na Ústave elektroniky a fotoniky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej
technickej univerzity v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Jana Vereš Benkovská**
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Ľubica Stuchlíková, PhD.**
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Štefan Luby, DrSc.
Fyzikálny ústav SAV, Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava

doc. Ing. Igor Jamnický, CSc.
Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 11.08.2015 o 10:00 hod.

Na Ústave elektroniky a fotoniky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej
technickej univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU

Obsah

Úvod.....	3
Súčasný stav problematiky.....	5
Ciele dizertačnej práce.....	8
Dosiahnuté výsledky.....	9
Hlavné prínosy dizertačnej práce	19
Záver	21
Summary	23
Použitá literatúra.....	25
Publikačná činnosť doktoranda	30

Úvod

Kremík, ako stavebný kameň polovodičovej éry, je považovaný za základný materiál používaný v polovodičových prvkoch a štruktúrach. V súčasnosti, vzhľadom na rozsiahle využitie integrovaných obvodov a náročné požiadavky komerčného trhu a priemyslu, akými sú napr. vysoko-výkonové zariadenia, dosahujeme fyzikálne limity kremíkovej technológie. Zariadenia na báze kremíka sú napr. obmedzené operačnou teplotou $T = 200^{\circ}\text{C}$ (1). Z týchto dôvodov sa štúdie v oblasti mikroelektroniky, zamerané na diagnostiku polovodičových materiálov, v súvislosti s ich vlastnosťami a potenciálom využitia v hraničných podmienkach, sústreďujú na hľadanie alternatívnych možností polovodičových materiálov pre novú generáciu integrovaných obvodov (2, 3, 4). Medzi tieto môžu byť bezpochyby zaradené aj širokopásmové polovodiče karbid kremíka (SiC) a nitrid gália (GaN).

Významný historický zlom vo výskume a rozvoji širokopásmových polovodičových materiálov nastal v roku 1989, keď sa japonskému vedeckému tímu na čele s profesorom Isamu Akasaki z Univerzity Nagoya podarilo vyrobiť prvú svetlo emitujúcu diódu s PN prechodom na báze nitridu gália. Profesor Akasaki vychádzal pri svojej práci z predpokladu, že syntéza kvalitného kryštálu GaN (zvyšková koncentrácia prímiesí $\leq 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) by mohla umožniť dopáciu typu *p*. Jeho následný objav schopnosti PN prechodu na báze GaN vyžarovať z modrej oblasti elektromagnetického spektra, naštartoval ďalší technologický posun v rozvoji štruktúr na báze širokopásmových polovodičových materiálov. V dnešnej dobe sa štruktúry na báze nitridov, ako sú napr. vysokoúčinné svetlo emitujúce

diódy a tranzistory s vysokou pohyblivosťou elektrónov (HEMT), používajú na bežné aplikácie napríklad v mobilných telefónoch, radaroch, semaforoch alebo veľkoplošných obrazovkách (5).

Pre podporu prebiehajúceho výskumu širokopásmových polovodičových materiálov vznikli v posledných rokoch viaceré svetové iniciatívy, z ktorých uvádzame iba niektoré vybrané. Do 10/2011 bol aktívny projekt MORGaN („Materials for Robust Gallium Nitride“), podporovaný Európskou komisiou v rámci FP7 („Seventh Framework Programme“ – Siedmy rámcový program). Hlavná pozornosť projektu sa sústreďovala na širokopásmové polovodičové materiály akými sú GaN a diamant a tiež heteroštruktúry na báze týchto materiálov (6). 10/2015 sa v Taliansku bude konať šestnásty ročník medzinárodnej konferencie zameranej na karbid kremíka (ICSCRM – „International Conference on Silicon Carbide and Related Materials“) s cieľom prezentovať posledné dosiahnuté teoretické aj experimentálne výsledky v oblasti kryštálového rastu, elektrickej charakterizácie a materiálových vlastností SiC (7). 12/2015 bude v USA organizovaný už tretí IEEE workshop WiPDA („Wide Bandgap Power Devices and Applications“ – Výkonové prvky na báze širokopásmových polovodičových materiálov a ich aplikácie), ktorého primárnym cieľom je poskytnúť priestor odborníkom v oblasti polovodičových prvkov a výkonovej elektroniky, aby mohli spoločne hľadať nové efektívnejšie možnosti pre využitie širokopásmových polovodičových materiálov vo výkonovej elektronike (8).

Prítomnosť defektov v kryštalickej štruktúre výrazne ovplyvňuje elektronické vlastnosti polovodičov. Poruchy v kryštalickej mriežke spôsobujú deformáciu elektrického poľa a môžu zapríčiniť vznik neželaných energetických hladín v zakázanom pásme polovodiča. Typickými príkladmi porúch sú chemické nečistoty, chýbajúce atómy v kryštalickej mriežke alebo ich kombinácia. V reálnom polovodičovom materiáli sa nachádza množstvo defektov, z dôvodu ich riadeného vytvorenia za účelom ovplyvnenia elektrických a optických vlastností polovodiča, alebo nezámernou kontamináciou štruktúry počas rastu kryštálu a pri technológii ďalšieho spracovania (9).

V snahe čo najlepšie pochopiť problematiku defektov v polovodičových štruktúrach, sa diagnostika kvality polovodičových materiálov stala neoddeliteľnou súčasťou výskumnej činnosti. Dôraz je kladený predovšetkým na procesy vzniku jednotlivých porúch a vplyv týchto porúch na vlastnosti polovodičových materiálov, za účelom dosiahnutia požadovaných elektrických parametrov polovodičových štruktúr a prvkov. Kapacitné a prúdové meracie metódy, vďaka svojim vlastnostiam (automatizácia, dostupnosť, citlivosť, nedeštruktívny charakter), sú zaradované k významným procesom diagnostiky polovodičových materiálov. Princíp daných meracích metód je založený na monitorovaní nábojových zmien v oblasti priestorového náboja. Jednou zo všestranných metód na charakterizáciu porúch je spektroskopia hlbokých hladín (DLTS) (10).

Cieľom tejto práce je zistenie nových poznatkov o širokopásmových polovodičových materiáloch a štruktúrach na báze SiC a GaN, so zameraním na emisno-záchytné procesy v zakázanom pásme. Nosná časť dokumentu je venovaná elektrickej charakterizácii a diagnostike kvality vybraných polovodičových materiálov na báze SiC a GaN s využitím prúdových (I-V) a kapacitných (C-V, DLTS) meracích metód dostupných vo výskumných laboratóriách SemiTest na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave.

V závere práce uvádzame možnosti transferu výsledkov výskumnej a experimentálnej činnosti do vzdelávacieho procesu FEI STU v Bratislave v rámci bakalárskeho, inžinierskeho ako aj PhD. štúdia, prostredníctvom inovatívnych a moderných foriem vzdelávania.

Predložená práca bola vypracovaná na Ústave elektroniky a fotoniky, FEI STU v Bratislave, v Centre Excelencie „CENAMOST“ (Agentúra pre podporu vedy a výskumu, kontrakt č. VVCE-0049-07) s podporou Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR (Projekty VEGA 1/0742/08, VEGA 1/0507/09, VEGA 1/0689/09, VEGA 1/0866/11, VEGA 1/0712/12, VEGA 1/0377/13, VEGA 1/0439/13), Agentúry na podporu výskumu a vývoja (Projekt APVV-0509-10) a 7. F. P. MORGAN. Táto práca bola spolufinancovaná Poľským ministerstvom vedy a vysokého školstva z grantu č. N N515 607539, Európskou úniou z Európskeho fondu regionálneho rozvoja cez program Inovačná ekonomika (POIG.01.01.02-00-008/08-05), štatutárnym grantom Wroclawskej Technickej Univerzity S10019, B20011 a Slovensko-Poľským Programom medzinárodnej spolupráce č. SK-PL-0017-09.

Súčasný stav problematiky

Karbid kremíka (SiC) a nitrid gália (GaN), so šírkou zakázaného pásma väčšou ako 3 eV, zaradujeme medzi najvýznamnejších predstaviteľov širokopásmových polovodičov, ktoré sú bežne využívané v oblasti elektroniky (11). Vychádzame pritom z viacerých hľadísk, akými sú predovšetkým fyzikálne parametre, reálna komerčná dostupnosť polovodičovej dosky, ako aj úroveň zvládnutia technologických procesov (1). Medzi výhody širokopásmových polovodičov patrí možnosť ich využitia na vysoko-teplotné, vysoko-výkonové a vysoko-frekvenčné aplikácie, ako aj vysoká radiačná odolnosť. SiC sa vyznačuje hodnotou prierného napätia až 10-krát väčšou ako Si. Výrazne nižšia intrinzická koncentrácia voľných nosičov náboja umožňuje súčiastkam na báze SiC a GaN pracovať pri extrémne vysokých teplotách. V prípade SiC hovoríme teoreticky o teplote prevyšujúcej 800°C, pričom experimentálne bola potvrdená teplota 600°C (12).

Diódy na báze SiC sú komerčne dostupné už vyše 10 rokov. Výkonové SiC Schottkyho bariérové diódy, majú prakticky nulový zotavovací náboj (13), preto ich hlavnou výhodou je rýchly čas zotavenia

diódy v závernom smere. Táto vlastnosť je využívaná napr. v napájacích zdrojoch, ktoré pracujú pri vyšších frekvenciách ako zdroje na báze kremíka a dosahujú vyššiu účinnosť aj pri menších rozmeroch a hmotnosti (14). Na trhu sú dnes už k dispozícii Schottkyho diódy na báze SiC s vysokými hodnotami záverného napätia (viac ako 1700 V). Využitie výkonových prvkov na báze SiC je jedným z kľúčových faktorov na zníženie energetických nárokov hybridných vozidiel (15).

V súčasnosti sa pomaly na trh dostávajú aj prvky na báze GaN. S ohľadom na ich špecifické vlastnosti a rôzny stupeň zvládnutia technológie prípravy SiC a GaN polovodičových dosiek, sa tieto odlišujú aj vo využití na rôzne aplikácie.

Pokiaľ ide o Schottkyho diódy, tu dochádza ku konkurenčnému boju medzi SiC a GaN, v ktorom bude rozhodujúcim parametrom kvalita zhotovených štruktúr a ich výrobná cena. Limitným faktorom pre obidva materiály, s ohľadom na spíniacu rýchlosť a teplotnú stabilitu, je v súčasnej dobe technológia puzdrenia (16).

Porovnanie spínacích vlastností Schottkyho diódy na báze GaN a SiC ukazuje, že pri vyšších teplotách je výhodnejšie použiť GaN diódu, ktorá dosahuje lepšiu spíniacu rýchlosť a menšie straty. Na druhej strane v súvislosti so širším zakázaným pásmom, GaN Schottkyho dióda má oveľa väčší úbytok napätia na dióde v priepustnom smere ako SiC Schottkyho dióda (17).

Aktuálny vývoj v oblasti elektroniky naznačuje, že tranzistory na báze GaN sú vhodné pre vysoko-frekvenčné integrované obvody do 2000 V a maximálne niekoľko desiatok ampérov, zatiaľ čo prvky na báze SiC sú skôr vhodné na využitie v diskretných zariadeniach s prierazným napätím väčším ako 1000 V, ale prakticky s neobmedzenou hodnotou prúdu (16).

Priamy širokopásmový polovodičový materiál GaN je významný pre výrobu účinných optických prvkov (LED, lasery). Externá účinnosť (pomer fotónov emitovaných zo súčiastky k počtu elektrónov injektovaných do súčiastky) vysokoúčinných bielych LED na báze GaN od roku 2000 vzrástla z 25% na dnešných viac ako 70%, vďaka skvalitneniu GaN materiálu a zlepšeniu dizajnu súčiastok (18). Na druhej strane LED na báze SiC, ako reprezentanta nepriamych širokopásmových polovodičov, majú 100-krát menšiu účinnosť vyžarovania ako LED na báze nitridov (5).

Súčasne s rozvojom technológií prípravy SiC ako základného materiálu a tiež nízkodopovaných epitaxných vrstiev na báze SiC, vystúpili do popredia výskumu v oblasti SiC rôzne metódy elektrickej charakterizácie polovodičových materiálov a štruktúr, medzi inými aj DLTS metóda. Jedna z prvých DLTS štúdií na SiC bola realizovaná na 3C-SiC rastenom na Si (19, 20). Dôraz vo výskume SiC bol kladený prevažne na identifikáciu plytkých donorových/akceptorových hladín (21, 22, 23) a hlbokých hladín vznikajúcich ako dôsledok prítomnosti kovových nečistôt na rozhraní (24, 25).

Ďalší výskum sa sústreďoval na vznik porúch ako dôsledok pôsobenia žiarenia na polovodičovú štruktúru, ako aj ich následnú reakciu na žihanie štruktúry. V tejto oblasti boli realizované rozsiahle experimenty na tranzistoroch na báze SiC (26, 27). Autori pritom dospeli k záveru, že okrem známych radiačných porúch $Z_{1/2}$ a EH6/7 v 4H-SiC, musia existovať ďalšie poruchy, ktoré výrazne ovplyvňujú funkčnosť polovodičových prvkov na báze SiC. Vo svojej štúdii poukazujú na zistenia, že funkčnosť skúmaného prvku sa plne obnovila už po žíhaní pri teplote $T < 800^{\circ}\text{C}$. Pri takej nízkej teplote žíhania však zostávajú poruchy $Z_{1/2}$ a EH6/7 neovplyvnené.

Vplyv rôznych typov ožiarenia (rýchle elektróny, kombinované neutrónové a gama žiarenie) na vybrané parametre 4H-SiC Schottkyho štruktúr, skúmaný metódami DLTS a DLTFs, z hľadiska identifikácie a porovnania hlbokých hladín, vznikajúcich v ožiarených štruktúrach, sme prezentovali v (28, 29). Pre obidva typy žiarenia sme potvrdili prítomnosť poruchy $Z_{1/2}$ ako aj výskyt ďalších druhov radiačných porúch. V (30) sme sústredili pozornosť na komplexnú elektrickú charakterizáciu základných parametrov štruktúr so Schottkyho kontaktom (RuO_2 a RuWO_x) pred ožiarení, ako aj po ožiarení rýchlymi elektrónmi, využitím I-V a C-V meracích metód.

V prvých teoretických štúdiách, zaoberajúcich sa výskumom hlbokých energetických hladín, ktoré vznikajú ako dôsledok výskytu bodových porúch v štruktúre GaN, boli publikované hodnoty aktivačnej energie pre dusíkové vakancie v rozmedzí 0,03 eV – 0,4 eV pod spodným okrajom vodivostného pásma a pre dusíkovú substitučnú poruchu (0,8 eV a 1,1 eV pod E_C) (31). Neskoršie výskumy uvádzajú teoretické výpočty súvisiace s prirodzenými poruchami v štruktúre GaN, akými sú N a Ga vakancie a intersticiálne mriežkové poruchy (32). Bolo tiež potvrdené, že dusíkové vakancie vytvárajú v štruktúre GaN vodivosť typu p , zatiaľ čo Ga vakancie sú zodpovedné za vznik vodivosti typu n (33).

Experimentálne štúdie, skúmajúce hlboké energetické hladiny v GaN, boli často zamerané na pozorovanie vplyvu žiarenia na vznik a správanie sa defektov v danej štruktúre (34, 35). Ďalšie rozsiahle štúdie hlbokých energetických hladín v GaN boli venované skúmaniu vplyvu metódy a parametrov rastového procesu na vznik a správanie sa defektov v danej štruktúre (36, 37).

Identifikácii hlbokých energetických hladín pomocou DLTFs metódy v Schottkyho AlGaIn/GaN HEMT heteroštruktúrach sa venujeme v (38, 39, 40) a v InAlN/GaN HEMT heteroštruktúrach v (41). V prípade InAlN/GaN rozhrania boli vytvorené vzorky s rôznou hodnotou vnútorného napätia, ako dôsledok zmeny pomeru molárneho prietoku pri raste AlN vrstvy. Potvrdili a kvantifikovali sme vplyv rôzneho štruktúrneho zloženia v Schottkyho AlGaIn/GaN HEMT heteroštruktúrach a vplyv zmeny vnútorného napätia v InAlN/GaN HEMT heteroštruktúrach, na emisno-záchytné procesy v skúmaných polovodičových štruktúrach.

Elektrické vlastnosti a správanie sa širokopásmových polovodičových materiálov, aj napriek rozsiahlym teoretickým a experimentálnym štúdiám v danej oblasti, zostávajú pochopené iba čiastočne, preto sú naďalej intenzívne skúmané. V početnej miere sa vyskytujúce materiálové defekty, akými sú dislokácie, stavy na rozhraní, mikrorúrkové a mikrotrhlinové poruchy a iné, si vyžadujú bližšie skúmanie za účelom optimalizácie rastových podmienok materiálu a štruktúr s cieľom minimalizácie počtu týchto porúch. Preto je aj v súčasnosti veľmi dôležité venovať zvýšenú pozornosť uvedenej problematike (1).

Meranie polovodičových prvkov a štruktúr pokrýva široký rozsah disciplín a meracích techník, ale najbežnejšou metódou a tiež súčasným trendom je práve elektrická charakterizácia. Vo všeobecnosti sa nejedná iba o identifikáciu nečistôt v polovodičových materiáloch spôsobom, aký využívajú optické a fyzikálno-chemické metódy, ale predovšetkým dostávame relevantné informácie o elektrických vlastnostiach vzorky.

Ciele dizertačnej práce

Na základe doterajšieho výskumu a štúdia odbornej literatúry, zaoberajúcej sa zadanou problematikou, boli stanovené nasledovné ciele a úlohy, riešené v rámci doktorandského štúdia, ktorých výsledky sú súčasťou predkladanej dizertačnej práce:

- Oboznámiť sa s najnovšími poznatkami z oblasti výskumu širokopásmových polovodičov so zameraním sa na SiC a GaN, a vypracovať stručný prehľad ich vlastností a uplatnenia v širokom spektre priemyselných aj bežných komerčných aplikácií.
- Skúmať vplyv rôznych vonkajších ako aj vnútorných činiteľov a procesov na charakteristické vlastnosti štruktúr na báze SiC, využitím dostupných prúdových a kapacitných metód elektrickej diagnostiky polovodičových prvkov.
- Analyzovať pomocou DLTS metódy vplyv rôzneho štruktúrneho zloženia a rôznych rastových podmienok na emisno-záchytne procesy v heteroštruktúrach pre HEMT tranzistory na báze GaN.
- Realizovať transfer nových poznatkov, získaných na základe teoretického a experimentálneho výskumu, do výchovno-vzdelávacieho procesu.

Dosiahnuté výsledky

Praktická časť práce pozostáva z elektrickej charakterizácie a určovania parametrov polovodičových štruktúr na báze SiC a GaN a e-learning-u v elektronike. Elektrická charakterizácia a určovanie parametrov polovodičových štruktúr na báze SiC a GaN je rozdelená na 4 ucelené experimenty podľa typu skúmaných vzoriek.

4H-SiC Schottkyho štruktúry s RuO₂ a RuWO_x kontaktmi

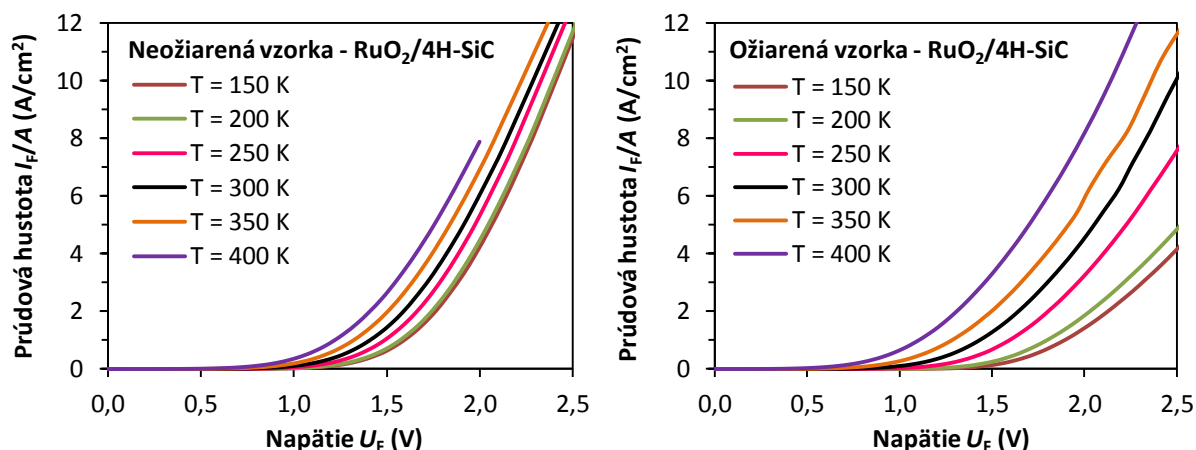
Táto najrozsiahljšia časť dizertačnej práce sa zaoberá komplexnou elektrickou charakterizáciou štruktúr na báze SiC.

Skúmané Schottkyho štruktúry vytvorené na báze 4H-SiC substrátu typu n , vyrobeného na Univerzite Linköping vo Švédsku (42) s RuO₂ a RuWO_x Schottkyho kontaktmi boli elektricky charakterizované metódami I-V, C-V a DLTS, pred ožiarením ako aj po ožiarení rýchlymi elektrónmi.

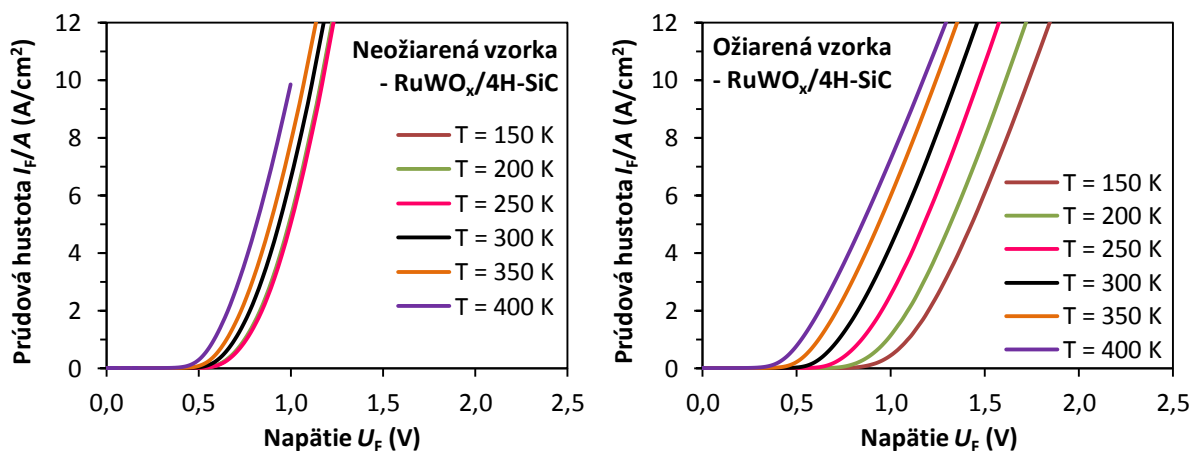
Na základe I-V a C-V charakteristík, nameraných na neožiarených aj ožiarených vzorkách, bola potvrdená prítomnosť vyhovujúceho Schottkyho kontaktu. Z I-V charakteristík, získaných pri teplote $T = 300$ K, boli definované charakteristické parametre Schottkyho diódy pre neožiarenú aj ožiarenú vzorku. Pre štruktúru s RuWO_x Schottkyho kontaktom boli určené výrazne nižšie hodnoty prahového napätia pred ožiarovaním ($U_{T \text{ RuWO}_x} = 0,81$ V, $U_{T \text{ RuO}_2} = 1,56$ V), ako aj po ožiarovaní rýchlymi elektrónmi ($U_{T \text{ RuWO}_x} = 0,77$ V, $U_{T \text{ RuO}_2} = 1,48$ V). Vplyvom ožiarovania bol pozorovaný mierny pokles výšky Schottkyho bariéry iba pre vzorku RuO₂/4H-SiC (pred ožiarovaním $\Phi_b = 0,95$ eV, po ožiarovaní $\Phi_b = 0,88$ eV). Zistené hodnoty saturačného prúdu pre jednotlivé vzorky naznačovali rovnaké závery. Opäť iba pre vzorku RuO₂/4HSiC nastal pri teplote $T = 300$ K po ožiarovaní rázový nárast hodnoty saturačného prúdu (zmena z $I_s/A = 1,54 \times 10^{-09}$ A/cm² pred ožiarovaním, na $I_s/A = 3,93 \times 10^{-08}$ A/cm² po ožiarovaní). Z daných zistení vyplýva, že pri rovnakých podmienkach ožiarovania rýchlymi elektrónmi, dochádza v skúmaných vzorkách k zmenám, ktoré sa pri izbovej teplote prejavujú zmenou parametrov Schottkyho diódy v štruktúre RuO₂/4H-SiC. Na druhej strane v štruktúre RuWO_x/4H-SiC táto zmena nebola zaznamenaná, čo poukazuje na lepší potenciál využitia pre aplikáciu v radiačnom prostredí. Môžeme predpokladať, že pridaním volfrámu do štruktúry bola zabezpečená vyššia odolnosť voči ožiarovaniu rýchlymi elektrónmi.

Dôsledkom ožiarovania štruktúry rýchlymi elektrónmi, môže byť pozorovaná výrazná zmena sériového odporu a zvodového prúdu (43, 44). Vplyvom ožiarovania dochádza v štruktúre k vzniku nových defektov (hlbokých energetických hladín), čo spôsobuje zvýšenie hodnôt uvedených parametrov. Pre obidve skúmané štruktúry bol pri $T = 300$ K po ožiarovaní zistený nárast sériového odporu z pôvodnej hodnoty $R_s = 6,1 \Omega$ na $R_s = 8,24 \Omega$ pre RuO₂ a z hodnoty $R_s = 3,26 \Omega$ na $R_s = 6,96 \Omega$ pre RuWO_x/4H-SiC.

Predložené vzorky pred ožiarením ako aj po ožiarení rýchlymi elektrónmi boli podrobené I-V meraniam v teplotnom rozsahu $T = 150\text{ K} - 400\text{ K}$, s cieľom určiť vplyv zmeny teploty na skúmané štruktúry. Namerané I-V-T charakteristiky pred ožiarení a po ožiarení rýchlymi elektrónmi v priepustnom smere pre vzorku $\text{RuO}_2/4\text{H-SiC}$ sú zobrazené na obr. 1 a pre vzorku $\text{RuWO}_x/4\text{H-SiC}$ na obr. 2.



Obr. 1 I-V charakteristiky v priepustnom smere merané na $\text{RuO}_2/4\text{H-SiC}$ štruktúrach v teplotnom rozsahu $T = 150\text{ K} - 400\text{ K}$ (porovnanie neožiarenej a ožiarenej vzorky)



Obr. 2 I-V charakteristiky v priepustnom smere merané na $\text{RuWO}_x/4\text{H-SiC}$ štruktúrach v teplotnom rozsahu $T = 150\text{ K} - 400\text{ K}$ (porovnanie neožiarenej a ožiarenej vzorky)

V celom rozsahu meraných teplôt bolo zistené, že pri konštantnej hodnote napätia dochádza vo všetkých skúmaných vzorkách so zvyšujúcou sa teplotou k nárastu prúdu. Naopak, so zvyšujúcou sa teplotou dochádza k poklesu prahového napätia štruktúr, pričom teplotná stabilita hodnoty prahového napätia je najvýraznejšia pri štruktúre $\text{RuWO}_x/4\text{H-SiC}$ pred ožiarení. Pre obidve skúmané vzorky je zmena prahového napätia v závislosti od teploty väčšia po ožiarení rýchlymi elektrónmi.

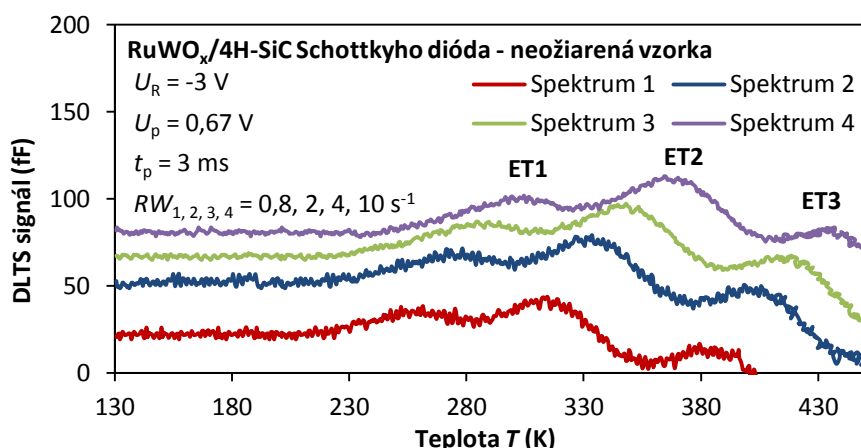
V uvedenom teplotnom rozsahu bola určená aj teplotná zmena ďalších charakteristických parametrov (saturačný prúd I_s , idealizačný faktor n , výška Schottkyho bariéry Φ_b a sériový odpor R_s)

neožiarenej a ožiarenej vzorky $\text{RuO}_2/4\text{H-SiC}$, rovnako ako aj vzorky $\text{RuWO}_x/4\text{H-SiC}$. Pre obidve štruktúry dochádza k poklesu hodnoty idealizačného faktora so zvyšujúcou sa teplotou pred ožiarení ako aj po ožiarení rýchlymi elektrónmi. Naopak, so vzrastajúcou teplotou pozorujeme nárast hodnoty výšky Schottkyho bariéry pre obidve štruktúry. Tento jav je interpretovaný ako dôsledok nehomogenity rozhrania kovu a polovodiča. Nehomogenity môžu byť spôsobené nerovnovážnou koncentráciou prímiesí, vysokou hustotou stavov rozhrania spôsobenou kontamináciou rozhrania, prítomnosťou povrchových defektov a iné (45).

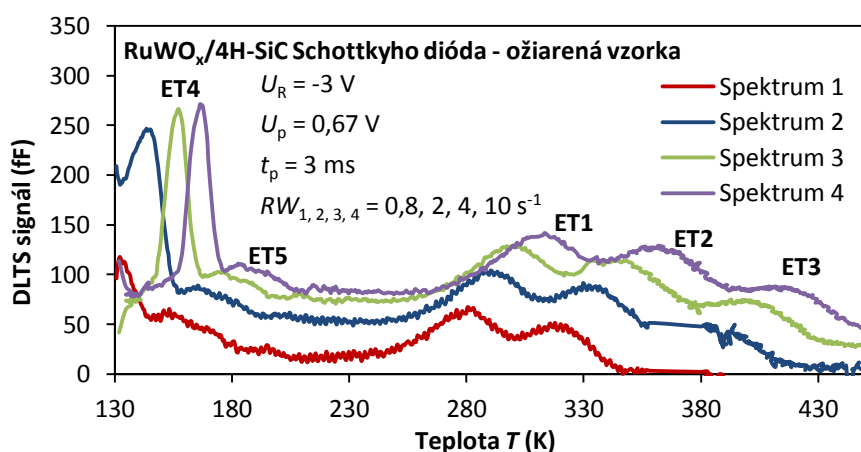
Vzhľadom na to, že zistené elektrické parametre neožiarených ako aj ožiarených vzoriek, skúmané v širokom rozsahu teplôt, vykazujú odchýlky od termoemisnej teórie, môžeme predpokladať, že v predložených štruktúrach bola už pri výrobnom procese sformovaná nehomogénna bariéra. Tým dochádza k potenciálovým fluktuáciám na rozhraní s výskytom oblastí s rôznou výškou Schottkyho bariéry (46). Kvôli zisteným nehomogenitám na rozhraní, nie je na výpočet experimentálnej hodnoty efektívnej Richardsonovej konštanty vhodná aplikácia štandardnej Richardsonovej závislosti $\ln(I_s/T^2) = f(1/T)$, ktorá má značne nelineárny charakter. Z teplotne závislých I-V meraní na ožiarenej štruktúre RuWO_x bola preto zhotovená modifikovaná Richardsonova závislosť a vypočítaná experimentálna hodnota efektívnej Richardsonovej konštanty $A^* = 50,68 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$.

C-V merania potvrdili teplotnú stabilitu kapacity skúmaných štruktúr pred ožiarení ako aj po ožiarení rýchlymi elektrónmi. Taktiež nebol pozorovaný ani vplyv ožiarenia štruktúry na merané C-V krivky. Predpokladáme, že nižšia dávka a energia aplikovaného žiarenia nebola dostatočná na to, aby vyvolala zmeny C-V charakteristiky. Z C-V charakteristik, získaných pri teplote $T = 300 \text{ K}$ a frekvencii $f = 1 \text{ MHz}$ boli určené ďalšie dôležité parametre Schottkyho diód – hodnota zabudovaného potenciálu $V_{bi} = 1,1 \text{ V}$ a hustota prímiesí $N_D = 6,3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ pre $\text{RuO}_2/4\text{H-SiC}$ ($V_{bi} = 1,13 \text{ V}$ a $N_D = 9,1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ pre $\text{RuWO}_x/4\text{H-SiC}$). Výška Schottkyho bariéry, určená z C-V meraní $\Phi_b = 1,31 \text{ eV}$ pre $\text{RuO}_2/4\text{H-SiC}$ a $\Phi_b = 1,26 \text{ eV}$ pre $\text{RuWO}_x/4\text{H-SiC}$ bola vyššia, ako hodnota vypočítaná z I-V meraní. Je to spôsobené výskytom rekombinačných centier a defektov na rozhraní kovu a polovodiča, ktoré ovplyvňujú I-V merania, zatiaľ čo C-V charakteristiky sú ovplyvnené ochudobnením povrchovej vrstvy štruktúry o voľné nosiče náboja. Metóda určenia výšky Schottkyho bariéry z I-V meraní je taktiež závislá od použitej hodnoty efektívnej Richardsonovej konštanty A^* , a teda je menej spoľahlivá ako z C-V meraní.

Na základe porovnaní DLTS spektier meraných na vzorke $\text{RuWO}_x/4\text{H-SiC}$ pred ožiarení štruktúry (obr. 3) a po jej ožiarení rýchlymi elektrónmi (obr. 4), bolo v ožiarenej vzorke objavených niekoľko hlbokých energetických hladín s aktivačnou energiou, poukazujúcou na prítomnosť štruktúrálnych defektov spôsobených vplyvom žiarenia. Tieto defekty súvisia s radiačnými poruchami v SiC označovanými v literatúre ako P1/P2 centrum ($\Delta E_T = 0,19 \text{ eV} - 0,21 \text{ eV}$) (ET4, ET5) a $Z_{1/2}$ centrum ($\Delta E_T = 0,63 \text{ eV} - 0,68 \text{ eV}$) (ET3) (47).



Obr. 3 DLTS spektrá neožiarenej Schottkyho štruktúry $\text{RuWO}_x/\text{4H-SiC}$ (vstupné parametre: $U_R = -3 \text{ V}$, $U_p = 0,67 \text{ V}$, $t_p = 3 \text{ ms}$, $RW_{1,2,3,4} = 0,8, 2, 4, 10 \text{ s}^{-1}$)



Obr. 4 DLTS spektrá ožiarenej Schottkyho štruktúry $\text{RuWO}_x/\text{4H-SiC}$ (vstupné parametre: $U_R = -3 \text{ V}$, $U_p = 0,67 \text{ V}$, $t_p = 3 \text{ ms}$, $RW_{1,2,3,4} = 0,8, 2, 4, 10 \text{ s}^{-1}$)

Vo vzorke $\text{RuO}_2/\text{4H-SiC}$ boli taktiež po ožiarení rýchlymi elektrónmi identifikované hlboké energetické hladiny s aktivačnou energiou, poukazujúcou na prítomnosť štrukturálnych defektov spôsobených vplyvom žiarenia – E5, E6 s podobnými parametrami ako je uvádzané pre P1/P2 centrum a E10, E11 zodpovedajúce $Z_{1/2}$ centru.

4H-SiC radiačný detektor

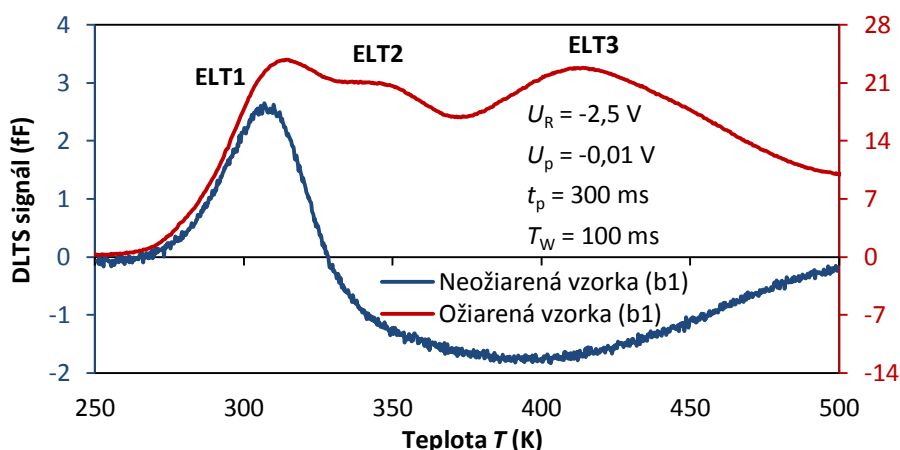
Experiment skúma vplyv ožiarenia kombinovaným neutrónovým a gama žiarením na štruktúru, ktoré bolo vyvolané jadrovou reakciou $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ s veľkosťou toku rýchlych neutrónov $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Skúmané štruktúry boli vytvorené na vysokodopovanom 4H-SiC n^{++} substráte s hrúbkou 350 μm . Na substrát bola nanosená 0,5 μm hrubá oddelovacia medzivrstva („buffer layer“) 4H-SiC n^+ s koncentráciou prímеси $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Nasledovala 100 μm hrubá epitaxná vrstva, tvorená vysokočistým 4H-SiC dopovaným dusíkom, ktorá bola narastená metódou epitaxného rastu z kvapalnej fázy.

DLTFS merania vzorky 4H-SiC radiačného detektora boli realizované na automatizovanom meracom pracovisku BIORAD DL 8000 v teplotnom rozsahu $T = 85 \text{ K} - 500 \text{ K}$ pred ožiarením, aj po ožiarení kombinovaným neutrónovým a gama žiarením.

V neožiarenej vzorke 4H-SiC radiačného detektora bola identifikovaná jedna hlboká hladina elektrónového typu ELT1 s aktivačnou energiou $\Delta E_T = 0,67 \text{ eV}$ (obr. 5). Uvedená hlboká energetická hladina zodpovedá známemu štrukturálnemu defektu $Z_{1/2}$. Dve hlboké energetické hladiny (ELT2 a ELT3) vznikli v štruktúre ako dôsledok vplyvu kombinovaného neutrónového a gama žiarenia. Aktivačné energie zachytných centier ELT2 ($\Delta E_T = 0,74 \text{ eV}$) a ELT3 ($\Delta E_T = 0,95 \text{ eV}$) boli určené metódou vyhodnotenia „Maximum evaluation“.

Najvýraznejší pik DLTFS spektier ELT1 bol nameraný pred ožiarení aj po ožiarení štruktúry. V súvislosti so skúmaním radiačnej odolnosti predloženého 4H-SiC detektora je významné pozorovanie, že koncentrácia pasív tohto štrukturálneho defektu sa výrazne zvýšila po ožiarení štruktúry kombinovaným neutrónovým a gama žiarením.



Obr. 5 DLTFS spektrá – porovnanie neožiarenej a ožiarenej štruktúry 4H-SiC radiačného detektora (vstupné parametre: $U_R = -2,5 \text{ V}$, $U_p = -0,01 \text{ V}$, $t_p = 300 \text{ ms}$, $T_w = 100 \text{ ms}$)

AlGaIn/GaN

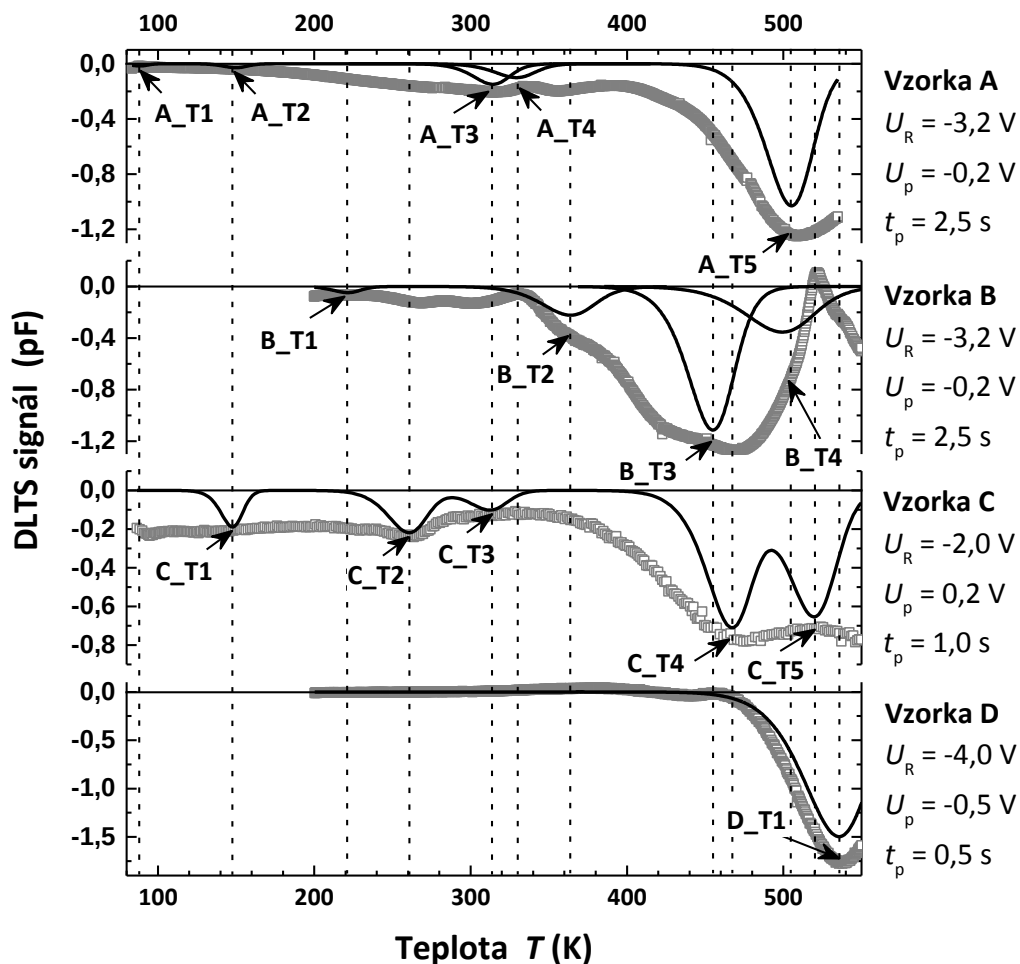
Experiment bol zameraný na sledovanie vplyvu parametrov a zloženia vrstiev heteroštruktúr na báze GaN, ako aj optimalizáciu metodiky DLTFS na diagnostiku týchto heteroštruktúr.

Štyri Schottkyho diódy AlGaIn/GaN (označené A, B, C, D) s rôznymi geometrickými rozmermi a zložením $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ boli pripravené metódou MOVPE na zafirovom substráte (A, B) a SiC (C, D) substráte, použitím štandardných krokov HFET technológie. Rozmery vrstiev a ich geometrické usporiadanie v prípade jednotlivých AlGaIn/GaN štruktúr sú uvedené na obr. 6.

DLTFS merania na pripravených AlGaIn/GaN Schottkyho štruktúrach boli realizované na automatizovanom meracom pracovisku BIORAD DL 8000 v teplotnom rozsahu $T = 85 \text{ K} - 550 \text{ K}$.

Schottkyho bariérová štruktúra		Vzorka A	Vzorka B	Vzorka C	Vzorka D	
UD GaN	vrchná vrstva	(nm)	3,0	3,0	0	0
UD AlGaN	bariéra	(nm)	22,0	8,0	20,0	22,0
AlGaN:Si	bariéra	(nm)	0	6,0	0	0
UD AlGaN	bariéra	(nm)	0	8,0	0	0
AlN	medzivrstva	(nm)	0	0	1,3	0
GaN:Fe	„buffer“	(μm)	3,0	3,0	1,7	1,7
substrát		typ	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	4H-SiC	4H-SiC
Al _x Ga _{1-x} N		x	0,30	0,30	0,29	0,26

Obr. 6 Schematický popis a geometrické parametre skúmaných štruktúr



Obr. 7 Identifikované hlboké hladiny v AlGaIn/GaN štruktúre (DLTFS spektrá a simulované krivky) (parametre: zobrazený koeficient b1, $T_W = 2 \text{ s}$)

Bolo identifikovaných pätnásť pascí (obr. 7) a určené ich základné parametre. Všetky štruktúry vykazovali poruchy (B_T3, C_T4, A_T5, B_T4, C_T5 a D_T1) v teplotnom rozsahu od 450 K do 550 K s aktivačnými energiami $\Delta E_T = 1,02 \text{ eV} - 1,58 \text{ eV}$. Pôvod hlbokých energetických

hladín s takou hodnotou aktivačnej energie je v literatúre prisudzovaný skupine skrutkových dislokácií (48) alebo defektom, spôsobených uhlíkovými atómami v intersticiálnej polohe (49). Poruchy B_T1 s aktivačnou energiou $\Delta E_T = 0,50$ eV (pravdepodobne zodpovedá prítomnosti Fe prímеси (50)) a B_T2 s energiou $\Delta E_T = 0,69$ eV (pravdepodobne súvisí s povrchovou emisiou (51)), boli identifikované len vo vzorke B, ale prítomnosť týchto energetických hladín je očakávaná aj v štruktúre A.

Defekt A_T3 s aktivačnou energiou $\Delta E_T = 0,76$ eV (pravdepodobne zodpovedá dusíku v intersticiálnej polohe (52)), bol identifikovaný iba vo vzorke A, ale podľa charakteru nameraných DLTFs spektier sa táto porucha s vysokou pravdepodobnosťou nachádza aj vo vzorke B. Štruktúry A aj B, v ktorých predpokladáme emisiu zo 4 rovnakých hladín boli narastené na zafirovom substráte.

Poruchy A_T2/C_T1 s aktivačnými energiami $\Delta E_T = 0,26$ eV/0,28 eV (v literatúre zodpovedajú dusíkovým vakanciám, emisii z rozhrania 2DEG alebo čiastkovým dislokáciám (53, 54, 55)) a poruchy C_T3/A_T4 s energiami $\Delta E_T = 0,72$ eV/0,75 eV (pravdepodobne prímесové atómy Fe (50), alebo dusík v intersticiálnej polohe (52)) boli identifikované vo vzorkách A a C.

Najnižší DLTS signál bol nameraný na štruktúre C. Vzhľadom na to, že merania nebolo možné realizovať pri rovnakých počiatočných podmienkach, je možné len predpokladať, že uvedená štruktúra má najmenšiu koncentráciu porúch. Tento predpoklad je možné podporiť nasledovnými argumentmi – najnižším reverzným napätím $U_R = -2$ V, najvyšším plniacim napätím $U_p = 0,2$ V a prítomnosťou medzivrstvy AlN, ktorá znižuje vnútorné napätie štruktúry. Protiargumentom je menší čas plniaceho impulzu $t_p = 1$ s.

Vzhľadom na neexponenciálnu kapacitnú prechodovú odozvu nebolo možné určiť parametre všetkých hladín, ktoré emisiou prispievajú do výsledného DLTFs signálu. S najväčšou pravdepodobnosťou nameraná odozva zachytáva aj emisie, ktoré sú dôsledkom zmien populácie nosičov náboja v povrchových stavoch (56) a prítomnosti kvantových jám v AlGaN/GaN heteroštruktúrach. Všetky uvádzané údaje sú stále predmetom intenzívneho skúmania.

V rámci tohto experimentu bola optimalizovaná metodika meraní heteroštruktúr na báze GaN. Čas snímania odozvy a šírku plniaceho impulzu je nutné nastavovať rádovo v sekundách. Je nevyhnutné opakovať merania pri rovnakých podmienkach, aby bolo možné zvýšiť validitu nameraných výsledkov. Pri nastavovaní meracích podmienok je potrebné meniť jednotlivé parametre tak, aby došlo k elektronickej dekonvolúcii nameraných priebehov. Súčasne sa zvyšuje náročnosť evaluácie nameraných spektier – je nevyhnutné využiť celú škálu možností evaluácie a všetky výsledky vzájomne komparovať a následne simuláciou tieto výsledky overiť. Využitie komparačných grafov s nameranými DLTFs signálmi pri rovnakom čase snímania a porovnanie všetkých získaných Arrheniových závislostí, umožňuje určenie vzájomných závislostí medzi skúmanými štruktúrami.

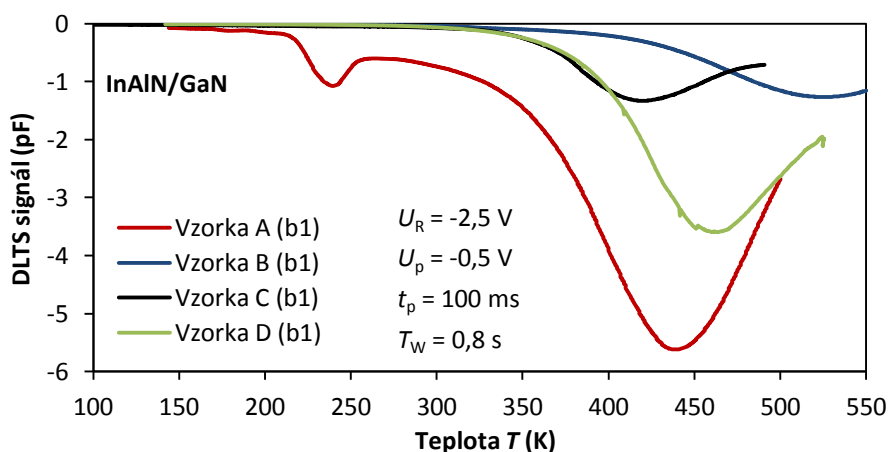
InAlN/GaN

Cieľom experimentu bolo skúmať vplyv rozdielnych rastových podmienok pri vytváraní AlN oddeľovacej medzivrstvy na elektrické vlastnosti Schottkyho štruktúr s InAlN/GaN epitaxnou vrstvou, ktoré boli navrhnuté pre HEMT štruktúry s AlN oddeľovacou medzivrstvou.

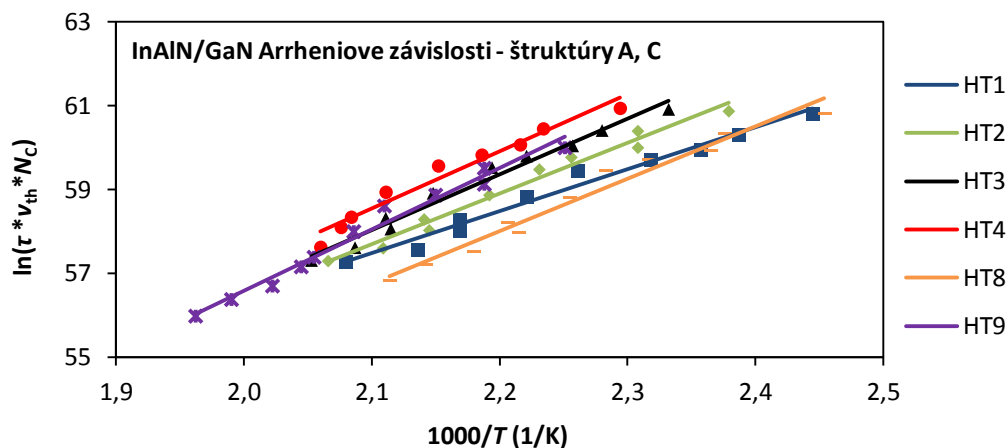
Štyri štruktúry InAlN/GaN (označené ako A, B, C, D) boli narastené na semiizolačnom nedopovanom substráte 6H-SiC metódou MOVPE. Na 270–350 nm hrubú oddeľovaciu medzivrstvu AlN bola narastená 2,5 μm hrubá vrstva GaN a nasledovala 7 nm hrubá bariérová vrstva $\text{In}_{0,14}\text{Al}_{0,86}\text{N}$. Skúmané štruktúry sa odlišujú iba v podmienkach vzniku oddeľovacej medzivrstvy AlN, všetky ostatné vrstvy štruktúr boli pripravované rovnako. Zmena rastových podmienok vrstvy AlN bola zabezpečená zmenou pomeru molárneho prietoku NH_3 (amoniak) a TMAI (trimetylaluminium), pričom prúdenie TMAI bolo vo všetkých rastových experimentoch konštantné 20 mmol/min a menil sa prietok NH_3 , aby boli dosiahnuté požadované pomery molárneho prietoku 240, 1200, 4700 a 8200 (57).

Na elektrickú charakterizáciu boli využité kapacitné metódy, akými sú C-V merania a DLTFs metóda. DLTFs merania na pripravených InAlN/GaN Schottkyho štruktúrach boli realizované na automatizovanom meracom pracovisku BIORAD DL 8000 v teplotnom rozsahu $T = 85 \text{ K} - 550 \text{ K}$.

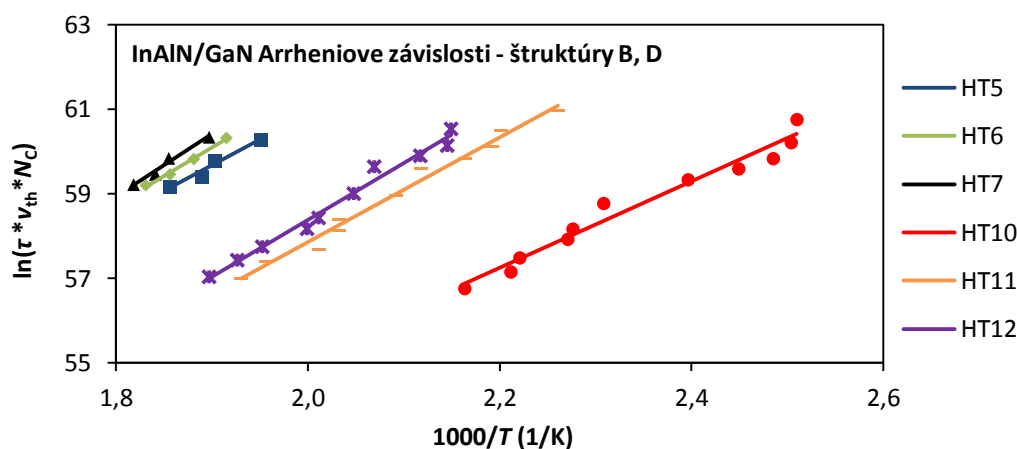
Na obr. 8 sú znázornené typické DLTFs spektrá získané z meraní na všetkých štyroch vzorkách A, B, C, D. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri kombinácii vstupných parametrov: $U_R = -2,5 \text{ V}$, $U_p = -0,5 \text{ V}$, $t_p = 100 \text{ ms}$ a $T_W = 0,8 \text{ s}$. DLTFs spektrá, namerané na všetkých vzorkách vykazujú veľkosť signálu rádovo v pF. Toto zistenie poukazuje na veľkú koncentráciu prítomných defektov, ako aj na záchytné a emisné procesy voľných nosičov náboja prebiehajúce na heterorozhraní.



Obr. 8 DLTFs spektrá InAlN/GaN Schottkyho štruktúr A, B, C, D (vstupné parametre: $U_R = -2,5 \text{ V}$, $U_p = -0,5 \text{ V}$, $t_p = 100 \text{ ms}$, $T_W = 0,8 \text{ s}$)



Obr. 9 Arrheniove závislosti hlbokých energetických hladín InAlN/GaN Schottkyho štruktúr A, C (nepriama metóda vyhodnotenia)



Obr. 10 Arrheniove závislosti hlbokých energetických hladín InAlN/GaN Schottkyho štruktúr B, D (nepriama metóda vyhodnotenia)

Rozdielny pomer molárneho prietoku V/III výrazne ovplyvňuje rastový proces AlN vrstvy na 6H-SiC substráte, ako aj výsledné mechanické a elektrické vlastnosti štruktúry (57). Z C-V meraní bolo zistené, že v oblasti náhleho poklesu kapacity dochádza k zvyšovaniu hodnoty záverného napätia so zvyšujúcou sa hodnotou pomeru molárneho prietoku V/III. DLTFs merania ukázali, že najväčšia koncentrácia defektov sa vyskytuje v štruktúre A (pomer molárneho prietoku 240), ktorá vykazuje aj najväčšiu hodnotu mechanického vnútorného napätia, zistenú metódou Ramanovej spektroskopie.

Z analýzy nameraných DLTFs spektier ďalej vyplynulo, že najlepšiu kvalitu, vzhľadom na výskyt hlbokých energetických hladín, má štruktúra C (pomer molárneho prietoku 4700). Na štruktúre C bola taktiež pomocou Ramanovej spektroskopie určená najmenšia hodnota mechanického vnútorného napätia. Domnievame sa preto, že výsledky získané z DLTFs meraní, poukazujúce na kvalitu AlN vrstvy, lepšie zodpovedajú výsledkom z Ramanovej spektroskopie, než z XRD metódy. Zistené údaje sa zhodujú s výsledkami, uvádzanými v (58). Môžeme teda

predpokladať, že nižšia hodnota mechanického vnútorného napätia vrstvy AlN má vplyv na redukcii defektov v aktívnej oblasti štruktúry.

V skúmaných štruktúrach bolo pomocou DLTFs metódy identifikovaných 12 hlbokých energetických hladín dierového typu (obr. 9, obr. 10), ktorých pôvod však nebol s istotou určený a preto bude predmetom ďalšieho výskumu aj s využitím iných dostupných metód.

E-learning v elektronike

Dlhodobý proces transferu vedeckých poznatkov, nadobudnutých cieľavedomou a kontinuálnou experimentálnou činnosťou vo výskumných laboratóriách SemiTest, je realizovaný aj na Ústave elektroniky a fotoniky, FEI STU v Bratislave. Naše niekoľkoročné skúsenosti s tvorbou a implementáciou interaktívnych e-learning materiálov (59, 60) sme využili na vývoj komplexného kurzu, zaoberajúceho sa elektrickou charakterizáciou vlastností polovodičových bariérových štruktúr „Elektrická charakterizácia polovodičových štruktúr a prvkov“. V kurze sú obsiahnuté základné elektrické metódy na kontrolu kvality polovodičových štruktúr: meranie voltampérových (I-V) charakteristík, meranie kapacitných (C-V, C-T, C-t) charakteristík ako aj na identifikáciu parametrov hlbokých pascí v polovodičoch (DLTS). Detailný popis e-learning kurzu „Elektrická charakterizácia polovodičových štruktúr a prvkov“, ako aj podrobný rozbor tematiky využitia „E-learningu ako nástroja na dosiahnutie vyššej kvality a efektívnosti tradičných vzdelávacích metód vo vzdelávaní inžinierov“ je publikovaný v našej monografii z roku 2014 (61).

Hlavné prínosy dizertačnej práce

Hlavné prínosy predloženej dizertačnej práce Elektrická charakterizácia štruktúr na báze progresívnych polovodičových materiálov je možné zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Získali sme nové poznatky o širokopásmových polovodičoch so zameraním sa na SiC a GaN, o ich elektrických a optických vlastnostiach. Využitie týchto poznatkov v praxi rozširuje možnosti aplikácie neštandardných Schottkyho kontaktov na 4H-SiC, prispieva k bližšiemu poznaniu mechanizmu radiačnej odolnosti SiC štruktúr, pochopeniu emisno-záchytných procesov a optimalizácii rastového procesu HEMT na báze GaN.
- V skúmaných 4H-SiC štruktúrach s novým typom Schottkyho kontaktov RuO_2 a RuWO_x sme metódami I-V, C-V a DLTS určili základné parametre pred ožiarením a po ožiarení rýchlymi elektrónmi.
 - Potvrdili sme prítomnosť vyhovujúceho Schottkyho kontaktu, určili výšku Schottkyho bariér, hodnoty koeficientu ideality a saturačného prúdu a určili parametre 7 porúch identifikovaných pred ožiarením a 11 porúch po ožiarení rýchlymi elektrónmi.
 - Pozorovali sme pokles výšky Schottkyho bariéry vplyvom ožiarenia, nárast saturačného prúdu a sériového odporu vo vzorke $\text{RuO}_2/4\text{H-SiC}$.
 - Z teplotne závislých I-V meraní na ožiarenej 4H-SiC Schottkyho štruktúre s RuWO_x Schottkyho kontaktom sme zostrojili modifikovanú Richardsonovu závislosť a určili experimentálnu hodnotu efektívnej Richardsonovej konštanty $A^* = 50,68 \text{ A.cm}^{-2}.\text{K}^{-2}$.
 - Zistili sme, že skúmaná 4H-SiC štruktúra s RuWO_x Schottkyho kontaktom v porovnaní s 4H-SiC štruktúrou s RuO_2 Schottkyho kontaktom vykazuje lepšiu stabilitu a radiačnú odolnosť, čo sme potvrdili I-V, C-V a DLTS meraniami.
- V radiačnom detektore na báze 4H-SiC sme pozorovali rádové zvýšenie koncentrácie poruchy detegovanej pred ožiarením (zodpovedajúcej známemu štruktúrnemu defektu $Z_{1/2}$) a vznik dvoch radiačných porúch po ožiarení kombinovaným neutrónovým a gama žiarením.
- Identifikovali sme 15 porúch a určili ich základné parametre v štyroch AlGaIn/GaN Schottkyho štruktúrach s rozdielnym zložením vrstiev. Najnižší DLTS signál bol nameraný na štruktúre s AlN oddelovacou medzivrstvou, ktorá zlepšuje mriežkové prispôsobenie v štruktúre.
- Optimalizovali sme metodiku DLTFs na sledovanie emisno-záchytných procesov v heteroštruktúrach na báze GaN.
- V InAlN/GaN HEMT štruktúre sme prostredníctvom sledovania emisných a záchytných procesov metódou DLTFs potvrdili, že rozdielny pomer molárneho prietoku V/III výrazne

ovplyvňuje rastový proces AlN vrstvy na 6H-SiC substráte, ako aj výsledné mechanické a elektrické vlastnosti štruktúry.

- Zistili sme, že najväčšia koncentrácia defektov sa vyskytuje v štruktúre s hodnotou pomeru molárneho prietoku 240, ktorá vykazuje aj najväčšiu hodnotu mechanického vnútorného napätia, zistenú metódou Ramanovej spektroskopie.
 - Na základe analýzy nameraných DLTFs spektier sme určili, že najlepšiu kvalitu má štruktúra s veľkosťou pomeru molárneho prietoku 4700, čo korešponduje s nameranými najmenšími hodnotami mechanického vnútorného napätia, pomocou metódy Ramanovej spektroskopie.
- Zrealizovali sme transfer nových poznatkov, získaných na základe teoretického ako aj experimentálneho výskumu, do výchovno-vzdelávacieho procesu.

Záver

Širokopásmové polovodiče svojimi unikátnymi vlastnosťami a perspektívnymi aplikáciami hrajú kľúčovú úlohu v oblasti vysokých výkonov a frekvencií. Elektrické, optické a mechanické vlastnosti polovodičových materiálov a súčiastok na báze SiC a GaN sú však výrazne ovplyvňované nečistotami a poruchami nachádzajúcimi sa v štruktúre. Niektoré defekty vytvárajú aj neželané pasce, ktoré môžu výrazne degradovať funkčnosť elektronických zariadení. Z tohto dôvodu je veľmi dôležité poznať rozdelenie a typy porúch nachádzajúcich sa v polovodičových materiáloch, mechanizmy ich vzniku, ich správanie sa ako aj spôsob využitia ich prospešných vlastností.

Táto práca sa venuje elektrickej charakterizácii štruktúr na báze SiC a GaN, s dôrazom na sledovanie emisných a záchytných procesov metódou spektroskopie hlbokých hladín.

V teoretickej časti práce sú stručne spracované základné poznatky o širokopásmových polovodičoch SiC a GaN, ich aplikáciách a výskume.

V rámci praktickej časti práce boli zrealizované štyri experimenty zamerané na elektrickú charakterizáciu a určovanie parametrov polovodičových štruktúr na báze SiC a GaN, ktoré umožnili získať nové poznatky v danej oblasti. Využitie týchto poznatkov v praxi rozširuje možnosti aplikácie neštandardných Schottkyho kontaktov na 4H-SiC, prispieva k bližšiemu poznaniu mechanizmu radiačnej odolnosti SiC štruktúr, pochopeniu emisno-záchytných procesov a optimalizácii rastového procesu HEMT na báze GaN.

Kapitola 2.1 predstavuje komplexnú charakterizáciu 4H-SiC Schottkyho štruktúr s RuO_2 a RuWO_x kontaktmi pred a po ožiarení rýchlymi elektrónmi. I-V, C-V a DLTS meraniami bolo potvrdené, že skúmaná 4H-SiC štruktúra s RuWO_x Schottkyho kontaktom v porovnaní s 4H-SiC štruktúrou s RuO_2 Schottkyho kontaktom vykazuje lepšiu stabilitu a radiačnú odolnosť. Z teplotne závislých I-V meraní na ožiarenej 4H-SiC Schottkyho štruktúre s RuWO_x Schottkyho kontaktom bola určená experimentálna hodnota efektívnej Richardsonovej konštanty $A^* = 50,68 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$.

V kapitole 2.2 je sledovaný vplyv kombinovaného neutrónového a gama žiarenia na 4H-SiC radiačný detektor. Pred ožiarení bolo v detektore identifikované iba $Z_{1/2}$ centrum, čo korešponduje s výsledkami štúdií realizovaných na vysokokvalitných 4H-SiC epitaxných vrstvách typu n , rastených bez dodatočnej úpravy („as-grown“). Po ožiarení vznikli dve radiačné poruchy a koncentrácia pôvodnej poruchy rádozo vzrástla.

Kapitoly 2.3 a 2.4 sú venované vyšetrovaniu hlbokých hladín v štruktúrach na báze GaN. Tento experiment bol spojený s optimalizáciou metodiky merania, pretože v prípade GaN vystupujú do popredia špecifiká GaN, ako je veľká hustota porúch, polarizačné efekty, prítomnosť heterorozhraní, 2DEG... Bol prediskutovaný vplyv kompozície vrstiev štruktúry na distribúciu porúch. Najnižšia koncentrácia porúch bola zistená v štruktúre s AlN vrstvou, čo potvrdilo očakávanie, že táto vrstva

zlepšuje mriežkové prispôsobenie v štruktúre. Sledovaný bol aj vplyv rastových podmienok AlN medzivrstvy na vlastnosti štruktúr. Na základe analýzy nameraných DLTFS spektier bolo zistené, že najlepšiu kvalitu má štruktúra s pomerom molárneho prietoku 4700, čo korešponduje s nameranými najmenšími hodnotami mechanického vnútorného napätia, určenými metódou Ramanovej spektroskopie.

Kapitola 3 uvádza výsledky dosiahnuté v oblasti transferu nových poznatkov, získaných na základe teoretického, ako aj experimentálneho výskumu, do výchovno-vzdelávacieho procesu. Tieto výsledky boli prezentované na mnohých medzinárodných vedeckých fórach, a spracované do formy monografie „E-learning ako nástroj na dosiahnutie vyššej kvality a efektívnosti tradičných vzdelávacích metód vo vzdelávaní inžinierov“.

K splneniu zadaných cieľov bolo nevyhnutné pochopiť a vedieť interpretovať fyzikálne procesy na hlbokých hladinách, poznať základné vlastnosti Schottkyho kontaktu, ako typického rozhrania vytvoreného v skúmaných bariérových štruktúrach a princípy vybraných metód elektrickej charakterizácie a vyhodnocovania elementárnych parametrov Schottkyho kontaktu. Tieto informácie sú uvedené v prílohe práce.

DLTFS analýza spektier nameraných na štruktúrach na báze GaN poukázala na zložitosť emisno-záchytných procesov na rozhraniach jednotlivých vrstiev skúmaných heteroštruktúr, prítomnosť veľkého množstva materiálových porúch a tým aj na mimoriadnu náročnosť evaluácie týchto procesov. Zvládnutie technológie rastu a spracovania týchto štruktúr je prioritou pre ich hromadné zavedenie do praxe.

Summary

Wide band gap semiconductors, based on their unique properties and promising applications, play a key role in the field of high performance and high frequency semiconductor structures. Electrical, optical and mechanical properties of semiconductor materials and components based on SiC and GaN are significantly affected by impurities and defects contained within the structure. Impurities in these structures are also able to generate electrically active traps, which can highly degrade the functionality of electronic devices by capturing and emitting charge carriers. Therefore, it is very important to define and investigate the origin and types of defects in semiconductor materials, mechanisms of their formation, moreover their behavior connected with beneficial properties.

This work is dedicated to electrical characterization of SiC and GaN based semiconductor structures, with an emphasis put on the monitoring of emission and capture processes, using the Deep Level Transient Spectroscopy method.

The theoretical part briefly describes the basic understanding of wide band gap semiconductors, thus SiC and GaN, with their applications and research.

The practical part includes four experiments aimed at the electrical characterization and parameter determination of semiconductor structures based on SiC and GaN, establishing a contribution of new knowledge in this field. Practical use of gained knowledge not only extends the potential of using nonstandard Schottky contacts on 4H-SiC, but also contributes to understanding of radiation hardness of SiC structures, understanding of emission and capture processes and optimization of the growth process of HEMT based on GaN.

Section 2.1 provides a comprehensive characterization of 4H-SiC Schottky structures with RuO₂ and RuWO_x contacts before and after irradiation by fast electrons. I-V, C-V and DLTS measurements confirmed that the examined 4H-SiC Schottky structure with RuWO_x contact, compared to the 4H-SiC structure with a RuO₂ Schottky contact, exhibits higher stability and radiation resistance. From temperature dependent I-V measurements, carried out on the irradiated 4H-SiC Schottky structure with RuWO_x Schottky contact, the experimental value of effective Richardson constant $A^* = 50,68 \text{ A.cm}^{-2}.\text{K}^{-2}$ was also determined.

Chapter 2.2 examines the effect of combined neutron and gamma radiation on a 4H-SiC radiation detector. Before the irradiation, only a so called $Z_{1/2}$ center was determined, which corresponds with results of studies conducted on high-quality as-grown 4H-SiC epitaxial n-type layers. Irradiation caused formation of additional deep energy levels, whereas the concentration of the original defect increased.

Chapters 2.3 and 2.4 are devoted to investigation of deep levels in semiconductor structures based on GaN. This experiment was also connected with aim to optimize the measurement methodology. This means that in this case, the specific properties of GaN had to be considered – mainly high density of

defect states, polarization effects and the presence of a 2DEG hetero-interface. The influence of layer compositions on defect distributions was also discussed. The lowest concentration of defects was found in the structure with AlN interlayer, confirming the expectation that this layer improves lattice matching. The effect of AlN layer growth conditions on the structures properties was also monitored. DLTFs analysis of the measured spectra showed that the best quality had the structure, grown with molar flow ratio 4700, corresponding to Raman spectroscopy experiments where the smallest measured value of strain was obtained.

Chapter 3 presents results, achieved by knowledge transfer into the educational process. These results were presented at many international scientific forums, and published as a monograph with the title: "E-learning as a tool to achieve higher quality and efficiency of traditional teaching methods in the education of engineers".

In order to fulfil the specified objectives, it was necessary to understand and to be able to interpret the physical processes of deep energy levels, properties of Schottky contact as a typical interface used in barrier structures and also principles of used methods for electrical characterization and parameter evaluation. All these information are listed in the enclosure of the work.

DLTFs analysis of spectra measured on structures based on GaN showed the complexity of emission and capture processes at the interface of each layer of the investigated heterostructures, moreover high presence of defects in the material, meaning a high complexity of evaluation processes. Mastering the growth process and the electrical characterization of these structures is a priority for their practical applications.

Použitá literatura

1. MILLÁN, J., P. GODIGNON a A. PÉREZ-TOMÁS. Wide Band Gap Semiconductor Devices for Power Electronics. *Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications* [online]. 2012, 53(2) [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.7305/automatika.53-2.177.
2. KEYES, R. W. Physical limits of silicon transistors and circuits. *Reports on Progress in Physics* [online]. 2005, 68(12): 2701-2746 [cit. 2015-07-05]. DOI: 10.1088/0034-4885/68/12/r01.
3. HUNG, J. Have We Reached The Limits Of Silicon? *ITinnovation* [online]. 30. Apríl 2010 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.techdirt.com/blog/innovation/articles/20100329/1206118767.shtml>
4. THOMSON, I. Silicon technology failing against laws of physics. *PC Authority* [online]. 14. Júl 2010 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.pcauthority.com.au/News/219795,silicon-technology-failing-against-laws-of-physics.aspx>
5. TAKAHASHI, K., A. YOSHIKAWA a A. SANDHU. *Wide bandgap semiconductors: fundamental properties and modern photonic and electronic devices*. New York: Springer, 2007, xxv, 460 p. ISBN 3540472347.
6. *The MORGaN project* [online]. 12. Október 2011 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.morganproject.eu/>
7. *International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2015* [online]. [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://icscrm2015.imm.cnr.it/>
8. *The 3rd IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications* [online]. [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.wipda2015.org/>
9. CAPAN, I. *Electrically active defects in silicon and germanium induced by radiation*. Zagreb, 2006. Dizertačná práca.
10. LANG, D. V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *Journal of Applied Physics* [online]. 1974, 45(7) [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1063/1.1663719.
11. ARAÚJO, S. V. *On the perspectives of wide-band gap power devices in electronic-based power conversion for renewable systems*. Online-Ausg. Kassel [Germany]: Kassel University Press, 2013. ISBN 9783862194872.
12. KŘEČEK, T. *Součástky na bázi SiC* [online]. [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.roznovskastredni.cz/dwn/pel2007/03/Krecek.pdf>
13. WEISS, R., L. FREY a H. RYSSEL. Tungsten, nickel, and molybdenum Schottky diodes with different edge termination. *Applied Surface Science* [online]. 2001, 184(1-4): 413-418 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/s0169-4332(01)00527-x.
14. BARDA, B. Zářivá budoucnost karbidu křemíku. *ABB Conversations* [online]. 2014 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.abb-conversations.com/cs/2014/02/zariva-budoucnost-karbidu-kremiku/>

15. Nové polovodiče pomôžu znížiť spotrebu hybridov. Vyvíja ich Toyota a Denso. *Autožurnál* [online]. 2014 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://autozurnal.ta3.com/nove-polovodice-pomozu-znizit-spotrebu-hybridov-vyvi-ich-toyota-a-denso>
16. KAMINSKI, N. a O. HILT. SiC and GaN Devices - Competition or Coexistence? In: *7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*. The Power Engineering Society within VDE a ZVEI. Proceedings / CIPS 2012 March, 6 - 8, 2012, Nuremberg, Germany; incl. CD-ROM. Berlin: VDE-Verl, 2012. ISBN 9783800734146.
17. AGRAWAL, P. *Wide Band Gap Semiconductors*. Dehradun, 2010. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/32810118/Wide-Band-Gap-Semiconductors#scribd>
18. DENBAARS, S. P., D. FEEZELL, K. KELCHNER, et al. Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays. *Acta Materialia* [online]. 2013, 61(3): 945-951 [cit. 2015-05-29]. DOI:10.1016/j.actamat.2012.10.042.
19. BEYER, F. C. *Deep levels in SiC*. Linköping, 2011. Dizertačná práca.
20. ZHOU, P., M. G. SPENCER, G. L. HARRIS a K. FEKADE. Observation of deep levels in cubic silicon carbide. *Applied Physics Letters* [online]. 1987, 50(19) [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1063/1.97864.
21. KIMOTO, T., A. ITOH, H. MATSUNAMI, et al. The effects of N+dose in implantation into 6H-sic epilayers. *Journal of Electronic Materials* [online]. 1995, 24(4): 235-240 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1007/bf02659681.
22. KIMOTO, T., A. ITOH, H. MATSUNAMI, et al. Aluminum and boron ion implantations into 6H-SiC epilayers. *Journal of Electronic Materials* [online]. 1996, 25(5): 879-884 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1007/bf02666653.
23. TROFFER, T., M. SCHADT, T. FRANK, et al. (1997), Doping of SiC by Implantation of Boron and Aluminum. *phys. stat. sol. (a)*, 162: 277–298.
doi: 10.1002/1521396X(199707)162:1<277::AID-PSSA277>3.0.CO;2-C
24. ACHTZIGER, N., J. GRILLENBERGER a W. WITTHUHN. *Hyperfine Interactions* [online]. 1999, 120/121(1/8): 69-79 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1023/a:1017021927967.
25. ACHTZIGER, N., D. FORKEL-WIRTH, J. GRILLENBERGER, et al. Identification of deep bandgap states in 4H- and 6H-SiC by radio-tracer DLTS and PAC-spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* [online]. 1998, 136-138: 756-762 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/s0168-583x(97)00767-2.
26. HALLÉN, A., M. NAWAZ, C. ZARING, at al. Low-Temperature Annealing of Radiation-Induced Degradation in 4H-SiC Bipolar Junction Transistors. *IEEE Electron Device Letters* [online]. 2010, 31(7): 707-709 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1109/led.2010.2047237.
27. USMAN, M., M. NOUR, A. Y. AZAROV a A. HALLÉN. Annealing of ion implanted 4H-SiC in the temperature range of 100–800°C analysed by ion beam techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* [online]. 2010, 268(11-12): 2083-2085 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.020.

28. KOSA, A., J. BENKOVSKA, L. STUCHLIKOVA, et al. Radiation hardness of 4H-SiC structures. In: *The Tenth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems* [online]. 2014 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1109/asdam.2014.6998641.
29. BENKOVSKÁ, J., A. KÓSA, L. STUCHLÍKOVÁ, et al. DLTS Study of Neutron Bombarded 4H-SiC Detector. In *ADEPT 2013: 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013*. 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2013, s.274-277. ISBN 978-80-554-0689-3.
30. BENKOVSKA, J., L. STUCHLIKOVA, D. BUC a L. ČAPLOVIC. Electrical characterization of 4H-SiC Schottky diodes with RuWO_x Schottky contacts before and after irradiation by fast electrons. *Physica status solidi (a)* [online]. 2012, 209(7): 1384-1389 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1002/pssa.201127559. **Citované 2 (2 SCOPUS)**
31. TANSLEY, T. L. a R. J. EGAN. Point-defect energies in the nitrides of aluminum, gallium, and indium. *Physical Review B* [online]. 1992, 45(19)
32. BOGUSLAWSKI, P., E. L. BRIGGS a J. BERNHOLC. Native defects in gallium nitride. *Physical Review B* [online]. 1995, 51(23)
33. VAN DE WALLE, C. G., J. NEUGEBAUER, C. STAMPFL a M. D. MCCLUSKEY. Defects and defect reactions in semiconductor nitrides. *Acta Physica Polonica A* (Papers from the 28th International School on Physics of Semiconducting Compounds; 1999 June 6-11; Jaszowiec, Poland); 1999 November; 96 (5): 613-627.
34. POLENTA L., Z. Q. FANG, a D. C. LOOK. On the Main Irradiation-Induced Defect in GaN. *Applied Physics Letters* 76.15 (2000): 2086-2088. Dostupné z: http://works.bepress.com/david_look/38
35. GOODMAN, S. A., F. D. AURET, F. K. KOSCHNICK. Radiation induced defects in MOVPE grown n-GaN. *Materials Science and Engineering: B* [online]. 2000, 71(1-3): 100-103 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/S0921-5107(99)00357-8.
36. FANG, Z. Q., D. C. LOOK, W. KIM, et al. Deep centers in n-GaN grown by reactive molecular beam epitaxy (1998). *VCU Electrical and Computer Engineering Publications*. Paper 28. Dostupné z: http://scholarscompass.vcu.edu/egre_pubs/28
37. FANG, Z. Q., D. C. LOOK, J. JASINSKI, et al. Evolution of deep centers in GaN grown by hydride vapor phase epitaxy. *Applied Physics Letters* [online]. 2001, 78(3) [cit. 2015-07-06]. DOI: 10.1063/1.1338970.
38. STUCHLÍKOVÁ, L., J. BENKOVSKÁ, J. JAKUŠ, et al. DLTS Study of Deep Traps in Schottky Diodes Based on AlGaIn/GaN Heterostructure. In *EDS'13. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2013 : Proceedings; Brno, Czech Republic, 26-27 June 2013*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013, s.98-103. ISBN 978-80-214-4754-7.
39. STUCHLIKOVA, L., A. KOSA, J. BENKOVSKA, et al. Defects in schottky diodes based on AlGaIn/GaN heterostructures. In: *The Tenth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems* [online]. 2014 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1109/asdam.2014.6998675.

40. STUCHLIKOVA, L., J. SEBOK, J. RYBAR, et al. Investigation of deep energy levels in heterostructures based on GaN by DLTS. In: *The Eighth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems* [online]. 2010 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1109/asdam.2010.5666319.
41. STUCHLIKOVA, L., M. PETRUS, J. KOVAC, et al. Electrical characterization of the InAlN/GaN heterostructures by capacitance methods. In: *The Ninth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems* [online]. 2012 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1109/asdam.2012.6418557.
42. TUOMINEN, M., R. YAKIMOVA, E. PRIEUR, et al. Growth-related structural defects in seeded sublimation-grown SiC. *Diamond and Related Materials* [online]. 1997, 6(10): 1272-1275 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/s0925-9635(97)00096-4.
43. DOYLE, J. P.; M. K. LINNARSSON, P. PELLEGRINO, et al. Electrically active point defects in n-type 4H-SiC. *Journal of Applied Physics*, [online]. 1998, 84(3): 1354-1357 [cit. 2015-05-29].
44. HEMMINGSSON, C., N. T. SON, O. KORDINA, et al. Deep level defects in electron-irradiated 4H SiC epitaxial layers. *Journal of Applied Physics*, [online]. 1997, 81(9) [cit. 2015-05-29].
45. CIECHONSKI, R. *Device characteristics of sublimation grown 4H-SiC layers*. Linköping: Univ, 2005. ISBN 9789185297504.
46. ROCCAFORTE, F., F. L. VIA, V. RAINERI, et al. Richardson's constant in inhomogeneous silicon carbide Schottky contacts. *Journal of Applied Physics* [online]. 2003, 93(11) [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1063/1.1573750.
47. STORASTA, L., J. P. BERGMAN, E. JANZÉN, et al. Deep levels created by low energy electron irradiation in 4H-SiC. *Journal of Applied Physics* [online]. 2004, 96(9) [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1063/1.1778819.
48. GASSOUMI, M., O. FATHALLAH, C. GAQUIERE a H. MAAREF. Analysis of deep levels in AlGaIn/GaN/Al₂O₃ heterostructures by CDLTs under a gate pulse. *Physica B: Condensed Matter* [online]. 2010, 405(9): 2337-2339 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/j.physb.2010.02.042.
49. AREHART, A. R., T. HOMAN, M. H. WONG, et al. Impact of N- and Ga-face polarity on the incorporation of deep levels in n-type GaN grown by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters* [online]. 2010, 96(24) [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1063/1.3453660.
50. POLYAKOV, A. Y. Influence of high-temperature annealing on the properties of Fe doped semi-insulating GaN structures. *Journal of Applied Physics* [online]. 2004, 95(10) [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1063/1.1697616.
51. OKINO, T., M. OCHIAI, Y. OHNO, et al. Drain Current DLTS of AlGaIn–GaN MIS-HEMTs. *IEEE Electron Device Letters* [online]. 2004, 25(8): 523-525 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1109/led.2004.832788.
52. ASGHAR, M., P. MURET, B. BEAUMONT a P. GIBART. Field dependent transformation of electron traps in GaN p–n diodes grown by metal–organic chemical vapour deposition. *Materials Science and Engineering: B* [online]. 2004, 113(3): 248-252 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/j.mseb.2004.09.001.

53. WEISS, S. a R. KASSING. Deep Level Transient Fourier Spectroscopy (DLTFS) – A technique for the analysis of deep level properties. *Solid-State Electronics* [online]. 1988, 31(12): 1733-1742 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/0038-1101(88)90071-8.
54. BISI, D., M. MENEGHINI, C. de SANTI, et al. Deep-Level Characterization in GaN HEMTs-Part I: Advantages and Limitations of Drain Current Transient Measurements. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2013, 60(10): 3166-3175 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1109/ted.2013.2279021.
55. SONG, H., E. K. KIM, K. H. BAIK, et al. Characterization of deep levels in a-plane GaN epilayers grown using various growth techniques. *Journal of Crystal Growth* [online]. 2012, 340(1): 23-27 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2011.11.042.
56. GASSOUMI, M., B. GRIMBERT, C. GAQUIERE a H. MAAREF. Evidence of surface states for AlGaIn/GaN/SiC HEMTs passivated Si₃N₄ by CDLTS. *Semiconductors* [online]. 2012, 46(3): 382-385 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1134/s1063782612030104.
57. FLOROVIC, M., J. KOVAC, H. BEHMENBURG, et al. Off-state stress investigation of InAlN/GaN HFETs with different AlN buffer layer. In: *The Eighth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems* [online]. 2010 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1109/asdam.2010.5666337.
58. BEHMENBURG, H., C. GIESEN, R. SRNANEK, et al. Investigation of AlN buffer layers on 6H-SiC for AlInN HEMTs grown by MOVPE. *Journal of Crystal Growth* [online]. 2011, 316(1): 42-45 [cit. 2015-05-29]. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2010.12.058.
59. STUHLÍKOVÁ, L., J. BENKOVSKÁ, a J. ŠEBOK. Interactive eLearning Courses. In *EWME 2010. 8th European Workshop on Microelectronics Education: Darmstadt, Germany, 10.-12.5.2010*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2010, s.58-63.
60. STUHLÍKOVÁ, L., J. BENKOVSKÁ. Quo Vadis, e-learning? In *ICETA 2012 [elektronický zdroj]: IEEE 10th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications, November 8-9, 2012 Stará Lesná, The High Tatras, Slovakia*. Piscataway: IEEE, 2012, s.365-370. ISBN 978-1-4673-5122-5.
61. STUHLÍKOVÁ, L., BENKOVSKÁ, J. *E-learning ako nástroj na dosiahnutie vyššej kvality a efektívnosti tradičných vzdelávacích metód vo vzdelávaní inžinierov* [elektronický zdroj]. 1. vyd. Brno: MSD, 2014. CD ROM, 125 s. ISBN 978-80-7392-238-2.

Publikačná činnosť doktoranda

AAA Vedecké monografie vydané v zahraničných vydavateľstvách (1)

1. STUHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana**. *E-learning ako nástroj na dosiahnutie vyššej kvality a efektívnosti tradičných vzdelávacích metód vo vzdelávaní inžinierov* [elektronický zdroj]. 1. vyd. Brno: MSD, 2014. CD ROM, 125 s. ISBN 978-80-7392-238-2.

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch (1)

1. **BENKOVSKÁ, Jana** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - BÚC, Dalibor - ČAPLOVIČ, Ľubomír. Electrical Characterization of 4H-SiC Schottky Diodes with RuWO_x Schottky Contacts before and after Irradiation by Fast Electrons. In *Physica Status Solidi (A)-Applications and Materials Science*. Vol. 209, Iss. 7 (2012), s.1384-1389. ISSN 1862-6300. V databáze: WOS ; SCOPUS.

AFA Publikované pozvané príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách (2)

1. STUHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana**. Moodle? Yes, but First and Foremost as Course, not Just as Content Management System! In *MoodleMoot.cz: Ostrava, 20.-21.10.2011*. Ostrava: PragoData Consulting, s.r.o., 2011, s.http://2011.moodlemoot.cz/mod/data/view.php?id=1&rid=32. ISBN 978-80-248-2496-3.
2. STUHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - ŠEBOK, Ján. The Experiences with Forums in MOODLE. In *MoodleMoot.cz 2010: Mezinárodní konference. Brno, 10.-11.6.2010*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita v Ostravě, 2010, s.http://2010.moodlemoot.cz/mod/data/view.php?id=1&rid=27. ISBN 978-80-248-2242-6.

AFB Publikované pozvané príspevky na domácich vedeckých konferenciách (3)

1. STUHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana**. e-Learn Central - the Journey to e-Learning. In *ICL 2011 [elektronický zdroj] : 14th International Conference on Interactive Collaborative Learning and 11th International Conference Virtual University. Piešťany, Slovakia, September 21-23, 2011*. Piscataway: IEEE, 2011, s.16-23. ISBN 978-1-4577-1746-8. **Citované 2 (1 SCOPUS)**
2. STUHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana**. "eLearn central" - eLearning in Practice. In *Virtual University 2009: 10th International Conference. Bratislava, Slovak Republic, December 10-11, 2009*. Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2009, s.CD-Rom. ISBN 978-80-89316-11-3.
3. STUHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana**. Quo Vadis, e-learning? In *ICETA 2012 [elektronický zdroj]: IEEE 10th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications, November 8-9, 2012 Stará Lesná, The High Tatras, Slovakia*. Piscataway: IEEE, 2012, s.365-370. ISBN 978-1-4673-5122-5. V databáze: WOS.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách (17)

1. **BENKOVSKÁ, Jana** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - NEMEC, Michal - ŠEBOK, Ján - STUHLÍK, M. - RYBÁR, Jakub - PETRUS, Miroslav. Renewable Energy Sources for Pupils of Elementary Schools. In *Nové technologie ve výuce. 5. ročník [elektronický zdroj]*:

Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2011. Brno: Masarykova univerzita, 2012, s.CD-ROM [5] s. ISBN 978-80-210-5942-9.

2. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - GRON, Michal. E-Learning as a Tool to Enhance the Quality and Effectiveness of Traditional Teaching Methods in Practice. In *Distance Learning, Simulation and Communication 2009: Brno, Czech Republic, 6.5.2009*. Brno: University of Defence, 2009, s.173-178. ISBN 978-80-7231-638-0.
3. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - BENKO, Peter - RYBÁR, Jakub - PETRUS, Miroslav - NEMEC, Michal - ŠEBOK, Ján - HARMATHA, Ladislav. Quality Criteria in Practice of Electronic Education. In *Nové technológie ve výuce. 5. ročník [elektronický zdroj]: Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2011.* Brno: Masarykova univerzita, 2012, s.CD-ROM [5] s. ISBN 978-80-210-5942-9.
4. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - HARMATHA, Ladislav - BÚC, Dalibor - **BENKOVSKÁ, Jana**. Electrical Characterization of 4H-SiC Schottky Diodes with a RuO₂ a RuWO_x Schottky Contacts. In *EDS'06. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2006: Brno, Czech Republic, 14.-15.9.2006*. Brno : VUT v Brně, 2006, s.164-169. ISBN 80-214-3246-2.
5. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - JAKUŠ, Juraj - HARMATHA, Ladislav - NEMEC, Michal - BENKO, Peter - KÓSA, Árpád - JUHÁSZ, Peter. DLTFs Study of Deep Traps in Schottky Diodes Based on AlGa_N/Ga_N Heterostructure. In *EDS'13. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2013 : Proceedings; Brno, Czech Republic, 26-27 June 2013*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013, s.98-103. ISBN 978-80-214-4754-7.
6. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana**. e-Learning on Science and Technology Service. In *Nové technológie ve výuce. 3. ročník: Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2009*. Brno: Masarykova univerzita, 2009, , s.CD-Rom. ISBN 978-80-210-5092-1.
7. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - ČERVENOVÁ, Jana. e-Learning ako mnohostranne použiteľný nástroj motivácie. In *Social Networking: Proceedings of International Conferences ICT Bridges, Sunflowers 2009, Silesian Moodle Moot 2009. Čeladná, Czech Republic, 10.-13.11.2009*. Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - Technical University of Ostrava, 2009, s.283-289. ISBN 978-80-248-2117-7.
8. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - ŠEBOK, Ján - RYBÁR, Jakub - PETRUS, Miroslav - NEMEC, Michal - HARMATHA, Ladislav - **BENKOVSKÁ, Jana** - KOVÁČ, Jaroslav - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - LALINSKÝ, Tibor - PASZKIEWICZ, Bogdan - TLACZALA, Marek. Investigation of Deep Energy Levels in Heterostructures based on Ga_N by DLTS. In *ASDAM 2010. The Eighth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, 25 - 27 October 2010*. Piscataway : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010, s.135-138. ISBN 978-1-4244-8572-7. **Citované 3 (2 SCOPUS)**
9. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - VARGA, Štefan - RYBÁR, Jakub - NEMEC, Michal - ŠEBOK, Ján. Ako efektívne vyvíjať kvalitné e-learning kurzy. In *Nové technológie ve výuce. 4. ročník: Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2010*. Brno: Masarykova univerzita, 2010, s.1-4. ISBN 978-80-210-5333-5.
10. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - ŠEBOK, Ján. Interactive eLearning Courses. In *EWME 2010. 8th European Workshop on Microelectronics Education: Darmstadt, Germany, 10.-12.5.2010*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2010, s.58-63. **Citované 1 (1 SCOPUS)**

11. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - HARMATHA, Ladislav. Challenges and Solutions in Engineering Education. In *EDS'12. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2012: Proceedings*; Brno, Czech Republic, 28-29 June 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012, s.177-182. ISBN 978-80-214-4539-0.
12. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - DONOVAL, Daniel. Be Smart. Educate Yourself! In *EWME 2012: 9th European Workshop on Microelectronics Education*. Grenoble, France, May 9-11, 2012: EDA Publishing, 2012, s.51-54. ISBN 978-2-35500-019-5. **Citované 1**
13. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - JANÍČEK, František. E-learning as a Possible Way of Quality Improvement in Engineering Education. In *EQ-2012: Third Forum of Young Researchers "Education Quality"*. Izhevsk, Rossija, 22.-22.2.2012. Izhevsk: Publishing House of Izhevsk State Technical University, 2012, s.314-320. ISBN 978-5-7526-0531-4.
14. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - NEMEC, Michal - KÓSA, Arpád - JUHÁSZ, Peter - JAKUŠ, Juraj - BENKO, Peter. E-Learning in Engineering Education. In *Nové technológie ve výuce [elektronický zdroj]: 6. ročník mezinárodní konference. Postkonferenční sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků*. Brno, 15. 11. 2012. Brno: Masarykova univerzita, 2013, s.CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-210-6402-7.
15. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - DONOVAL, Martin. An Easy and Effective Creation of E-Learning Courses. In *Distance Learning, Simulation and Communication 2013: Brno, Czech Republic, May 21-23, 2013*. Brno: Univerzita obrany, 2013, s.159-164. ISBN 978-80-7231-919-0. **Citované 2 (2 SCOPUS)**
16. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - KÓSA, Arpád - **BENKOVSKÁ, Jana**. From a teaching machine to MOOC. In *Distance learning, simulation and communication 2015: International conference*. Brno, Czech Republic. May 19-21, 2015. Brno: University of Defence, 2015, [6] s. ISBN 978-80-7231-992-3.
17. ŠEBOK, Ján - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - NEMEC, Michal - **BENKOVSKÁ, Jana** - HARMATHA, Ladislav - DONOVAL, Daniel. eLearning as a Support in Education of Young Experimenters. In *EWME 2010. 8th European Workshop on Microelectronics Education: Darmstadt, Germany, 10.-12.5.2010*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2010, s.64-69.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách (16)

1. **BENKOVSKÁ, Jana** - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - HARMATHA, Ladislav - BÚC, Dalibor - HLINKA, Branislav - BENKOVSKÝ, Ivan. 4H-SiC Diode with a RuWox Schottky Contact Irradiated by Fast Electrons. In *APCOM 2006. Applied Physics of Condensed Matter: Proceedings of the 12th International Workshop*. Malá Lučivná, Slovak Republic. 21.- 23. June 2006. Bratislava: STU, 2006, s.74-78. ISBN 80-227-2424-6.
2. **BENKOVSKÁ, Jana** - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - ŠEBOK, Ján - RYBÁR, Jakub. e-Learning and Mysterious World of Science and Technology. In *ICETA 2010: 8th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications*. Stará Lesná, Slovakia, 28.-29.10.2010. Košice: Elfa, 2010, s.307-312. ISBN 978-80-8086-166-7.
3. **BENKOVSKÁ, Jana** - KÓSA, Arpád - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - DUBECKÝ, František - HARMATHA, Ladislav. DLTS Study of Neutron Bombarded 4H-SiC Detector. In *ADEPT 2013: 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies*. Nový

Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013. 1. vyd. Žilina: University of Žilina, 2013, s.274-277. ISBN 978-80-554-0689-3.

4. KÓSA, Arpád - **BENKOVSKÁ, Jana** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica. Investigation of Defects in 4H-SiC Detectors Before and after Neutron Radiation by DLTS Method. In *ŠVOČ 2013 [elektronický zdroj]: Zborník vybraných prác, Bratislava, 23. apríl 2013*. 1. vyd. Bratislava: FEI STU, 2013, s.CD ROM, s. 297-302. ISBN 978-80-227-3909-2.
5. KÓSA, Arpád - JUHÁSZ, Peter - **BENKOVSKÁ, Jana** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica. Deep Level Investigation on AlGaIn/GaN Structures by DLTS Method. In *ŠVOČ 2013 [elektronický zdroj]: Zborník vybraných prác, Bratislava, 23. apríl 2013*. 1. vyd. Bratislava: FEI STU, 2013, s.CD ROM, s. 319-324. ISBN 978-80-227-3909-2.
6. KÓSA, Arpád - **BENKOVSKÁ, Jana** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - BÚC, Dalibor - DUBECKÝ, František - HARMATHA, Ladislav. Radiation Hardness of 4H-SiC Structures. In *ASDAM 2014: The 10th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice Castle, Slovak Republic, October 20-22, 2014*. 1.vyd. Danvers : IEEE, 2014, s. 41-44. ISBN 978-1-4799-5474-2.
7. PAVLOVIČ, Matúš - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana**. Laser Diode as a Basic Optoelectronic Device in e-Learning. In *ŠVOČ 2009: Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník víťazných prác. Bratislava, Slovak Republic, 29.4.2009*. Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2009, s.CD-Rom. ISBN 978-80-227-3094-5.
8. RYBÁR, Jakub - KÓSA, Arpád - DUBECKÝ, František - PETRUS, Miroslav - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - HARMATHA, Ladislav - HRKÚT, Pavol - BAČEK, D. - KOVÁČ, Peter. DLTS Study of Neutron Bombarded Silicon Detector. 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, s.192-195. ISBN 978-80-554-0386-1.
9. STUHLÍKOVÁ, Ľubica - HARMATHA, Ladislav - ŠEBOK, Ján - VALLO, Martin - ŠRAMATÝ, Roman - PETRUS, Miroslav - KOVÁČ, Jaroslav - **BENKOVSKÁ, Jana** - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - LALINSKÝ, Tibor - PASZKIEWICZ, Bogdan - TLACZALA, Marek. Electrical Characterization of Al_{0.19}Ga_{0.81}N/GaN Single-Quantum-Well Structures. In *APCOM 2009. Applied Physics of Condensed Matter: Proceedings of the 15th International Workshop. Bystrá, Slovak Republic, 24.-26.6.2009*. Žilina: Žilinská univerzita, 2009, s.49-52.
10. STUHLÍKOVÁ, Ľubica - HARMATHA, Ladislav - BÚC, Dalibor - **BENKOVSKÁ, Jana** - HLINKA, Branislav - SIU, Guei Gu. 4H-SiC Diode with a RuOx and a RuWOx Schottky Contact Irradiated by Fast Electrons. In *ASDAM 2006. The Sixth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems: Smolenice, Slovakia. 16.- 18. Oct. 2006*. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006, s.193-196. ISBN 1-4244-0396-0. **Citované 1 (1 SCOPUS)**
11. STUHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana**. News Forum in Moodle in Practice. In *Virtual University 2008: 9th International Conference. Bratislava, Slovak Republic, 11.-12.12.2008*. Bratislava: STU v Bratislave, 2008, s.CD-Rom. ISBN 978-80-89316-10-6.
12. STUHLÍKOVÁ, Ľubica - ŠEBOK, Ján - PETRUS, Miroslav - HARMATHA, Ladislav - **BENKOVSKÁ, Jana** - KOVÁČ, Jaroslav - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - LALINSKÝ, Tibor - PASZKIEWICZ, Bogdan - TLACZALA, Marek. Deep Energy Levels in Al_{0.19}Ga_{0.81}N/GaN Single-Quantum-Well Structures. 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, s.158-161. ISBN 978-80-227-3307-6.

13. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - STUCHLÍK, M. - NEMEC, Michal - ŠEBOK, Ján - RYBÁR, Jakub - PETRUS, Miroslav. Future of Power Engineering Depends on Young People. In *Power Engineering 2012. Renewable Energy Sources 2012 [elektronický zdroj]: 3rd International Scientific Conference OZE 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012.* Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2012, s.259-260. ISBN 978-80-89402-48-9.
14. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - PETRUS, Miroslav - KOVÁČ, Jaroslav - RYBÁR, Jakub - HARMATHA, Ladislav - DONOVAL, Daniel - **BENKOVSKÁ, Jana** - BEHMENBURG, H. - HEUKEN, M. Electrical Characterization of the InAlN/GaN Heterostructures by Capacitance Methods. In *ASDAM 2012: The 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012.* Piscataway: IEEE, 2012, s.51-54. ISBN 978-1-4673-1195-3.
15. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - KÓSA, Arpád - **BENKOVSKÁ, Jana** - BENKO, Peter - HARMATHA, Ladislav - KOVÁČ, Jaroslav. Defects in Schottky Diodes Based on AlGaIn/GaN Heterostructures. In *ASDAM 2014: The 10th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice Castle, Slovak Republic, October 20-22, 2014.* 1.vyd. Danvers: IEEE, 2014, s. 189-192. ISBN 978-1-4799-5474-2.
16. ŠEBOK, Ján - PETRUS, Miroslav - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - HARMATHA, Ladislav - KOVÁČ, Jaroslav - NEMEC, Michal - **BENKOVSKÁ, Jana** - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava. Study of Electrical Properties of GaN by Capacitance Methods. 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, s.154-157. ISBN 978-80-227-3307-6.

AFH Abstrakty príspevkov z domácich konferencií (1)

1. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - **BENKOVSKÁ, Jana** - KÓSA, Arpád - PETRUS, Miroslav - HARMATHA, Ladislav - ŽIŠKA, Milan - KOVÁČ, Jaroslav. DLTS study of deep traps in InAlN/GaN heterostructures. In *WOCSDICE 2015: 39th workshop on compound semiconductor devices and integrated circuits. Smolenice, Slovakia. 8-10 June, 2015.* Bratislava: UEF FEI STU, 2015, S. 101-102.

FAI Redakčné a zostavovateľské práce knižného charakteru (bibliografie, encyklopédie, katalógy, slovníky, zborníky...) (2)

1. BENKO, Peter (ed.) - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica (ed.) - **BENKOVSKÁ, Jana** (ed.) - NEMEC, Michal (ed.). *ŠVOČ 2010. Fakultné kolo. Sekcia: Mikroelektronika a Optoelektronika, Mikroelektronické a Optoelektronické systémy, e-Learning a web technológie v Elektronike: Bratislava, 21. 4. 2010.* Bratislava: FEI STU, 2010. 114 s.
2. STUCHLÍKOVÁ, Ľubica (ed.) - BENKO, Peter (ed.) - **BENKOVSKÁ, Jana** (ed.). *ŠVOČ 2009. Fakultné kolo. Sekcia: Mikroelektronika a Optoelektronika, Mikroelektronické a Optoelektronické systémy, e-Learning a web technológie v Elektronike : Bratislava, 29.4.2009.* Bratislava: FEI STU, 2009. 120 s.

Citácie: 7 príspevkov / 12 citácií (z toho 9 citácií SCOPUS)