

Ing. Miroslav Petrus

Autoreferát dizertačnej práce

**SKÚMANIE ELEKTROFYZIKÁLNYCH VLASTNOSTÍ POLOVODIČOVÝCH MATERIÁLOV A PRVKOV
SPEKTROSKOPIOU HLBOKÝCH HLADÍN**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Mikroelektronika**
v študijnom odbore **5.2.13 elektronika**

Miesto a dátum: Bratislava, 21.07.2016

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

Ing. Miroslav Petrus

Autoreferát dizertačnej práce

**SKÚMANIE ELEKTROFYZIKÁLNYCH VLASTNOSTÍ POLOVODIČOVÝCH MATERIÁLOV A PRVKOV
SPEKTROSKOPIOU HLBOKÝCH HLADÍN**

na získanie **akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)**

v doktorandskom študijnom programe:
Mikroelektronika

Miesto a dátum: **Bratislava, 21.07.2016**

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia

Na pracovisku Ústavu elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava

Predkladateľ: **Ing. Miroslav Petrus**
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

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

Oponenti: **RNDr. Dagmar Gregušová, DrSc.**
Elektrotechnický ústav SAV, Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

doc. Ing. Igor Jamnický, CSc.
Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita, Univerzitná 1, 01026 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 23.08.2016 o 10:30

Na Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU

Obsah

<i>Úvod</i>	3
<i>Prehľad súčasného stavu</i>	4
<i>Ciele dizertačnej práce</i>	5
<i>Dosiahnuté výsledky</i>	6
<i>Hlavné prínosy dizertačnej práce</i>	12
<i>Záver</i>	13
<i>Summary</i>	14
<i>Použitá literatúra</i>	15
<i>Zoznam vlastných publikácií</i>	18

Úvod

V dnešnej dobe neustáleho pokroku vo vývoji polovodičových štruktúr v oblasti výkonových a vysokoteplotných technológií sú kladené čoraz väčšie nároky na technológiu výroby, v dôsledku čoho narastajú i požiadavky na diagnostiku kvality polovodičových štruktúr. Je nevyhnutné, aby diagnostika polovodičových štruktúr v sebe zahŕňala metódy, ktoré sú efektívne, čiže ľahko aplikovateľné a nedeštruktívne, so zameraním na analýzu elektrických vlastností týchto materiálov, ktoré výrazne ovplyvňujú elektricky aktívne poruchy. Prítomnosť niektorých porúch môže byť žiaduca pre správnu funkciu štruktúr, avšak na druhej strane iné defekty môžu znižovať kvalitu štruktúr záchytným nosičom náboja z valenčného alebo vodivostného pásma. Pri návrhu štruktúr na báze A3B5 polovodičových materiálov je vhodné aby proces ich výroby bol podporený intenzívnou charakterizáciou vlastností defektov a ich vplyvu na elektrické vlastnosti.

V skupine polovodičových materiálov A3B5, je v súčasnosti najintenzívnejšia pozornosť venovaná širokopásmovému polovodiču gálium nitrid (GaN). Súčiastky na báze GaN majú veľký potenciál využitia v optoelektronickom priemysle ako modré luminiscenčné diódy (LED) a v oblastiach vysokých frekvencií a výkonov ako napr. tranzistory s vysokou pohyblivosťou elektrónov (HEMT). Pre takéto uplatnenie GaN predurčujú najmä významné vlastnosti ako sú, šírka zakázaného pásma, hustota elektrónov a okrem iného aj vysoká hodnota prierného napätia. Aby bolo možné pochopiť vnútorné deje a zachovať uvedené špecificky významné parametre, ktoré sú v značnej miere ovplyvnené poruchami kryštalografickej štruktúry, je potrebné podrobnejšie skúmanie emisných a záchytných procesov prebiehajúcich v týchto štruktúrach. Tieto procesy je možné účinne sledovať experimentálnou metódou s vysokou citlivosťou - spektroskopiou hlbokých hladín (DLTS).

Ústav elektroniky a fotoniky disponuje pracoviskom BIO-RAD DL8000 s DLTS metódou, ktorá využíva pri vyhodnocovaní nameraných DLTS spektier Fourierovu transformáciu. Táto modifikácia nazývaná Fourierova spektroskopia hlbokých hladín ("Deep Level Transient Fourier Spectroscopy" - DLTFs) sníma celú kapacitnú transientu a ponúka širokú škálu vyhodnocovacích módo v teplotnom rozsahu od 80 do 550 K, čo významne uľahčuje spracovanie veľkého množstva údajov.

GaN je polovodič, ktorý sa vyznačuje veľkým množstvom porúch, čo má za následok nameranie často nevyhodnotiteľných súčtových DLTFs spektier. To nás bezpodmienečne privádza k hľadaniu lepšej a efektívnejšej možnosti charakterizácie štruktúr na báze GaN. Jedným z riešení je zmerať DLTFs

spektrá vo vybraných teplotných intervaloch, avšak vplyv ostatných porúch mimo meraný teplotný interval ostáva a vyhodnotenie je nejednoznačné. Ďalším možným riešením je zmerať celé teplotné spektrum, avšak budiť len jeden typ voľných nosičov náboja, čo nám umožňuje metóda DLTFs s optickým budením (DLTFs-O). Táto metóda je rovnako nedeštruktívna ako aj DLTFs metóda s elektrickým budením, ale umožňuje upriamiť pozornosť len na jeden typ porúch – súvisiacich s minoritnými nosičmi náboja, čo významne uľahčuje identifikovať ich vplyv na polovodič. Kombinácia DLTFs meraní s elektrickou a optickou excitáciou nám ponúka oveľa širšie možnosti v oblasti optimalizácie merania a identifikácie porúch.

Táto dizertačná práca sa venuje skúmaniu emisno-záchytných procesov v zakázanom pásme štruktúr na báze GaN, optimalizácii podmienok merania a vyhodnocovania identifikačných parametrov hlbokých hladín z nameraných DLTFs spektier a rozšíreniu možností identifikácie porúch na meracom pracovisku DL8000 realizáciou modifikácie DLTFs s optickým budením (DLTFs-O). Pozornosť je sústredená na zisťovanie elektricky aktívnych porúch v Schottkyho AlGaIn/GaN HEMT štruktúrach.

Predložená práca bola vypracovaná na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava s podporou Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR (VEGA 1/0742/08, 1/0689/09, 1/0507/09, 1/0712/12, 1/0866/11, 1/0377/13, 1/0739/16,), Agentúry na podporu výskumu a vývoja MŠVVaŠ SR (APVV-0509-10), EU FP7 (MORGAN), štatutárneho grantu Wroclawskej Technickej Univerzity (S10019, B20011) a Slovensko-Poľským Programom medzinárodnej spolupráce č. SK-PL-0017-09 & 0005-12 a HORIZON2020 project OSIRIS (ECSEL-RIA № 662322)¹.

Prehľad súčasného stavu

Galium nitrid je priamy polovodič zložený z gália - polovodiča III. skupiny a dusíka - polovodiča V. skupiny. Jedná sa o materiál s vysokou tvrdosťou, mechanickou odolnosťou, tepelnou kapacitou, ale najmä s veľkou šírkou zakázaného pásma (3,4 eV). K ďalším výhodám GaN patrí napr. vysoká teplotná vodivosť (1,5 W/cmK), vysoká prierezná intenzita elektrického poľa E_{BR} ($> 10^6$ V/cm), ktorá je až 10-krát vyššia ako v Si, relatívna permitivita ϵ_r , pohyblivosť elektrónov μ_n pri 300 K a tepelná vodivosť v GaN a ďalších vybraných polovodičoch.

Zlúčeniny GaN s AlN ($E_g = 6,2$ eV) alebo InN ($E_g = 0,64$ eV) umožňujú jednoduchú zmenu šírky zakázaného pásma, čo vytvorilo podmienky pre aplikácie GaN v optoelektronike pri malých vlnových dĺžkach (1) (2) (3) (4), ako sú modré alebo ultrafialové (UV) LED (5) (6) (7) (8), laserové diódy (3), súčiastky emitujúce zelené žiarenie (2) a UV fotodetektory (9) (10) (11) (12). V konečnom dôsledku GaN nachádza široké uplatnenie v oblasti obnoviteľnej energie pri vytváraní solárnych článkov (13) (14) (15) (16). Vysoké prierezné napätie, vysoká pohyblivosť elektrónov a vysoká teplotná vodivosť GaN sa intenzívne využívajú v aplikáciách ako sú tranzistory s vysokou pohyblivosťou elektrónov (HEMTs) (17) (18) (19) (20) (21) (22). Vývoj výroby polovodiča GaN a spôsob dopovania boli však stále veľmi problematické, až kým v prvej polovici 90. rokov nenastal prielom v technológii a bol vyrobený GaN p-typ. GaN je možné narásť viacerými metódami v závislosti od účelu jeho použitia ako sú

¹ The research leading to these results has received funding from the Electronic Component Systems for European Leadership Joint Undertaking under grant agreement No 662322, project OSIRIS. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and France, Norway, Slovakia, and Sweden. This publication reflects only the author's view and the JU is not responsible for any use that may be made of the information it contains.

napríklad: chemická depozícia z pár organokovových zlúčenín (MOCVD) (23) (24), molekulárna zväzková epitaxia (MBE) (25), depozícia z hydridových pár (HVPE) (26) (27) (28), depozícia pri vysokom tlaku (HPS) (24), rastová metóda na báze toku sodíka (Na flux) (25) (26) (29) a termálna amoniaková syntéza „ammonothermal method“ (27).

Najrozšírenejšie uplatnenie GaN je v HEMT tranzistoroch na báze AlGaIn/GaN pre ich vysoké výkony a vysokú frekvenčnú odolnosť až do 1THz, vďaka polarizácií na tomto heterorozhraní (30) (31) (32). Vrstva náboja na rozhraní umožňuje vznik dvojrozmerného elektrónového plynu (2DEG) dokonca i pri zámernom nedopovaní, čo umožňuje vytvorenie vodivostného kanála s výnimočne veľkou plošnou hustotou náboja n_s a pohyblivosťou. Vzhľadom na tieto špecifické vlastnosti je nevyhnutné lepšie porozumieť mechanizmu 2DEG formovania a vplyvu hlbokých hladín na účinnosť AlGaIn/GaN HEMT. V prípade, keď je GaN narastený na inom substráte, sú mriežky substrátu a GaN vrstvy nekompatibilné, čo má za následok vznik napätia vo vrstve. Toto napätie deformuje štruktúru vo vrstve a vzniká piezoelektrické pole, ktoré prispieva k polarizácii. Celková polarizácia v GaN pozostáva teda zo spontánnej polarizácie a piezoelektrickej polarizácie. V konečnom dôsledku táto polarizácia zvyšuje väzbové napätie v dôsledku čoho vznikajú poruchy v GaN, ktoré významne ovplyvňujú výkon GaN prvkov a preto je nevyhnutné pochopiť ich vlastnosti a pôvod.

Univerzálnou metódou na skúmanie porúch v polovodičoch je spektroskopia hlbokých hladín. DLTS metódu ako prvý publikoval D. V. Lang (33) v roku 1974 ako meraciu techniku pracujúcu na princípe snímania kapacitných zmien, ktoré vznikajú vplyvom emisie a záchytu nosičov náboja v elektricky aktívnych defektoch v polovodičoch. Z nameraných DLTS spektier je možné zostrojiť Arrheniovu závislosť a z nej určiť základné parametre hlbokých energetických hladín:

$$\ln\left(\frac{e_{n,p}(E)}{T^2}\right) = \ln(\gamma_{n,p} \cdot \sigma_{n_i,p_i}) - \left(\frac{\Delta E_{n_i,p_i}(E)}{kT}\right) \quad (1)$$

kde $e_{n,p}(E)$ je emisná rýchlosť elektrónov, alebo dier závislá od energie, $\gamma_{n,p}$ je teplotne závislý parameter polovodičového materiálu n-typu, alebo p-typu, definovaný vzťahom, σ_{n_i,p_i} je identifikačný (zdanlivý) záchytný prierez elektrónov alebo dier a $\Delta E_{n_i,p_i}(E)$ je identifikačná (zdanlivá) aktivačná energia závislá od energie. Hodnotu $\Delta E_{n_i,p_i}(E)$ získame zo smernice tejto priamky a veľkosť σ_{n_i,p_i} z priesečníka Arrheniovej závislosti s y-ovou osou. DLTS metóda využíva na budenie nosičov náboja elektrický impulz, pričom DLTS s optickým zdrojom používa na budenie nosičov v skúmanej vzorke svetelné žiarenie, čo sa považuje za základný rozdiel medzi týmito dvoma meracími technikami.

Ciele dizertačnej práce

Najnovšie trendy v oblasti elektroniky a fotoniky si vyžadujú vývoj nových a kvalitných polovodičových materiálov a štruktúr s dobrými elektrickými vlastnosťami. Takto sa do popredia dostáva diagnostika kvality štruktúr na báze GaN. Pre dizertačnú prácu boli stanovené nasledovné ciele:

- Verifikovať možnosti použitia metódy spektroskopie hlbokých hladín na skúmanie emisno-záchytných procesov v zakázanom pásme polovodičových štruktúr na báze GaN a nájst optimálne podmienky merania a vyhodnocovania identifikačných parametrov hlbokých hladín.

- Analyzovať poruchy identifikované v štruktúrach na báze GaN metódou DLTS s optickým budením. Špecifikovať požiadavky na DLTFSS experiment s optickým budením na zariadení DL8000.
- Rozšíriť možnosti charakterizácie štruktúr na báze GaN aplikáciou modifikácie DLTFSS s optickým budením na zariadení DL8000.
- Identifikovať pôvod emisných a záchytných procesov vo vybraných HEMT štruktúrach na báze GaN.

Dosiahnuté výsledky

Experimentálna časť práce sa zaoberá skúmaním emisných a záchytných procesov v polovodičových bariérových štruktúrach metódou DLTFSS. Hlavný dôraz je kladený na identifikáciu parametrov hlbokých energetických v AlGaN/GaN Schottkyho štruktúrach pre HEMTy a s tým spojenú optimalizáciu meracej metodiky a rozšírenie jej možností.

Prvé experimenty s cieľom zistiť kvalitu štruktúr na báze GaN z hľadiska distribúcie elektricky aktívnych porúch boli realizované na pracovisku BIO-RAD DL8000 na Ústave elektroniky a fotoniky už v roku 2009 (34) (35) (36). Vysoká hustota defektov a šírka zakázaného pásma GaN si vyžiadali komplexné poznanie metodiky merania a vyhodnocovania Fourierovej spektroskopie hlbokých hladín (37). Hlavná pozornosť bola venovaná sledovaniu emisno-záchytných procesov v AlGaN/GaN HEMT Schottkyho heteroštruktúrach. Prítomnosť viacerých vrstiev v štruktúre, polarizácie na rozhraní a 2DEG mimoriadne komplikuje DLTFSS meranie ako aj interpretáciu nameraných spektier. Praktické poznatky získané v DLTFSS experimentoch na jednoduchých bariérových štruktúrach s bežnými polovodičovými materiálmi nebolo možné aplikovať na skúmanie AlGaN/GaN heteroštruktúr, ktoré si svojimi vlastnosťami vyžadujú osobitný prístup. Nevyhnutnou podmienkou úspešného experimentu bola preto systematická optimalizácia meracích podmienok a vyhodnotenia. Pri špecifikácii parametrov merania DLTFSS a evaluácie nameraných spektier vo viacvrstvových HEMT štruktúrach s AlGaN/GaN heterorozhraním boli použité bohaté skúsenosti z oblasti metodiky merania DLTFSS spektier na viacvrstvových štruktúrach získané v rámci experimentov na báze GaAsN a InGaAsN (38) (39) (40) (41) (42). Pri zisťovaní parametrov identifikovaných hlbokých energetických hladín v AlGaN/GaN heteroštruktúrach bolo nutné zohľadniť nasledovné:

- vysoká hustota defektov v GaN môže spôsobiť neexponenciálny charakter kapacitnej transienty
- existencia 2DEG prispieva k emisným procesom na rozhraní AlGaN/GaN
- prítomnosť polarizácie a následnej nábojovej nestability GaN štruktúr má za následok nereprodukovateľnosť DLTFSS merania
- veľké relaxačné časy emisno-záchytných procesov majú vplyv na teplotu merania a dobu snímania T_w
- parametre merania ovplyvňujú vnútorné napätie v kryštalografickej mriežke.

Optimalizácia meracích podmienok DLTFs

GaN patrí medzi materiály, v ktorom defekty vážne ovplyvňujú jeho optické aj elektrické vlastnosti (43). Optimalizácia DLTFs merania je nevyhnutnou podmienkou pre úspešný experiment počnúc analýzou GaN meranej štruktúry s predpokladom návrhu meracích parametrov, ktoré majú významný vplyv na celkové vyhodnotenie a interpretáciu výsledkov. V súčasnosti môžeme formulovať dve základné podmienky pre optimalizáciu merania na DL8000:

a) Analýza vstupných meraní s cieľom návrhu optimálnych vstupných parametrov DLTFs merania

V praxi analýza vstupných meraní znamená, že skúmanú štruktúru pred meraním DLTFs spektier podrobíme štandardným elektrickým meraniam (I-V, C-V, C-t). I-V merania sú dôležité pre overenie kvality Schottkyho kontaktu a C-V merania pre overenie AlGaIn/GaN heteroštruktúry. Z hľadiska nastavenia vstupných meracích parametrov DLTFs merania sa z nameraných C-V závislostí podľa polohy nábežnej hrany najväčšej kapacitnej zmeny stanovujú hodnoty napätí pre V_R a V_P pri 300 K, resp. pri teplote kompenzácie. Hodnotu dĺžky periódy T_w , ďalšieho parametra DLTFs merania, stanovujeme z meraní kapacitných transient C-t. Nastavenie času pôsobenia napäťového impulzu t_p , kde je najvhodnejšie vychádzať z informácií o štruktúre meranej vzorky. Viacvrstvové štruktúry sa môžu vyznačovať transientami, ktoré nemajú exponenciálny charakter, pri ktorom softvér nedokáže stanoviť ExpClass a pre tento prípad je vhodné zvýšiť hodnotu času t_0 , čo posúva začiatok snímania a ukladania bodov transienty.

b) Modifikácia DLTFs metódy so zameraním sa na identifikáciu minoritných nosičov náboja.

Praktická realizácia optimalizácie merania DLTFs a vyhodnotenia sa zameriava na možnosti zlepšenia charakterizácie elektricky aktívnych defektov na zariadení DL8000, doplnením metodiky DLTFs merania s optickou excitáciou. Táto metóda nám umožňuje eliminovať vplyv majoritných nosičov náboja, následkom čoho sa zvyšuje pravdepodobnosť presnejšieho určenia parametrov porúch súvisiacich s emisiou a záchytnom minoritných nosičov náboja. Výsledkom merania DLTFs s optickým budením je záporné spektrum – spektrum od minoritných nosičov náboja.

Skúmanie porúch v AlGaIn/GaN štruktúrach metódou DLTFs s elektrickým budením

V rámci tejto časti práce opublikovanej v (38) sme sa zamerali na identifikáciu defektov v AlGaIn/GaN HEMT štruktúre metódou DLTFs s elektrickým budením. Meraná štruktúra bola rastená metódou chemickej depozície z metalorganických pár pri nízkom tlaku (LP-MOVPE) na zařirovom substráte (Al_2O_3). Vzorka pozostávala z dvoch 8 nm hrubých nedopovaných $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ vrstiev a 6 nm hrubej Si-dopovanej $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ medzivrstvy, ktorá je narastená na 3 μm vrstve GaN. DLTFs namerané spektrá na predloženej AlGaIn/GaN vzorke majú záporný charakter, čo je príznačné pre signál minoritných nosičov náboja. Tvar nameraných priebehov zodpovedá veľkému množstvu defektov, avšak z týchto priebehov bolo možné identifikovať pomocou „direct evaluation“ parametre len dvoch dierových pascí: ET1 má aktivačnú energiu $\Delta E_{T1} = 0,954$ eV a ET2 má aktivačnú energiu $\Delta E_{T2} = 1,06$ eV. Predpokladáme, že obe identifikované pasce súvisia so špirálovými dislokáciami v GaN vrstve skúmanej AlGaIn/GaN HEMT štruktúry.

Skúmanie porúch v AlGaIn/GaN štruktúrach metódou DLTFs s optickým budením

Problémy s identifikáciou parametrov elektricky aktívnych porúch z nameraných DLTFs spektier v štruktúrach na báze GaN na pracovisku DL8000 si vyžiadali modifikáciu metodiky ako aj pracoviska. Na základe doteraz dosiahnutých výsledkov sme sa rozhodli pre zostrojenie relevantného zdroja optického budenia, aby bolo možné rozšíriť pôvodné pracovisko o DLTFs s optickým budením, čo nám umožní eliminovať majoritné nosiče náboja a tak lepšie charakterizovať pasce minoritných nosičov náboja. V rámci verifikácie novej metodiky sme sa zamerali na DLTFs merania s variáciou teploty pri nastavení zdroja optického budenia na žiarenie konštantnej vlnovej dĺžky s cieľom porovnania spektier z DLTFs a DLTFs-O merania.

V rámci experimentu sme použili dva typy AlGaIn/GaN heteroštruktúr s hrebeňovým Schottkyho kontaktom vhodným na optické meranie. Obe štruktúry boli vyrastené metódou LP-MOVPE. Na substráte 4H-SiC bola narastená nukleačná vrstva AlN, ďalej železom dopovaná GaN vrstva (1,7 μm /1,5 μm), nukleačná vrstva AlN (1,25 nm/0) a Al_xGa_{1-x}N vrstva (20 nm/25 nm). Ohmický kontakt bol vytvorený z Nb (20 nm)/Ti (20 nm)/Al(100 nm)/Ni(40 nm)/Au (50 nm) a Schottkyho kontakt z Ti (40 nm)/Au (100 nm). Na identifikáciu porúch boli použité metódy DLTFs s elektrickým a DLTFs s optickým budením.

Na vzorke bez nukleačnej vrstvy medzi GaN a AlGaIn boli z DLTFs meraní určené parametre 3 hladín (2_EL1, 2_EL2, 2_HL1) a z DLTFs-O meraní ďalších 5 dierových hladín (240HL1, 240HL2, 345HL1, 345HL2 a 345HL3). Maximá píkov hladín 250HL1, 290HL1, 240HL1 a 345HL1 z DLTFs-O spektier navzájom korešpondujú pri $T_w = 1$ s, ale ich parametre sú odlišné. Iba hladina 250HL1, určená v štruktúre s AlN vrstvou, a hladina 345HL1, určená v štruktúre bez AlN vrstvy, vykazujú zhodu. Obe tieto hladiny pravdepodobne súvisia s dopáciou železa. Okrem železa v oboch vzorkách bola zistená i porucha súvisiaca s prítomnosťou vakancie gália alebo intersticiálneho dusíka (1_HL1, 2_HL1 a 345HL3). Táto porucha bola v štruktúre bez AlN vrstvy potvrdená z DLTFs aj DLTFs-O nameraných spektier. Namerané výsledky potvrdili predpoklad, že vzorka s AlN nukleačnou vrstvou bude mať nižšiu koncentráciu defektov vzhľadom k vzorke bez AlN. Výrazný rozdiel v nameraných DLTFs spektrách sme pozorovali v oblasti 100 až 300 K. Uvedené výsledky potvrdili oprávnenosť použitia metódy DLTFs s optickým budením, ktorá umožnila identifikovať parametre ďalšej pasce oproti DLTFs s elektrickým budením. Súčasne sme zistili, že DLTFs-O spektrum je súčtové a aby bolo možné identifikovať parametre viacerých porúch je nutné použiť matematickú dekonvolúciu spektier, alebo optimalizovať vlnovú dĺžku žiarenia.

Poznatky a skúsenosti získané pri DLTFs a DLTFs-O experimentoch sme využili na skúmanie emisných procesov v referenčnej AlGaIn/GaN štruktúre, ktorá slúži ako základ komerčne vyrábaných HEMT s vysokou kvalitou. Kvalita skúmaných AlGaIn/GaN štruktúr bola súčasne aj príležitosťou na otestovanie vplyvu vybraných vstupných parametrov a metódik DLTFs a DLTFs-O.

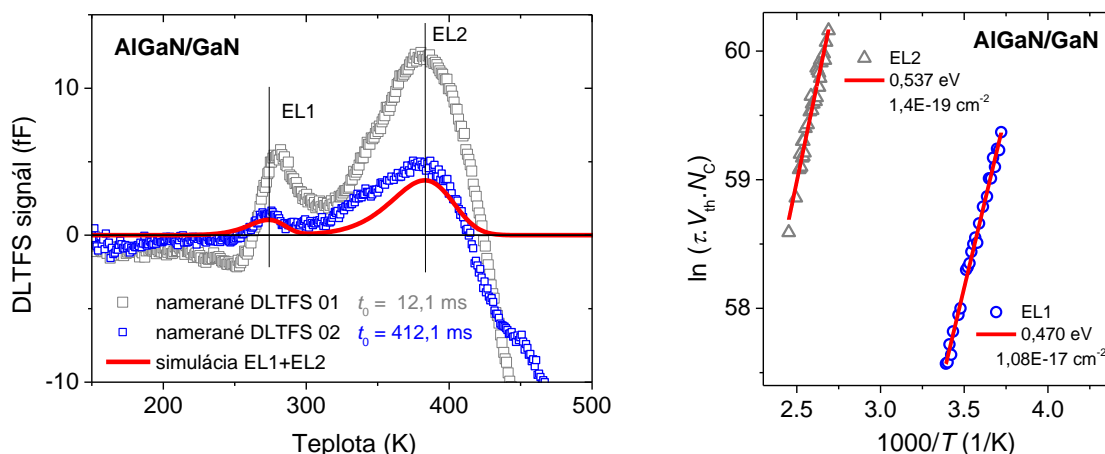
Zloženie AlGaIn/GaN štruktúry je štandardizované ale presné rastové podmienky nám nie sú známe. Ohmický kontakt je vytvorený naparením Ti/Al/Ni/Au a Schottkyho kontakt naparením PtPdAu. Štruktúra bola potom pasivovaná SiN. Pre DLTFs optické merania sme použili Schottkyho kontakt B (FAT FET), ktorý má hrebeňovitý tvar. Funkčnosť Schottkyho kontaktu sme overili meraním I-V a HEMT

charakter štruktúry meraním C-V. Z C-V charakteristík sme vychádzali aj pri nastavovaní vstupných parametrov DLTFs a DLTFs-O meraní, ktoré sú uvedené v Tab. 1. Namerané spektrá vykazovali súčtový charakter s DLTF signálom rádovo desiatky fF. Vzhľadom na to, že výška píkovo priamo súvisí s koncentráciou pascí, a tento signál je doteraz najnižší signál zistený v AlGaIn/GaN štruktúrach skúmaných na pracovisku DL8000, tento výsledok jednoznačne potvrdzuje, že sa jedná o kvalitnú štruktúru.

Tab. 1 Vstupné parametre pre DLTFs a DLTFs-O merania

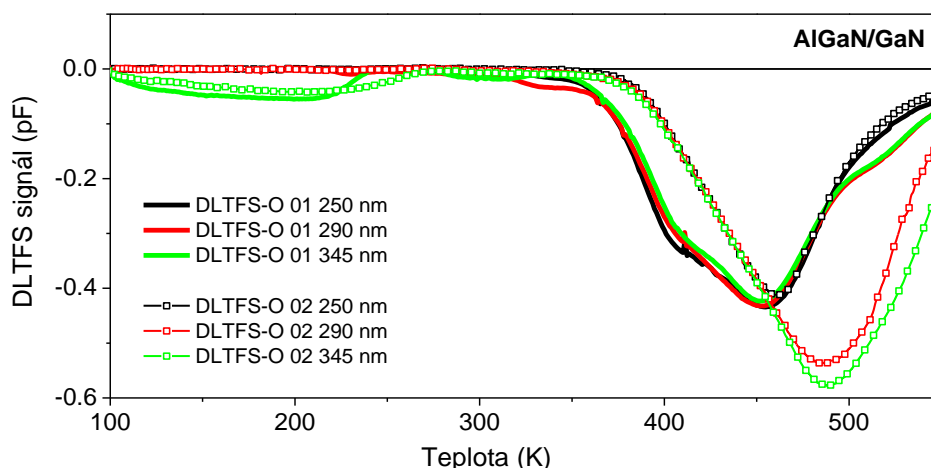
Meranie	V_R (V)	V_P (V)	T_w (s)	t_p / t_{p0} (s)	t_0 pri $T_w = 1$ s /vlnová dĺžka
DLTFs 01	-3,1	-2,0	1; 2; 5	2	$t_0 = 12,1$ ms
DLTFs 02	-3,1	-2,0	1; 2; 5	2	$t_0 = 412,1$ ms
DLTFs 03	-3,1	-1,0	1; 2; 5	2	$t_0 = 261,7$ ms
DLTFs 04	-3,1	-1,0	1; 2; 5	2	$t_0 = 412,1$ ms
DLTFs-O 01	-3,1	-	1; 2; 5	2	$t_0 = 261,7$ ms/ 250, 290, 345
DLTFs-O 02	-3,1	-	0,1; 0,2; 0,5	2	250, 290, 345

Na Obr. 1 vľavo sú zobrazené DLTFs 01 a DLTFs 02 spektrá, ktoré sú merané pri rovnakých vstupných parametroch V_P , V_R , t_p a T_w (Tab. 1), ale pri rozdielnych hodnotách parametra t_0 (12,1/412,1 ms). Z oboch spektier sme identifikovali pomocou „direct evaluation“ parametre dvoch elektrónových hladín EL1 s aktivačnou energiou $\Delta E_T = 0,47$ eV a so zachytným prierezom $\sigma_T = 1,08 \times 10^{-17}$ cm⁻² a EL2 s $\Delta E_T = 0,54$ eV a so $\sigma_T = 1,4 \times 10^{-19}$ cm². DLTFs 01 spektrum s $t_0 = 12,1$ ms vykazuje vyššiu hodnotu signálu v dôsledku toho, že začiatok zaznamenávania bodov transiency je bližšie k počiatku snímania, pričom najväčší gradient zmeny je práve v tejto oblasti. Naopak spektrum DLTFs 02 s $t_0 = 412,1$ ms má nižšiu hodnotu DLTFs signálu, čo sa prejavilo na znížení vplyvu zápornej polarizácie pribehu na elektrónovú hladinu EL1. To umožnilo presnejšie určenie parametrov pasce EL1 zo spektra DLTFs 02. Podmienky evaluácie druhej elektrónovej pasce EL2 identifikovanej v oboch spektrách sa nezmenili. Arrheniové závislosti oboch pascí sú zobrazené na Obr. 1 vpravo. Pomocou parametrov určených z týchto závislostí sme nasimulovali DLTFs spektrum oboch pascí, ktoré je zobrazené na Obr. 1 vľavo. Poruchy EL1 a EL2 pravdepodobne súvisia s procesmi na rozhraní (diskontinuita pásiem alebo stavy na rozhraní AlGaIn/GaN (44)), ich pôvod je však predmetom ďalšieho skúmania.

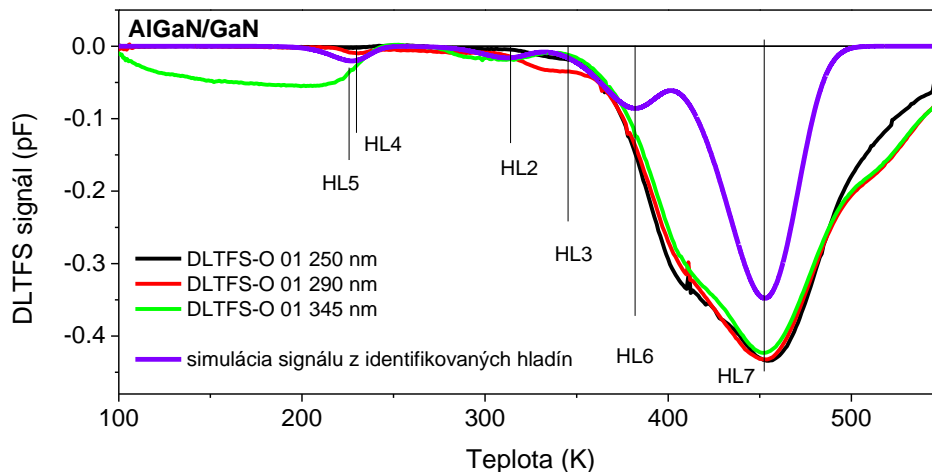


Obr. 1 Namerané DLTFs 01 a DLTFs 02 spektrá na AlGaIn/GaN štruktúre pri $T_w = 1$ s pre rôzne t_0 s identifikovanými hladinami EL1 a EL2 a ich Arrheniové závislosti.

Predložená štruktúra bola meraná metódou DLTFs s optickým budením LED s vlnovými dĺžkami 250, 290 a 345 nm (Obr. 2). Overovanie metodiky merania bolo realizované s dvoma sadami meracích parametrov, ktoré sa odlišovali v dobe snímania kapacitnej transiency T_W . Charakter a veľkosť nameraných spektier sa v prípade DLTFs-O 01 v podstate zachoval bez ohľadu na veľkosť času snímania transiency T_W (1,2 a 5 s). V prípade DLTFs-O 02 sa spolu s veľkosťou času snímania transiency T_W (0,1;0,2 a 0,5 s) významne menil charakter spektier, ako aj výška maxim týchto spektier. Na základe týchto výsledkov môžeme konštatovať, že vplyv vybraných vlnových dĺžok na charakter DLTFs-O spektra pre dostatočne veľký čas snímania transiency T_W klesá (Obr. 2).

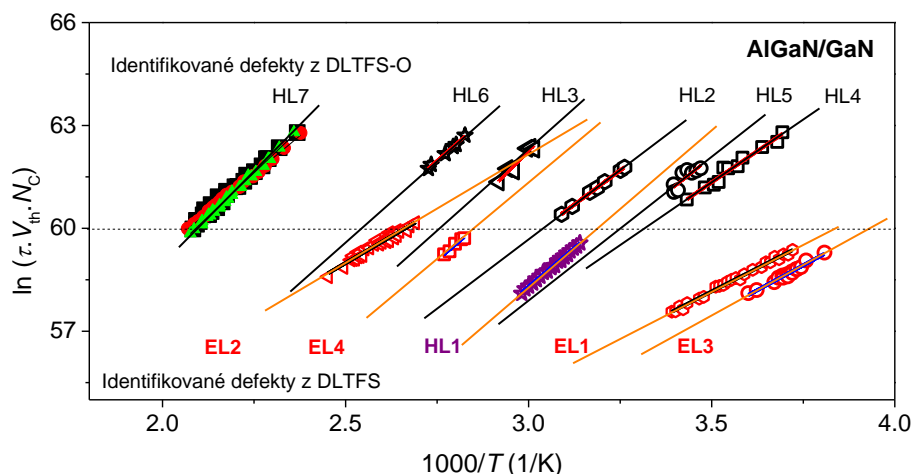


Obr. 2 Namerané DLTFs-O 01 spektrá pri $T_W = 1$ s a DLTFs-O 02 spektrá pri $T_W = 0,1$ s s vlnovými dĺžkami 250, 290 a 345 nm.



Obr. 3 Namerané DLTFs-O 01 spektrá pri $T_W = 1$ s, s vlnovými dĺžkami 250, 290 a 345 nm s identifikovanými dierovými pascami HL2 až HL7 a simulácia signálu z týchto pascí.

DLTFs-O spektrá vykazujú oveľa väčšiu koncentráciu pascí. Metódou „direct evaluation“ bolo identifikovaných päť dierových hlbokých energetických pascí (HL2-HL6) (Obr. 31). Poruchu HL7 bolo možné identifikovať iba metódou „maximum evaluation“ nakoľko sa jedná o komplexný súčtový pík. Pri všetkých vlnových dĺžkach je hladina HL7 totožná, čo bolo potvrdené aj zostrojením Arrheniových závislostí (Obr. 4). Z týchto závislostí boli určené parametre jednotlivých hladín, ktoré sú zhrnuté v Tab. 2, spolu s uvedením pravdepodobného pôvodu porúch.



Obr. 4 Arrheniové závislosti všetkých identifikovaných hladín v AlGaIn/GaN štruktúre zo spektier DLTS s elektrickým a optickým budením.

Tab. 2 Parametre identifikovaných pascí z elektrických a optických DLTS meraní

Pasca	Aktivačná energia ΔE_T (eV)	Záchytný prierez σ_T (cm ²)	Pôvod
EL1	0,470	$1,08 \times 10^{-17}$	Rozhranie AlGaIn/GaN
EL2	0,537	$1,40 \times 10^{-19}$	Rozhranie AlGaIn/GaN
EL3	0,498	$6,74 \times 10^{-17}$	Rozhranie AlGaIn/GaN
EL4	0,710	$1,50 \times 10^{-16}$	neznámy pôvod
HL1	0,809	$8,36 \times 10^{-14}$	Dopáčia Fe v GaN
HL2	0,686	$2,75 \times 10^{-16}$	neznámy pôvod
HL3	0,771	$6,02 \times 10^{-17}$	Dopáčia Fe v GaN
HL4	0,598	$4,90 \times 10^{-17}$	Komplex vakancie gália s kremíkom
HL5	0,657	$1,24 \times 10^{-16}$	neznámy pôvod
HL6	0,725	$1,47 \times 10^{-17}$	Vakancia gália alebo intersiciál N
HL7	1,121	$1,60 \times 10^{-17}$	Skrutkové dislokácie

Z nameraných spektier DLTS s elektrickým budením (DLTS 01 až 04) bolo identifikovaných 5 hlbokých energetických hladín, z toho 4 elektrónové (EL1 - EL4) a 1 dierová (HL1). Z DLTS s optickým budením boli zistené parametre 6 dierových pascí (HL2-HL6). Pasce HL1 a HL3 boli identifikované oboma metódami a súvisia pravdepodobne s dopáciou Fe v GaN. Hladina HL7 bola identifikovaná pre všetky vlnové dĺžky a pravdepodobne súvisí s prítomnosťou skrutkových dislokácií v štruktúre. Pôvod identifikovaných porúch je však predmetom ďalšieho skúmania. V prípade porúch EL4, HL2 a HL5 nie sú v literatúre dostupné relevantné informácie o pôvode.

Využitie DLTS-O metódy teda umožnilo identifikáciu ďalších 5 dierových hladín. Predpokladáme, že v prípade optimalizácie veľkosti času snímania transiency T_w , alebo zmenou vlnovej dĺžky optického zdroja, dôjde k elektronickej dekonvolúcii píkov, čo nám umožní zistenie ďalších emisno-záchytných procesov prebiehajúcich v AlGaIn/GaN heteroštruktúrach.

Hlavné prínosy dizertačnej práce

Predložená práca svojím obsahom spĺňa vytýčené ciele. Hlavné prínosy je možné zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Získanie nových poznatkov o AlGaN/GaN HEMT štruktúrach, o ich elektrických a optických vlastnostiach. Využitie týchto poznatkov v praxi prispieva k lepšiemu pochopeniu emisno-záchytných procesov a optimalizácii rastového procesu HEMT na báze GaN.
- Analýza súčasnej DLTS a DLTFs metodiky z hľadiska jej aplikácie na skúmanie elektricky aktívnych defektov v AlGaN/GaN heteroštruktúrach. Optimalizácia metodiky DLTFs na sledovanie emisno-záchytných procesov v heteroštruktúrach na báze GaN.
- Návrh a realizácia metodiky DLTFs s optickou excitáciou na pracovisku ÚEF FEI STU v Bratislave DL8000 na rozšírenie možností identifikácie porúch v AlGaN/GaN heteroštruktúrach.
- Aplikácia DLTFs - O metodiky na zisťovanie emisie minoritných nosičov náboja na troch typoch AlGaN/GaN HEMT štruktúr. Experimentálne bol stanovený vplyv rôznej veľkosti vlnovej dĺžky (240, 250, 290 a 345 nm) DLTFs-O merania na možnosť určovania parametrov porúch z nameraných DLTFs spektier. Najlepšie výsledky boli získané pri optickom zdroji LED s vlnovou dĺžkou 345 nm.
- Identifikácia viac ako 15 porúch, určenie ich základných parametrov a pravdepodobného pôvodu v AlGaN/GaN HEMT Schottkyho štruktúrach. Prítomnosť skrutkových dislokácií bola potvrdená vo všetkých skúmaných štruktúrach a prítomnosť železa, vakancií gália a intersticiálneho dusíka v troch typoch štruktúr vyšetovaných metódou DLTFs-O.
- Experimentálne bol potvrdený predpoklad, že vzorka s AlN nukleačnou vrstvou medzi AlGaN a GaN bude mať nižšiu koncentráciu elektricky aktívnych defektov oproti vzorke bez tejto medzivrstvy.

Záver

Vývoj súčiastok na báze GaN je v centre záujmu už od roku 1980 až do súčasnosti, pričom veľká pozornosť sa venuje výskumu pôvodu defektov. Vysoká koncentrácia defektov v GaN významne ovplyvňuje činnosť týchto elektronických súčiastok.

Dizertačná práca sa zaoberá problematikou charakterizácie emisno-záchytných procesov v zakázanom pásme štruktúr na báze GaN metódou Fourierovej spektroskopie hlbokých hladín (DLTFS). Úvod práce sa venuje základným vlastnostiam GaN ako polovodičového materiálu s ohľadom na jeho aplikácie a technológiu rastu. Veľká pozornosť bola venovaná heterozhraniu AlGaN/GaN, ktoré je základom HEMT aplikácií. Nasledujúca kapitola bola venovaná teórii a metodike spektroskopie hlbokých hladín na identifikáciu parametrov elektricky aktívnych porúch, z ktorej vychádza metóda DLTFS a DLTFS s optickým budením. V praktickej časti práce sme sa zaoberali optimalizáciou merania a vyhodnocovania identifikačných parametrov porúch z nameraných DLTFS spektier na AlGaN/GaN heteroštruktúrach. Prvé DLTFS experimenty na AlGaN/GaN heteroštruktúrach poukazujú na súčtový charakter spektra a problémy pri jeho vyhodnocovaní.

Analýzou metodiky DLTFS na sledovanie emisno-záchytných procesov sa ukázalo ako jedno z možných riešení využitie optického budenia, čiže aplikácie DLTFS-O metódy. Táto jednoduchá, ale pritom účinná metóda znižuje vplyv majoritných porúch na merané spektrum a významne uľahčuje identifikovať pôvod porúch v bariérových štruktúrach. Navrhli, realizovali a implementovali sme modifikáciu DLTFS s optickým budením na meracom pracovisku DL8000. Metódami DLTFS s elektrickým budením a DLTFS s optickým budením sme skúmali tri typy štruktúr. Získané výsledky potvrdili oprávnenosť použitia metódy DLTFS s optickým budením, ktorá umožnila identifikovať parametre ďalších pasív oproti DLTFS s elektrickým budením, čím došlo jednoznačne k zvýšeniu počtu identifikovaných porúch.

Zavedením DLTFS-O metodiky bol významne znížený vplyv majoritných nosičov náboja na emisno-záchytné procesy. DLTFS-O spektrum zodpovedá emisii len minoritných nosičov náboja. Súčasne sme zistili, že aj DLTFS-O spektrum je súčtové a aby bolo možné identifikovať parametre ďalších porúch je nutné použiť matematickú dekonvolúciu spektier, alebo optimalizovať vlnovú dĺžku žiarenia. Experimentálne sme potvrdili predpoklad, že vzorka s AlN nukleačnou vrstvou medzi AlGaN a GaN má nižšiu koncentráciu elektricky aktívnych defektov oproti vzorke bez tejto medzivrstvy.

Overili sme vysokú kvalitu komerčne využívanej AlGaN/GaN štruktúry. Experimentálne bol stanovený vplyv rôznej vlnovej dĺžky (240, 250, 290 a 345 nm) DLTFS-O merania na namerané spektrá. Najlepšie výsledky boli získané pri optickom zdroji LED s vlnovou dĺžkou 345 nm. Celkovo bolo identifikovaných viac ako 30 hlbokých energetických hladín, z toho viac ako 21 súviselo s emisiou minoritných nosičov náboja. Prítomnosť skrutkových dislokácií bola potvrdená vo všetkých skúmaných štruktúrach a prítomnosť železa, vakancií gália a intersticiálneho dusíka v troch typoch štruktúr vyšetřovaných metódou DLTFS-O.

Hlavným prínosom práce bolo optimalizácia metodiky DLTFS na sledovanie emisno-záchytných procesov v heteroštruktúrach na báze GaN, jej rozšírenie o DLTFS s optickým budením a získanie nových poznatkov, ktorých využitie v praxi prispieva k lepšiemu pochopeniu emisno-záchytných procesov a optimalizácii rastového procesu HEMT na báze GaN.

Summary

The most recent trends in electronics and photonics require the development of new and high-quality semiconductor materials and structures with good electrical properties. In the group A3B5 semiconductor materials, the attention is currently paid to wide band semiconductor gallium nitride (GaN). Devices based on GaN have great potential use for instance, in the area of the high frequency range and performance as in high electron mobility transistors (HEMTs).

The dissertation thesis focuses on the characterization of emission and capture processes in a band gap of GaN structures by the Deep level transient Fourier spectroscopy (DLTFS). The first chapter introduces the basic electrophysical properties of GaN semiconductor and Schottky heterostructures AlGaN/GaN created for HEMTs. In the end of the first chapter, the disorders are classified affecting the quality of these structures. The second chapter elaborates the essence of theory and methodology of deep levels spectroscopy to identify the parameters of electrically active defects underlying the method DLTFS. In the practical part, the experimental conditions observed optimization of measurement and evaluation of defect identification parameters from measured spectra DLTFS on AlGaN/ GaN heterostructures is provided. The proposal, construction and implementation of modifications DLTS optical excitation (DLTFS-O) at the measuring workplace DL8000 are presented. Experimentally, the effect of various wavelengths (240, 250, 290 and 345 nm) DLTFS measuring on the measured spectra was defined. The best results were gained from the optical LED resources with the wave length 345 nm. The parameters and the possible origin of 15 defects in the AlGaN/GaN HEMT Schottky structures were identified. The impact of minority charge carriers for emission-capture processes was significantly reduced by the use of the DLTFS-O methodology. DLTS-O spectrum shows only emission of minor charge carriers. The use of the acquired knowledge in practice contributes to a better understanding of emission-capture processes and optimizes the growth process of HEMT based on GaN.

Keywords: Deep level transient Fourier spectroscopy, AlGaN/GaN, emission and capture, Deep level transient Fourier spectroscopy with optical excitation.

Použitá literatura

1. J. C. Carrano, T. Li, D. L. Brown, P. A. Grudowski, C. J. Eiting, R. D. Dupuis, J. C. Campbell. Very high-speed metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors fabricated on GaN. *Applied Physical Letters*. 73, 1998, Zv. 17.
2. D. Walker, E. Monroy, P. Kung, J. Wu, M. Hamilton, F. J. Sanchez, J. Diaz, M. Razeghi. High-speed, low-noise metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors based on GaN. *Applied Physical Letters*. 74, 1999, Zv. 5.
3. O. Jani, I. Ferguson, C. Honsberg, S. Kurtz. Design and characterization of GaN/InGaN solar cells. *Applied Physical Letters*. 91, 2007, Zv. 13.
4. D.-J. Seo, J.-P. Shim, S.-B. Choi, T. H. Seo, E.-K. Suh, D.-S. Lee. Efficiency improvement in InGaN-based solar cells by indium tin oxide nano dots covered with ITO films. *Optical Express*. 20, 2012, Zv. S6.
5. Denbaars, S. P. Gallium-nitride-based materials for blue to ultraviolet optoelectronics devices. *Proc. IEEE*. 85, 1997, Zv. 11.
6. Akasaki, I. GaN- Based p-n Junction Blue-Light-Emitting Devices. *Proc. IEEE*. 101, 2013, Zv. 10.
7. S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Nagahama, T. Yamada, T. Mukai. Superbright Green InGaN Single-Quantum-Well-Structure Light-Emitting Diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*. 34, 1995.
8. S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. M.-Sushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto. InGaN-Based Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*. 35, 1996, Zv. part 2, 1B.
9. Q. Chen, M. Asif Khan, J. W. Yang, C. J. Sun, M. S. Shur, H. Park. High transconductance heterostructure field-effect transistors based on AlGaIn/GaN. *Applied Physical Letters*. 69, 1996, Zv. 6.
10. M. Yanigihara, Y. Uemoto, T. Ueda, T. Tanaka, D. Ueda. Recent advances in GaN transistors for future emerging applications. *Physica Status Solidi*. 206, 2009, Zv. 6.
11. Baliga, B. J. Gallium nitride devices for power electronic applications. *Semiconductor Science Technology*. 28, 2013, Zv. 7.
12. T.P. Chow. High-voltage SiC and GaN power devices. *Microelectron. Engineering*. 83, 2006, Zv. 1.
13. R. Horng, S. Lin, Y. Tsai, M. Chu, W. Liao, M. Wu, R. Lin, Y. Lu. Improved Conversion Efficiency of GaN/InGaN Thin-Film Solar Cells. *IEEE Electron Device Letters*. 30, 2009, Zv. 7.
14. Y.-F. Wu, D. Kapolnek, J. P. Ibbetson, P. Parikh, B. P. Keller, U. K. Mishra. Very-high power density AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Trans. Electron Devices*. 48, 2001, Zv. 3.
15. T. Uesugi, T. Kachi. GaN Power Switching Devices for automotive Applications. *CS MANTECH*. Paper 2.1, 2009.
16. X. H. Wu, D. Kapolnek, E. J. Tarsa, B. Heying, S. Keller, B. P. Keller, U. K. Mishra, S. P. DenBaars, J. S. Speck. Nucleation layer evolution in metal-organic chemical vapor deposition grow GaN. *Applied Physical Letters*. 68, 1996, Zv. 10.
17. B. Heying, R. Averbeck, L. F. Chen, E. Haus, H. Riechert, J. S. Speck. Control of GaN surface morphologies using plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*. 88, 2000, Zv. 4.

18. C. Hemmingsson, G. Pozina. Optimalization of low temperature GaN buffer layers for halide vapor phase epitaxy growth of bulk GaN. *Journal of Cryst. Growth*. 366, 2013.
19. C. Hemmingsson, M. Boota, R. Rahmatalla, M. Junaid, G. Pozina, J. Brich, B. Monemar. Growth and characterization of thick GaN layers grown by halide vapour phase epitaxy on lattice-matched AlInN templates. *Journal of Cryst. Growth*. 311, 2009, Zv. 2.
20. C. Hemmingsson, P. P. Paskov, G. Pozina, M. Heuken, B. Schineller, B. Monemar. Growth of bulk GaN in a vertical hydride vapour phase epitaxy reactor. *Superlattices Microstruct.* 40, 2006, Zv. 4-6.
21. H. P. Maruska, J. J. Tietjen. The preparation and properties of vapor-deposited single crystalline GaN. *Applied Physical Letters*. 15, 1969, Zv. 10.
22. R. Madar, G. Jacob, J. Hallais, R. Fruchart. High pressure slution growth of GaN. *Journal of Cryst. Growth*. 31, 1975.
23. H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, Y. Toyoda. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer. *Applied physics letters*. 48, 1989, Zv. 353.
24. Porowski, S. High pressure growth of GaN - new prospects for blue lasers. *Journall of Cryst. Growth*. 166, 1996.
25. H. Yamane, M. Shimada, S. J. Clarke, F. J. Disalvo. Preparation of GaN Single Crystals Using a Na Flux. *Chemical Mater.* . 1896, 1997, Zv. 1.
26. Y. Mori, M. Imade, M. Maruyama, M. Yoshimura. Growth of GaN Crystals by Na Flux Method. *ECS Journal of Solid State Sci. Technol.* 2, 2013, Zv. 8.
27. B. Wang, M. J. Callahan. Ammonothermal Synthesis of III-nitride Crystals 2006. *Crystal Growth Des.* 6, 2006.
28. M. E. Levinshstein, S. L. Rumyantsev, M. S. Shur. *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN and SiGe*. New York : John Wiley & Sons, 2001.
29. M. Aoki, H. Yamane, M. Shimada, S. Sarayama. GaN single crystal growth using high-purity Na as a flux. *Journal of Cryst. Growth*. 242, 2002.
30. B. Jun, S. Subramanian. Carrier-removal rate and mobility degradation in heterojunction field-effect transistor structures. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 49, 2002, Zv. 6.
31. H. Kroemer. Heterostructure devices: A device physicist looks at interfaces. *Surface Science*. 132, 1983, Zv. 1-3.
32. T. Lei, M. Fanciulli, R. J. Molnar, T. D. Moustakas, R. J. Graham, J. Scanlon. Epitaxial growth of zinc blende and wurtzitic gallium nitride thin films on (001) silicon. *Applied Physical Letters*. 59, 1991, Zv. 8.
33. D. V. Lang, Deep level transient spectroscopy: A new method of characterize traps in semiconductors. *Journal of Applied Physics*. 45, 1974.
34. Ľ. Stuchlíková, a iní. *Electrical Characterization of Al_{0,19}Ga_{0,81}N/GaN Single-Quantum-Well-Structures*. APCOM 2009:Bystrá Žilinská univerzita, 2009.
35. M. Petrus, M, Stuchlíková, Ľ a Šebok, J. *Poruchy v GaN*. ŠVOČ 2010, Bratislava : Bratislava STU, 2010. 978-80-227-3286-4.
36. Petrus, M, Stuchlíková, Ľ a Šebok, J. *Identifikácia porúch v AlGaN/GaN*. ŠVOČ 2011, Bratislava : Bratislava STU, 2011. 978-80-227-3508-7.
37. Petrus, M a Stuchlíková, Ľ. *Diagnostika polovodičových materiálov metódou DLTFs*. ŠVOČ 2009, Bratislava : Bratislava STU, 2009. 978-80-227-3094-5.

38. Ľ. Stuchlíková, L. Harmatha, J. Rybár, J. Jakuš, J. Kováč, M. Nemeč, M. Petrus, B. Sciana, D. Radziejewicz, D. Pucicki, W. Dawidowski, M. Tlaczala, *Investigation of Emission and Capture Processes in Schottky and p-i-n Structures Based on InGaAsN/GaAs Heterostructure*. EDS 2013. Brno : Vysoké učení technické v Brne, 2013. 978-80-214-4754-7.
39. M. Petrus, Ľ. Stuchlíková, J. Rybár, P. Juhász, L. Harmatha, P. Benko, J. Kováč, M. Žiška, J. Šebok, B. Ściana, D. Pucicki, M. Tlaczala, D. Radziejewicz. *Deep Level Investigation on GaAsN Structures by DLTS Method*. APCOM 2012, Štrbské Pleso : Bratislava STU, 2012. 978-80-227-3720-3.
40. J. Rybár, Ľ. Stuchlíková, M. Petrus, L. Harmatha, B. Sciana, D. Radziejewicz, D. Pucicki, W. Dawidowski, M. Tlaczala, *Deep Levels in InGaAsN/GaAs and InGaAs/GaAs Heterojunctions..* ASDAM 2012 Smolenice : Piscataway, 2012. 978-1-4673-1195-3.
41. Ľ. Stuchlíková, J. Rybár, A. Kosa, M. Petrus, L. Harmatha, J. Kováč, B. Sciana, D. Pucicki, M. Tlaczala, D. Radziejewicz *Investigation of InGaAsN/GaAs Heterostructures by Capacitance Methods*. APCOM 2012. Štrbské Pleso : Bratislava STU, 2012. 978-80-227-3720-3.
42. Stuchlíková, Ľubica, a iní. Electrical Characterization of the AlInBv-N Heterostructures by Capacitance Methods. *Applied Surface Science*. 269, 2013, Zv. s 175-179.
43. *III – Nitride Semiconductors: Electrical, Structural and Defects Properties*. Manasreh, O. s.l. : Elsevier Science, 2000. ISBN: 0 444 50630 6.
44. D.W. Cardwell, a iní. Spatially- resolved spectroscopic measurements of Ec-0,57 eV traps in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *Applied Physics letters*. 102, 2013.
45. M. Petrus, Ľ. Stuchlíková, J. Šebok, L. Harmatha, J. Kováč, M. Nemeč, J. Škriniarová. *Study of electrical properties of AlGaIn/GaN structures by DLTS method*. Nový Smokovec : APCOM 2011, Žilinská univerzita, 2011. 978-80-554-0386-1.
46. Ľ. Stuchlíková, J. Šebok, J. Rybár, M. Petrus, M. Nemeč, L. Harmatha, J. Benkovská, J. Kováč, J. Škriniarová, T. Lalinský, B. Paszkiewicz, M. Tlaczala, *Investigation of Deep Energy Levels in Heterostructures based on GaIn by DLTS*. ASDAM 2010, Smolenice : Piscataway, 2010. 978-1-4244-8572-7.

Zoznam vlastných publikácií

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- 1.) STUHLÍKOVÁ, Ľubica - HARMATHA, Ladislav - PETRUS, Miroslav- RYBÁR, Jakub - ŠEBOK, Ján - SCIANA, Beata - RADZIEWICZ, Damian - PUCICKI, Damian - TLACZALA, Marek - KÓSA, Arpád - BENKO, Peter - KOVÁČ, Jaroslav - JUHÁSZ, Peter. Electrical Characterization of the AlInBv-N Heterostructures by Capacitance Methods. In Applied Surface Science. Vol. 269 (2013), s.175-179. ISSN 0169-4332.

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- 2.) 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.
- 3.) PETRUS, Miroslav- STUHLÍKOVÁ, Ľubica - HARMATHA, Ladislav. Deep Level Investigation on GaN Structures by DLTS Method. 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.338-342. ISBN 978-80-214-4539-0.
- 4.) STUHLÍKOVÁ, Ľubica - BENKOVSKÁ, Jana - BENKO, Peter - RYBÁR, Jakub - PETRUS, Miroslav- NEMEC, Michal - ŠEBOK, Ján - HARMATHA, Ladislav. Quality Criteria in Practice of Electronic Education. 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.
- 5.) STUHLÍKOVÁ, Ľubica - HARMATHA, Ladislav - RYBÁR, Jakub - JAKUŠ, Juraj - KOVÁČ, Jaroslav Jr. - NEMEC, Michal - PETRUS, Miroslav- SCIANA, Beata - RADZIEWICZ, Damian - PUCICKI, Damian - DAWIDOWSKI, Wojciech - TLACZALA, Marek. Investigation of Emission and Capture Processes in Schottky and p-i-n Structures Based on InGaAsN/GaAs 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.195-200. ISBN 978-80-214-4754-7.
- 6.) STUHLÍKOVÁ, 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 GaN 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.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- 7.) JUHÁSZ, Peter - PETRUS, Miroslav- STUHLÍKOVÁ, Ľubica. Identifikácia porúch v GaAsN štruktúrach spektroskopiou hlbokých hladín. In ŠVOČ 2012 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác, Bratislava, 25. apríl 2012. Bratislava : FEI STU, 2012, s.CD-ROM, s. 321-325. ISBN 978-80-227-3697-8.
- 8.) JUHÁSZ, Peter - WEIS, Martin - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - PETRUS, Miroslav- JAKABOVIČ, Ján - HARMATHA, Ladislav. Investigation of Emission Processes in Pentacene. 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.127-130. ISBN 978-80-554-0689-3.
- 9.) MAREK, Juraj - DONOVAL, Daniel - PETRUS, Miroslav- STUHLÍKOVÁ, Ľubica - CHVÁLA, Aleš - MOLNÁR, Marián - PRÍBYTNÝ, Patrik. Degradation of the Low Voltage Power MOSFET Electrical Parameters During Multipulse UIS Test. In ASDAM 2012 : The 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012. Piscataway : IEEE, 2012, s.183-186. ISBN 978-1-4673-1195-3.
- 10.) PETRUS, Miroslav- STUHLÍKOVÁ, Ľubica - RYBÁR, Jakub - JUHÁSZ, Peter - HARMATHA, Ladislav - BENKO, Peter - KOVÁČ, Jaroslav - ŽIŠKA, Milan - ŠEBOK, Ján - ŠCIANA, Beata - PUCICKI, Damian - TLACZALA, Marek - RADZIEWICZ, Damian. Deep Level Investigation on GaAsN Structures by DLTS Method. In APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. 1. vyd. Bratislava : STU v Bratislave, 2012, s.353-356. ISBN 978-80-227-3720-3.
- 11.) PETRUS, Miroslav- STUHLÍKOVÁ, Ľubica. Diagnostika kvality polovodičových materiálov metódou DLTS. 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.
- 12.) PETRUS, Miroslav- STUHLÍKOVÁ, Ľubica - ŠEBOK, Ján. Poruchy v GaN. In ŠVOČ 2010 : Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 21.4.2010. Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2010, s.CD-Rom. ISBN 978-80-227-3286-4.
- 13.) PETRUS, Miroslav- STUHLÍKOVÁ, Ľubica - ŠEBOK, Ján. Identifikácia porúch v AlGaIn/GaN. In ŠVOČ 2011 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011. Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2011, s.453-456. ISBN 978-80-227-3508-7.
- 14.) PETRUS, Miroslav- STUHLÍKOVÁ, Ľubica - ŠEBOK, Ján - HARMATHA, Ladislav - KOVÁČ, Jaroslav - NEMEC, Michal - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava. Study of Electrical Properties of AlGaIn/GaN Structures by DLTS Method. 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.135-138. ISBN 978-80-554-0386-1.

- 15.) PETRUS, Miroslav- STUHLÍKOVÁ, Ľubica - RYBÁR, Jakub. Solar Cells in Engineering Education. 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.285-286. ISBN 978-80-89402-48-9.
- 16.) RYBÁR, Jakub - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - PETRUS, Miroslav- HARMATHA, Ladislav - SCIANA, Beata - RADZIEWICZ, Damian - PUCICKI, Damian - TLACZALA, Marek. Deep Levels in InGaAsN/GaAs and InGaAs/GaAs Heterojunctions. In ASDAM 2012 : The 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012. Piscataway : IEEE, 2012, s.103-106. ISBN 978-1-4673-1195-3.
- 17.) 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.
- 18.) 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.
- 19.) 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.
- 20.) STUHLÍKOVÁ, Ľubica - BENKOVSKÁ, Jana - STUHLÍK, 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.
- 21.) STUHLÍKOVÁ, 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.

- 22.) STUHLÍKOVÁ, Ľubica - RYBÁR, Jakub - KÓSA, Arpád - PETRUS, Miroslav- HARMATHA, Ladislav - ŠCIANA, Beata - PUCICKI, Damian - TLACZALA, Marek - RADZIEWICZ, Damian. Investigation of InGaAsN/GaAs Heterostructures by Capacitance Methods. In APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. 1. vyd. Bratislava : STU v Bratislave, 2012, s.357-360. ISBN 978-80-227-3720-3.
- 23.) ŠEBOK, Ján - PETRUS, Miroslav- STUHLÍKOVÁ, 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.
- 24.) ŠEBOK, Ján - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - PECHÁČEK, Juraj - PÍSEČNÝ, Pavol - PETRUS, Miroslav- KOVÁČ, Jaroslav - NEMEC, Michal - HARMATHA, Ladislav - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava. Study of Electrical Properties of AlGaIn/GaN Structures by Capacitance Method. 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.139-142. ISBN 978-80-554-0386-1.

Abstrakty príspevkov zo zahraničných konferencií

- 25.) STUHLÍKOVÁ, Ľubica - HARMATHA, Ladislav - PETRUS, Miroslav- RYBÁR, Jakub - ŠEBOK, Ján - KÓSA, Karol - BENKO, Peter - KOVÁČ, Jaroslav - JUHÁSZ, Peter. Electrical Characterization of AlInBv-N Heterostructures by Capacitance Methods. In SURFINT - SREN III : Progress in Applied Surface, Interface and Thin Film Science 2012. Florence, Italy, May 14-18, 2012. Bratislava : Comenius University, 2012, s.180-181. ISBN 978-80-223-3212-5.

Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- 26.) STUHLÍKOVÁ, 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.

Citácie: 12 citácií 4 článkov z toho 7 citácií SCOPUS

Meno autora: Ing. Miroslav Petrus

Názov práce: “ SKÚMANIE ELEKTROFYZIKÁLNYCH VLASTNOSTÍ POLOVODIČOVÝCH
MATERIÁLOV A PRVKOV SPEKTROSKOPIOU HLBOKÝCH HLADÍN ”

Náklad: 12 ks

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

Termín vytlačenia: 2016