

Ing. Juraj PECHÁČEK

**Elektrická charakterizácia Schottkyho štruktúr s heteropriechodom
AlGaN/GaN**

**Electrical characterisation of Schottky contacts
on the AlGaN/GaN heterostructures**

autoreferát k dizertačnej práci

k obhajobe a získaniu akademického titulu
„Philosophiae Doctor“



v študijnom programe:

mikroelektronika

v študijnom odbore:

5.2.13 elektronika

Bratislava
február 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre mikroelektroniky (dnes Ústav elektroniky a fotoniky) FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Juraj PECHÁČEK

Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

Ústav elektroniky a fotoniky

Ilkovičova 3

812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Ladislav HARMATHA, Ph.D.

Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave

Oponenti: prof. Ing. Peter BALLO, Ph.D.

doc. Ing. Vladimír ÁČ, CSc.

Autoreferát bol rozposlaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa: o h.
pred odborovou komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktoranského štúdia
vymenovanou predsedom odborovej komisie v odbore 5.2.13 elektronika, študijnom
programe mikroelektronika, v zasadacej miestnosti dekana Fakulty elektrotechniky
a informatiky STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava.

doc. RNDr. Gabriel JUHÁS, Ph.D.

dekan FEI STU

v.r.

prof. Ing. Daniel DONOVAL, Dr.Sc.

riaditeľ ÚEF a predseda odb. komisie

v.r.

Obsah

Úvod	3
Ciele dizertačnej práce.....	4
1 Materiály na báze nitridu gália	5
1.1 Vývoj GaN technológie – historická review	5
2 Súhrn a analýza experimentálnych výsledkov	8
2.1 Analyzované štruktúry a vzorky	8
2.1.1 H1441.....	8
2.1.2 SG039-5C.....	9
2.1.3 Masky	10
2.1.4 Energetický pásmový diagram	11
2.1.5 Simulačná analýza	12
2.2 CVT charakterizácia.....	12
2.3 CVf charakterizácia.....	14
2.4 Koncentračný profil a určenie $n_{2\text{DEG}}$	15
2.5 IVT charakterizácia.....	17
2.6 Spektroskopia hlbokých hladín – DLTS	23
2.6.1 Hlboké hladiny identifikované v štruktúre H1441.....	23
2.6.2 Hlboké hladiny identifikované v štruktúre SG039-5C.....	26
Záver	27
Bibliografia.....	29
Publikačná činnosť autora.....	31

Úvod

V prácach tohto typu sa zvyčajne objavujú kapitoly týkajúce sa analýzy súčasného stavu výskumu v danej problematike. Táto práca sa naopak zaobera iba sčasti historickými aspektmi, nakoľko problematika výskumu nitridu galitého i heteroštruktúr ako AlGaN/GaN či InAlN/GaN je relatívne mladá a dlhoročný výskum je, napriek značnému pokroku, v porovnaní so znalostami kremíka len na začiatku. Analýzou súčasného stavu sú tak de-facto kapitoly sumarizujúce výsledky výskumu vybraných vzoriek.

Frekvenčné i výkonové nároky aplikácií nútia vedeckú obec skúmať a vyuvíjať materiály spĺňajúce tieto požiadavky uspokojujúce nároky konečného spotrebiteľa. Takýto výskum a vývoj je podporovaný meraniami charakteristických vlastností a parametrov materiálov a súčiastok so zámerom určiť vplyv samotných materiálov i jednotlivých častí technologických procesov na parametre týchto prvkov a späťne procesy vo výrobe optimalizovať. Ide o náročný proces, na začiatku ktorého stojí meranie. Determinácia fyzikálneho modelu mechanizmov, ktoré ovplyvňujú vlastnosti materiálu, je v prípade elektrickej charakterizácie pomocou CV či IV analýzy zložitý proces. Odhalené procesy a javy pritom z neho môžu urobiť materiál pre výrobný proces ideálny alebo absolútne nevhodný.

Prvým cieľom tejto práce je stanoviť a porovnať charakteristické parametre vzoriek heteroštruktúr AlGaN/GaN od dvoch výrobcov (CREE® a Technická univerzita Wrocław) pomocou CV a IV analýzy Schottkyho kontaktu a identifikovať vplyv vonkajších i vnútorných javov na ich vlastnosti.

Napísanie teoretickej časti dizertačnej práce ako aj samotný výskum si obvykle vyžadujú preštudovanie značného množstva literatúry a odborných článkov, preto mojím druhým cieľom bolo zhromaždiť informácie týkajúce sa nitridu gália a na ňom vyrobených štruktúr i základných princípov a metodiky výskumu a interpretácie výsledkov v čo najprehľadnejšej forme a poskytnúť tak ďalším študentom solídný základ pre ďalšie štúdium a ušetriť im tak drahocenný čas, ktorý môžu venovať štúdiu denne pribúdajúcich nových informácií, ale najmä samotnej výskumnej činnosti.

Ciele dizertačnej práce

Na základe analýzy súčasného stavu technológie a vývoja prvkov na báze alternatívneho polovodičového materiálu GaN boli stanovené nasledovné ciele pre dizertačnú prácu:

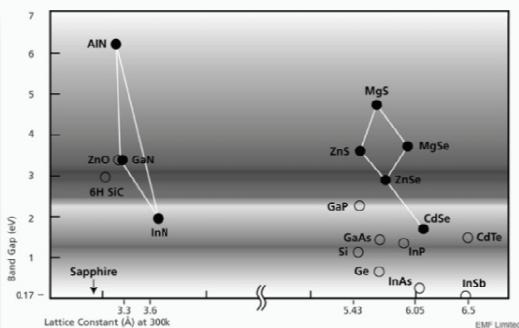
- ✓ oboznámiť sa so súčasným stavom problematiky identifikácie porúch metódou spektroskopie hlbokých hladín;
- ✓ klasifikovať poruchy v polovodičových materiáloch a štruktúrach so zameraním na GaN;
- ✓ popísat vlastnosti kontaktu kov-polovodič v súvislosti s existenciou heteropriechodu a metodiky merania a vyhodnocovania charakteristických parametrov;
- ✓ vytvoriť technické podmienky a metodiku merania prúdových a kapacitných charakteristik Schottkyho štruktúr na báze GaN;
- ✓ pomocou kapacitnej charakterizácie určiť polohu kvantovej jamy vybraných vzoriek a hodnoty koncentrácie 2DEG u oboch typov vzoriek;
- ✓ analyzovať vplyv frekvencie meracieho signálu na tvar CV charakteristik;
- ✓ s využitím IV meraní stanoviť hodnoty elektrických parametrov Schottkyho kontaktov na daných vzorkách;
- ✓ definovať procesy podielajúce sa na vedení prúdu kontaktom;
- ✓ zhrnúť najnovšie výsledky výskumu hlbokých hladín v heteroštruktúre AlGaN/GaN pomocou DLTS aplikovanej na Schottkyho kontaktoch predložených vzoriek;

1 Materiály na báze nitridu gália

V ostatných desaťročiach exponenciálne vzrástol výskum v oblasti nitridu gália (GaN) aj jemu príbuzných širokopásmových polovodičových materiálov (AlN, InN a pod.). Polovodiče zo skupiny označovej ako „III-nitrid“ sa stali tak hlavným materiálom pri výrobe elektroluminiscenčných a laserových diód ako aj perspektívnym materiálom v produkcií elektronických prvkov pre vysoko výkonové, či vysoko teplotné aplikácie. Úspešný vývoj vysoko svietivej LED na báze InGaN znamenal v podstate revolúciu v LED technológiách, ktorá otvorila široké, doposiaľ nepoznané možnosti ďalšieho rozvoja v komerčnej i vojenskej oblasti.

1.1 Vývoj GaN technológie – historická review

Šírka zakázaného pásma polovodičov na báze nitridu sa pohybuje v rozmedzí od 1,9eV (InN) až po 6,2eV(AlN). (1) Toto dáva skupine III-nitridov unikátne optické a elektrické vlastnosti, diametralne odlišné od tradičných polovodičov (Si, GaAs, InP). Predurčujú ich k využitiu v rámci širokého spektra optických, výkonových, vysokofrekvenčných a vysokoteplotných aplikácií. V rámci tejto práce sa budeme venovať tiež osobitnej III-nitrid zlúčenine $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ a vlastnostiam štruktúry, ktorú AlGaN tvorí dovedna s nitridom gália.



Obr. 1.1: Šírky zakázaného pásma a mriežkové konštanty III-nitrid polovodičov a ďalších technologicky dôležitých polovodičov a ich zlúčenín. (1)

Od chvíle, keď bola po prvýkrát predstavená elektroluminiscenčná dióda na báze GaN(2) a popísaná stimulovaná emisia v GaN v dôsledku optického budenia (3) v roku 1971, sústredila sa pozornosť výskumu najmä na optoelektronické aplikácie v spektri vlnových dĺžok od zelenej farby až po UV žiarenie. Akýkoľvek ďalší progres vo výskume bol v porovnaní s rýchlosťou vývoja polovodičov skupiny III-V brzdený absenciou vhodných substrátov. Kým pre konvenčné homogénne i heterogénne polovodiče existuje pomerne značné množstvo substrátov

umožňujúcich homogénny epitaxný rast, pre GaN tátó podmienka splnená pomerne dlho nebola. Výrobe použiteľných GaN substrátov s väčšou plochou bolo obetované značné úsilie, avšak ani využitie rastu pod vysokým tlakom neprinieslo žiaduci výsledok a rozmery rastených kryštálov boli pre praktické aplikácie stále nedostatočné. Napriek snahe získať GaN substrát dostatočných rozmerov a zároveň zlepšiť dovtedy skôr mizernú kvalitu kryštalickej štruktúry ako aj kontrolovať jeho hrúbku a vodivosť, trvalo pomerne dlhú dobu, kým Kawabata (4) narástol novú LED štruktúru na báze GaN. Využil pri tom metódu rastu označovanú MOVPE resp. MOCVD, prvýkrát predstavenú Manasevitom koncom roku 1960 (5), pričom využil trietylglálium (TEGa) a amoniak (NH_3) ako zdrojové plyny pre rast GaN na zafírovom a SiC substráte. Navzdory zavedeniu novej rastovej technológie boli mechanické a elektrické vlastnosti rastenej vrstvy limitované slabou kvalitou kryštálu, najmä obsahom dusíkových vakancií, ktoré mali veľký vplyv na koncentráciu voľných nosičov náboja, čím GaN získal automaticky charakter n-typu polovodiča. Ovplyvňovanie vodivosti materiálu tak bolo potom prakticky nemožné.

Problémy viažuce sa na heteroepitaxný rast GaN boli po prvýkrát prekonané Akasakim a Amanom v roku 1986 (6). V tzv. *two-flow* metóde rastu využili na rast GaN vrstvy tenkú základnú vrstvu AlN, nadeponovanú na zafírovom substráte pri nízkej teplote (ďalej LT vrstva). Aj keď neskôr ako medziľahlú LT vrstvu využil Nakamura (7) samotný GaN, použitie tejto tzv. nukleačnej vrstvy ako základného materiálu pre následný rast GaN fakticky významne zvýšilo kryštalickú kvalitu rasteného bulkového materiálu a dokázaťne znížilo koncentráciu parazitných dopantov (8).

V osemdesiatych rokoch dvadsiateho storočia bola dosiahnutá vodivosť typu N dopovaním kremíkom (9), získanie p-typu vodivosti bolo však náročnejšie. Dopovanie zinkom (Zn) bolo pomerne náročné (10), na druhej strane, aj keď naviazanie horčíku (Mg) bolo relatívne jednoduché (11), väčšina atómov tohto dopantu bola spočiatku elektricky neaktívna. Tieto komplikácie boli o niečo neskôr odstránené aktiváciou ožiarením elektrónovým zväzkom s nízkou energiou elektrónov LEEBI (12). Dnes je táto aktivácia realizovaná skôr teplotným žíhaním v dusíkovej atmosfére (7).

Prototyp modrej a zelenej LED na báze III-nitrid polovodiča ako aj prototyp fialovej laserovej diódy vyvinul prof. Nakamura v rozmedzí rokov 1993-1995 (13). Zavedenie spomínaných technológií využívajúcich LT vrstvy umožnilo masovú výrobu a komercializáciu LED (14) ako aj laserových diód (LD) (15). Zakiaľ v LED aplikáciách GaN štruktúr je vyššia koncentrácia porúch (dislokácií) tolerovateľná (typicky v rozmedzí $10^8 - 10^{10} \text{ cm}^{-2}$), pre dosiahnutie vyššej životnosti LD aplikácií musela byť hodnota ich koncentrácie znížená na minimum, čomu významne pomohla metóda ELO, pomocou ktorej sa koncentrácia dislokácií vo vrstvách rastených metódou MOVPE znížila pod úroveň 10^7 cm^{-2} (16). Účinnosť tejto technológie potvrdil Nakamura (17), keď úspešne ukončil vývoj modrej laserovej diódy so životnosťou viac ako 10000 hodín.

Súčasný vývoj ešte stále najpoužívanejšieho polovodičového materiálu – kremíka (Si), dosahuje svoje limity vo viacerých smeroch. Kremík, napriek veľkému množstvu svojich nesporných výhod, prestáva splňať predovšetkým výkonové nároky mnohých zariadení. Tieto si vyžadujú vyššie pracovné záverné a prierazné napäťa, pracovné frekvencie a prevádzkové teploty. Práve z tohto dôvodu bol nevyhnutný vývoj nových materiálov, ktoré by tieto požiadavky splňali. Výskum a vývoj materiálov na báze zlúčení nitridu reprezentuje bezpochyby jeden z najdôležitejších medzníkov vo vývoji polovodičových materiálov za posledných štyridsať rokov. Postupne dosiahnutá kvalita materiálov umožnila paralelné využitie nitridu gália vo vývoji a výrobe súčiastok a komponentov pre výkonové, vysokofrekvenčné a vysokoteplotné aplikácie. Jedným z takýchto je práve nitrid gália – GaN.

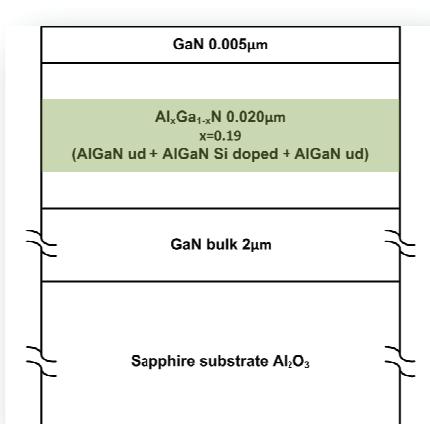
2 Súhrn a analýza experimentálnych výsledkov

Predmetom výskumu a podkladom k tejto práci je elektrická charakterizácia a analýza vlastností a parametrov heteroštruktúry AlGaN/GaN so Schottkyho kontaktom. Teoretická časť poskytuje relatívne široký pohľad na problematiku od úvodných definícií štrukturálnych porúch a materiálových parametrov nitridu gália cez popis fyzikálnych vlastností heteroštruktúry AlGaN/GaN a Schottkyho kontaktu, až po definície jeho základných prúdových či kapacitných vlastností. Nakol'ko predmetom tejto práce je okrem teoreticky popísaných dejov a charakterizácie hlbokých hladín aj analýza ich prítomnosti a vplyvu, uzatvára teoretickú časť práce teória hlbokých hladín a ich spektroskopie.

2.1 Analyzované štruktúry a vzorky

2.1.1 H1441

Vrstvy GaN analyzované v tejto práci boli pripravené nanášaním organokovových zlúčenín na zafírovom substráte.



Obr. 2.1: Štruktúra vzorky H1441 - Wrocław.

Štruktúra H1441 vyrobená na Fakulte mikrosystémovej elektroniky a fotoniky na Technickej univerzite Wrocław v roku 2009 pozostáva z $2\mu\text{m}$ hrubej bufferovej vrstvy GaN, na ktorú nadväzuje 20-22nm hrubá bariérová vrstva a 5nm hrubá vrchná krycia vrstva GaN (*cap layer*).

Bariérová vrstva $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ je zložená z troch úrovní AlGaN, z ktorých iba stredná je dopovaná hliníkom, vonkajšie vrstvy sú nedopované. Molový podiel (*mol fraction*) je v celej vrstve $x=0,19$. Schottkyho kontakty boli vytvorené štandardnou lift-off technológiou a ohmické kontakty naparením Nb/Ti/Al/Ni/Au.

Predbežné merania 2DEG, ktoré boli realizované ešte na univerzite vo Wrocławi, uvádzajú pohyblivosť elektrónov $1700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ a plošnú koncentráciu $6.10^{12} \text{ cm}^{-2}$ pri izbovej teplote.

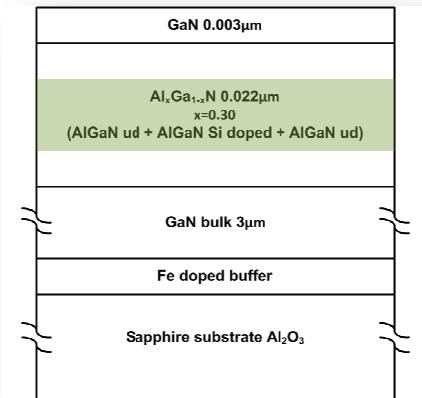
Po vytvorení kontaktov bola doska rozdelená na tri časti (I, II a III), ktoré boli ďalej podrobene následnému spracovaniu:

- ✓ H1441-I : žíhanie v N_2 pri teplote 430°C
- ✓ H1441-II : nežíhaná vzorka
- ✓ H1441-III : RTP žíhanie – 35s. pri teplote 400°C

2.1.2 SG039-5C

Vzorky s označením SG039 boli zakúpené od firmy CREE®, Inc. Pôvodná doska bola rozdelená na viac kusov (5B, 5C, 6B, 6C), ktoré sa líšili

aplikovaným postupom pri úprave povrchu pred depozíciou Schottkyho kontaktov. Na rozdiel od poľskej dosky obsahuje bulkový materiál SG039-5C bufferovú vrstvu dopovanú železom vo svojej spodnej časti. Sendvičová štruktúra, podobná ako v prípade vzorky H1441, pozostáva z troch vrstiev: nedopowanej $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ vrstvy hrúbky 6nm, kremíkom dopovanej vrstvy $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ s hrúbkou 8nm a opäť nedopowanej vrstvy $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ hrúbky 8nm (obr. 2.2). Koncentráciu dopantov v strednej vrstve udáva výrobca v hodnote $1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $n_{2\text{DEG}}=6.10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Molový podiel hliníka je $x=0,3$.

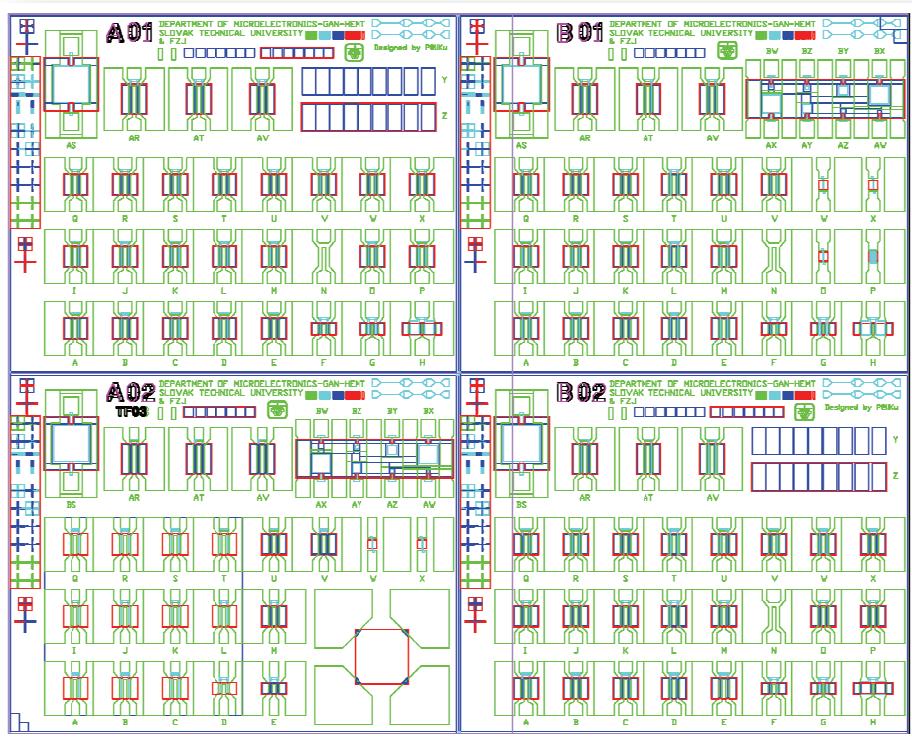


Obr. 2.2: Štruktúra vzorky SG039-5C – CREE®.

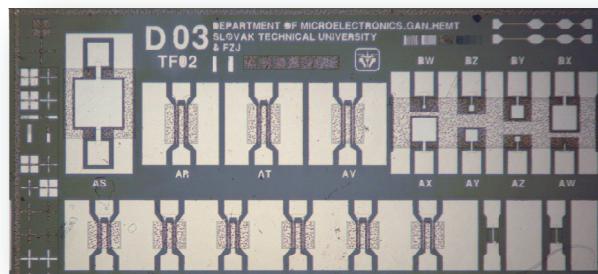
Pri všetkých vzorkách SG039 boli ohmické kontakty naparené EBE z kombinácie zložiek Nb-Ti-Al-Ni-Au. Podiely jednotlivých zložiek boli: Nb (20nm) / Ti (20 nm) / Al (100 nm) / Ni (40 nm) / Au (50 nm). Odpor kontaktu poklesol po žíhaní v dusíkovej inertnej atmosfére pri teplote 850°C počas 35s pod hodnotu $3.10^6 \Omega\text{cm}^2$. Schottkyho kontakt resp. hradlová úroveň boli vytvorené kombináciou Ni(40nm)/Au(130nm). Expandovaný kontakt tvorila kombinácia Ti(30nm)/Au(120nm).

2.1.3 Masky

Schottkyho hradlá boli tvarované maskami, ktoré umožnili okrem samotných Schottkyho kontaktov aj meranie MOS tranzistorov či Hallovské merania. Celá maska je znázornená na Obr. 2.3. Vyobrazený motív sa na doske cyklicky opakuje vo vodorovnom i zvislom smere, pričom číslovanie pokračuje až do hodnoty D06.



Obr. 2.3: Masky použité pre tvorbu štruktúr na doskách H1441 a SG039.



Obr. 2.4: Výrez masky so Schottkyho štruktúrami. (SEM)

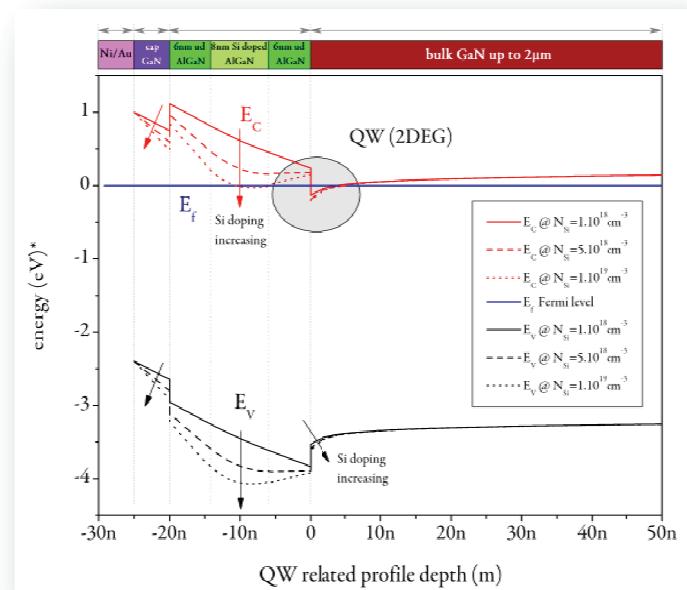
Výrez obsahujúci štruktúry so Schottkyho kontaktom je na Obr. 2.4. V samotných analýzach boli využité plochy $100 \times 100 \mu\text{m}$ a $200 \times 200 \mu\text{m}$. Podrobná špecifikácia je uvedená v Tabuľka 2.1 na nasledujúcej strane.

Tabuľka 2.1: Lokalizácia meraných vzoriek a klasifikácia plôch.

označenie vzorky	wafer	maska	plocha	rozmer	obsah
JPA	H1441-I	D06	BS	200x200µm	4.10^{-8} m^2
JPB	H1441-II	A06	BX	100x100µm	1.10^{-8} m^2
JPC	H1441-III	A04	BS	200x200µm	4.10^{-8} m^2
JPD	SG039-5C	C02	AX	100x100µm	1.10^{-8} m^2
JPE	SG039-5C	C02	BS	200x200µm	4.10^{-8} m^2

2.1.4 Energetický pásmový diagram

Model pásmového diagramu (Obr. 2.5) bol vytvorený editorom MDRAW simulačného systému Synopsys® TCAD¹. Rozmery jednotlivých vrstiev, predovšetkým však ich hrúbky, boli stanovené tak, aby zodpovedali experimentálnym vzorkám. Následne boli podrobne zadefinované koncentračné profily, vrátene vrstvy AlGaN dopovanej kremíkom. Pomocou programu Mesh bola vymedzená mriežka rozdeľujúca štruktúru na končený počet oblastí resp. prvkov, čo dovolí programu Dessis riešiť parciálne diferenciálne rovnice numerickými metódami. Aby bola zaručená konvergencia numerického riešenia, hustota mriežky je 10 až 100 násobne vyššia v oblasti s väčším gradientom danej veličiny (el. pole, prúd, koncentrácia prímesí), v našom prípade v oblasti kvantovej jamy v okolí $x=0$. Elektrofyzikálne vlastnosti štruktúry boli analyzované nástrojom SDEVICE⁷. Pre simuláciu pásmového diagramu bez pripojených napäti na kontaktoch postačuje evaluácia s využitím Poissonovej rovnice.

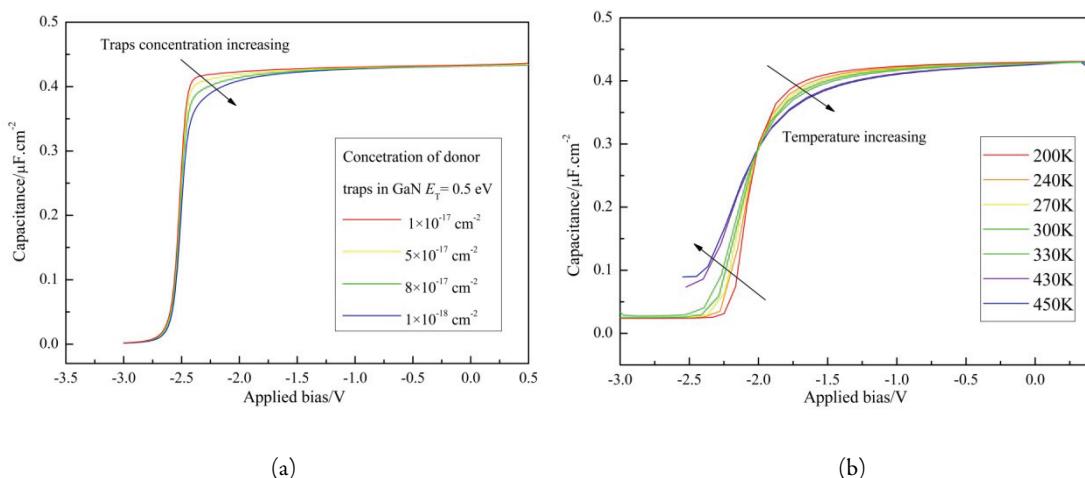


Obr. 2.5: Energetický pásmový diagram štruktúry H1441 odsimulovaný v programe DESiS pre rôzne koncentrácie kremíka v dopovanej vrstve AlGaN.

¹ <http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/DeviceSimulation/Pages/default.aspx>

2.1.5 Simulačná analýza

Aj napriek tomu, že hydrodynamický (HD) model je zvyčajne uvažovaný u silných a nehomogénnych polí vyskytujúcich sa najmä v HEMT, bol tento model použitý aj v tomto prípade, nakoľko bol nutné simulovať vytvorenie 2DEG pomocou vplyvu polí s vysokou intenzitou. Navyše, HD model (klúčový v riešení AC a transientných charakteristik) bolo potrebné využiť aj z dôvodu simulácie prítomnosti hlbokých hladín. Simulácie boli realizované pre *single-level* pascu donorového typu s aktivačnou energiou $E_T = E_V - 0,5\text{ eV}$. Výsledky simulácií CV kriviek pre variabilnú hodnotu plošnej koncentrácie donorových pascí resp. teplotu štruktúry sú znázornené na obrázku 9.12 (a) resp. (b). (18)



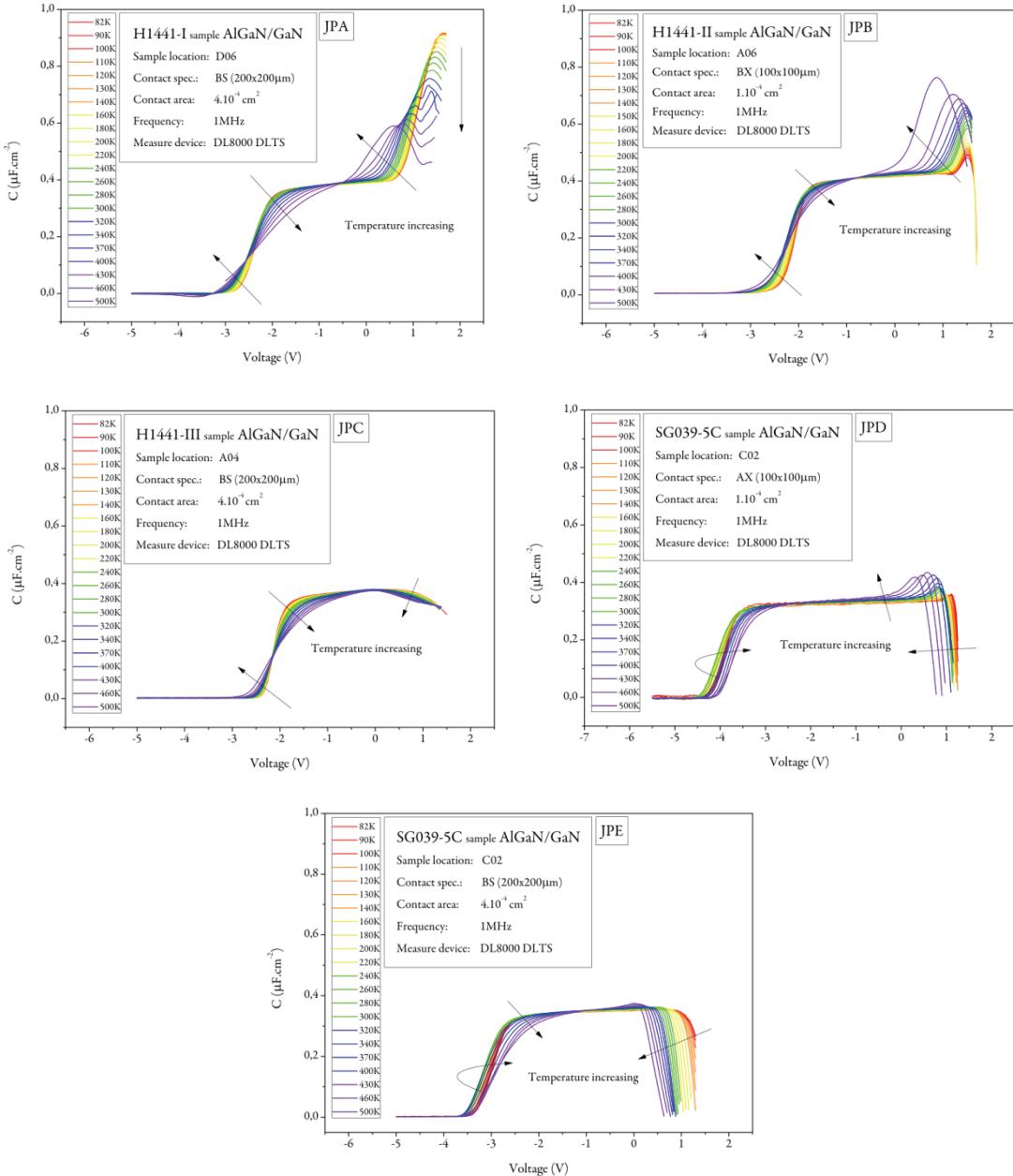
Obr. 2.6: Simulačná analýza vplyvu (a) koncentrácie pasce donorového typu v GaN a (b) teploty na CV krivky štruktúry H1441.

Zo simulácií² je zrejmý dominantný vplyv teploty na sklon CV krivky, hoci pre napäcia blízke *pinch-off* majú zásadný vplyv na tvar kriviek procesy tunelovania. Aplikácia procesov priameho a nepriameho (*trap-assisted*) tunelovania pri simulácii vplyvu hlbokých hladín viedla ku komplikáciám v konvergenciu evaluácie.

2.2 CVT charakterizácia

Na Obr. 2.7 sú znázornené CV charakteristiky Schottkyho kontaktov na meraných štruktúrach.

² Uvádzané výsledky budú publikované v: Harmatha, L., Pecháček, J., Stuchlíková, L., Marek, J., Breza, J., Racko, J., Capacitance characterization of Schottky diodes based on AlGaN/GaN heterostructure, *Microelectronics Journal*, 2013.



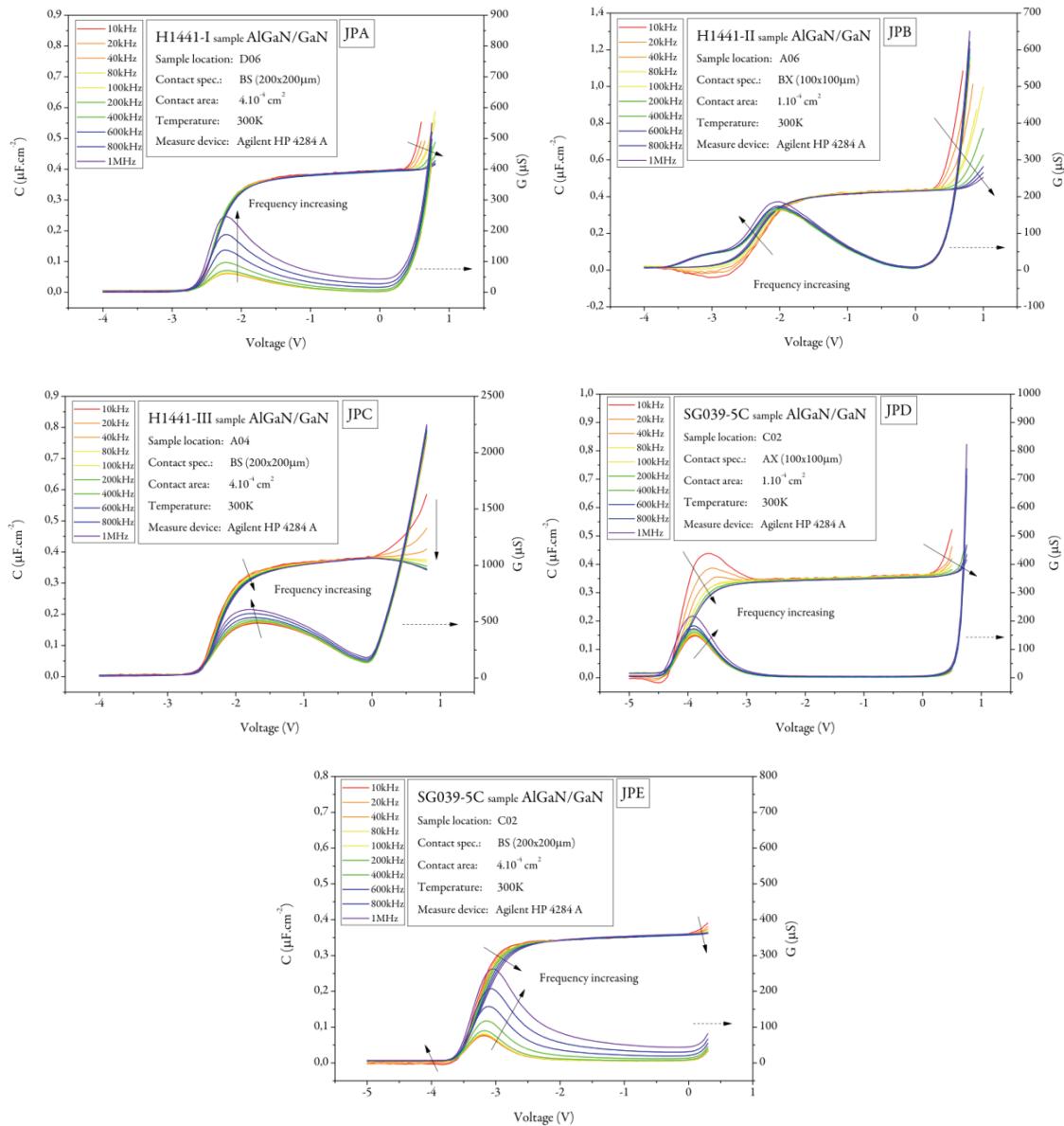
Obr. 2.7: Teplotné CV krivky namerané prúdovým modulom DL8000 DLTS na vzorkách JPA-JPE (H1441 a SG039-5C).

Strmý pokles zaznamenaný u všetkých vzoriek v rozmedzí napäť 2,0-4,5V je daný podľa (19) posunom vlnových funkcií elektrónov v kvantovej jame QW, resp. jej vyprázdenením. Napätie, pri ktorom dochádza k poklesu v CV krivke implikuje polohu QW, a hodnota kapacity v oblasti plateau nepriamo udáva koncentráciu voľných nosičov v tejto jame. Pri porovnaní vzoriek H1441 a SG039-5C je viditeľný rozdiel v charaktere zmeny závislosti od teploty. Podľa fyzikálneho modelu, ktorý uvádzajú Osvald vo svojej práci (19), je zmena v strmosti v tejto časti charakteristiky spôsobená prítomnosťou hlbokých hladín v bulkovom GaN. Nakol'ko pozorujeme zmeny v strnosti v závislosti od teploty, dá sa predpokladať lokalizovanie hlbokých

hladín v objeme GaN pri DLTS analýze. Realizované výskumy (20) (21) tieto väzby medzi posunom a existenciou stavov rozhrania vysvetľujú zmenou pozície Fermiho hladiny na rozhraní. Uvedené súvislosti dokladá Osvald v (19) simuláciami stavov rozhrania a hlbokých hladín donorového typu.

2.3 CVf charakterizácia

Hypotézu existencie hlbokých hladín vychádzajúcu zo zmeny strmosti teplotných CV kriviek je možné doložiť frekvenčnými CV charakteristikami, hoci potvrdiť ich môže až meranie DLTS. Na Obr. 2.8 sú vynesené CV a GV frekvenčné závislosti namerané na jednotlivých vzorkách.



Obr. 2.8: Frekvenčné CV a GV krivky namerané pomocou Agilent HP 8242A na vzorkách JPA-JPE (H1441 a SG039-5C).

Z uvedených meraní je evidentná značná rezistentnosť v oblasti strmého poklesu daných priebehov voči meniacej sa meracej frekvencii, a tak je možné usúdiť, že odozva pascí na merací signál (10kHz – 1MHz; 30mV) je nepatrňa. Existujú predpoklady, že lokálny nárast CV krivky aký sa objavuje u vzorky JPD ako aj záporná kapacita nameraná u vzoriek JPB a JPD po stranách poklesu kriviek, sú spôsobené prítomnosťou hlbokých hladín. Nakol'ko sa prekmit CV krivky vyskytuje iba pri vzorke JPD, a nie pri JPE, dá sa vzhľadom na lokáciu vzoriek predpokladat značná nehomogenita porúch na doske. Okrem toho poloha lokálnych extrémov v CV priebehoch potvrdzuje sentencie, podľa ktorých sa pasce alebo štrukturálne poruchy s charakterom pascí vyskytujú a prejavujú práve v podpovrchových vrstvach príahlých k rozhraniu AlGaN/GaN.

2.4 Koncentračný profil a určenie $n_{2\text{DEG}}$

Na určenie koncentračného profilu sa využívajú vysokofrekvenčné C-V merania záverným napäťom V_a polarizovaného Schottkyho kontaktu s plochou A s využitím vzťahov:

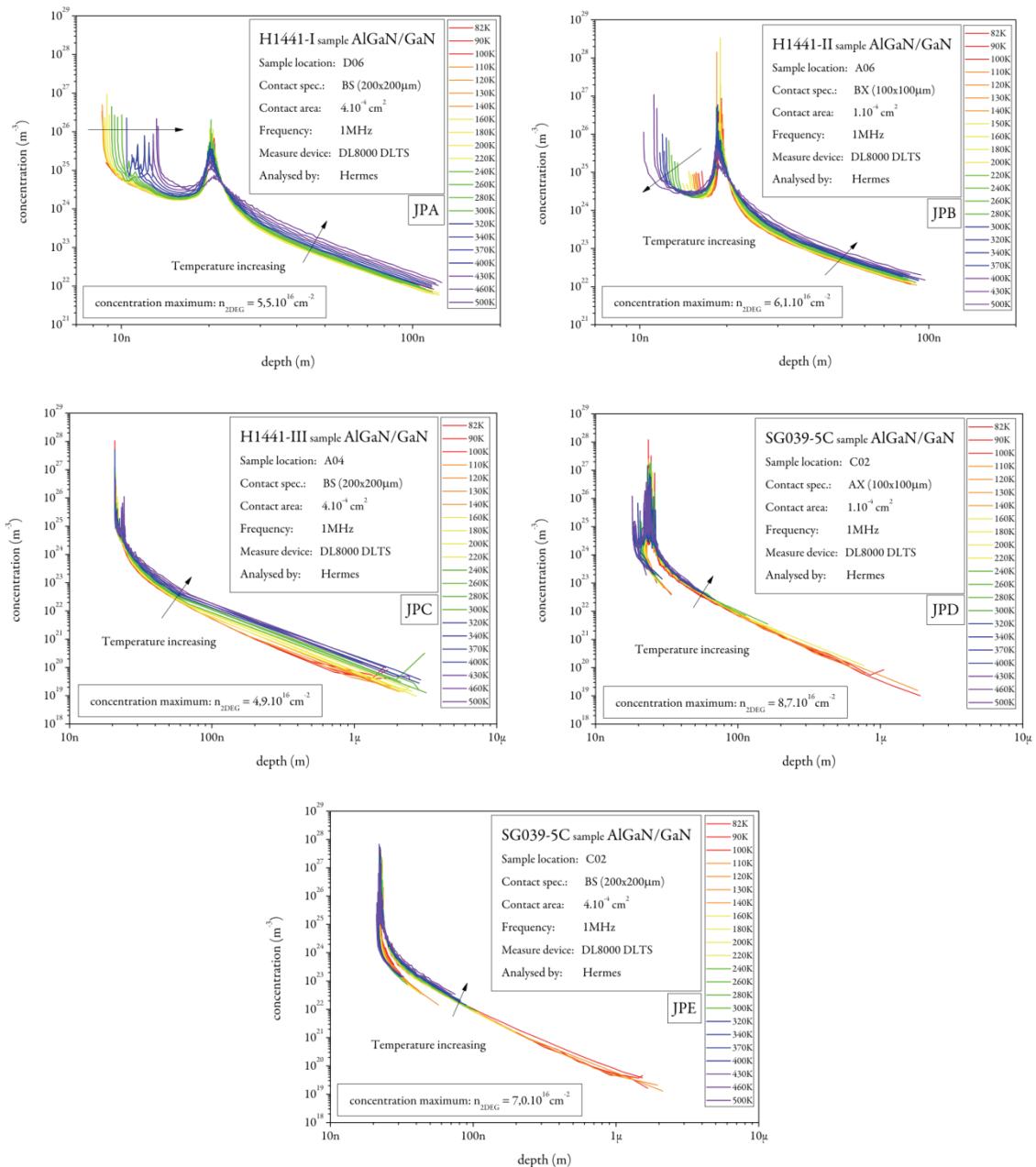
$$n(x) = n(V_a) = \frac{2}{q\epsilon_{sc}} \left| \frac{dC_{(1)}^{-2}}{dV_a} \right|^{-1} = \frac{C^3}{q\epsilon_{sc} A^2} \left| \frac{dC}{dV_a} \right|^{-1} \quad (1)$$

$$x = \frac{\epsilon_{sc}}{C_{(1)}} = \frac{\epsilon_{sc}}{C} A \quad (2)$$

... kde $C_{(1)}$ je kapacita na jednotku plochy. Uvedené rovnice boli odvodené za podmienok úplnej ionizácie prímesí v OPN, strmého priechodu, approximácie úplného ochudobnenia a modelu rovinného kondenzátora. Nakol'ko predmetom výskumu je určenie koncentrácie voľných nosičov náboja v QW, hľadanou je plošná, nie objemová hustota nosičov. Vychádzajúc z predpokladu (22), že plateau závernej CV charakteristiky definuje plošnú hustotu 2DEG v kvantovej jame vytvorenjej na rozhraní AlGaN/GaN, pre určenie hľadanej hodnoty $n_{2D}(x)$ podľa (23) platí:

$$n_{2D} = \int_0^{V_R} \frac{C(V)}{qA} dV = \frac{1}{qA} \int_0^{V_R} C(V) dV \quad (3)$$

Hodnoty $n_{2D}(x)$ sú uvedené v koncentračných profilochoch na Obr. 2.9. a taktiež v Tabuľke 2.2.



Obr. 2.9: Teplotné koncentračné profily analyzované z vf kapacitných meraní pomocou programu Hermes. Maximum plošnej koncentrácie 2DEG v kvantovej jame je uvedené v jednotlivých obrázkoch vzoriek JPA-JPE (H1441 a SG039-5C).

Vypočítané hodnoty koncentrácie 2DEG v kvantovej jame ($4,9\text{--}8,7.10^{16}\text{m}^{-2}$) s prihľadnutím na chybu numerického výpočtu koncentračných profilov z nameraných CV kriviek, algoritmu numerickej integrácie a stanovenia integračných medzí rádovo zodpovedajú hodnotám, ktoré pre dané vzorky uvádzajú výrobca ($6,0.10^{16}\text{m}^{-2}$). Poloha maxím vo všetkých prípadoch korešponduje s lokalizáciou kvantovej jamy udávanou výrobcami. Tí súce predpokladajú v oboch prípadoch existenciu QW v hĺbke 25nm, pravdepodobné je však poškodenie *cap layer* pri kontaktovaní. Tomu presne zodpovedá vypočítaná poloha jamy.

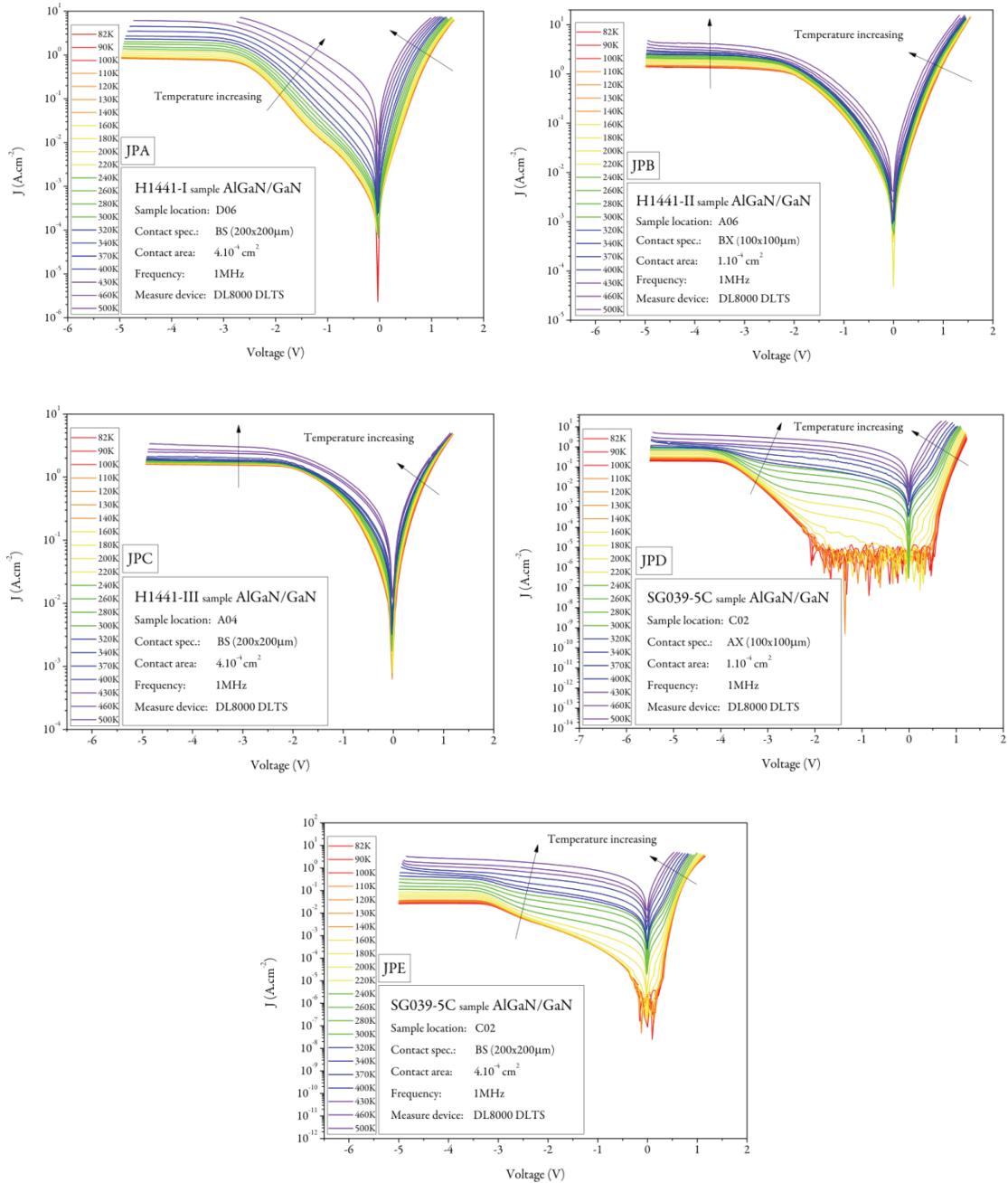
Tabuľka 2.2: Súhrn atribútov, maxím objemovaj i plošnej hustoty n.n. v QW určených z koncentračných profilov.

sample tag	wafer	mask	location	area m ²	n _{3D} (m ⁻³)	n _{2D} (m ⁻²)	QW location (nm)
JPA	H1441-I	D06	BS	4.10 ⁻⁸	2.10²⁶	5,5.10¹⁶	20
JPB	H1441-II	A06	BX	1.10 ⁻⁸	3.10²⁸	6,1.10¹⁶	20
JPC	H1441-III	A04	BS	4.10 ⁻⁸	1.10²⁸	4,9.10¹⁶	20
JPD	SG039-5C	C02	AX	1.10 ⁻⁸	1.10²⁸	8,7.10¹⁶	22
JPE	SG039-5C	C02	BS	4.10 ⁻⁸	1.10²⁸	7,0.10¹⁶	22

Za povšimnutie stojí ešte posun kriviek koncentračného profilu s teplotou po oboch stranách QW, ktorý je najlepšie demonštrovať na vzorkách JPA a JPB. Na ľavu od kvantovej jamy, teda smerom k povrchu, je možné pre dané vzorky pozorovať rozdielny charakter teplotnej redistribúcie volných nosičov náboja. Kým pri vzorke JPB je pod usmerňujúcim kontaktom zrejmý pokles objemovej koncentrácie nosičov s rastúcou teplotou, v prípade vzorky JPA je situácia opačná. Nakol'ko jediným rozdielom medzi danými vzorkami je postup pri formovaní hradla, teplotný nárast koncentrácie pod hradlom je možné pripísat práve tejto úprave. Pri ťihaní v dusíkovej atmosfére došlo pravdepodobne k vzrastu koncentrácie atómov dusíka v prikontaktnnej vrstve hoci len po okrajoch kontaktu a následnej generácii voľných elektrónov vplyvom pracovnej teploty. Na pravej strane od kvantovej jamy, teda smerom do hĺbky bulkového materiálu, je taktiež pozorovateľný nárast objemovej koncentrácie nosičov s rastúcou teplotou až o jeden rád. Vysvetlenie je aj v tomto prípade možné hľadať v tepelnej generácii nosičov v objeme bulkového materiálu GaN. Pri vzorkách JPD a JPE dosky SG039-5C však tento vplyv nie je až tak markantný a táto odolnosť je pravdepodobne zaručená Fe buffer vrstvou medzi substrátom a bulkovým GaN materiálom.

2.5 IVT charakterizácia

Na Obr. 2.10 sú znázornené výsledky teplotných IV meraní na predložených vzorkách Schottkyho diód na heteroštruktúrach AlGaN/GaN. Na týchto charakteristikách (pri nízkych teplotách v okolí nulového napäťia koliduje hodnota prúdu s rozlišovacou schopnosťou prúdového modulu DLTS) je možné si všimnúť rozdiely medzi vzorkami H1441 a SG039-5C nielen v tvare, ale tiež v hodnotách záverného prúdu. Cieľom následnej analýzy je z nameraných závislostí určiť najmä kľúčové parametre týchto prvkov, ktorými sú teplotné závislosti hodnôt výšky Schottkyho bariéry, faktora ideality a saturačného prúdu resp. jeho zložiek.



Obr. 2.10: Teplotné IV charakteristiky vzoriek JPA-JPE (H1441 a SG039-5C) namerané prúdovým modulom DL8000 DLTS.

Primárnu a obvyklou úvahou pri analýze týchto parametrov je aplikácia modelu termionickej emisie. Využitím tohto predpokladu vyjadrimo IV charakteristiku vztahom:

$$I = AA^{**}T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{bn}}{kT}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] = I_{teo} \exp\left(\frac{qV_a}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV_a}{kT}\right) \right] \quad (4)$$

Úpravou získame:

$$\ln \left[I / \left(1 - \exp \left(-\frac{qV_a}{kT} \right) \right) \right] = f(V_a) \quad (5)$$

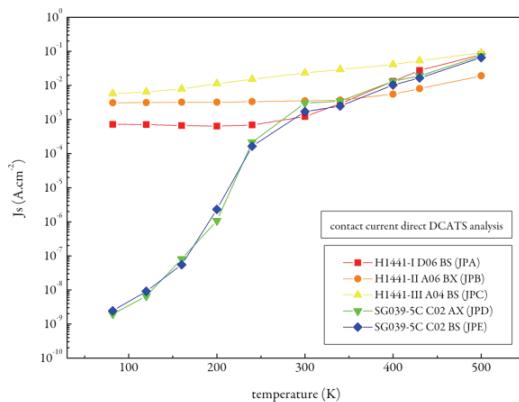
Z tejto závislosti je možné určiť saturačný prúd extrapoláciou ako priesecník lineárnej časti grafu s osou y. Výška Schottkyho bariéry je daná vzťahom:

$$\Phi_{bn} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{I_{teo}}{AA^{**}T^2} \quad (6)$$

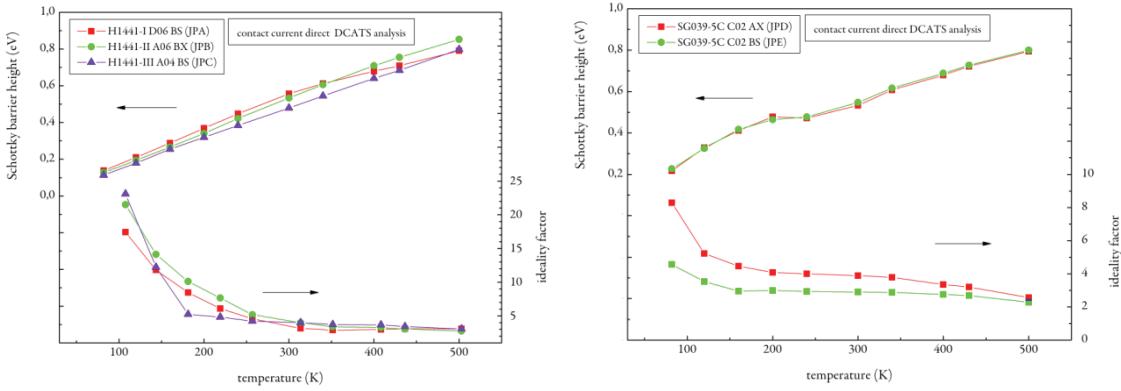
Faktor ideality je možné určiť úpravou vzťahu (4):

$$n = \frac{kT}{q} \left[\frac{d(\ln I)}{dV} \right]^{-1} \quad (7)$$

Obr. 2.11 znázorňuje teplotnú závislosť prúdovej hustoty saturačného prúdu vyhodnotenú v zmysle vzťahu (5). Za platnosti rovnakých predpokladov boli získané teplotné závislosti faktora ideality a výšky Schottkyho bariéry a vynesené sú na Obr. 2.12 vľavo pre vzorku H1441 a vpravo pre SG039-5C.



Obr. 2.11: Teplotná závislosť prúdovej hustoty saturačného prúdu pre dané vzorky vyhodnotená s predpokladom výskytu čisto termoemisného javu.

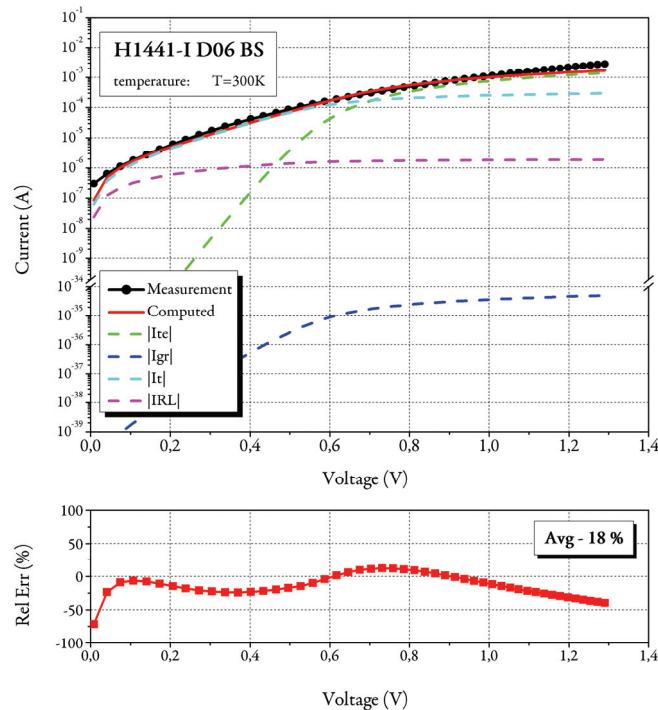


Obr. 2.12: Teplotné závislosti výšky Schottkyho bariéry a faktora ideality vzoriek JPA-JPC (vľavo) a JPD-JPE (vpravo).

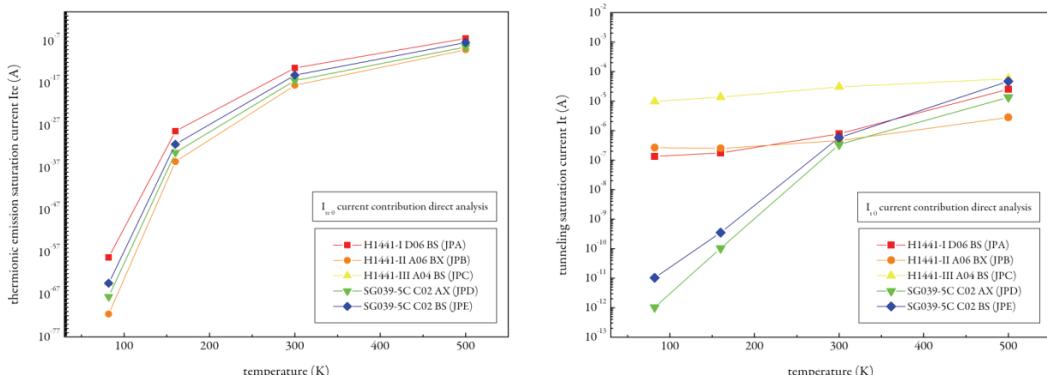
Pozorovaný nárast výšky Schottkyho bariéry s teplotou nemá fyzikálne vysvetlenie. Pochybenia vo využití termoemisie ako majoritného procesu vo vedení prúdu potvrdzujú aj hodnoty faktora ideality, ktorý ani pri vysokých teplotách, kde by termoemisia skutočne mohla byť prevládajúca, nenadobúda hodnoty blízke 1. Tieto skutočnosti naznačujú existenciu procesov, s ktorými daný model nepočíta. Pri vyhodnocovaní týchto parametrov sa teda ukázala ako dôležitá potreba determinácie parciálnych prúdových procesov Schottkyho kontaktu. Už skôr publikované články (24) sa zaobrali definíciou podstaty termoemisnej, tunelovacej, generačno-rekombinačnej a zvodovej časti prúdu ako aj ich určením z prieplustnej časti IV charakteristik. S uvažovaním týchto procesov je možné celkový prúd popísat rovnicou:

$$I = I_{te} + I_{gr} + I_t + I_{leak} = I_{te} \left[\exp\left(\frac{q(V_a - IR_s)}{kT}\right) - 1 \right] + I_{gr} \left[\exp\left(\frac{q(V_a - IR_s)}{2kT}\right) - 1 \right] + I_{t} \left[\exp\left(\frac{q(V_a - IR_s)}{E_0}\right) - 1 \right] + \frac{V_a - IR_s}{R_L} \quad (8)$$

Iteračnými metódami je možné určiť jednotlivé konštanty a premenné vystupujúce vo vzťahu (8) a definovať tak jednotlivé prúdové zložky. Spätná syntéza a porovnanie s nameranou krivkou determinuje relatívnu chybu výpočtu. Nakol'ko výstupom tejto analýzy je pomerne rozsiahly súbor údajov, uvádzame príklad pre vzorku JPA analyzovanú pri teplote 300K (Obr. 2.13).

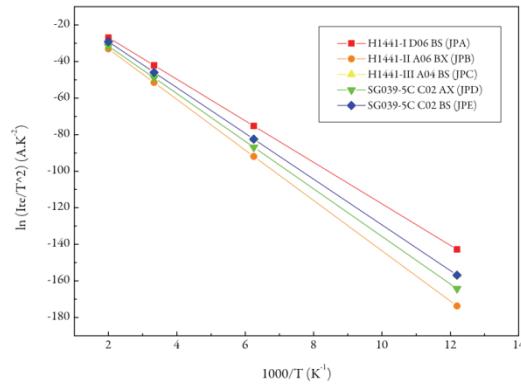


Obr. 2.13: Analýza prúdových zložiek z prieplustnej časti IV charakteristiky vzorky JPA (H1441-I).



Obr. 2.14: Teplotná závislosť termoemisnej (vľavo) a tunelovacej (vpravo) zložky saturačného prúdu.

Zo získaných údajov boli vynesené teplotné závislosti termionickej a tunelovacej zložky saturačného prúdu, znázornené na Obr. 2.14. Z ďalších parametrov a závislostí, ktoré je pomocou tejto analýzy možné získať, sú na Obr. 2.15 funkčné závislosti termoemisnej zložky prúdu $\ln(I_{te}/T^2) = f(1000/T)$.



Obr. 2.15: Teplotné zavislosti termoemisnej zložky prúdu pre získanie Richardsonovej konštanty a výšky Schottkyho bariéry.

Jedná sa o grafickú interpretáciu vzťahu (4), úpravou ktorého získame tvar:

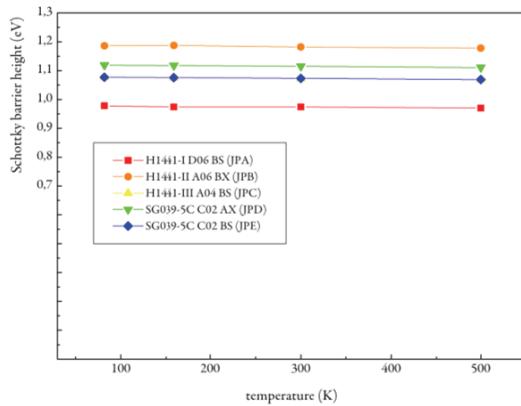
$$\ln\left(\frac{I_{te}}{T^2}\right) = -\frac{\Phi_{bn}}{1000k} \frac{1000}{T} + \ln(AA^{**}) \quad (9)$$

Hodnoty výšky Schottkyho bariéry určené zo smernice a hodnoty Richardsonovej konštanty dané extrapoláciou v $1000/T=0$ sú zhrnuté v Tabuľka 2.3. Hodnoty Richardsonovej konštanty, vzhladom na horeuvedenú podmienku, vychádzajú z výpočtov o málo vyššie ako hodnota $29 \pm 6 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ spravidla uvažovaná pre GaN.

Tabuľka 2.3: Zdanlivá výška Schottkyho bariéry a efektívna hodnota Richardsonovej konštanty.

vzorka	wafer	maska	plocha	obsah	$\Phi_{bn, app}$	A**
				m ²	(eV)	(Acm ⁻² K ⁻²)
JPA	H1441-I	D06	BS	4.10^{-8}	0,9797	37,570
JPB	H1441-II	A06	BX	1.10^{-8}	1,1879	36,164
JPC	H1441-III	A04	BS	4.10^{-8}	1,0788	37,600
JPD	SG039-5C	C02	AX	1.10^{-8}	1,1208	37,560
JPE	SG039-5C	C02	BS	4.10^{-8}	1,0788	37,369

Teplotná závislosť výšky Schottkyho bariéry určenej z termoemisnej zložky prúdu v oblasti meraných teplôt je znázornená na Obr. 2.16. Vypočítané krivky vykazujú mierne klesajúci charakter.



Obr. 2.16: Teplotná závislosť výšky Schottkyho bariéry určenej z termoemisnej zložky prúdu.

Napriek tomu, že takéto výsledky sú v zhode so všeobecne uznanými princípmi, môžeme v odborných časopisoch nájsť publikované aj opačné názory. Klesajúci charakter výšky Schottkyho bariéry však pôsobí dôveryhodnejšie. Na záver však treba dodať, že po identifikácii charakteru Schottkyho bariéry z predpokladu čistej termoemisie v prípade heteropriechodu AlGaN/GaN je určovanie tohto parametra z termoemisnej zložky extrahovanej z celkového prúdu popri ostatných prúdových zložkách len ďalším, nie však finálnym krokom k exaktnej charakterizácii Schottkyho bariéry s uvažovaním všetkých participujúcich mechanizmov.

2.6 Spektroskopia hlbokých hladín – DLTS

Napriek rýchlemu zdokonaľovaniu techniky rastu veľmi kvalitného GaN stále nachádzame v tomto materiáli vysokú koncentráciu defektov, ktorých pôvod nie je doposiaľ vo všetkých prípadoch objasnený. Pre obe oblasti využitia, teda pre optické aj elektronické aplikácie, ovplyvňujú hlboké pasce resp. rekombináčne centrá, výsledné parametre zhotovených prvkov. Súčasné štúdie pôvodu porúch v štruktúre GaN sú spojené s procesom dotácie prímesí, prípadne procesom metalizácie.

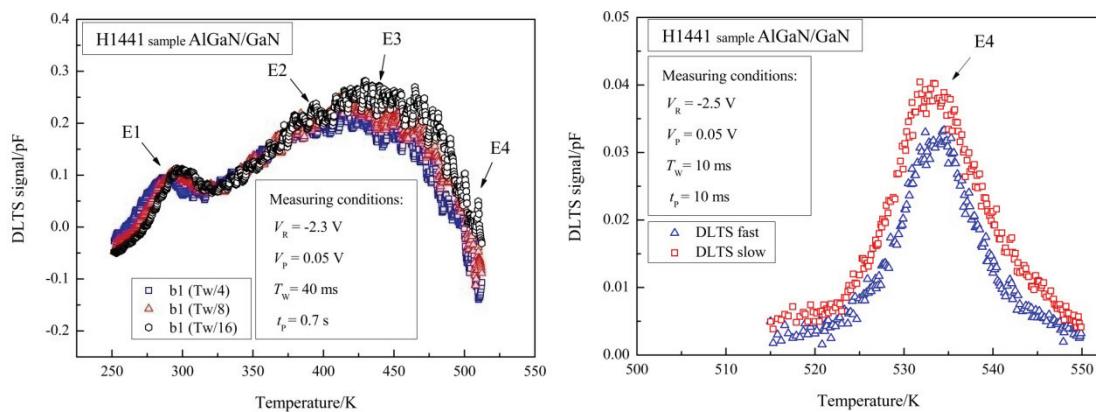
2.6.1 Hlboké hladiny identifikované v štruktúre H1441³

Ako už naznačili teplotné CV merania, v bulkovom GaN i na rozhraní GaN/AlGaN možno očakávať prítomnosť elektricky aktívnych hlbokých hladín vplývajúcich na sklon CV kriviek v oblasti prislúchajúcej vyprázdnujúcej sa kvantovej jame.

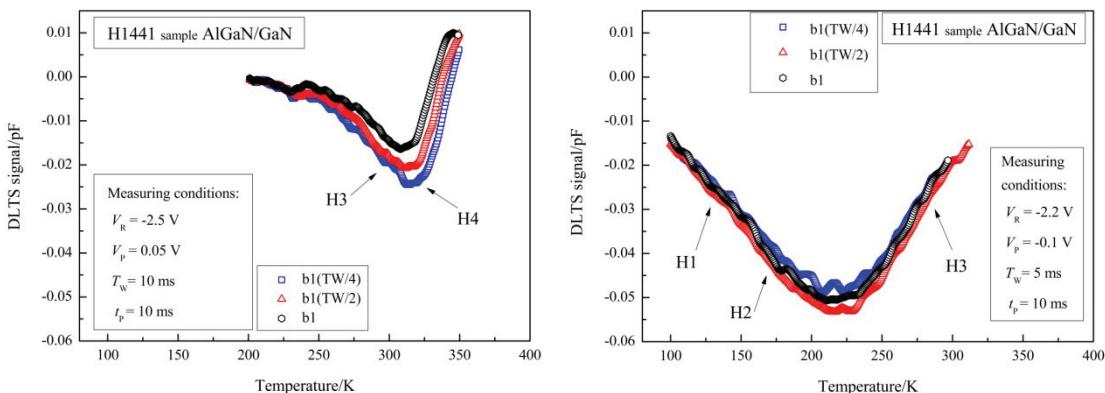
³ Uvádzané výsledky budú publikované v: Harmatha, L., Pecháček, J., Stuchlíková, L., Marek, J., Breza, J., Racko, J., Capacitance characterization of Schottky diodes based on AlGaN/GaN heterostructure, *Microelectronics Journal*, 2013.

Existencia pascí bola potvrdená meraniami DLTS v rozsahu teplôt 80K – 550K pomocou BioRad DL8000 DLTS. Získali sme široký súbor meraní, pričom všetky namerané spektrá vykázali značnú odchýlku transientnej kapacitnej odozvy od rýdzoexponenciálneho charakteru priebehu. Ako už bolo vysvetlené skôr, neexponenciálne priebehy indikujú prítomnosť väčšieho množstva hlbokých hladín rôzneho pôvodu a charakteru.

Aplikovaním korelačných funkcií na merania pri teplotách v rozsahu 80K – 550K boli získané typické DLTS spektrá, ako sú znázornené na obrázkoch 2.17 a 2.18. Ako vyplýva z teórie DLTS nie všetky korelačné funkcie sa identifikujú s transientnou odozvou hľbokej hladiny. DLTS spektrá sú tak vyhodnotiteľné iba pre niektoré funkcie. Príklad vyhodnocovanej odozvy na korelačné funkcie $b_1(T_w/4)$, $b_1(T_w/8)$ a $b_1(T_w/16)$ v teplotnom rozsahu 250K- 530K je na obr. 2.17 (vľavo). DLTS signál na obrázku 2.17 (vpravo) zodpovedá hladine E4 označenej na obrázku vľavo.

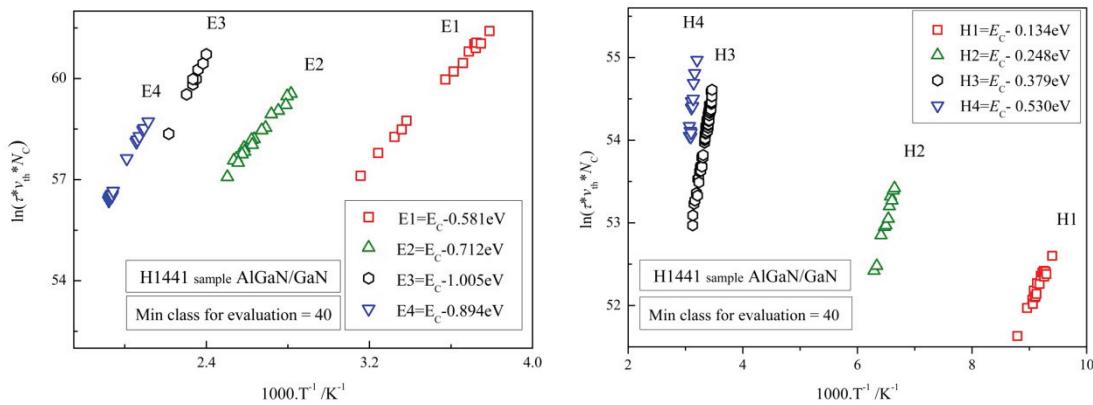


Obr. 2.17: DLTFS spektrum elektrónových pascí v štruktúre H1441 získané za podmienok definovaných v obrázkoch.



Obr. 2.18: DLTFS spektrum dierových pascí v štruktúre H1441 získané za podmienok definovaných v obrázkoch.

DLTFS spektrá dierových pascí znázornené na obr. 2.18 (vľavo) sa líšia od spektier na obr. 2.17 (vpravo) iba teplotným rozsahom. Parametre plniaceho impulzu sú totožné. V štruktúre H1441 boli identifikované štyri elektrónové pasce (E1-E4) a štyri dierové pasce (H1-H4). Parametre pascí – aktivačná energia E_T , záchytný prierez σ_T a koncentrácia N_T určené z Arrheniových závislostí (obr. 2.19) sú zhrnuté v tabuľke 2.4. Hlboká hladina E1 bola určená priamou evaluáciou. Vysokú presnosť výpočtu s využitím veľkého súboru transientných kapacitných odoziev v prípade tejto hladiny reprezentuje hodnota parametra *min. class for evaluation* v rozsahu 50 – 59.



Obr. 2.19: Arrheniove závislosti definujúce parametre elektrónových pascí E1-E4 a dierových pascí H1-H4 získaných DLTFS analýzov v štruktúre H1441.

Tabuľka 2.4: Energetické hladiny identifikované vo vzorke H1441.

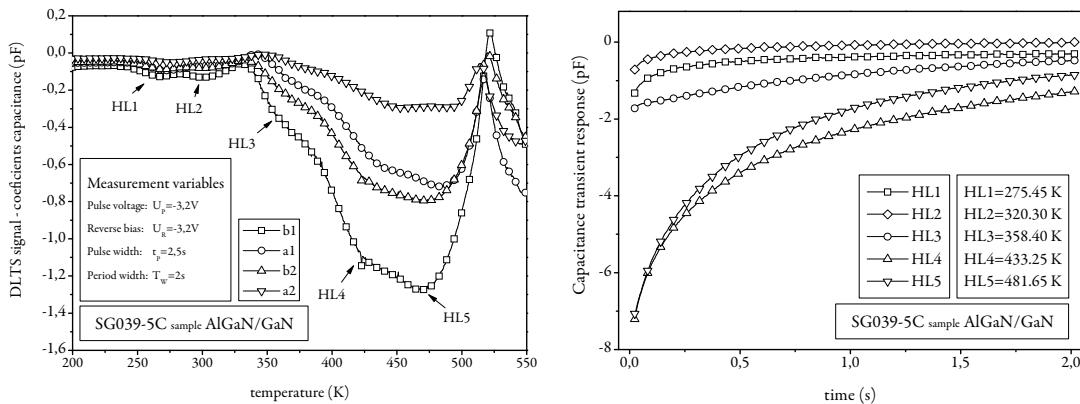
Deep energy level	E_T (eV)	σ_T (cm ²)	N_T (cm ⁻³)	Comparison with the parameters set out in references
E1	0,581	$2,62 \cdot 10^{-16}$	$3,43 \cdot 10^{14}$	nitrogen antisite point defect NGA (25)
E2	0,712	$8,81 \cdot 10^{-17}$	$6,45 \cdot 10^{16}$	gallium vacancy-oxygen complex (V _{Ga} -O _N) or dislocations (26) (27)
E3	1,005	$1,13 \cdot 10^{-14}$	$8,41 \cdot 10^{17}$	threading dislocations (28)
E4	0,894	$1,07 \cdot 10^{-16}$	$5,85 \cdot 10^{14}$	unknown
<hr/>				
H1	0,134	$3,24 \cdot 10^{-17}$	$4,51 \cdot 10^{18}$	unknown
H2	0,248	$1,23 \cdot 10^{-15}$	$4,23 \cdot 10^{18}$	reflect the changes in the population of surface states (29)
H3	0,379	$8,37 \cdot 10^{-18}$	$5,99 \cdot 10^{17}$	unknown
H4	0,530	$4,77 \cdot 10^{-16}$	$1,12 \cdot 10^{18}$	consistent with surface localization (29) (30)

Pri identifikácii ďalších siedmich pascí bola „trieda presnosti“ (*min.class for evaluation*) v rozsahu 40 – 49, takže určenie parametrov je dostatočne presné aj napriek komplikovanému

tvaru DLTS spektra. Uvedené parametre pascí boli určené elektronickou dekonvolúciou z DLTS spektier získaných pomocou meniacich sa parametrov plniaceho impulzu. Vzhľadom na väčšie množstvo pascí blízko seba nie je zväčšovanie plniaceho impulzu garantom získania „čistejšieho“ DLTS spektra a hodnoty koncentrácie sa preto číselne úplne nezhodujú s hodnotou v uvádzaných referenciách.

2.6.2 Hlboké hladiny identifikované v štruktúre SG039-5C

Výsledky spektroskopie hlbokých hladín na vzorke SG039-5C boli publikované na konferencii APCOM 2011 (31). Štruktúra SG039-5C bola podrobenná DLTS meraniam na ploche BS (4.10^{-4} cm^2) vzorky JPE. Na obr. 2.20 (vľavo) je znázornené DLTS spektrum štyroch korelačných funkcií (a_1, a_2, b_1, b_2), z ktorých možno identifikovať prítomnosť piatich hlbokých hladín označených HL1-HL5. Na obrázku 2.20 (vpravo) je exponenciálna odozva určených hladín pri teplotách udaných pre jednotlivé hladiny.



Obr. 2.20: DLTS spektrum vzorky SG039-5C C02 BS (JPE) pre definované atribúty plniaceho impulzu identifikujúce päť hlbokých hladín HL1-HL5 (vľavo) a transientné odozvy určených hladín pri vybraných teplotách (vpravo). (31)

Tabuľka 2.5: Parametre a bližšia špecifikácia hlbokých hladín určených na vzorke SG039-5C C02 BS (JPE). (31)

Deep energy level	E_T (eV)	σ_T (cm^2)	N_T (cm^{-3})	temperature (K)	Comparison with the parameters set out in publications
HL1	0,58	$3,65.10^{17}$	$3,8.10^{17}$	263-280	surface localization 0,5eV (30)
HL2	0,77	$3,42.10^{23}$	$3,2.10^{17}$	280-320	donor-acceptor pair and yellow luminiscence band in Gan (32)
HL3	0,82	$6,48.10^{17}$	$1,3.10^{18}$	346-358	surface localization (30)
HL4	1,06	$5,04.10^{14}$	$6,4.10^{18}$	425-450	origin unknown
HL5	1,25	$3,97.10^{14}$	$6,1.10^{18}$	460-480	origin unknown

Záver

Elektrická charakterizácia Schottkyho kontaktov na heteropriechode AlGaN/GaN je na prvý pohľad téza so širokým tematickým záberom. Problematika elektrickej charakterizácie Schottkyho kontaktu je pomerne obsiahla a komplikuje sa využitím heteropriechodu na báze relatívne mladého materiálu – nitridu gália. Pri určovaní parametrov vybraných vzoriek bolo teda potrebné k týmto skutočnostiam prihliadať a s ohľadom na predpokladané vlastnosti heteropriechodu AlGaN/GaN a Schottkyho kontaktu samotného vybrať vhodné metódy, pomocou ktorých by špecifikácia bola jednoznačná a výstižná, hoci – vzhľadom na súčasný vývoj – len čiastočná.

IV merania sú základnými charakteristikami, z ktorých možno vychádzať pri analýze vlastností predkladaných štruktúr. Z ich analýzy je tak s definovanou presnosťou možné určiť výšku Schottkyho bariéry a saturačné prúdy jednotlivých prúdových zložiek. Kapacitné metódy možno zase využiť k stanoveniu parametrov, ktoré nám IV charakterizácia neposkytne. Medzi ne patrí koncentračný profil určujúci objemovú a plošnú hustotu voľných nosičov náboja 2DEG v kvantovej jame, ako aj jej polohu. Vplyv pascí, ktorých identifikácia bola realizovaná pomocou spektroskopie hlbokých hladín DLTS, na priebeh IV kriviek možno zatiaľ sice iba predpokladať, poskytujú však solídne informácie pre technologický proces výroby a ďalšieho spracovania.

Využitím IV meraní špecifikujeme Schottkyho kontakt na danej vzorke a pomocou CV meraní a DLTS charakterizujeme materiál, na ktorom je tento kontakt vyrobený. Porovnaním údajov získaných týmito testami s atribútmi, ktoré pre vybrané štruktúry deklaruje výrobca, je možné potvrdiť adekvátnosť použitých postupov, bez obáv ich aplikovať a získané výsledky aj v prípade Schottkyho štruktúr s heteropriechodmi na širokopásmových polovodičoch považovať za relevantné. Napriek všetkému výsledky vykonaných analýz avizujú nutnosť ďalšieho skúmania, najmä pokial ide o stanovenie výšky Schottkyho bariéry. Využitie IV meraní pre jej určenie totiž prináša zatiaľ iba málo uspokojivé a často protichodné výsledky. Ukazuje sa, že termoemisný model, pomocou ktorého bola výška Schottkyho bariéry doposiaľ určovaná u kremíka, nie je pre daný materiál a komplikovanú štruktúru vyhovujúci, napriek tomu pri určení koncentrácie 2DEG a polohy kvantovej jamy dáva na ňom založená analýza uspokojivé výsledky. Z meraní

uskutočnených na vybraných vzorkách tiež vyplýva, že softwarové prostriedky, ktoré nám umožňujú definovanie jednotlivých prúdových zložiek pomocou teplotných IV meraní, využívajú pre stanovenie výšky bariéry taktiež iba termoemisný model aplikovaný na danú zložku. Započítanie ostatných mechanizmov vedenia prúdu a ich prípadný vplyv na výšku Schottkyho bariéry tak zostáva výzvou pre ďalší výskum.

Z kapacitných meraní možno jednoznačne posúdiť vplyv Fe buffer vrstvy na teplotné a frekvenčné parametre súčiastok. Spektroskopia hlbokých hladín, ktorá taktiež patrí medzi metódy kapacitné, dokazuje súborom extrahovaných údajov svoje opodstatnenie a prospěšnosť v procese vývoja materiálov a elektronických prvkov.

Z uvedeného tak vyplýva, že hoci dané metódy netvoria „úplný balík“ testovacích metód, poskytujú dôveryhodné a použiteľné výsledky.

Cieľom tejto práce bolo vo svojom rozsahu poskytnúť aj teoretický kontext v zábere adekvátnom k publikovanému výskumu. Z tohto dôvodu som sa v pomerne rozsiahlej teoretickej časti snažil uviesť maximum informácií z oblastí relevantných k danej tematike, počnúc definovaním porúch kryštalickej mriežky, cez stručný prierez niektorými technologickými postupmi výroby základných materiálov a teóriu Schottkyho kontaktu, až po teoretický rozbor metodík, ktoré boli k elektrickej charakterizácii Schottkyho kontaktu na heteropriechode AlGaN/GaN v tejto práci využívané.

V závere si dovolím vyjadriť presvedčenie, že táto práca bude nielen inšpiráciou alebo východiskom pre ďalší výskum, ale tiež vhodným studijným materiálom poskytujúcim aspoň základné informácie k danej problematike.

Bibliografia

1. Kaluza, N.E.: *MOVPE Growth and Characterization of $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ Heterostructures for HEMT Application.* [ed.]: Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2003.
2. Pankove, J.I., Miller, E.A., Richman, D., Berkeyheiser, J.E.: *Electroluminiscence in GaN.* J. Lumin. **4**, Issue 1, 63-66 (1971). ISSN 0022-2313, 10.1016/0022-2313(71)90009-3.
3. Dingle, R., Shaklee, K.L., Leheny, R.F., Zetterstrom, R.B.: *Stimulated Emission and Lase Action in Gallium Nitride.* Appl. Phys. Lett. **19**, 5 (1971). ISSN 1077-3118, 10.1063/1.1653730.
4. Kawabata, T., Marsuda, T., Koike, S.: *GaN blue light emitting diodes prepared by metalorganic chemical vapor deposition.* J. Appl. Phys. **56**, 2367 (1984). ISSN 1089-7550, 10.1063/1.334277.
5. Manasevit, H.M., Erdmann, F.M., Simpson, W.I.: *The Use of Metalorganics in the Preparation of Semiconductor Materials.* J. Electrochem. Soc. **118**, 1864-1868 (1971). ISSN 1945-7111, 10.1149/1.2407853.
6. Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., Toyoda, Y.: *Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer.* Appl. Phys. Lett. **48**, 353 (1986). ISSN 1077-3118, 10.1063/1.96549.
7. Nakamura, S.: *GaN growth using GaN buffer layer.* Jpn. J. Appl. Phys. **30**, L1705-L1707 (1991). ISSN 1347-4065, 10.1143/JJAP.30.L1705.
8. Akasaki, I., Amano, H.: *Crystal Growth and Conductivity Control of Groupe III Nitride Semiconductors and Their Application to Short Wavelength Light Emitters.* Jpn. J. Appl. Phys. **36**, 5393-5408 (1997). ISSN 1347-4065, 10.1143/JJAP.36.5393.
9. Amano, H., Akasaki, I.: Proc. Mater. Res. Soc. **165** Extended Abstract, EA-21 (1990). ISSN 1946-4274, 10.1557/PROC-165-X.
10. Pankove, J.I., Miller, E.A., Berkeyheiser, J.E.: *GaN blue light-emitting diodes.* J. Lumin. **5**, 84-86 (1972). ISSN 0022-2313, 10.1016/0022-2313(72)90038-5.
11. Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K., Akasaki, I.: *Growth and Luminiscence Properties of Mg-Doped GaN Prepared by MOVPE.* J. Electrochem. Soc. **137**, 1639-1641 (1990). ISSN 1945-7111, 10.1149/1.2086742.
12. Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K., Akasaki, I.: *P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI).* Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L2112-L2114 (1989). ISSN 1347-4065, 10.1143/JJAP.28.L2112.
13. Nakamura, S.: *Solid State Lightning & Energy Center.* [Online] The Regents of the University of California, 2009. [Date: 7. december 2010.] www.sslec.ucsb.edu/nakamura.
14. Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M.: *Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double heterostructure blue-light-emitting diodes.* Appl. Phys. Lett. **64**, 1687-1689 (1994). ISSN 1077-3118, 10.1063/1.111832.
15. Nakamura, S., Senoh, M., Nagahama, S., Iwasa, N., Yamada, T., Matsushita, T., Kiyoku, H., Sugimoto, Y.: *InGaN-based Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes.* Jpn. J. Appl. Phys. **35**, L74-L76 (1996). ISSN 1347-4065, 10.1143/JJAP.35.L74.
16. Nam, O.-H., Bremser, M.D., Zheleva, T.S., Davis, R.F.: *Lateral epitaxy of low defect density GaN layers via organometallic vapor phase epitaxy.* Appl. Phys. Lett. **71**, 2638-2640 (1997). ISSN 1077-3118, 10.1063/1.120164.
17. Nakamura, S.: *InGaN/GaN/AlGaN-based laser diodes with an estimated lifetime of longer than 10,000 hours.* MRS Bullet. **23**, 37-43 (1998). ISSN 1938-1425.
18. Racko, J., Mikolášek, M., Granzner, R., Al Mustafa, N., Schwierz, F., Breza, J.: *The impact of changed barrier layer parameters upon tunneling in GaN/AlGaN/GaN Schottky structures.* 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, November 11-15, 2012 Smolenice, Slovakia (2012) p. 207. ISBN 978-1-4673-1197-7, 10.1109/ASDAM.2012.6418531.
19. Osvald, J.: *Influence of interface states on C-V characteristics of AlGaN/GaN heterostructures.* [ed.] FEI STU. Smolenice, 2010, ASDAM 2010 conference proceedings. ISBN 978-1-4244-8573-4.
20. Miczek, M., Adamowicz, B., Mizue, Ch., Hashizume, T.: *Simulations of Capacitance-Voltage-Temperature Behavior of Metal/Insulator/AlGaN/GaN.* Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 04C092-04C097 (2009). ISSN 1347-4065, 10.1143/JJAP.48.04C092.

21. Miczek, M., Mizue, Ch., Hashizume, T., Adamowicz, B.: *Effects of interface states and temperature on C-V- behavior of metal/insulator/AlGaN/GaN heterostructure capacitors.* J. Appl. Phys. **103**, 104510-104520 (2008). ISSN 1089-7550, 10.1063/1.2924334.
22. Harmatha, L., Stuchlikova, L., Csabay, O., Thurzo, I., Gornik, E., Strasser, G.: *Determination of the 2D-Electron Gas Density in a Quantum Well from C-T and C-V Measurements.* Phys. Stat. Sol. (a) **183**, 391-397 (2001). ISSN 1862-6319, 10.1002/1521-396X(200102)183:2<391::AID-PSSA391>3.0.CO;2-N.
23. Foyt, A.G., Donnelly, J.P., Lindley, W.T.: *Efficient doping of GaAs by Se⁺ ion implantation.* Appl. Phys. Lett. **14**, 372-374 (1969). ISSN 1077-3118, 10.1063/1.1652691.
24. Donoval, D., Chvala, A., Sramaty, R., Kovac, J., Carlin, J.-F., Grandjean, N., Pozzovivo, G., Kuzmik, J., Pogany, D., Strasser, G., Kordos, P.: *Current transport and barrier height evaluation in Ni/InAlN/GaN Schottky diodes.* Appl. Phys. Lett. **96**, 223501-223503 (2010). ISSN 1077-3118, 10.1063/1.3442486.
25. Cho, H.K., Kim, C.S., Hong, C.-H.: *Electron capture behaviors of deep level traps in unintentionally doped and intentionally doped n-type GaN.* J. Appl. Phys. **94**, 1485-1489 (2003). ISSN 1089-7550, 10.1063/1.1586981.
26. Polyakov, A.I., Smirnov, N.B., Govorkov, A.V., Markov, A.V., Yakimov, E.B., Vergeles, P.S., Amano, H., Kawashima, T.: *Electrical properties and deep traps spectra in undoped M-plane GaN foams prepared by standard MOCVD and selective lateral overgrowth.* J. Cryst. Growth **311**, 2923-2925 (2009). ISSN 0022-0248, 10.1016/j.crysgro.2009.01.065.
27. Ito, T., Nomura, Y., Selvaraj, S.L., Egawa, T.: *Comparison of electrical properties in GaN grown on Si (111) and c-sapphire substrate by MOVPE.* J. Cryst. Growth **310**, 4896-4899 (2008). ISSN 0022-0248, 10.1016/j.crysgro.2008.08.029.
28. Fang, Z.-Q., Look, D.C., Kim, D.H., Adesida, I.: *Traps in AlGaN/GaN/SiC heterostructures studied by deep level transient spectroscopy.* Appl. Phys. Lett. **87** (18), 182115-182117 (2005). ISSN 1077-3118, 10.1063/1.2126145.
29. Gassoumi, M., Grimbert, B., Gaquiere, C., Maaref, H.: *Evidence of surface states for AlGaN/GaN/SiC HEMTs passivated Si₃N₄ by CDLTS.* Fizika i Technika Poluprovodnikov **46** (3) 396-399 (2012). ISSN 0015-3222.
30. Faqir, M., Varzellesi, G., Fantini, F., Danesin, F., Rampazzo, F., Meneghesso, G., Zanoni, E., Cavallini, A., Castaldini, A., Labat, N., Touboul, A., Dua, C.: *Characterization and analysis of trap-related effects in AlGaN-GaN HEMTs.* Microelectron. Rel. **47**, 1639-1642 (2007). ISSN 0026-2714, 10.1016/j.microrel.2007.07.005.
31. Sebok, J., Stuchlikova, L., Pechacek, J., Pisecny, P., Petrus, M., Kovac, J., Nemec, M., Harmatha, L., Skrinjarova, J.: *Study of Electrical Properties of AlGaN/GaN Structures by Capacitance Method.* In: APCOM 2011 Conf. Proc. of 17th International Conference. Novy Smokovec, Slovak Republic, 22.-24.6.2011. 139-142 (2011). ISBN 978-80-554-0386-1.
32. Ogino, T., Aoki, M.: *Mechanism of Yellow Luminiscence in GaN.* Jpn. J. Appl. Phys. **19**, 2395-2405 (1980). ISSN 1347-4065, 10.1143/JJAP.19.2395.

Publikačná činnosť autora

Publikované práce relevantné k riešenej problematike

- ADE1 Racko, J., **Pecháček, J.**, Mikolášek, M., Benko, P., Grmanová, A., Harmatha, L., Breza, J.: *Trap-Assisted Tunneling in the Schottky Barrier.* (accepted to publish in: Radioengineering **22** (1), 2013).
- ADE2 Racko, J., Breza, J., **Pecháček, J.**, Grmanová, A., Mikolášek, M., Benko, P., Harmatha, L.: *Alternative Model of Coupled Defect Level Recombination.* (to be published in: World Journal of Condensed Matter Physics, 2013).
- AFD1 **Pecháček, J.**, Škriniarová, J., Harmatha, L., Kováč, J., Paskiewicz, B., Kordoš, P., Donoval, D., Tlaczala, M.: *Current Transport in Ni/AlGaN/GaN Schottky Diodes Evaluated from I-V Characteristics Measured at High Temperatures.* In: APCOM 2009 Conf. Proc. of 15th International Workshop. Bystra, Liptovsky Jan, Slovak Republic, 24.-26.6.2009. 41-44 (2009).
- AFD3 Stuchlíková, L., Paluga, M., **Pecháček, J.**, Harmatha, L., Csabay, O.: Double Deep Level Transient Spectroscopy of Al0.34Ga0.66As/GaAs Single-Quantum-Well Structures. In: APCOM 2007 Proc. of 13th International Workshop. Bystrá, Liptovsky Jan, Slovak Republic, 27.-29.6.2007. 56-59 (2007). ISBN 978-80-8070-709-5.
- AFD4 Stuchlíková, L., Harmatha, L., Csabay, O., **Pecháček, J.**, Šramatý, R., Nemec, M., Šebok, J., Vallo, M., Hanáček, M.: *Interactive Course „Semiconductor Materials and Devices Electrical Characterization.* In: Elektro 2008 Proceedings of 7th International Conference. Zilina, Slovak republic, 21.-23.5.2008. 170-173 (2008). ISBN 978-80-8070-845-0.
- AFD6 Šebok, J., Stuchlíková, L., **Pecháček, J.**, Písečný, P., Petrus, M., Kováč, J., Nemec, M., Harmatha, L., Škriniarová, J.: *Study of Electrical Properties of AlGaN/GaN Structures by Capacitance Method.* In: APCOM 2011 Conf. Proc. of 17th International Conference. Novy Smokovec, Slovak Republic, 22.-24.6.2011. 139-142 (2011). ISBN 978-80-554-0386-1.

Ostatné publikované práce

- ADF1 Stuchlíková, L., Gron, M., Csabay, O., Donoval, D., **Pecháček, J.**: *Volne prístupný vzdelávací portál pre študentov: eLearn central.* In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku, mimoriadne číslo, roč. 13, 29-34 (2007).
- AFD2 **Pecháček, J.**, Stuchlíková, L.: *Interactive www Course „Logic Circuits“.* Poster in: Virtual University VU '07: 8th International Conference Proc. in Bratislava, Slovak republic, 13.-14.12.2007, 145-149 (2007). ISBN 978-80-89316-09-0.
- AFD5 Stuchlíková, L., Králiková, E., Červeňová, J., Samuhelová, E., Ondrášová, I., **Pecháček, J.**: *Teachers as e-learning course creators.* In: Innovative Process in e-Learning. University of Economics in Bratislava, Slovak republic, 5.3.2008, 102-106 (2008). ISBN 978-80-225.

Meno autora: Ing. Juraj PECHÁČEK

Názov práce: Elektrická charakterizácia Schottkyho štruktúr s heteropriechodom AlGaN/GaN

Náklad: 35ks.

Termín tlače: február 2013

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



Táto práca vznikla s podporou

Vossloh-Schwabe Deutschland GmbH, o.z. SR spoločnosti Panasonic Lighting Europe GmbH.