

Ing. Matej Matuš

**SKÚMANIE ELEKTROFYZIKÁLNYCH VLASTNOSTÍ
POLOVODIČOVÝCH PROGRESÍVNÝCH PRVKOV NA BÁZE
GAN**

Študijný program: 104404 – Elektronika a fotonika

Študijný odbor: 2675 – Elektrotechnika

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedeckej hodnosti *philosophiae doctor* (PhD.)

Miesto a dátum: V Bratislave, Jún 2025

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave
Fakulta Elektrotechniky a Informatiky
Ústav Elektroniky a Fotoniky

Ing. Matej Matuš

**SKÚMANIE ELEKTROFYZIKÁLNYCH VLASTNOSTÍ
POLOVODIČOVÝCH PROGRESÍVNYCH PRVKOV
NA BÁZE GAN**

Študijný program: 104404 – Elektronika a fotonika

Študijný odbor: 2675 – Elektrotechnika

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedeckej hodnosti *philosophiae doctor* (PhD.)

Miesto a dátum: V Bratislave, Jún 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná na Ústave Elektroniky a Fotoniky, Fakulte Elektrotechniky a Informatiky, Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave.

Uchádzač: Ing. Matej Matuš
 Ústav elektroniky a fotoniky, Fakulta elektrotechniky
 a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave,
 Ilkovičova 3, 81219 Bratislava

Oponenti:

Ing. Filip Gučmann, PhD.,
Elektrotechnický ústav SAV, v. v. i.
Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava, Slovenská republika

prof. Ing. Dušan Pudiš, PhD.,
Katedra fyziky, Fakulta elektrotechniky a informačných technológií
Žilinská univerzita v Žilina
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 21.8.2025 , o 11. hod. pred skúšobnou komisiou obhajoby dizertačných prác v zasadačke Ústavu Elektroniky a Fotoniky, Fakulty Elektrotechniky a Informatiky, Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave.

S dizertáciou je možné sa oboznámiť na pedagogickom oddelení Fakulty Elektrotechniky a Informatiky, Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave.

Prof. Ing. Viera Stopjaková, PhD.
Predseda programovej komisie
študijného odboru Elektrotechnika

Obsah

1	Úvod.....	5
2	Tézy dizertačnej práce.....	7
3	Prehľad problematiky.....	8
4	Dosiahnuté výsledky	11
4.1	InAlGaN/GaN HEMT	11
4.2	InGaN/GaN MQW.....	16
4.3	Komerčné pGaN e-mode GaN výkonové tranzistory	25
4.3.1	IGO60R070D1 600V CoolGaN™.....	25
4.3.2	GS66516B 650V e-mode GaN.....	31
5	Zhrnutie výsledkov dizertačnej práce	37
6	Záver	40
7	Conclusion.....	42
8	Publikačná činnosť	44
9	Ohlasy na publikácie autora	53
10	Zoznam použitej literatúry	55

1 Úvod

V posledných dekádach dochádza k rapídemu rozvoju výkonovej elektroniky, komunikačných technológií, obnoviteľných zdrojov energie a elektromobility, ktorý si vyžaduje nové generácie polovodičových súčiastok s vyššou účinnosťou, väčšou tepelnou stabilitou a schopnosťou pracovať pri vysokých frekvenciách. V tomto kontexte sa nitrid gália (GaN), objavený už v 70. rokoch 20. storočia, čoraz viac uplatňuje ako strategický materiál s výnimočnými fyzikálnymi vlastnosťami – veľkou šírkou zakázaného pásma (3,4 eV), vysokým priernym elektrickým poľom (3,3 MV/cm), vysokou saturačnou rýchlosťou ($2,4 \times 10^7$ cm/s) a odolnosťou voči vysokým teplotám i žiareniu. Súčasne prítomnosť spontánnej a piezoelektrickej polarizácie umožňuje vytvoriť dvojrozmerný elektrónový plyn (2DEG) s vysokou pohyblivosťou (2000 cm²/Vs) a veľkou hustotou nosičov náboja v kanáli tranzistora s vysokou pohyblivosťou náboja (HEMT) bez akéhokoľvek dopovania vďaka použitiu napr. InAlGa_N/Ga_N heteroštruktúr, čo prispieva k minimalizácii odporových strát v týchto tranzistoroch (1).

Práve preto sa GaN stal stredobodom pozornosti viacerých strategických výskumných a priemyselných iniciatív v rámci Európskej únie, ako sú projekty ESGAN (vývoj 200 V GaN tranzistorov pre kozmický priemysel), YESvGa_N (vertikálne 1200 V tranzistory, ciele 100 A) či SGAN-Next (Ga_N-on-SiC technológia pre vysokofrekvenčné aplikácie vo vesmíre) (2-4), ktoré reflektujú ambíciu EÚ znížiť emisie skleníkových plynov aspoň o 55 % do roku 2030 (oproti roku 1990) a prejsť na uhlíkovo neutrálnu spoločnosť do roku 2050 (5). EÚ sa tiež zaviazala znížiť spotrebu energie do roku 2030 minimálne o 11,7 % oproti predpokladom z roku 2020 (6). Programy ako Horizon Europe, schémy InvestEU a Clean Industrial Deal alokujú stovky miliárd eur na rozvoj zelených technológií a podporu energeticky efektívnej výroby polovodičov (7). Tieto riešenia sú navrhované tak, aby znížovali uhlíkovú stopu a šetrili energiu – napr. GaN tranzistory môžu v niektorých aplikáciách znížiť CO₂ emisie až o 30 % v porovnaní s kremíkom. GaN je preto paradoxne “starým” materiálom s novou, vysokou relevanciou (8).

Napriek nespochybniteľným výhodám GaN technológie zostáva výzvou zabezpečiť dlhodobú spoľahlivosť týchto súčiastok. Elektricky aktívne defekty, ktoré môžu vzniknúť počas rastu alebo spracovania štruktúr,

majú zásadný vplyv na ich elektro-fyzikálne vlastnosti defekty (9). Aj nízka koncentrácia takýchto porúch môže ovplyvniť parametre ako čas života nosičov náboja, stabilitu prenosu alebo prierazné napätie, čo sa následne prejaví na výkone a životnosti zariadení. Identifikácia týchto defektov preto predstavuje jednu z kľúčových úloh pri vývoji GaN technológií. Experimenty vykonávané na štruktúrach na báze GaN sú ovplyvnené špecifickými faktormi, ktoré súvisia existenciou 2DEG, prítomnosťou polarizácie a následnou nábojovou nestabilitou GaN heteroštruktúr, čo kladie vysoké nároky na charakterizačné techniky a ich presnosť. Je potrebné použiť nové prístupy, kombináciu viacerých meracích techník, viacerých spôsobov evaluácie, verifikáciu prostredníctvom simulácií a porovnávať namerané výsledky s referenčnými štruktúrami a literatúrou pre dosiahnutie čo najlepších výsledkov.

Motiváciou a cieľom tejto dizertačnej práce je prispieť k poznaniu v oblasti diagnostiky kvality GaN štruktúr prostredníctvom detailného skúmania ich elektro-fyzikálnych vlastností. Osobitná pozornosť je venovaná identifikácii elektricky aktívnych porúch v progresívnych štruktúrach na báze GaN, ktoré sú analyzované pomocou Fourierovej spektroskopie hlbokých hladín (DLTFS) ako jednej z hlavných metód elektrickej charakterizácie.

2 Tézy dizertačnej práce

1. Oboznámiť sa s vlastnosťami a súčasným stavom vývoja materiálov a štruktúr na báze GaN pre vysokovýkonové a vysokofrekvenčné aplikácie z hľadiska vývoja kvalitných súčiastok.
2. Analyzovať možnosti použitia metódy Fourierovej spektroskopie hlbokých hladín na skúmanie emisných a záchytných procesov v zakázanom pásme vybraných štruktúr na báze GaN. Na základe týchto poznatkov navrhnúť efektívny prístup k výskumu parametrov hlbokých energetických hladín s vysokou spoľahlivosťou v komplikovaných viacvrstvových štruktúrach.
3. Skúmať vplyv rôznych vonkajších ako aj vnútorných činiteľov a procesov, ako je napríklad vplyv technológie prípravy súčiastok a vplyv elektrického namáhania, na charakteristické vlastnosti štruktúr na báze GaN, využitím dostupných prúdových a kapacitných metód elektrickej diagnostiky polovodičových prvkov.
4. Na základe charakterizácie štruktúr Fourierovou spektroskopiou hlbokých hladín skúmať a analyzovať fyzikálne záchytné a emisné procesy prebiehajúce v štruktúrach na báze GaN s cieľom získať nové poznatky o charaktere elektricky aktívnych porúch a ich vplyvu na výsledné elektrofyzikálne parametre štruktúr na báze GaN.

3 Prehľad problematiky

Nitrid gália (GaN) je polovodičový materiál zo skupiny III-V, ktorý sa vyznačuje širokým zakázaným pásmom s hodnotou približne 3,4 eV, vysokým priernym napätím, vynikajúcou tepelnou stabilitou a schopnosťou pracovať pri vysokých frekvenciách (10). Tieto výnimočné fyzikálne vlastnosti ho predurčujú na použitie v oblasti výkonovej elektroniky, optoelektroniky (LED, laserové diódy) a vysokofrekvenčných aplikácií. GaN kryštalizuje najčastejšie v hexagonálnej wurtzitovej štruktúre, pričom jeho polarizačné efekty, ako spontánna a piezoelektrická polarizácia, zohrávajú dôležitú úlohu v tvorbe a riadení heteroštruktúr (11).

Vrstvené štruktúry GaN sa prevažne rastú na cudzích substrátoch, akými sú zafír (Al_2O_3), karbid kremíka (SiC) alebo kremík (Si) (12). Každý z týchto substrátov prináša výhody i nevýhody, či už z pohľadu tepelnej vodivosti, mriežkového nesúladu alebo výrobných nákladov. Pre výkonové aplikácie sa najčastejšie využíva SiC substrát vďaka nízkemu mriežkovému nesúladu a vysokej tepelnej vodivosti.

Medzi najvýznamnejšie súčiastky na báze GaN patria vysokofrekvenčné tranzistory typu HEMT (High Electron Mobility Transistor), ktoré využívajú vznik dvojrozmerného elektrónového plynu (2DEG) na rozhraní vrstiev AlGaIn/GaN (14). Tieto tranzistory môžu byť navrhnuté ako „normally-on“ alebo „normally-off“ v závislosti od typu použitej hradlovej štruktúry, napríklad s využitím p-GaN vrstvy. Okrem toho sa v oblasti výkonových aplikácií vyvíjajú aj vertikálne GaN diódy, ako sú Schottkyho a PN diódy, či MOSFET-y, ktoré umožňujú prevádzku pri vyšších napätiach nad 1200 V a prekonávajú obmedzenia laterálnych štruktúr (15).

Dôležitou súčasťou GaN súčiastok sú elektródy a ich kontaktné vlastnosti. Ohmické kontakty na GaN si vyžadujú viacvrstvé metalizácie, typicky Ti/Al/Ni/Au, pričom stabilita a nízky kontaktný odpor sa dosahujú vysokoteplotným žiňaním v rozsahu 650–950°C (16). Výber materiálov a ich hrúbok ovplyvňuje difúziu kovov a výslednú kvalitu kontaktu. Schottkyho kontakty využívajú kovy ako nikel, platina alebo paládium. Výška Schottkyho bariéry je často ovplyvnená povrchovými stavmi a technologickými parametrami výroby.

Poruchy v GaN štruktúrach predstavujú kľúčový faktor ovplyvňujúci nielen elektrické vlastnosti, ale aj spoľahlivosť a životnosť zariadení. Medzi

najčastejšie poruchy kryštalickej mriežky patria vakancie gália (V_{Ga}) a vakancie dusíka (V_N), ktoré môžu spôsobovať vznik hlbokých energetických hladín v zakázanom pásme. Okrem nich sa v materiáli vyskytujú aj intersticiálne poruchy, kde atómy gália alebo dusíka obsadzujú polohy mimo štandardnej mriežky, ako aj poruchy, pri ktorých atómy zaujmú nesprávne pozície v kryštalickej mriežke. Významnú skupinu predstavujú prímesové defekty spôsobené kontamináciou materiálu atómami horčíka (Mg), kremíka (Si), uhlíka (C), vodíka (H) alebo železa (Fe). Tieto nežiaduce prvky môžu vytvárať pasce pre nosiče náboja alebo rekombinačné centrá, čo vedie k zhoršeniu parametrov ako je kolaps prúdu, hysterézia či nestabilita prahového napätia. Prítomnosť týchto defektov môže ovplyvniť tiež dynamickú odozvu súčiastok a ich odolnosť voči degradačným javom pri dlhodobej prevádzke (17).

Analýza a identifikácia uvedených defektov vyžaduje pokročilé metódy elektrickej charakterizácie. Prúdovo-napäťové (I–U) merania poskytujú informácie o výške Schottkyho bariéry, idealizačnom faktore a sériovom odpore, čím umožňujú posúdenie kvality kontaktov a rozhraní. Kapacitno-napäťové (C–U) merania sa využívajú na určenie profilu dopovania, šírky ochudobnenej oblasti a zabudovaného napätia, pričom poskytujú cenné informácie o distribúcii nábojov v štruktúre (18). Jednou z najvýznamnejších metód je Fourierova spektroskopia hlbokých hladín (DLTFS) (19), ktorá umožňuje identifikáciu elektricky aktívnych porúch. Táto metóda je citlivá na prítomnosť pascí, ich energetické hladiny, záchytné prierezy a koncentrácie a dokáže odhaliť aj neexponenciálne transients, čo je často nevyhnutné pri zložitých GaN štruktúrach. Kombinácia týchto metód poskytuje komplexný obraz o kvalite materiálu a spoľahlivosti súčiastok.

Elektrická charakterizácia GaN je náročná vzhľadom na vysokú hustotu dislokácií, komplexné rozhrania a prítomnosť polarizačných efektov. Merania bývajú komplikované veľkou variabilitou defektov, nelineárnym a neexponenciálnym správaním transient a výraznou hysteréziou. Presné vyhodnotenie parametrov vyžaduje nielen kombináciu viacerých meracích techník, ale aj dôkladnú optimalizáciu experimentálnych podmienok a analytických prístupov (20).

Do budúcnosti ostáva GaN mimoriadne perspektívnym materiálom pre široké spektrum aplikácií. Medzi hlavné výzvy patrí zlepšenie kvality GaN kryštálov, zníženie hustoty defektov, optimalizácia p-typ dopovania a

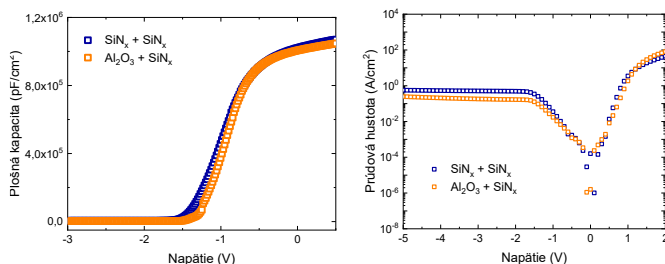
zníženie odporu ohmických kontaktov pre p-GaN vrstvy (21). Dôležitým aspektom je tiež efektívny manažment tepla a zvládnutie problémov spojených so samozahrievaním súčiastok, ktoré môžu limitovať ich spoľahlivosť (22). Ekonomická výroba veľkoplošných GaN substrátov s nízkym počtom defektov je ďalším kľúčovým faktorom pre širšiu adopciu tejto technológie. Spoľahlivosť, zvládnutie defektov a inovatívne architektúry sú cestou k plnému využitiu potenciálu GaN v energeticky účinných a vysokovýkonných elektronických systémoch.

4 Dosiahnuté výsledky

4.1 InAlGaN/GaN HEMT

Hlavným cieľom tohto experimentu bolo analyzovať distribúciu elektricky aktívnych porúch (pascí) v štruktúrach s dvojvrstvovými pasivačnými systémami typu $\text{SiN}_x + \text{SiN}_x$ a $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiN}_x$.

Zmerané C-U a I-U charakteristiky (Obr. 4.1) potvrdili, že skúmané vzorky sú bariérového typu. Medzi týmito dvoma typmi štruktúr boli pozorované len minimálne rozdiely v charakteristikách.

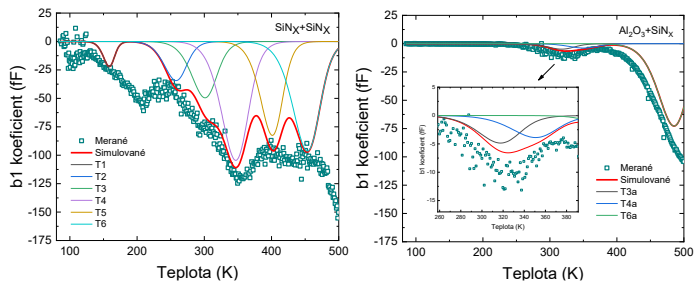


Obr. 4.1 Namerané C-U a I-U charakteristiky pri izbovej teplote pre sukmany InAlGaN/GaN HEMT štruktúry.

Obr. 4.2 zobrazuje DLTFs spektrá namerané pri reverznom napätí $U_R = -1,75$ V a napäťovom impulze $U_P = -0,5$ V. Taktiež sú zobrazené simulácie šiestich identifikovaných dierových pascí (označené T1 až T6) vo vzorke s pasiváciou $\text{SiN}_x + \text{SiN}_x$ a troch dierových pascí (označené T3a, T4a a T6a) vo vzorke s pasiváciou $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiN}_x$. Parametre použitých simulácií – aktivačné energie ΔE_T a záchytné prierezy σ_T pre každú dierovú pascu – boli určené z Arrheniových závislostí vypočítaných na základe nameraných kapacitných transient (Obr. 4.3).

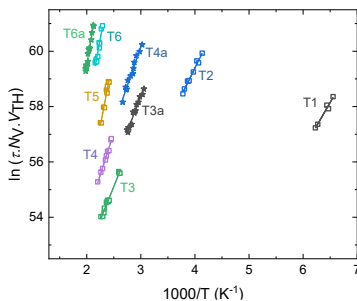
Dierové pasce T1 (0,27 eV) a T2 (0,34 eV) boli identifikované iba vo vzorkách s dvojvrstvovou pasiváciou $\text{SiN}_x + \text{SiN}_x$. Výskyt týchto pascí možno vysvetliť zmenami v obsadenosti povrchových stavov elektrónmi. Je známe, že depozícia SiN na AlGaIn/GaN HEMT štruktúrach vedie k zvýšeniu hustoty dvojrozmerného elektrónového plynu (2DEG), čo sa

pripisuje zníženiu výšky bariéry v dôsledku vytvárania donorových stavov na rozhraní SiN/AlGaN (23).



Obr. 4.2 Namerané spektrá DLTS pri vstupných meracích podmienkach:

$U_R = -1,75$ V, $U_P = -0,5$ V, $t_P = 1$ s, $T_W = 0,5$ s. Vložené sú aj simulácie identifikovaných dierových pascí.



Obr. 4.3 Arrheniove závislosti identifikovaných dierových pascí v InAlGaN/GaN HEMT.

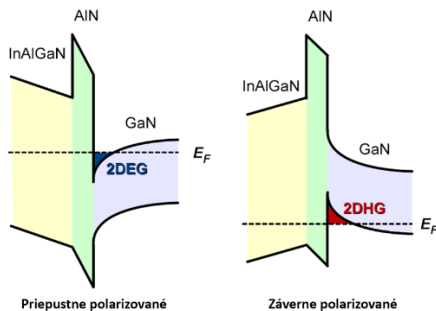
Dierové pasce T5 (0,88 eV) a T6 (0,92 eV) identifikované v štruktúre s dvojvrstvovou pasiváciou SiN_x + SiN_x a pasca T6a (0,97 eV) identifikovaná v štruktúre s dvojvrstvovou pasiváciou Al₂O₃ + SiN_x pravdepodobne zodpovedá C_N akceptorovej hladiny približne pri $E_V + 0,9$ eV (24).

Tab. 4.1 Vypočítané základné parametre identifikovaných pascí a ich pravdepodobný pôvod.

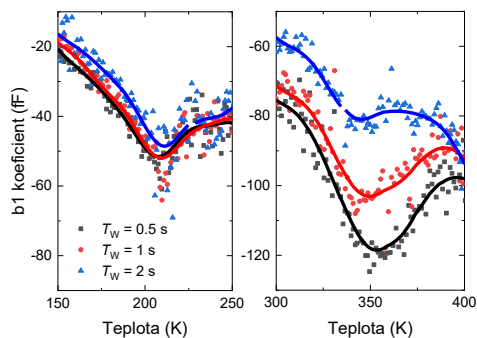
Pasca	ΔE_T (eV)	σ_T (cm ²)	Pravdepodobný pôvod
SiN_x + SiN_x			
T1	0.27	1.99×10^{-17}	Si atómy lokalizované na SiN/InAlGaN rozhraní (23)
T2	0.34	5.29×10^{-15}	Si atómy lokalizované na SiN/InAlGaN rozhraní (23)
T3	0.42	2.09×10^{-19}	2DHG
T4	0.53	7.41×10^{-19}	
T5	0.88	1.24×10^{-15}	C _N akceptor s hladinou blízko $E_v + 0.9$ eV (24)
T6	0.92	1.24×10^{-16}	
Al₂O₃ + SiN_x			
T3a	0.44	1.68×10^{-19}	2DHG
T4a	0.49	1.58×10^{-19}	
T6a	0.97	8.89×10^{-17}	C _N akceptor s hladinou blízko $E_v + 0.9$ eV (24)

Dvojica dierových pascí označených ako T3 a T4, identifikovaných vo vzorke s pasivačnou vrstvou SiN_x + SiN_x (s aktivačnými energiami 0,42 eV a 0,53 eV), bola pozorovaná aj vo vzorke s pasiváciou Al₂O₃ + SiN_x, pričom zodpovedajúce pasce (označené ako T3a a T4a) vykazovali aktivačné energie 0,44 eV a 0,49 eV. Avšak koncentrácia týchto pascí bola v prípade vzorky s Al₂O₃ + SiN_x výrazne nižšia. Pri aplikácii záverného napätia na heteroštruktúru GaN/AlN/InAlGaN dochádza k výraznému zakriveniu energetických pásov, čo vedie k akumulácii dier na rozhraní GaN/AlN. Tento jav, ktorý dopĺňa akumuláciu elektrónov pozorovanú pri priepustnom napätí, je spôsobený odsadením valenčných pásov (valence band offset) medzi materiálmi GaN a AlN, ako je znázornené na Obr. 4.4. Výrazný rozdiel

v šírke zakázaných pásiem vytvára potenciálovú jamu, ktorá zachytáva diery v kvázi dvojrozmernej vrstve, čím vzniká dvojrozmerný dierový plyn (2DHG) s vlastnosťami porovnateľnými s jeho elektrónovým ekvivalentom. Po návrate do termodynamickej rovnováhy sa akumulované diery uvoľňujú postupne, keďže pásová štruktúra sa vracia do rovnovážneho stavu. Podrobné štúdium správania náboja ukazuje špecifické charakteristiky, ktoré odlišujú relaxáciu 2DHG od štandardného uvoľňovania náboja z klasických pasci. Uvoľnené diery vykazujú správanie zodpovedajúce úniku zo stavu podobného pasci (Obr. 4.5), avšak ich záchytný prierez je extrémne malý ($\sim 10^{-19} \text{ cm}^2$). Táto výnimočne nízka hodnota sa výrazne odlišuje od hodnôt typických štrukturálnych defektov, pri ktorých sú záchytné prierezy spravidla o niekoľko rádov väčšie. Malý záchytný prierez možno pripísať delokalizovanému charakteru viazaných nábojov, ktoré neobsadzujú diskrétné lokálne defektové hladiny, ale skôr plynulé kontinuum dvojrozmerných stavov. Napriek tomuto atypickému mechanizmu zachytávania, teplotná závislosť miery emisie vykazuje aktivačnú energiu, ktorá zodpovedá teoreticky predpokladanému odsadeniu valenčných pásov medzi GaN a AlN, čo potvrdzuje pravdepodobnú hĺbku potenciálovej jamy. Tento jav teda vykazuje kinetiku emisie podobnú pasciam, avšak s energetikou závislou od pásovej štruktúry.



Obr. 4.4 Pásmový diagram InAlGaN/AlN/GaN v priepustnej a závernej polarizácii. Výrazný posun pásu môže vytvoriť potenciálovú jamu, ktorá zachytáva diery v kvázi dvojrozmernej vrstve, čo vedie k dvojrozmernému dierovému plynu.



Obr. 4.5 Namerané DLTS spektrá vzorky $\text{SiN}_x + \text{SiN}_x$ s rôznymi T_W pri reverznom napätí $U_R = -1,75$ V, $U_P = -0,5$ V, $t_P = 1$ s. Teplotný posun maxima/minima nameraného spektra v závislosti od zmeny šírky periódy indikujúci stav podobný pasci (vpravo).

Zavedenie pasivačných vrstiev, či už SiN alebo Al_2O_3 , do heteroštruktúry $\text{InAlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ vedie k vzniku rozhraní s dipólovým charakterom, ktoré významne menia vnútorné elektrické pole. Predpokladáme, že jednotlivé pasivačné vrstvy spôsobujú odlišný posun vákuovej hladiny, čo vyplýva z ich rozdielnych dielektrických konštánt, energetického usporiadania pásov a konfigurácie väzby na rozhraní s podkladovou InAlGaN vrstvou. Pasivácia pomocou SiN všeobecne vytvára výraznejší dipól na rozhraní než Al_2O_3 , čím podstatne ovplyvňuje rozloženie vnútorného elektrického poľa v rámci heteroštruktúry. Táto zmena polarizačne indukovaného poľa má priamy dopad na zakrivenie energetických pásov a tým aj na rozloženie koncentrácie minoritných nosičov. Zmenené vnútorné pole následne ovplyvňuje efektívnu výšku bariéry pre diery, a teda aj koncentráciu dier v objeme vrstvy GaN a dynamiku akumulácie dier na rozhraní AlN/GaN . Pasivácia pomocou Al_2O_3 , vzhľadom na svoje špecifické rozhranie, vytvára iba slabý dipól na rozhraní, a preto ovplyvňuje transportné a akumulačné mechanizmy dier iným spôsobom. Zmena koncentrácie minoritných nosičov v závislosti od typu pasivácie tak významne ovplyvňuje správanie štruktúr pri závernej polarizácii a ich kapacitnú odozvu, čím sa potvrdzuje, že účinok pasivácie presahuje rámec iba povrchovej ochrany.

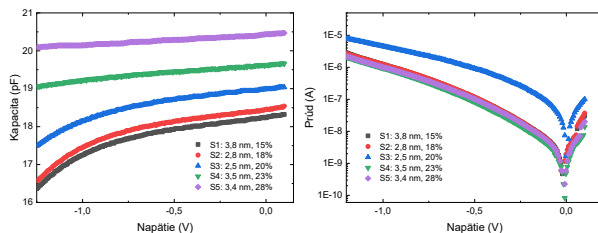
4.2 InGaN/GaN MQW

Cieľom experimentu je preskúmať možný vplyv štruktúrnych parametrov, ako je zloženie a hrúbka vrstiev InGaN/GaN MQW štruktúr (Tab. 4.2), na správanie nosičov náboja, konkrétne na procesy ich zachytávania do pascí a ich emisie a správanie nosičov náboja v kvantových jamách metódou DLTS.

Tab. 4.2 Parametre výroby a rastu InGaN/GaN MQW štruktúr.

Vzorka (wafer)	Teplota rastu (°C)	Doba rastu (s)	Hrúbka QW (nm)	Obsah In (%)	Hustota hex. defektov ($\times 10^8 \text{ cm}^{-2}$)	Dislokácie	Vlnová dĺžka emisie (nm)/energia (eV)
S1	780	90	3,8	15	0	Nie	528 / 2,35
S2	760	60	2,8	18	<0.01	Nie	520 / 2,38
S3	750	60	2,5	20	0,03	Nie	516 / 2,40
S4	730	60	3,5	23	2,1	Áno	578 / 2,15
S5	700	60	3,4	28	7	Áno	620 / 2,00

C-U a I-U merania boli vykonané pri izbovej teplote (Obr. 4.6). Zmerané charakteristiky potvrdili, že skúmané vzorky sú bariérového typu. Na C-U charakteristikách pozorujeme trend – rastúca koncentrácia In v štruktúre spôsobuje rast nameranej kapacity. Zvýšenie kapacity pri vyššom obsahu In je spôsobené viacerými faktormi. So zvyšujúcim sa obsahom In dochádza k znižovaniu zakázaného pásma $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ vrstvy.



Obr. 4.6 Namerané C-U a I-U charakteristiky pri izbovej teplote na InGaN/GaN MQW štruktúrach S1 až S5.

Nižšia hodnota šírky zakázaného pásma vedie k plytšej potenciálovej jame pre elektróny, čo ovplyvňuje rozloženie nábojov a tým aj výslednú kapacitu. Súčasne vyšší obsah In vedie k vyššiemu mriežkovému nesúladu s GaN, čo vyvoláva väčší piezoelektrický efekt. Tento efekt generuje dodatočné náboje na rozhraní, ktoré prispievajú k zvýšenej hustote 2DEG – čo sa následne prejaví vyššou kapacitou. S rastúcim obsahom In sa znižuje potenciálová bariéra, čo vedie k užšej ochudnobilenej oblasti, ktorá vedie k vyššej bariérovej kapacite pri rovnakom napätí. Pri vyšších koncentráciách In (S4, S5) bola výrobcom experimentálne potvrdená prítomnosť dislokácií a zvýšenej hustoty hexagonálnych defektov. Tieto taktiež môžu ovplyvniť rozloženie elektrického poľa, zmeniť štruktúru rozhrania a viesť k ďalšiemu zvýšeniu kapacity.

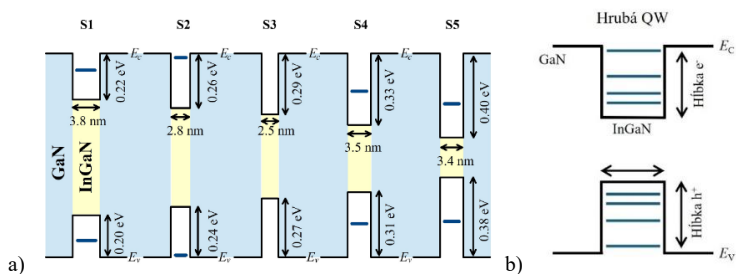
Vzhľadom na to, že naším hlavným cieľom je identifikovať emisie z kvantových jám, pristúpili sme najprv k predikcii, aké energie identifikované metódou DLTFs by mohli zodpovedať emisiám z kvantovej jamy. Na výpočet hĺbky kvantových jám (QW) v systéme InGaN/GaN MQW sme použili model konečne hlbokkej jamy. Potenciálna hĺbka jamy bola odvodená z rozdielu zakázaných pásiem medzi GaN a InGaN, pričom sme predpokladali delenie bandgap offsetu v pomere 70:30 (vodivostné:valenčné pásmo). Zakázané pásmo bolo interpolované lineárne podľa obsahu indiu v kvantovej vrstve. Efektívna hmotnosť elektrónov a diery bola interpolovaná podľa molárneho podielu In. Na výpočet energie viazaných hladín v kvantovej jame sme použili aproximáciu pre konečne hlbokú jamu. Získané hladiny pre stav $n = 1$ boli následne použité na určenie identifikovateľných energií metódou DLTFs. Prepočítané hĺbky kvantových jám, stavy a zodpovedajúce DLTFs energie vo všetkých skúmaných vzorkách S1 až S6 sú uvedené v Tab. 4.3.

Hrúbky kvantových jám v analyzovaných vzorkách S1 až S5 sú však príliš malé 2,5 až 3,8 nm, preto sa v takýchto QW nachádza iba jedna viazaná hladina pre elektróny aj diery (Obr. 4.7a). V prípade hrubej kvantovej jamy (napr. 10 nm), by bolo možné pozorovať viacero kvantových hladín (Obr. 4.7b).

Tab. 4.3 Parametre InGaN/GaN MQW štruktúr, odhadnuté hĺbky QW, stavy a DLTFs energie.

Vzorka	Obsah In (%)	Hrúbka QW (nm)	E_g InGaN (eV)	Hĺbka QW pre elektróny (meV)	Hĺbka QW pre diery (meV)	Stav e^- (meV)	Stav h^+ (meV)
S1	15	3,8	2,815	217	175	90	77
S2	18	2,8	2,654	260	224	20	5
S3	20	2,5	2,580	289	246	-	-
S4	23	3,5	2,419	333	294	179	159
S5	28	3,4	2,170	405	369	242	217

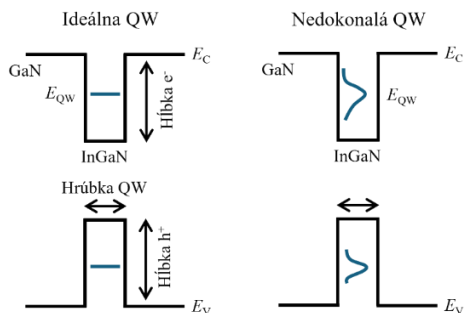
Zrealizované DLTFs experimenty potvrdili prítomnosť viacerých emisných a záchytných procesov. V nameraných spektrách pri rôznych meracích podmienkach sme identifikovali výhradne pasce typu dier.



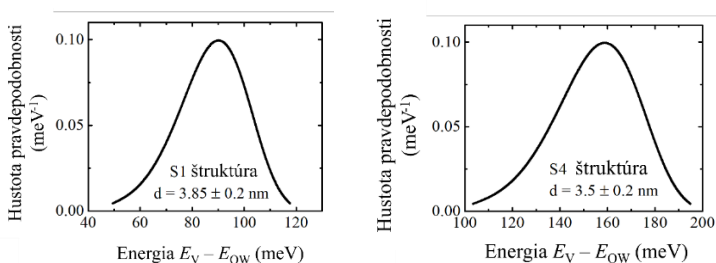
Obr. 4.7 Schematicky znázornené pásmové InGaN/GaN štruktúry (S1-S5) so zvýraznenými viazanými energetickými hladinami.

Na základe vyhodnotenia rozsiahleho súboru DLTFs meraní sme identifikovali viaceré hladiny s nízkou aktivačnou energiou a extrémne malými záchytnými prierezmi, ktoré sú typickými znakmi prechodov súvisiacich s kvantovými jamami. Pôvodne sme predpokladali, že ide o jednu diskretnú hladinu, no analýza odhalila, že pozorovaný signál je v skutočnosti dôsledkom distribúcie energetických hladín viazaných v kvantovej jame. Ako je znázornené na Obr. 4.8, v ideálnom prípade by bola energetická hladina kvantovo viazaného stavu jednoznačne definovaná. Avšak, v reálnych štruktúrach vzniká kvôli technologickým neidealitám (napr. kolísaniu hrúbky alebo rozhraniám) fluktuácia potenciálu v kvantovej jame. Tieto fluktuácie

boli zohľadnené pri výpočte pravdepodobnostnej distribúcie kvantových hladín pre vzorky S1 a S4 na Obr. 4.9.



Obr. 4.8 Odhad pravdepodobnostného rozdelenia energetického stavu kvantovej jamy v ideálnej a nedokonalnej QW v InGaN/GaN štruktúrach.



Obr. 4.9 Odhad pravdepodobnostného rozdelenia energetického stavu kvantovej jamy z DLTFs meraní v štruktúrach S1 ($\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$) a S4 ($\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}/\text{GaN}$).

V Tab. 4.4 sú zhrnuté predikované energie viazaných hladín v kvantovej jame pre diery spolu s vybranými experimentálne identifikovanými hodnotami aktivačnej energie pre päť skúmaných štruktúr S1 až S5. Tieto hladiny predstavujú energetické rozdiely medzi hornou hranou valenčného pásma a kvantovo viazanými stavmi, ktoré boli zistené pomocou DLTFs meraní alebo vypočítané modelom konečne hlbokoj kvantovej jamy s lineárne interpolovanými parametrami. Pre vzorky S1, S4 a S5 sú medzi vypočítanými a meranými hodnotami veľmi dobré zhody, čo potvrdzuje správnosť teoretického prístupu.

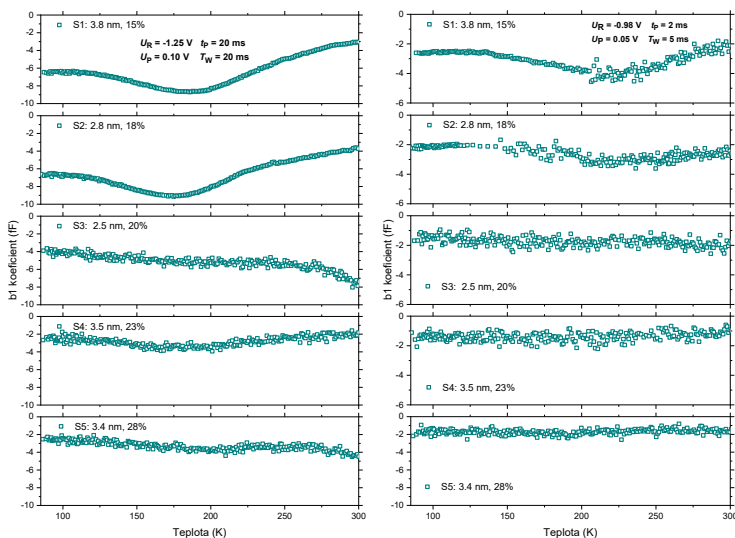
Tab. 4.4 Porovnanie vypočítaných energií z emisie z kvantových jám a namerané hodnoty metódou DLTFs na štruktúrach S1-S5.

Vzorka	Vypočítaná energia	Nameraná energia
S1	0,077 eV	0,08 eV
S2	0,005 eV	Hranica citlivosti
S3	Nevypočítané	Nenamerané
S4	0,159 eV	0,13 eV
S5	0,217 eV	0,22 eV

Ako sme uviedli vyššie, všetky DLTFs spektrá vykazujú výlučne negatívny signál, čo v prípade nedopovaných GaN štruktúr zvyčajne zodpovedá dierovým pasciám. Táto skutočnosť bola v rozpore s naším predpokladom, že identifikujeme aj príspevok elektrónových pascií. Z popisu vzoriek v Tab. 4.2 vyplýva, že koncentrácia hexagonálnych defektov a výskyt dislokácií úzko súvisia s obsahom india v kvantovej jame InGa_N. Vzorky s nižším obsahom In (S1 – S3) nevykazujú dislokácie a hustota hexagonálnych defektov je prakticky nulová. To poukazuje na to, že tieto štruktúry majú stabilný rast a dobrú morfológickú kvalitu bez výrazného narušenia kryštálovej mriežky. Naopak, pri vyššej koncentrácii In (23% a 28%) sa pozoruje výrazný nárast hustoty hexagonálnych defektov a súčasne sa objavujú dislokácie. Tento nárast porúch je pravdepodobne spôsobený rastúcim mriežkovým nesúlodom medzi InGa_N a GaN, ktorý generuje mechanické pnutie vo vrstve a vedie k jej relaxácii cez vznik dislokačných a hexagonálnych defektov. Z výsledkov meraní DLTFs však vyplýva, že za daných meracích podmienok sa nepodarilo identifikovať elektrónové pasce súvisiace s dislokáciami. Najpravdepodobnejším vysvetlením je prekrytie slabších elektrónových signálov dominantným záporným signálom z dierových pascií a z kvantových jám pre diery.

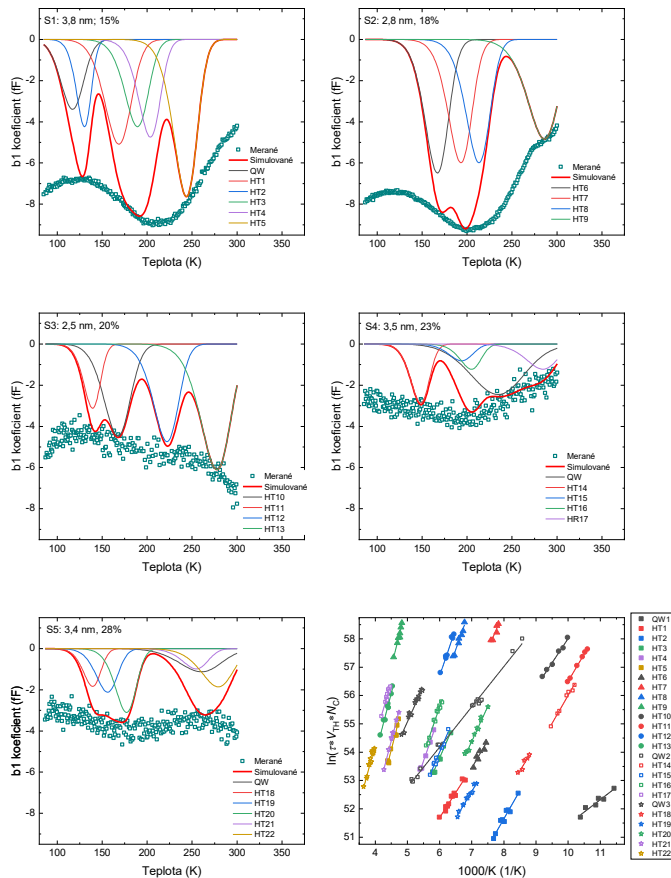
Ďalším dôležitým poznatkom z meraní DLTFs spektier (Obr. 4.9) je pozorovaný pokles amplitúdy DLTFs signálu so zvyšujúcou sa koncentráciou india. Tento trend by sa na prvý pohľad mohol interpretovať ako dôkaz zlepšujúcej sa kvality materiálu, teda nižšej koncentrácie defektov. Takáto interpretácia je však v rozpore s experimentálne potvrdeným rastom hustoty dislokácií pri vyššom obsahu In. Pravdepodobnejšie vysvetlenie spočíva v tom, že výsledný DLTFs signál je súčtom príspevkov od dierových (záporný signál) a elektrónových (kladný signál) pascií. So zvyšujúcim sa

obsahom india narastá pravdepodobnosť výskytu elektrónových pascí, ktoré znižujú čistú amplitúdu signálu rušením dominantnej zápornosti. Zníženie signálu teda neznamená menší počet pascí, ale skôr komplexnejšiu štruktúru spektra a narastajúci podiel pascí s opačnou polaritou.

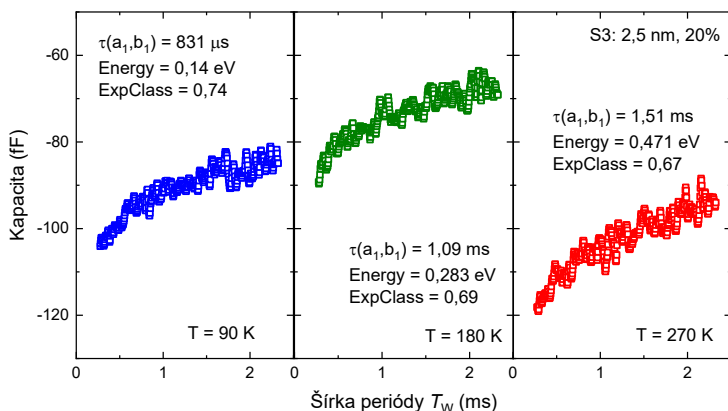


Obr. 4.9 Namerané DLTS spektrá na štruktúrach S1-S5 pri dvoch rôznych meracích podmienkach.

Na Obr. 4.10 sú zobrazené vybrané namerané DLTS spektrá pre všetky skúmané štruktúry S1 až S5 spolu s vypočítanými Arrheniovými závislosťami. Namerané DLTS spektrá sú doplnené o simulácie zachytno-emisných procesov, ktoré sme v danej štruktúre identifikovali. Napriek tomu, že časť spektier vykazuje zvýšený šum signálu, je možné ich použiť na vyhodnocovanie. To vyplýva aj z ukážky nameraných kapacitných transient (Obr. 4.11) na štruktúre S3. Aj napriek „zašumenému“ spektru namerané kapacitné transients vykazovali exponencialitu nad 66%. Súhrnný prehľad parametrov týchto defektov, vrátane aktivačnej energie a zachytného prierezu, je uvedený v Tab. 4.5.



Obr. 4.10 Namerané DLTS spektrá na štruktúrach S1-S5 pri rovnakých meracích podmienkach $U_R = -1,25$ V, $U_p = -0,1$ V, $t_p = 20$ ms, $T_w = 2$ ms a vypočítané Arrheniove závislosti. Namerané DLTS spektrá sú doplnené o simulácie záchytno-emisných procesov QW1 až QW3 a HT1 až HT22.



Obr. 4.11 Ukážka nameraných kapacitných transient pri rôznych teplotách v štruktúre S3.

Identifikované pasce HT1-HT22 sme na základe ich parametrov a polohy Arrheniových závislostí porovnali. Toto porovnanie je zhrnuté v Tab. 3.6. Tieto pasce môžeme rozdeliť do 7 skupín:

- Skupina H1 – pasce HT1 (0,15 eV), HT6 (0,17 eV), HT15 (0,15 eV) a HT19 (0,16 eV) sú rovnaké pasce identifikované v štruktúrach S1, S2, S3 a S5.
- Skupina H2 – pasce HT2 (0,17 eV), HT11 (0,17 eV), HT14 (0,17 eV) a HT18 (0,16 eV) sú rovnaké pasce identifikované v štruktúrach S1, S3, S4 a S5. Predpokladáme že pôvod zodpovedá prítomnosti vakancii Ga (25).
- Skupina H3 – pasce HT3 (0,22 eV), HT7 (0,23 eV) a HT15 (0,23 eV) sú rovnaké pasce identifikované v štruktúrach S1, S2 a S4.
- Skupina H4 – pasce HT4 (0,28 eV), HT8 (0,28 eV), HT12 (0,29 eV) a HT16 (0,30 eV) sú pasce identifikované v štruktúrach S1, S2, S3 a S4.
- Skupina H5 – pasce HT5 (0,38 eV) a HT21 (0,38 eV) sú pasce identifikované v štruktúrach S1 a S5.

Tab. 4.5 Sumarizácia základných parametrov emisií z kvantových jám QW1-QW3 a pascií HT1-HT22 z Arrheniových závislostí

Vzorka	Pasca	Aktivačná energia ΔE_T (eV)	Záchytný prierez σ_p (cm ²)
S1	QW1	0,08	$2,79 \times 10^{-19}$
S1	HT1	0,15	$1,45 \times 10^{-18}$
S1	HT2	0,17	$2,98 \times 10^{-16}$
S1	HT3	0,22	$2,71 \times 10^{-17}$
S1	HT4	0,28	$2,76 \times 10^{-16}$
S1	HT5	0,38	$1,63 \times 10^{-15}$
S2	HT6	0,17	$6,50 \times 10^{-18}$
S2	HT7	0,23	$3,61 \times 10^{-17}$
S2	HT8	0,28	$1,22 \times 10^{-16}$
S2	HT9	0,39	$1,23 \times 10^{-16}$
S3	HT10	0,15	$1,56 \times 10^{-18}$
S3	HT11	0,17	$9,72 \times 10^{-17}$
S3	HT12	0,29	$1,04 \times 10^{-16}$
S3	HT13	0,38	$1,38 \times 10^{-16}$
S4	QW2	0,13	$1,52 \times 10^{-20}$
S4	HT14	0,17	$1,77 \times 10^{-16}$
S4	HT15	0,23	$3,40 \times 10^{-17}$
S4	HT16	0,30	$7,69 \times 10^{-16}$
S4	HT17	0,38	$8,97 \times 10^{-17}$
S5	QW3	0,22	$3,58 \times 10^{-19}$
S5	HT18	0,16	$4,23 \times 10^{-17}$
S5	HT19	0,15	$8,14 \times 10^{-18}$
S5	HT20	0,22	$7,78 \times 10^{-17}$
S5	HT21	0,38	$6,89 \times 10^{-16}$
S5	HT22	0,36	$5,44 \times 10^{-17}$

- Skupina H6 – pasce HT6 (0,39 eV), HT13 (0,38 eV), HT17 (0,38 eV) a HT22 (0,36 eV) sú pasce identifikované v štruktúrach S2, S3, S4 a S5.
- Pasca HT20 (0,22 eV) identifikovaná len v štruktúre S5. Pôvod tejto pasce môžeme prisúdiť prítomnosti C_N-V_{Ga} komplexu (25).

4.3 Komerčné pGaN e-mode GaN výkonové tranzistory

Cieľom tohto experimentu bolo preskúmať vplyv elektrického namáhania (elektrický skrat typu I.) na distribúciu pascí v dvoch rôznych typoch výkonových tranzistorov od výrobcu Infineon.

Elektrické namáhanie - elektrického skratu typu I (SC-I. alebo HSF – Hard Switching Failure) je stav, kedy napájacia vetva zopne cez spínacie zariadenie, pričom tranzistor je pripojený priamo so zemou bez pripojenej záťaže. Jedinou záťažou v danom momente bude predstavovať vnútorný odpor tranzistora spolu s odporom samotných kontaktov. Počas merania dochádza k rozptýleniu vysokých energií, čo má za následok rýchly ohrev testovanej vzorky a zároveň k zníženiu mobility nosičov náboja. To spôsobuje pokles prúdu so zvyšujúcou sa dobou trvania skratu na testovanej vzorke. Tento stav môže trvať len veľmi krátku dobu (26).

4.3.1 IGO60R070D1 600V CoolGaN™

Na tento experiment boli použité vzorky IGO60R070D1 600V CoolGaN™ e-mode výkonové tranzistory od spoločnosti Infineon (27).

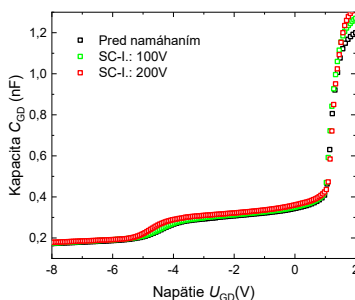
Súhrn podmienok elektrického namáhania pre DLTFs experiment je zobrazený v Tab. 4.6.

Tab. 4.6 Vstupné podmienky elektrického namáhania SC-I. pre DLTFs meranie.

Názov stresu	Napätie U_{DS} (V)	Napätie U_{GS} (V)	Dĺžka trvania pulzu t_p (μ s)	Počet cyklov
SC-I.: 100	100	4,5	2	200 000
SC-I.: 200	200	4,5	2	200 000

Na Obr. 4.12 sú zobrazené namerané C-U charakteristiky na skúšanom tranzistore pred a po aplikovaní elektrického namáhania.

Elektrické namáhanie nie veľmi, ale predsa ovplyvnilo kapacitu meraného tranzistora. Došlo ka nárastu kapacity v prechodovej oblasti (od -4 V do 0 V), pričom je tento nárast kapacity výraznejší, čím vyššiemu SC-I. stresu bol tranzistor vystavený. Z fyzikálneho hľadiska je možné tento jav vysvetliť tvorbou alebo aktiváciou defektov na rozhraní p-GaN/AlGaIn alebo AlGaIn/GaN, ktoré vytvárajú nové alebo prehĺbujú existujúce pasce. Tieto pasce menia lokálne elektrické pole v oblasti prechodu medzi OFF a ON stavom tranzistora, čo sa prejavuje ako zvýšenie kapacity pri danom napätí hradla. Ide o typický prejav pascí na rozhraní, ktoré ovplyvňujú prechodovú časť charakteristiky.



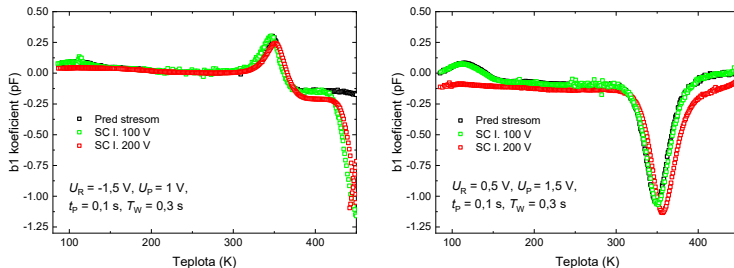
Obr. 4.12 Nameraná C-U charakteristika pred a po aplikovaní elektrického namáhania na skúmanom tranzistore.

Na Obr. 4.13 sú zobrazené namerané DLTFs spektrá pred a po aplikovanom elektrickom namáhaní pri rôznych podmienkach merania. Kapacitná transients (Obr. 4.14 vľavo) dokazuje prítomnosť pascí v oblasti teplôt 85-120 K, avšak už na prvý pohľad sa jedná o multiexponenciálu. Túto interpretáciu podporuje aj hodnota exponenciálnej triedy ($\text{ExpClass} = 0,62$), pričom ideálna hodnota ExpClass je 1. Na základe polohy maxima odhadujeme aktivačnú energiu pasce na približne 0,24 eV.

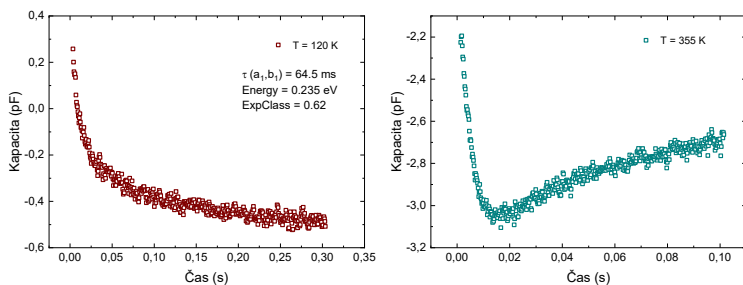
Aplikované elektrické namáhanie s napätím 200 V znížil kapacitu tohto signálu. V prípade maxima, ktoré sa nachádza v okolí teplôt 300–350 K môžeme vidieť, že aplikované elektrické namáhanie výrazne nemení kapacitu signálu. Nameraný DLTFs signál však prechádza cez 0, čo indikuje prítomnosť pascí, ktoré sa navzájom ovplyvňujú a výsledný signál je súčtom emisií. Na nameranej kapacitnej transiente pri danej teplote (Obr. vpravo)

môžeme vidieť, ako sa dva exponenciálne signály ovplyvňujú. V okolí teploty 420 K došlo k vytvoreniu minima po aplikovaní elektrického namáhania.

Namerané DLTFs spektrum pri podmienkach $U_R = 0,5$ V, $U_P = 1,5$ V je zobrazené na Obr. 4.13 vpravo. Toto namerané spektrum vykazuje lepšiu štruktúrovanosť. V okolí teploty od 85 – 120 K je vidieť namerané maximum tak, ako v prípade Obr. 4.13 vľavo. Predpokladať, že pri rôznych meracích podmienkach vidíme emisiu z tých istých pascí. Taktiež tu signál prechádza cez 0, čo indikuje prítomnosť pascí, ktoré sa navzájom ovplyvňujú. Môžeme si však všimnúť, že aplikované elektrické namáhania s napätím 200 V znížil kapacitu nameraného signálu a maximum sa nám už neobjavuje. Namiesto maxima sa tu nachádza kontinuálne spektrum až do teploty 300 K v záporných hodnotách. Takéto spektrum býva často indikátorom prítomnosti pascí na rozhraniach s kontinuálnou distribúciou energií cez celú šírku zakázaného pásma polovodiča (28). Minimum v okolí teploty 350 K je ovplyvnené len elektrickým namáhaním s napätím 200 V, kde vidíme malý nárast v kapacite signálu a aj malý posun do vyšších teplôt. Výrazná zmena je badateľná následne až pri teplote nad 400 K, kde dochádza k vytvoreniu záporného signálu po elektrickom namáhaní.



Obr. 4.13 Porovnanie nameraných DLTFs spektier pred a po aplikovaní elektrický stresov pri rôznych podmienkach merania.

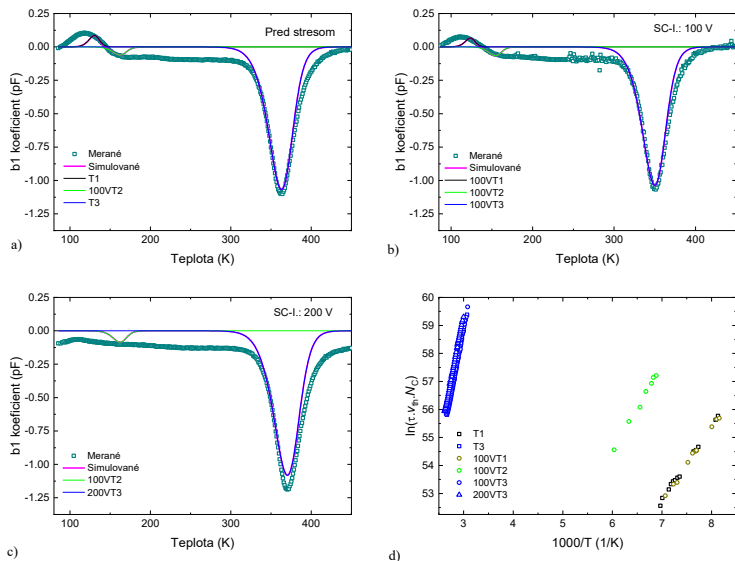


Obr. 4.14 Namerané kapacitné transienty pre DLTS spektrum s $U_R = -1.5$ V pri rôznych teplotách.

Z nameraných DLTS spektier pred a po aplikovaní elektrického stresu pri meracích podmienkach $U_R = 0,5$ V, $U_P = 1,5$ V (Obr. 4.15 a-c) sme z vypočítaných Arrheniových závislostí (Obr. 4.15 d) identifikovali parametre 3 pascí. Namerané spektrá sú doplnené o simulácie identifikovaných pascí. Pascu T3 s aktivačnou energiou 0,80 eV sme boli schopní identifikovať aj po aplikovaní jednotlivých stresov (označená ako 100VT3, 200VT3). Poruchu T1 s aktivačnou energiou 0.23 eV sme identifikovali len pred a po aplikovaní elektrického stresu s impulzným napätím 100 V (označená ako 100VT1). Poruchu 100VT2 s aktivačnou energiou 0.27 eV sme boli schopní identifikovať len po aplikovaní elektrického stresu s impulzným napätím 100 V. Predpokladáme, že táto pasca sa nachádza aj pred aplikovaním elektrického stresu a aj po aplikovaní stresu s napätím 200 V, preto sme simuláciu tejto pasce doplnili aj do týchto nameraných DLTS spektier. Vypočítané parametre identifikovaných pascí sú zhrnuté v Tab. 4.7.

Záchytný prierez identifikovaných porúch sme vypočítali aj pre elektrónový typ pasce, aj pre dierový typ pasce. Dôvodom výpočtu oboch záchytných prierezov je fakt, že v tak komplikovanej štruktúre z nameraného DLTS spektra a transient nedokážeme priamo určiť, či sa jedná o elektrónové alebo dierové pasce. Metódou, akou dokážeme určiť povahu poruchy je porovnať už odpublikované výsledky z dostupnej literatúry spolu s našimi výsledkami. Preto vypočítané Arrheniove závislosti pre jednu pascu sú vykreslené od seba. Tieto Arrheniove závislosti sme doplnili o simuláciu Arrheniových závislostí z odpublikovaných výsledkov. Čiernou farbou sú

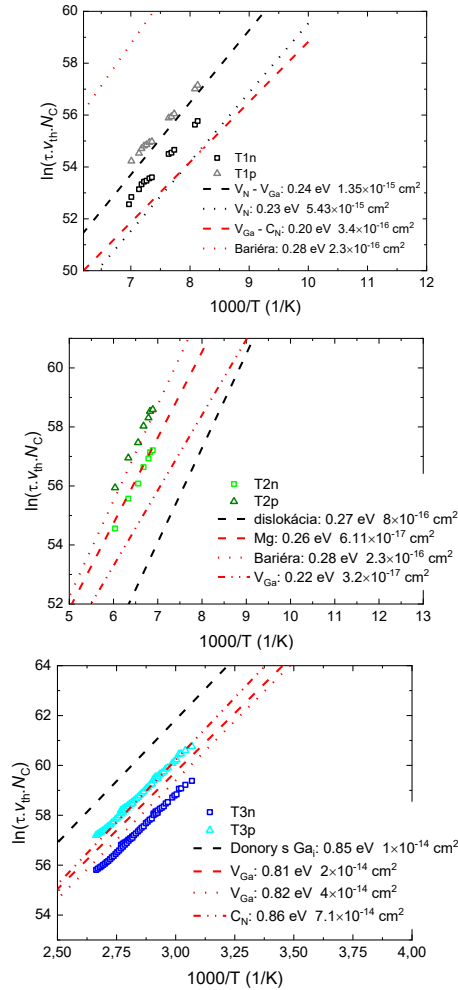
označené odpublikované elektrónové pasce, červenou farbou sú označené odpublikované dierové pasce (Obr. 4.16).



Obr. 4.15 Namerané DLTS spektrá: a) pred stresom; b) SC-I.: 100 V; c) SC-I.: 200 V; d) vypočítané Arrheniové závislosti identifikovaných porúch.

Tab. 4.7 Vypočítané parametre identifikovaných porúch

Označenie	Aktivačná energia ΔE_T (eV)	Záchytný prierez σ_n (cm ²)	Záchytný prierez σ_p (cm ²)
T1	0.228	1.35×10^{-15}	2.48×10^{-16}
100VT1	0.227	1.35×10^{-15}	3.37×10^{-16}
100VT2	0.27	3.74×10^{-16}	9.34×10^{-17}
T3	0.80	3.09×10^{-14}	7.73×10^{-15}
100VT3	0.77	1.30×10^{-14}	3.26×10^{-15}
200VT3	0.79	1.44×10^{-14}	3.60×10^{-15}



Obr. 4.16 Arrheniove závislosti pre vypočítané elektrónové a dierové pasce spolu so simuláciou odpublikovaných Arrheniových závislostí z dostupnej literatúry.

Na základe tejto analýzy môžeme povedať, že s vysokou pravdepodobnosťou namerané maximá v DLTFs spektrách zodpovedajú elektrónovým pasciam a namerané minimá v DLTFs spektre zodpovedajú dierovým pasciam.

- Simulované Arrheniove závislosti V_N a jej komplexov sa nachádzajú v blízkosti našej identifikovanej pasce. Tieto pasce sú v literatúre uvádzané ako elektrónové pasce (29).
- Simulované Arrheniove závislosti pascí v bariére a Mg akceptorových hladín sa nachádzajú v blízkosti našej identifikovanej pasce. Tieto pasce sú v literatúre uvádzané ako dierové pasce (30).
- Simulované Arrheniove závislosti V_{Ga} sa nachádzajú v blízkosti našej identifikovanej pasce. Táto pasca sa v literatúre uvádza ako dierová pasca (31).

Výsledky nášho DLTFs experimentu nadväzujú na výsledky práce (32), ktorá sa venovala testovaniu odolnosti a zmien elektrických charakteristík týchto tranzistorov po ich vystavení SC-I. Pri spínaní GaN HEMT tranzistorov v skratových podmienkach dochádza k zmenám ich elektrických parametrov v dôsledku opakovaného vystavenia vysokým prúdovým a napäťovým zaťaženiam. Zaznamenané zmeny vo výstupných a prevodových charakteristikách tranzistorov neprejavovali jednotnú závislosť od počtu absolvovaných skratových pulzov, čo poukazuje na komplexnú povahu degradácie týchto súčiastok. Pri skúmaní tranzistorov sa nezistil posun prahového napätia ani zmena kapacity medzi hradlom a sourcom. Zmena hradlového zvodového prúdu môže byť spôsobená tepelnomechanickým namáhaním štruktúry hradla. Postupný pokles drainového zvodového prúdu je možné vysvetliť postupným nabíjaním existujúcich pascí v epitaxnej vrstve alebo vznikom nových pascí v kanálovej AlGaN vrstve a na jej rozhraniach. Tieto zmeny sú podporené aj pozorovanou zmenou kapacity medzi hradlom a drainom, ktorá indikuje modifikáciu nábojových stavov v epitaxnej oblasti tranzistora (32).

4.3.2 GS66516B 650V e-mode GaN

Na tento experiment boli taktiež použité vzorky GS66516B 650V e-mode GaN výkonové tranzistory od spoločnosti GaN systems, ktorá je v súčasnosti už súčasťou Infineonu (33)

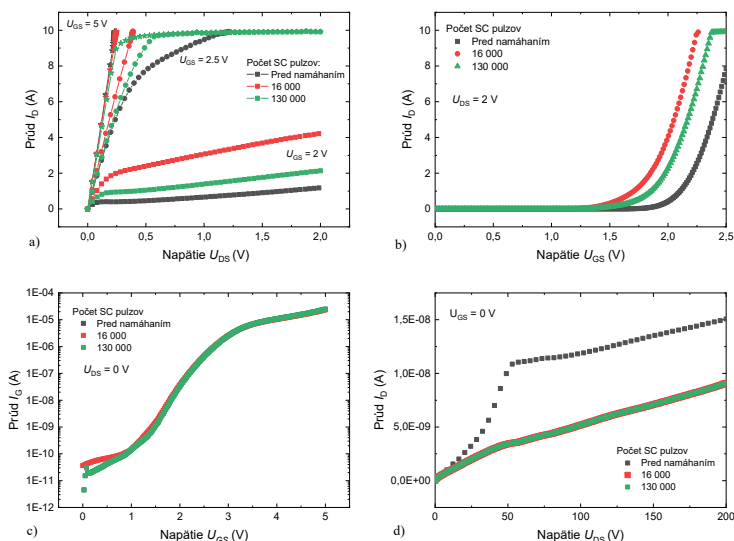
Súhrn podmienok elektrického namáhania pre DLTFs experiment je zobrazený v Tab. 4.8.

Tab. 4.8 Vstupné podmienky elektrického namáhania SC-I. pre DLTFs meranie.

Názov stresu	Napätie U_{DS} (V)	Napätie $U_{G,ON}$ (V)	Dĺžka trvania pulzu t_p (μ s)	Periódá pulzov T (ms)	Počet cyklov
200V	200	6	0,3	500	16 000
200V	200	6	0,5	500	130 000
250 V ¹	250	6	1	500	280

Na Obr. 4.17 sú namerané I-U charakteristiky na skúmanom tranzistore (výstupná charakteristika, prevodová charakteristika, zvodový prúd na hradle I_G a zvodový prúd na draine I_D). Môžeme vidieť, že zmena parametrov tranzistore je závislá od počtu cyklov použitého namáhania. Na výstupnej charakteristike môžeme badať, že elektrické namáhanie vplyva na strmosť charakteristiky a aj na saturačný prúd. Nedochádza však ku vplyvu v jednom trende. Takéto správanie vidíme i v prípade prevodovej charakteristiky, kde nedochádza k posunu len v jednom trende. Predpokladáme, že takéto zmeny charakteristík sú v dôsledku viacerých mechanizmov. Ich intenzita je závislá od počtu opakovaní pulzov elektrického namáhania. Prvým mechanizmom, ktorý môže vplyvať na takéto posuny charakteristík, je zachytávanie náboja pod hradlovou elektródou. To vplyva na posuny prahového napätia $U_{GS(th)}$ (34). Ďalší mechanizmus môže byť znižovanie koncentrácie voľných nosičov náboja v 2DEG v dôsledku záchytu náboja v oblasti drainu (35). V meraniach zvodového prúdu na hradle I_G (Obr. 4.17c) sa neprejavujú výrazné zmeny v závislosti od počtu opakovaní SC pulzov. Je možné pozorovať pokles drainového zvodového prúdu I_D po prvom elektrickom namáhaní so 16 000 cyklami. Avšak po elektrickom namáhaní so 130 000 cyklami už nedošlo k žiadnej zmene. To je možné vysvetliť postupným nabitím existujúcich pasív v epitaxnej vrstve, ktoré mohli byť vplyvom namáhania zaplnené a zneutralizované.

¹ Použitie týchto podmienok elektrického namáhania malo za následok deštrukciu tranzistora



Obr. 4.17 I-U charakteristiky namerané na skúmaných tranzistoroch pred a po aplikovaní elektrického stresu: a) výstupná charakteristika; b) prevodová charakteristika; c) závislosť zvodového prúdu na hradle; d) závislosť drainového zvodového prúdu na hradle.

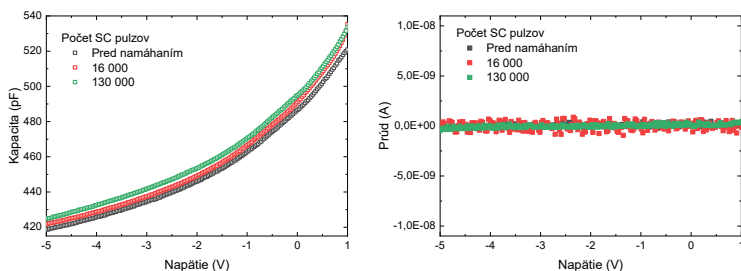
Na Obr. 4.18 sú zobrazené C-U a I-U charakteristiky pre a po aplikovaní elektrického namáhania, na základe ktorých sme sa optimalizovali vstupné parametre DLTFs merania. Vidíme, že aplikované elektrické namáhanie o niečo zvýšilo kapacitu štruktúry. Prúdová charakteristika zostala nezmenená.

Na Obr. 4.19 vľavo môžeme vidieť, akým spôsobom dokážu vybrané vstupné parametre (v tomto prípade napätia) ovplyvniť budenie jednotlivých pascí v štruktúre. Merania pri rôznych napätiach nám ukázali, že maximum DLTFs spektra pri $U_R = -2,5\text{ V}$ a $U_P = -0,1\text{ V}$ je možno výsledkom jednej emisie z jednej pasce, avšak dobežná hrana signálu nie je symetrická, čo nám indikovalo prítomnosť ďalších pascí. Taktiež vidíme, že signál sa nevracia naspäť do 0.

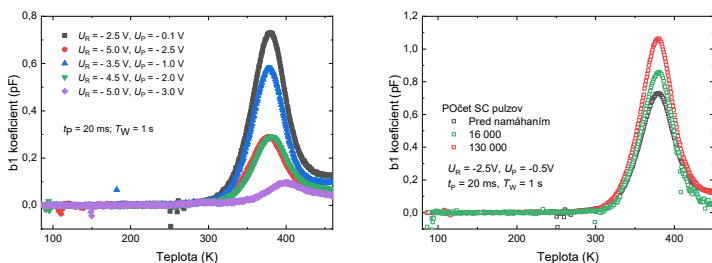
Treba poznamenať, že samotné DLTFs meranie dopomáha k relaxácii vzorky, čo sa nám potvrdilo v prípade predchádzajúcich experimentov (36). To znemožňuje získať spoľahlivý výsledok po

opakovaných meraniach na vzorke po aplikácii elektrického namáhania. Iba prvé DLTFs meranie, vykonané po aplikácii namáhania, má vysokú úroveň spoľahlivosti.

Porovnanie nameraných DLTFs spektier pred a po aplikovaní elektrického namáhania (Obr. 4.19 vľavo) nám ukázalo, že elektrické namáhanie ovplyvňuje distribúciu pascí. Vidíme, že kapacita signálu narástla, avšak nevzniklo žiadne ďalšie maximum/minimum. To hovorí o vysokej kvalite tejto štruktúry, nakoľko dochádza len k ovplyvneniu už existujúcich pascí.

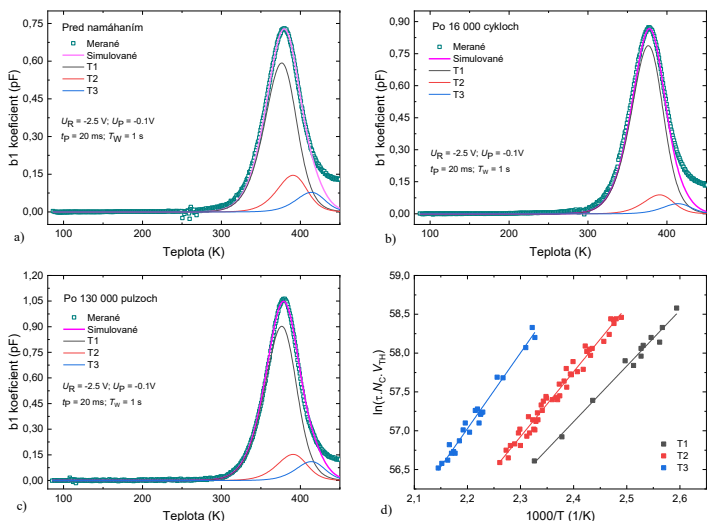


Obr. 4.7 Namerané C-U a I-U charakteristiky na meracom pracovisku DL8000.



Obr. 4.19 Namerané DLTFs spektra: a) vplyv vstupných parametrov na distribúciu porúch; b) vplyv elektrického namáhania na distribúciu porúch v tranzistore.

Z vypočítaných Arrheniových závislostí sme identifikovali základné parametre 3 pascí, označených T1-T3. Základné parametre identifikovaných porúch je zhrnutý v Tab. 4.9.

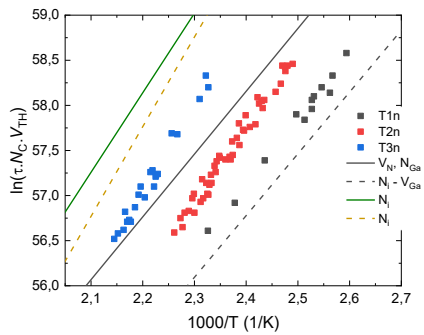


Obr. 4.20 Namerané DLTS spektrá pred a po aplikovaní elektrického namáhania doplnené o simuláciu identifikovaných pascí: a) pred namáhaním; b) po 16 000 cykloch; c) po 130 000 pulzoch; d) Vypočítané Arrheniove závislosti identifikovaných pascí.

Tab. 4.9 Základné parametre identifikovaných pascí T1-T3 v skúmanom tranzistore.

Označenie	Aktivačná energia ΔE_T (eV)	Záchytný prierez σ_n (cm ²)	Záchytný prierez σ_p (cm ²)
T1	0.62	$4,57 \times 10^{-18}$	$1,47 \times 10^{-18}$
T2	0.72	$4,20 \times 10^{-17}$	$2,81 \times 10^{-17}$
T3	0.84	$3,70 \times 10^{-16}$	$9,25 \times 10^{-16}$

Záchytný prierez identifikovaných porúch sme vypočítali aj pre elektrónový typ pasce, aj pre dierový typ pasce z rovnakých dôvodov, ako v prípade vzorky IGO60R070D1 – v tak komplikovanej štruktúre z nameraného DLTS spektra a transient nedokážeme priamo určiť, či sa jedná o elektrónové alebo dierové pasce. Avšak pri porovnaní s výsledkami z literatúry sme dospeli k záveru, že identifikované pasce sú elektrónového typu. Na Obr. 4.21 sú zobrazené vypočítané Arrheniove závislosti doplnené o simuláciu závislostí z dostupnej literatúry. Vidíme, že nami identifikované pasce pravdepodobne súvisia s bodovými poruchami (25, 37-39).



Obr. 4.21 Arrheniove závislosti pre vypočítané elektrónové a dierové pasce spolu so simuláciou odpublikovaných Arrheniových závislostí z dostupnej literatúry.
Parametre simulácií sú prevzaté z (25, 37-39)

5 Zhrnutie výsledkov dizertačnej práce

Hlavné body tejto dizertačnej práce môžeme zhrnúť do nasledovných bodov:

- Získali sme nové poznatky o fyzikálnych vlastnostiach materiálu GaN, polovodičových štruktúrach na báze GaN a o poruchách a technologických výzvach výrobného procesu štruktúr na báze GaN. Využitie týchto poznatkov významne prispieva k pochopeniu dynamiky nábojových pascí a optimalizácii rastových parametrov pre vysoko výkonové a vysokofrekvenčné elektronické a optoelektronické súčiastky.
- V skúmaných InAlGaN/GaN HEMT štruktúrach sme určili základné parametre elektricky aktívnych porúch v dvoch typoch štruktúr s rozdielnou pasivačnou dvojvrstvou ($\text{SiN}_x + \text{SiN}_x$ a $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiN}_x$).
 - o Bolo identifikovaných šesť dierových pascí v štruktúre s pasiváciou $\text{SiN}_x + \text{SiN}_x$ (T1 až T6) a tri dierové pasce v štruktúre s pasiváciou $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiN}_x$ (T3a, T4a, T6a).
 - o Dierové pasce s aktivačnými energiami 0,27 eV a 0,34 eV pravdepodobne zodpovedajú kremíkovým atómom lokalizovaným na rozhraní SiN/InAlGaN. Dierové pasce s energiami 0,88 eV, 0,92 eV a 0,97 eV možno priradiť hlbokým akceptorovým úrovňam C_N .
 - o Dvojica dierových pascí s aktivačnými energiami 0,42 eV a 0,53 eV, pozorovaná v štruktúre s pasiváciou $\text{SiN}_x + \text{SiN}_x$, bola identifikovaná aj v štruktúre s pasiváciou $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiN}_x$, avšak s výrazne nižšou koncentráciou. Tieto pasce pravdepodobne súvisia so vznikom dvojrozmerného dierového plynu (2DHG) v závernom smere.
 - o Pasivačná vrstva Al_2O_3 vďaka svojmu jedinečnému rozhraniu má miernejší dipólový efekt, a teda má odlišný vplyv na transport a akumuláciu dier. Výsledná modulácia koncentrácie minoritných nosičov závislá od typu pasivácie významne ovplyvňuje elektrické charakteristiky v závernom smere a kapacitné odozvy týchto heteroštruktúr, preto sa pasivácia s Al_2O_3 javí ako vhodnejšia alternatíva.

- V InGaN/GaN MQW štruktúrach sme skúmali vplyv koncentrácie india v InGaN/GaN MQW štruktúrach na distribúciu pascí a správanie nosičov náboja v kvantových jamách metódou DLTS (analyzované vzorky s obsahom In od 15 % (S1) po 28 % (S5)).
 - o Elektrónové pasce, ktoré sú typicky viazané na dislokácie, sa nepodarilo detegovať, pravdepodobne z dôvodu ich prekrytia silnejším záporným signálom pochádzajúcim z dierových pascí.
 - o Výsledný DLTS signál bol kombinovaným prejavom záchytno-emisných procesov elektrónov a dier, a preto zníženie amplitúdy signálu pri vyššej koncentrácii india nemožno interpretovať ako znak vyššej kvality štruktúry.
 - o Predikované a experimentálne určené aktivačné energie v kvantových jamách pre diery (QW1 – QW3) vykazovali veľmi dobrú zhodu.
 - o Viazané energetické stavy v kvantových jamách nevytvárajú jednu diskretnú hladinu, ale celú energetickú distribúciu, čo je dôsledok prirodzených fluktuácií hrúbky vrstvy a povrchovej drsnosti, ktoré sú charakteristické pre epitaxné technológie.
 - o Identifikovali sme tri pasce súvisiace s kvantovými jamami (QW1–QW3) a ďalších 22 pascí (HT1–HT22), ktoré sa podľa energetickej polohy a záchytného prierezu dajú zaradiť do siedmich skupín. Takéto zoskupenie naznačuje ich spoločný alebo podobný pôvod. Bola potvrdená prítomnosť vakancií gália.
- Skúmali sme vplyv elektrického namáhania, konkrétne skratu typu I. na distribúciu pascí v dvoch rôznych typoch výkonových p-GaN e-mode GaN výkonových tranzistorov od firmy Infineon.
 - o V prípade oboch typov tranzistorov sa preukázalo, že elektrické namáhanie ovplyvňuje koncentráciu existujúcich pascí, pričom nedochádza k tvorbe nových pascí, ale k zmene ich nábojového stavu. Tieto zmeny sa prejavujú najmä v oblasti prechodového napätia, kde bol pozorovaný nárast kapacity, ako aj pokles drainového zvodového prúdu po určitom počte cyklov namáhania.

- DLTFs merania ukázali, že v oblasti nízkych teplôt (85–120 K) boli identifikované výrazné signály, ktoré súvisia s elektrónovými pascami. Po aplikácii elektrického namáhania dochádzalo k útlmu DLTFs signálu alebo jeho transformácii na široké kontinuálne spektrum, čo naznačuje redistribúciu alebo deaktiváciu pascí.
 - Identifikované pasce T1–T3 s aktivačnými energiami 0,23; 0,27 a 0,80 eV boli simulované a porovnané s publikovanými údajmi. Simulácia Arrheniových závislostí potvrdila, že väčšina identifikovaných pascí má elektrónový charakter.
 - Významným zistením bolo, že DLTFs meranie je citlivé najmä na defekty v oblasti p-GaN/AlGaN hradla a v AlGaN bariére, čo je podmienené štruktúrou 2DEG. Výsledky zároveň ukazujú, že správna voľba meracích podmienok významne ovplyvňuje selektivitu voči konkrétnym pasciam.
- K prínosom práce patrí implementácia elektronickej dekonvolúcie v DLTFs meraniach, ktorá umožnila spracovanie neexponenciálnych kapacitných priebehov a spoľahlivú identifikáciu viacerých poruchových stavov aj v konštrukčne náročných viacvrstvových GaN heteroštruktúrach. Experimentálne výsledky zároveň potvrdili, že metóda DLTFs je dobre použiteľná na analýzu takto zložitých štruktúr.

6 Záver

Nitrid gália (GaN) sa v posledných rokoch stal dôležitým materiálom pre vývoj vysokovýkonných a vysokofrekvenčných polovodičových súčiastok v oblastiach výkonovej elektroniky, obnoviteľných zdrojov energie a elektromobility. Jeho výnimočné fyzikálne vlastnosti, ako sú široká šírka zakázaného pásma, vysoké prierné napätie, vynikajúca tepelná stabilita a možnosť vytvárať dvojrozmerný elektrónový plyn (2DEG), predurčujú GaN na použitie v aplikáciách, ktoré kladú vysoké nároky na účinnosť, spoľahlivosť a miniaturizáciu. Napriek týmto prednostiam je jednou z kľúčových výziev identifikácia a pochopenie vplyvu elektricky aktívnych porúch, ktoré môžu významne ovplyvniť životnosť a spoľahlivosť týchto zariadení.

Experimentálna časť práce bola rozdelená na tri experimenty zamerané na elektrickú charakterizáciu rôznych GaN štruktúr, ako sú InAlGaN/GaN HEMT, InGaN/GaN kvantové štruktúry a p-GaN e-mode výkonových tranzistorov.

Prvý experiment bol zameraný na štúdium poruchových stavov v InAlGaN/GaN HEMT štruktúrach s rôznymi schémami povrchovej pasivácie a to prostredníctvom metódy DLTFs. Výsledky DLTFs meraní potvrdzujú, že zvolený typ pasivačnej vrstvy významne ovplyvňuje prítomnosť a koncentráciu dierových pascií. Pasivácia pomocou $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiNx}$ preukazuje nižšiu koncentráciu defektov a priaznivejšie elektrické vlastnosti. Prítomnosť pascií pravdepodobne súvisí s kremíkovými atómami na rozhraní, akceptorovými defektmi typu CN, ako aj s emisiou dier z kvantovej jamy. Experimenty potvrdzujú, že vhodná voľba pasivačného systému dokáže znížiť koncentráciu povrchových pascií a tým prispieť k stabilnejšiemu a efektívnejšiemu správaniu HEMT súčiastok.

Druhý experiment bol zameraný na detailné skúmanie vplyvu koncentrácie indíu v InGaN/GaN MQW štruktúrach na distribúciu pascií a správanie sa nosičov náboja v kvantových jamách DLTFs metódou. DLTFs merania potvrdzujú prítomnosť dierových pascií a preukazujú koreláciu medzi rastúcou koncentráciou In a zvýšeným výskytom štruktúrnych defektov, ako sú dislokácie a hexagonálne defekty. Výsledky ukazujú, že emisie z kvantových jam zodpovedajú nízkoenergetickým hladinám s extrémne malými zachytnými prierezmi, pričom namerané aktivačné energie dobre

korelujú s predikovanými hodnotami pre kvantové stavy v kvantových jamách. Súčasne viazané energetické stavy v kvantových jamách nevytvárajú jednu diskretnú hladinu, ale celú energetickú distribúciu, čo je dôsledok prirodzených fluktuácií hrúbky vrstvy a povrchovej drsnosti, ktoré sú charakteristické pre epitaxné technológie. Elektrónové pasce, ktoré sú typicky viazané na dislokácie, sa nepodarilo detegovať, pravdepodobne z dôvodu ich prekrytia silnejším záporným signálom pochádzajúcim z dierových pascí.

V treťom experimente, v prípade pGaN e-mode GaN výkonových tranzistorov bol analyzovaný vplyv elektrického namáhania typu I. (elektrický skrat) na zmenu distribúcie pascí a elektrických parametrov súčiastok. Merania I-U a C-U charakteristík spolu s DLTFs analýzou ukazujú, že elektrické namáhanie vedie k zmene koncentrácie defektov, vzniku nových pascí a degradácii prenosových charakteristík tranzistorov. Experimenty potvrdzujú, že opakované vystavenie elektrickému namáhaniu môže viesť k nárastu koncentrácie hlbokých hladín a zhoršeniu výkonu súčiastok.

Na základe realizovaných experimentov a získaných výsledkov dizertačná práca potvrdzuje, že Implementácia elektronickej dekonvolúcie v DLTFs meraniach a kombinácia rôznych elektrických metód charakterizácie, predstavuje účinný a citlivý nástroj na identifikáciu a analýzu elektricky aktívnych porúch v progresívnych štruktúrach na báze GaN. Dosiahnuté výsledky prispievajú k hlbšiemu porozumeniu správania nosičov náboja, identifikácii pascí v kvantových jamách a v pokročilých výkonových tranzistoroch, čo umožňuje presnejšiu diagnostiku porúch a hodnotenie spoľahlivosti GaN súčiastok.

7 Conclusion

Gallium nitride (GaN) has become, in recent years, an important material for the development of high-power and high-frequency semiconductor devices in the fields of power electronics, renewable energy sources, and electromobility. Its exceptional physical properties—such as a wide bandgap, high breakdown voltage, excellent thermal stability, and the ability to form a two-dimensional electron gas (2DEG)—make GaN ideal for applications requiring high efficiency, reliability, and miniaturization. Despite these advantages, one of the key challenges remains the identification and understanding of electrically active defects, which can significantly impact the lifetime and reliability of these devices.

The experimental part of the dissertation was divided into three experiments focused on the electrical characterization of various GaN structures, such as InAlGaN/GaN HEMTs, InGaN/GaN quantum structures, and p-GaN e-mode power transistors.

The first experiment focused on the study of defect states in InAlGaN/GaN HEMT structures with different surface passivation schemes, using the DLTS method. The DLTS measurement results confirm that the chosen type of passivation layer significantly affects the presence and concentration of hole traps. Passivation using $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiN}_x$ shows a lower concentration of defects and more favorable electrical properties. The presence of traps is likely related to silicon atoms at the interface, CN-type acceptor defects, as well as hole emission from the quantum well. The experiments confirm that the appropriate choice of passivation system can reduce the concentration of surface traps, thereby contributing to more stable and efficient behavior of HEMT devices.

The second experiment focused on a detailed investigation of the effect of indium concentration in InGaN/GaN MQW structures on the distribution of traps and the behavior of charge carriers in quantum wells using the DLTS method. DLTS measurements confirm the presence of hole traps and show a correlation between increasing In concentration and a higher occurrence of structural defects such as dislocations and hexagonal defects. The results show that emissions from the quantum wells correspond to low-energy levels with extremely small capture cross-sections, and the measured activation energies align well with predicted values for quantum states within the wells. These bound quantum states do not form a single discrete level but rather an energy distribution, as a result of natural layer thickness fluctuations and surface roughness characteristic of epitaxial technologies. Electron traps, which are typically associated with dislocations,

were not detected—likely due to being masked by a stronger negative signal originating from hole traps.

In the third experiment, the influence of type I electrical stress (short circuit) was analyzed in p-GaN e-mode GaN power transistors in terms of changes in trap distribution and electrical parameters. I-V and C-V measurements along with DLTS analysis show that electrical stress leads to a change in defect concentration, the formation of new traps, and the degradation of the transistors' transfer characteristics. The experiments confirm that repeated exposure to electrical stress can lead to an increase in deep-level trap concentration and deterioration in device performance.

Based on the conducted experiments and obtained results, the dissertation confirms that the implementation of electronic deconvolution in DLTS measurements, combined with various electrical characterization methods, represents an effective and sensitive tool for identifying and analyzing electrically active defects in advanced GaN-based structures. The achieved results contribute to a deeper understanding of charge carrier behavior, trap identification in quantum wells and advanced power transistors, enabling more accurate defect diagnostics and reliability assessment of GaN devices.

8 Publikačná činnosť

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

- V3_01 MAREK, Juraj [40 %] - KOZÁRIK, Jozef [20 %] - MINÁRIK, Michal [10 %] - CHVÁLA, Aleš [5 %] - **MATUŠ, Matej [10 %]** - DONOVAL, Martin [5 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [5 %] - WEIS, Martin [5 %]. Charge trap states of sic power trenchmos transistor under repetitive unclamped inductive switching stress. In *Materials*. Vol. 15, iss. 22 (2022), Art. no. 8230 [11] s. ISSN 1996-1944 (2022: 3.4 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.563 - SJR, Q2 - SJR Best Q, 0.511 - AIS, Q1 - AIS Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/ma15228230 ; SCOPUS: 2-s2.0-85142688431 ; WOS: 000887385000001 ; CC: 000887385000001. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC
- V3_02 STUHLÍKOVÁ, Ľubica [30 %] - SCIANA, Beata [2 %] - KÓSA, Árpád [8 %] - **MATUŠ, Matej [8 %]** - BENKO, Peter [8 %] - MAREK, Juraj [8 %] - DONOVAL, Martin [4 %] - DAWIDOWSKI, Wojciech [1 %] - RADZIEWICZ, Damian [1 %] - WEIS, Martin [30 %]. Evaluation of effective mass in InGaAsN/GaAs quantum wells using transient spectroscopy. In *Materials*. Vol. 15, iss. 21 (2022), Art. no. 7621 [7] s. ISSN 1996-1944 (2022: 3.4 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.563 - SJR, Q2 - SJR Best Q, 0.511 - AIS, Q1 - AIS Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/ma15217621 ; SCOPUS: 2-s2.0-85141822946 ; WOS: 000883579900001 ; CC: 000883579900001. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC
- V3_03 **MATUŠ, Matej [55%]** – REŽO, Vratislav [5%] – HANIC, Michal [5%] – MORALES, Magali [3%] – STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15%] – WEIS, Martin [15%] – RUTERANA, Pierre [2%]. Defect Distribution in InAlGaN/GaN Structures with Different Passivation Schemes. In *Physica status solidi (RRL) Rapid Research Letters*, DOI: 10.1002/pssr.202500163, **Akceptované**.

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

- V2_01 **MATUŠ, Matej [15 %]** - DROBNÝ, Jakub [15 %] - VADOVSKÝ, Jakub [15 %] - KÓSA, Árpád [10 %] - BENKO, Peter [15 %] - KOVÁČ, Jaroslav jr. [10 %] - DELAGE, Sylvain Laurent [5 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %]. DLTS study of emission and capture processes in InAlGaN/GaN HEMT structures for 5G. In *ASDAM 2020 : 13th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. October 11-14, 2020*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2020, S. 119-122. ISSN 2474-9737. ISBN 978-1-7281-

9776-0. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85104499977 ; WOS: 000669651600027 ; IEEE: 9393839 ; DOI: 10.1109/ASDAM50306.2020.9393839.
Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_02 **MATUŠ, Matej [45 %]** - DROBNÝ, Jakub [15 %] - KÓSA, Arpád [5 %] - MAREK, Juraj [10 %] - KOVÁČ, Jaroslav jr. [10 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %]. Study of InAlGaN/GaN HEMT structures by DLTS with optical excitation. In *ASDAM 2022 : 14th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. October 23-26, 2022*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2022, S. 207-210. ISBN 978-1-6654-6977-7. V databáze: DOI: 10.1109/ASDAM55965.2022.9966764 ; IEEE: 9966764 ; SCOPUS: 2-s2.0-85144596456.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_03 BENKO, Peter [35 %] - KÓSA, Arpád [20 %] - **MATUŠ, Matej [10 %]** - DAWIDOWSKI, Wojciech [3 %] - RADZIEWICZ, Damian [3 %] - SCIANA, Beata [3 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [26 %]. Influence of annealing temperature on emission and capture processes in GaAsN/GaAs heterostructures. In *ASDAM 2022 : 14th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. October 23-26, 2022*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2022, S. 17-20. ISBN 978-1-6654-6977-7. V databáze: DOI: 10.1109/ASDAM55965.2022.9966749 ; IEEE: 9966749 ; SCOPUS: 2-s2.0-85144593783.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_04 MAREK, Juraj [60 %] - KOZÁRIK, Jozef [10 %] - MINÁRIK, Michal [10 %] - CHVÁLA, Aleš [5 %] - **MATUŠ, Matej [10 %]** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [5 %]. SiC power TrenchMOS transistor under repetitive avalanche stress. In *ASDAM 2022 : 14th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. October 23-26, 2022*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2022, S. 183-186. ISBN 978-1-6654-6977-7. V databáze: DOI: 10.1109/ASDAM55965.2022.9966790 ; IEEE: 9966790 ; SCOPUS: 2-s2.0-85144595561.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_05 STUHLÍKOVÁ, Ľubica [40 %] - **MATUŠ, Matej [20 %]** - ČINČURAK, Darko [10 %] - MAREK, Juraj [10 %] - BENKO, Peter [10 %] - CHVÁLA, Aleš [10 %]. Study of the defect distribution in power SiC-MOSFET before and after applied electrical stress. In *ASDAM 2022 : 14th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. October 23-26, 2022*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2022, S. 7-10. ISBN 978-1-6654-

6977-7. V databáze: DOI: 10.1109/ASDAM55965.2022.9966791 ;
IEEE: 9966791 ; SCOPUS: 2-s2.0-85144599132.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória
publikácie do 2021: AFD

V2_06

MATUŠ, Matej [40 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %] -
GREGUŠOVÁ, Dagmar [15 %] - MORALES, Magali [5 %] - WEIS,
Martin [15 %] - MAREK, Juraj [5 %] - RUTERANA, Pierre [5 %].
Impact of Indium Content on Defect Distribution in InGaN/GaN QW
Structures. In *ASDAM 2024 : 15th International conference on
advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice,
Slovakia. October 20-23, 2024*. Danvers : IEEE, 2024, S. 38-41. ISSN
2474-9737. ISBN 979-8-3315-4060-9. V databáze: DOI:
10.1109/ASDAM63148.2024.10844677 ; IEEE: 10844677 ; WOS:
001447859500010 ; SCOPUS: 2-s2.0-105001917756.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória
publikácie do 2021: AFD

V2_07

MATUŠ, Matej [40 %] - MAREK, Juraj [15 %] - CHVÁLA, Aleš [10
%] - BAKEROOT, Benoit [5 %] - GEENS, Karen [5 %] -
STUHLÍKOVÁ, Ľubica [25 %]. DLTFs Study of Monolithically
Integrated GaN-on-Si Power Transistor for High Power Applications. In
*ASDAM 2024 : 15th International conference on advanced
semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. October
20-23, 2024*. Danvers : IEEE, 2024, S. 42-45. ISSN 2474-9737. ISBN
979-8-3315-4060-9. V databáze: DOI:
10.1109/ASDAM63148.2024.10844616 ; IEEE: 10844616 ; WOS:
001447859500011 ; SCOPUS: 2-s2.0-105001921239.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória
publikácie do 2021: AFD

V2_08

MAREK, Juraj [30 %] - MINÁRIK, Michal [20 %] - **MATUŠ, Matej
[20 %]** - KOZÁRIK, Jozef [20 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [10 %].
SiC Power TrenchMOS Transistor under harsh repetitive switching
conditions. In *EPE'23 ECCE Europe : 25th European Conference on
Power Electronics and Applications. Aalborg, Denmark. September 4-
8, 2023*. New York : IEEE, 2023, [8] s. ISBN 978-9-0758-1541-2. V
databáze: DOI: 10.23919/EPE23ECCEurope58414.2023.10264402 ;
WOS: 001098971401053 ; IEEE: 10264402 ; SCOPUS: 2-s2.0-
85175170624.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória
publikácie do 2021: AFC

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

V2_09

DROBNÝ, Jakub [30 %] - **MATUŠ, Matej [20 %]** - MAREK, Juraj
[10 %] - CHVÁLA, Aleš [10 %] - KOZÁRIK, Jozef [10 %] -

STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %]. Investigation of emission and capture processes in Si IGBT. In *ADEPT 2021 : 9th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. September 20-23.2021*. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2021, S. 87-90. ISBN 978-80-554-1806-3.

Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_10 DROBNÝ, Jakub [30 %] - **MATUŠ, Matej [10 %]** - MAREK, Juraj [10 %] - CHVÁLA, Aleš [10 %] - GEENS, Karen [5 %] - BORGA, Matteo [5 %] - LIANG, Hu [5 %] - YOU, Shuzhen [5 %] - DECOUTERE, Stefaan [5 %] - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %]. Study of semi-vertical GaN-on-Si FETs by DLTFs with optical excitation. In *ADEPT 2021 : 9th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. September 20-23.2021*. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2021, S. 183-186. ISBN 978-80-554-1806-3.

Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_11 KÓSA, Árpád [15 %] - DAWIDOWSKI, Wojciech [10 %] - DROBNÝ, Jakub [15 %] - **MATUŠ, Matej [15 %]** - BENKO, Peter [15 %] - RADZIEWICZ, Damian [5 %] - ŚCIANA, Beata [5 %] - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %]. Analysis of emission and capture processes in GaAsN p-i-n solar cell. In *ADEPT 2022 : 10th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-24, 2022*. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2022, S. 254-257. ISBN 978-80-554-1884-1.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_12 **MATUŠ, Matej [40 %]** - MAREK, Juraj [15 %] - DROBNÝ, Jakub [15 %] - GEENS, Karen [1 %] - BORGA, Matteo [1 %] - LIANG, Hu [1 %] - DECOUTERE, Stefaan [1 %] - HAHN, Herwig [1 %] - HEUKEN, M. [1 %] - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [24 %]. Investigation of electrically active defects in quasi-vertical GaN devices for high power applications. In *ADEPT 2022 : 10th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-24, 2022*. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2022, S. 63-66. ISBN 978-80-554-1884-1.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_13 STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %] - KÓSA, Árpád [20 %] - BENKO, Peter [20 %] - **MATUŠ, Matej [20 %]** - ČINCURAK, Darko [5 %] - DAWIDOWSKI, Wojciech [5 %] - RADZIEWICZ, Damian [5 %] - ŚCIANA, Beata [5 %]. Annealing impact on the defect distribution in GaAsN/GaAs heterostructures. In *ADEPT 2022 : 10th International conference on advances in electronic and photonic technologies*.

Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-24, 2022. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2022, S. 250-253. ISBN 978-80-554-1884-1.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_14 MÁLIK, Viktor [25 %] - **MATUŠ, Matej [25 %]** - CHVÁLA, Aleš [14 %] - MAREK, Juraj [14 %] - VINCIGUERRA, Vincenzo [1 %] - MESSINA, Angelo Alberto [1 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %]. Electrically Active Defects in Power SiC-MOSFET Before and After Applied Electrical Stress. In *ADEPT 2023 : 11th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 12-15, 2023. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2023, S. 169-172. ISBN 978-80-554-1977-0.*
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_15 **MATUŠ, Matej [60 %]** - DROBNÝ, Jakub [5 %] - BENC, Peter [5 %] - FLOROVIČ, Martin [5 %] - DELAGE, Sylvain Laurent [5 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %]. Deep Level Transient Spectroscopy study of InAlGaN/GaN HEMT structures. In *ADEPT 2023 : 11th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 12-15, 2023. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2023, S. 103-106. ISBN 978-80-554-1977-0.*
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_16 STUHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %] - ŠCIANA, Beata [4 %] - KÓSA, Árpád [10 %] - **MATUŠ, Matej [10 %]** - BENKO, Peter [10 %] - DAWIDOWSKI, Wojciech [3 %] - RADZIEWICZ, Damian [3 %] - WEIS, Martin [40 %]. Insight into the Quantum Well Investigation by Transient Spectroscopy Technique. In *ADEPT 2023 : 11th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 12-15, 2023. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2023, S. 55-58. ISBN 978-80-554-1977-0.*
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V2_17 **MATUŠ, Matej [40 %]** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %] - GREGUŠOVÁ, Dagmar [15 %] - MORALES, Magali [5 %] - WEIS, Martin [15 %] - MAREK, Juraj [5 %] - RUTERANA, Pierre [5 %]. Investigation of Emission Processes in InGaN/GaN Quantum Well Structure. In *ADEPT 2024 : 12th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Nový Smokovec, Slovakia. June 24-27, 2024. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2024, S. 89-92. ISBN 978-80-554-2109-4.*
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

- V2_18 STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [35 %] - MATUŠ, Matej [15 %] - REŽO, Vratislav [15 %] - MORALES, M. [5 %] - WEIS, Martin [25 %] - RUTERANA, P. [5 %]. Flashback on 50 Years of Deep-Level Transient Spectroscopy. In *ADEPT 2024 : 12th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Nový Smokovec, Slovakia. June 24-27, 2024*. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2024, S. 7-12. ISBN 978-80-554-2109-4.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFB
- V2_19 STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [28 %] - VINCZE, Tomáš [10 %] - HANIC, Michal [10 %] - MATUŠ, Matej [10 %] - BENKO, Peter [10 %] - REŽO, Vratislav [10 %] - MORALES, Magali [3 %] - WEIS, Martin [16 %] - RUTERANA, Pierre [3 %]. Investigation of Organic Phototransistors by DLTS Method. In *ADEPT 2025 : 13th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 15-18, 2025*. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2025, S. 219-222. ISBN 978-80-554-2208-4.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_20 BENKO, Peter [26 %] - MATUŠ, Matej [15 %] - HROBÁROVÁ, Ema [5 %] - PAĽO, Adam [5 %] - HANIC, Michal [5 %] - REŽO, Vratislav [5 %] - VINCZE, Tomáš [5 %] - MORALES, Magali [2 %] - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %] - WEIS, Martin [10 %] - RUTERANA, Pierre [2 %]. Deconvolution of capacitance transients with a non-exponential character. In *ADEPT 2025 : 13th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 15-18, 2025*. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2025, S. 223-226. ISBN 978-80-554-2208-4.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_21 MAREK, Juraj [50 %] - KOZÁRIK, Jozef [15 %] - KOVÁCS, Krisztián [10 %] - MATUŠ, Matej [10 %] - MINÁRIK, Michal [10 %] - HANIC, Michal [5 %]. SiC power TrenchMOS transistor under harsh repetitive switching conditions. In *ADEPT 2025 : 13th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 15-18, 2025*. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2025, S. 67-70. ISBN 978-80-554-2208-4.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_22 MATUŠ, Matej [55 %] - KOZÁRIK, Jozef [10 %] - MINÁRIK, Michal [10 %] - MAREK, Juraj [10 %] - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %]. DLTS study of power GaN HEMTs before and after applied electrical stress. In *ADEPT 2025 : 13th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia*.

June 15-18, 2025. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2025, S. 201-204. ISBN 978-80-554-2208-4.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

- V2_23 STUHLÍKOVÁ, Ľubica [28 %] - VINCZE, Tomáš [10 %] - HANIC, Michal [10 %] - **MATUŠ, Matej [10 %]** - BENKO, Peter [10 %] - REŽO, Vratislav [10 %] - MORALES, Magali [3 %] - WEIS, Martin [16 %] - RUTERANA, Pierre [3 %]. Investigation of Organic Phototransistors by DLTS Method. In *ADEPT 2025 : 13th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 15-18, 2025*. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2025, S. 219-222. ISBN 978-80-554-2208-4.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_24 **MATUŠ, Matej [60 %]** - DROBNÝ, Jakub [20 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %]. Investigation of emission and capture processes in AlGaIn/GaN HEMT with field plate. In *ŠVOČ 2021 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác. 21. apríl 2021*. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, S. 97-100. ISBN 978-80-227-5104-9.
Typ výstupu: príspevok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_25 MÁLIK, Viktor [60 %] - **MATUŠ, Matej [20 %]** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %]. Analýza porúch vo výkonovom tranzistore MOSFET na báze SiC. In *ŠVOČ 2023 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác. 26. apríl 2023*. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, S. 147-151. ISBN 978-80-227-5307-4.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_26 TÁČIK, Tomáš [60 %] - **MATUŠ, Matej [20 %]** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %]. Skúmanie porúch vo výkonových diódach z karbidu kremíka. In *ŠVOČ 2023 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác. 26. apríl 2023*. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, S. 152-155. ISBN 978-80-227-5307-4.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_27 VADOVSKÝ, Jakub [15 %] - KÓSA, Arpád [15 %] - **MATUŠ, Matej [15 %]** - DROBNÝ, Jakub [15 %] - BENKO, Peter [10 %] - KOVÁČ, Jaroslav jr. [10 %] - DELAGE, Sylvain Laurent [5 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %]. DLTS Study of Electrically Active Defects in InAlGaIn/GaN HEMT Structures for 5G. In *Solid State Surfaces and Interfaces : 11th conference, November 23-26, 2020*,

Smolenice, Slovak Republic. 1. vyd. Bratislava : Comenius University, 2020, S. 103-104. ISBN 978-80-223-5018-1.
Kategória publikácie do 2021: AFH.

O2 Odborný výstup publikačnej činnosti ako časť knižnej publikácie alebo zborníka

- O2_01 CHVÁLA, Aleš [60 %] - MAREK, Juraj [10 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [10 %] - **MATUŠ, Matej [10 %]** - VINCIGUERRA, Vincenzo [5 %] - MESSINA, Angelo Alberto [5 %]. Characterization of Electrical Properties of Power SiC Schottky Diodes. In *WOCSDICE-EXMATEC 2023 : 46th Workshop on compound semiconductor devices and integrated circuits held in Europe. 16th Expert evaluation and control of compound semiconductor materials and technologies. Palermo, Italy. May 21-25, 2023*. Palermo : Università Degli Studi di Palermo, 2023, S. 78-79.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: BEE
- O2_02 MAREK, Juraj [20 %] - **MATUŠ, Matej [20 %]** - MÁLIK, Viktor [5 %] - CHVÁLA, Aleš [15 %] - WEIS, Martin [20 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %]. The impact of electric stress on charge trap states in SiC-based TrenchMOS. In *WOCSDICE-EXMATEC 2024 : 47th Workshop on compound semiconductor devices and integrated circuits held in Europe. 18th Expert evaluation and control of compound semiconductor materials and technologies. Heraklion Crete, Greece. May 19-23, 2024*. Heraklion Crete : MITOS, 2024, [2] s.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: BEE
- O2_03 **MATUŠ, Matej [40 %]** - MAREK, Juraj [20 %] - GEENS, Karen [3 %] - BORGA, Matteo [1 %] - LIANG, Hu [1 %] - DECOUTERE, Stefaan [1 %] - HAHN, Herwig [2 %] - HEUKEN, Michael [2 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [30 %]. Defect distribution study of p+/n-GaN diode for high power applications. In *WOCSDICE-EXMATEC 2022 : 45th Workshop on compound semiconductor devices and integrated circuits held in Europe. 16th Expert evaluation and control of compound semiconductor materials and technologies. Ponta Delgada, Portugal. May 3-6, 2022*. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2022, S. OP 96-97.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: BEE
- O2_04 **MATUŠ, Matej [80 %]** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [20 %]. Electrical characterisation of progressive structures based on GaN. In *ELITECH'23 [elektronický zdroj] : 25th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovakia. May 31, 2023*. 1. ed. Bratislava :

Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, [8] s. ISBN 978-80-227-5298-5.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: BEF

O2_05 **MATUŠ, Matej [60 %]** - DROBNÝ, Jakub [10 %] - FLOROVIČ, Martin [5 %] - MAREK, Juraj [5 %] - DELAGE, Sylvain Laurent [5 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %]. Electrically Active Defects in InAlGaN/GaN HEMT structures. In *WOCSDICE-EXMATEC 2023 : 46th Workshop on compound semiconductor devices and integrated circuits held in Europe. 16th Expert evaluation and control of compound semiconductor materials and technologies. Palermo, Italy. May 21-25, 2023*. Palermo : Università Degli Studi di Palermo, 2023, S. 21-22.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: BEE

O2_06 **MATUŠ, Matej [40 %]** - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %] - GREGUŠOVÁ, Dagmar [15 %] - MORALES, Magali [5 %] - WEIS, Martin [15 %] - MAREK, Juraj [5 %] - RUTERANA, Pierre [5 %]. Study of InGaN/GaN Quantum Well structure using transient spectroscopy. In *WOCSDICE-EXMATEC 2024 : 47th Workshop on compound semiconductor devices and integrated circuits held in Europe. 18th Expert evaluation and control of compound semiconductor materials and technologies. Heraklion Crete, Greece. May 19-23, 2024*. Heraklion Crete : MITOS, 2024, [2] s.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: BEE

Autor má 36 príspevkov z toho je 11 príspevkov v databáze WoS/SCOPUS

9 Ohlasy na publikácie autora

MAREK, Juraj [30 %] - MINÁRIK, Michal [20 %] - MATUŠ, Matej [20 %] - KOZÁRIK, Jozef [20 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [10 %]. SiC Power TrenchMOS Transistor under harsh repetitive switching conditions. In EPE'23 ECCE Europe : 25th European Conference on Power Electronics and Applications. Aalborg, Denmark. September 4-8, 2023. New York : IEEE, 2023, [8] s. ISBN 978-9-0758-1541-2. V databáze: DOI: 10.23919/EPE23ECCEurope58414.2023.10264402 ; WOS: 001098971401053 ; IEEE: 10264402 ; SCOPUS: 2-s2.0-85175170624.

[1] KE, Chao-Yang a KER, Ming-Dou. Investigation of safe operating area and behavior of unclamped inductive switching on 4H-SiC VDMOSFET. Online. Microelectronics Reliability. 2024, roč. 155. ISSN 00262714. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2024.115347>.

[2] NIE, Xinfeng; WANG, Ying; YU, Chenghao; FEI, Xinxing; YANG, Jianqun et al. A Two-Dimensional Computer-Aided Design Study of Unclamped Inductive Switching in an Improved 4H-SiC VDMOSFET. Online. Micromachines. 2024, roč. 15, č. 1. ISSN 2072-666X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/mi15010035>.

MAREK, Juraj [40 %] - KOZÁRIK, Jozef [20 %] - MINÁRIK, Michal [10 %] - CHVÁLA, Aleš [5 %] - MATUŠ, Matej [10 %] - DONOVAL, Martin [5 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [5 %] - WEIS, Martin [5 %]. Charge trap states of sic power trenchmos transistor under repetitive unclamped inductive switching stress. In Materials. Vol. 15, iss. 22 (2022), Art. no. 8230 [11] s. ISSN 1996-1944 (2022: 3.4 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.563 - SJR, Q2 - SJR Best Q, 0.511 - AIS, Q1 - AIS Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/ma15228230 ; SCOPUS: 2-s2.0-85142688431 ; WOS: 000887385000001 ; CC: 000887385000001.

[1] WU, Xiao-Dong; WANG, Ying; YU, Cheng-Hao; FEI, Xin-xing; YANG, Jian-qun et al. Impact of SiC power MOSFET interface trap charges on UIS reliability under single pulse. Online. Microelectronics Reliability. 2024, roč. 155. ISSN 00262714. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2024.115375>.

MAREK, Juraj [60 %] - KOZÁRIK, Jozef [10 %] - MINÁRIK, Michal [10 %] - CHVÁLA, Aleš [5 %] - MATUŠ, Matej [10 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [5 %]. SiC power TrenchMOS transistor under repetitive avalanche stress. In ASDAM 2022 : 14th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. October 23-26, 2022. 1. ed. Danvers : IEEE, 2022,

S. 183-186. ISBN 978-1-6654-6977-7. V databáze: DOI: 10.1109/ASDAM55965.2022.9966790 ; IEEE: 9966790 ; SCOPUS: 2-s2.0-85144595561.

[1] NIE, Xinfeng; WANG, Ying; YU, Chenghao; FEI, Xinxing; YANG, Jianqun et al. A Two-Dimensional Computer-Aided Design Study of Unclamped Inductive Switching in an Improved 4H-SiC VDMOSFET. Online. Micromachines. 2024, roč. 15, č. 1. ISSN 2072-666X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/mi15010035>.

[2] 辻崇. SiC トレンチ MOSFET におけるアバランシェ耐量の負荷インダクタンス依存性および破壊メカニズムの研究. (No Title), 2023.

STUHLÍKOVÁ, Eubica [30 %] - SCIANA, Beata [2 %] - KÓSA, Arpád [8 %] - MATUŠ, Matej [8 %] - BENKO, Peter [8 %] - MAREK, Juraj [8 %] - DONOVAL, Martin [4 %] - DAWIDOWSKI, Wojciech [1 %] - RADZIEWICZ, Damian [1 %] - WEIS, Martin [30 %]. Evaluation of effective mass in InGaAsN/GaAs quantum wells using transient spectroscopy. In Materials. Vol. 15, iss. 21 (2022), Art. no. 7621 [7] s. ISSN 1996-1944 (2022: 3.4 - JIF, Q2 - JIF Best Q, 0.563 - SJR, Q2 - SJR Best Q, 0.511 - AIS, Q1 - AIS Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/ma15217621 ; SCOPUS: 2-s2.0-85141822946 ; WOS: 000883579900001 ; CC: 000883579900001.

[1] HADER, Jörg a MOLONEY, Jerome V. Free Carrier Auger–Meitner Recombination in Monolayer Transition Metal Dichalcogenides. Online. Nano Letters. 2025, roč. 25, č. 1, s. 284-290. ISSN 1530-6984. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c04963>.

MATUŠ, Matej [15 %] - DROBNÝ, Jakub [15 %] - VADOVSKÝ, Jakub [15 %] - KÓSA, Arpád [10 %] - BENKO, Peter [15 %] - KOVÁČ, Jaroslav jr. [10 %] - DELAGE, Sylvain Laurent [5 %] - STUHLÍKOVÁ, Eubica [15 %]. DLTS study of emission and capture processes in InAlGaN/GaN HEMT structures for 5G. In ASDAM 2020 : 13th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. October 11-14, 2020. 1. ed. Danvers : IEEE, 2020, S. 119-122. ISSN 2474-9737. ISBN 978-1-7281-9776-0. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85104499977 ; WOS: 000669651600027 ; IEEE: 9393839 ; DOI: 10.1109/ASDAM50306.2020.9393839.

[1] LI, Hui-Lin; ZHU, Jie-Jie, QIN, Ling-Jie; HUANG, Si-Mei; LI, Shi-Yang et al. Gate leakage mechanisms in Al₂O₃/SiN/AlN/GaN MIS-HEMTs on Si substrates. Online. Chinese Physics B. 2025, roč. 34, č. 4. ISSN 1674-1056. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1674-1056/adb26d>.

Citácie: 7 (z toho WoS/SCOPUS: 6)

10 Zoznam použitej literatúry

- (1) DALLA VECCHIA, Mauricio; RAVYTS, Simon; VAN DEN BROECK, Giel a DRIESEN, Johan. Gallium-Nitride Semiconductor Technology and Its Practical Design Challenges in Power Electronics Applications: An Overview. Online. Energies. 2019, roč. 12, č. 14. ISSN 1996-1073.
- (2) EUROPEAN COMMISSION. EUROPEAN SPACE GAN. Online. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/project/id/101190041>.
- (3) YESvGaN. Online. Dostupné z: https://www.yesvgan.eu/en/Our_vision?utm_source=chatgpt.com.
- (4) SGAN-NEXT. Online. Dostupné z: <https://www.sgan-next.eu/>.
- (5) European Climate Law. Online. Dostupné z: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en.
- (6) EUROPEAN COMMISSION. Energy Efficiency Directive. Online. Dostupné z: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en.
- (7) REUTERS. *European Commission proposes mobilising 100 billion euros for EU-made clean tech*. Online. 26.2.2025. Dostupné z: <https://www.reuters.com/sustainability/sustainable-finance-reporting/european-commission-proposes-mobilising-100-bln-euros-eu-made-clean-tech-2025-02-26/>.
- (8) DING, Xiaofeng; ZHOU, Yang a CHENG, Jiawei. A review of gallium nitride power device and its applications in motor drive. Online. CES Transactions on Electrical Machines and Systems. 2019, roč. 3, č. 1, s. 54-64. ISSN 2096-3564.
- (9) MILLÁN, José; GODIGNON, Philippe a PÉREZ-TOMÁS, Amador. Wide Band Gap Semiconductor Devices for Power Electronics. Online. Automatika. 2017, roč. 53, č. 2, s. 107-116. ISSN 0005-1144.
- (10) RINKE, P.; SCHEFFLER, M.; QTEISH, A.; WINKELNKEMPER, M.; BIMBERG, D. et al. Band gap and band parameters of InN and GaN from quasiparticle energy calculations based on exact-exchange density-functional theory. Online. Applied Physics Letters. 2006, roč. 89, č. 16. ISSN 0003-6951.
- (11) GRZEGORY, I.; LESZCZYŃSKI, M.; KRUKOWSKI, S.; PERLIN, P.; SUSKI, T. et al. The Application of High Pressure in Physics and Technology of III-V Nitrides. Online. Acta Physica Polonica A. 2001, roč. 100, č. Supplement, s. 57-109. ISSN 0587-4246.
- (12) LUNDH, James Spencer; WALTEREIT, Patrick; MÜLLER, Stefan; KIRSTE, Lutz; CZAP, Heiko et al. Electrothermal Performance of AlGaIn/GaN Lateral Transistors with >10 μm Thick GaN Buffer on

- 200 mm Diameter-Engineered Substrates. Online. *Physica status solidi* (a). 2023, roč. 220, č. 16. ISSN 1862-6300.
- (13) PONCE, F. A.; BOUR, D. P.; YOUNG, W. T.; SAUNDERS, M. a STEEDS, J. W. Determination of lattice polarity for growth of GaN bulk single crystals and epitaxial layers. Online. *Applied Physics Letters*. 1996, roč. 69, č. 3, s. 337-339. ISSN 0003-6951.
 - (14) RAVINDRAN, Reshma a MASSOUD, Ahmed M. An overview of wide and ultra wide bandgap semiconductors for next-generation power electronics applications. Online. *Microelectronic Engineering*. 2025, roč. 299. ISSN 01679317.
 - (15) KUMAR, Amit; MORADPOUR, Milad; LOSITO, Michele; FRANKE, Wulf-Toke; RAMASAMY, Suganthi et al. Wide Band Gap Devices and Their Application in Power Electronics. Online. *Energies*. 2022, roč. 15, č. 23. ISSN 1996-1073.
 - (16) SELVANATHAN, Deepak; MOHAMMED, Fith M.; TESFAYESUS, Asrat a ADESIDA, Ilesanmi. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaV/GaN heterostructures. Online. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 2004, roč. 22, č. 5, s. 2409-2416.
 - (17) LYONS, John L.; WICKRAMARATNE, Darshana a VAN DE WALLE, Chris G. A first-principles understanding of point defects and impurities in GaN. Online. *Journal of Applied Physics*. 2021, roč. 129, č. 11. ISSN 0021-8979.
 - (18) SCHRODER, Dieter K. Semiconductor material and device characterization. 3rd ed. Piscataway: IEEE Press, c2006. ISBN 0-471-73906-5
 - (19) WEISS, S. a KASSING, R. Deep Level Transient Fourier Spectroscopy (DLTFS)—A technique for the analysis of deep level properties. Online. *Solid-State Electronics*. 1988, roč. 31, č. 12, s. 1733-1742. ISSN 00381101.
 - (20) BENKO, Peter; MATUŠ, Matej; HROBÁROVÁ, Ema; PAĽO, Adam; HANIC, Michal; REŽO, Vratislav; VINCZE, Tomáš; MORALES, Magali; STUHLÍKOVÁ, Ľubica; WEIS, Martin a RUTERANA, Pierre. Deconvolution of capacitance transients with a non-exponential character. In: *ADEPT 2025: 13th International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies*. Podbanské, Slovakia. June 15–18, 2025. 1. vyd. Žilina: Vydavateľstvo EDIS, 2025, s. 223–226. ISBN 978-80-554-2208-4.
 - (21) KUCHARSKI, R.; SOCHACKI, T.; LUCZNIK, B. a BOCKOWSKI, M. Growth of bulk GaN crystals. Online. *Journal of Applied Physics*. 2020, roč. 128, č. 5. ISSN 0021-8979.

- (22) HASSAN, Ahmad; SAVARIA, Yvon a SAWAN, Mohamad. GaN Integration Technology, an Ideal Candidate for High-Temperature Applications: A Review. Online. *IEEE Access*. 2018, roč. 6, s. 78790-78802. ISSN 2169-3536.
- (23) CHEN, Wei-Wei; MA, Xiao-Hua; HOU, Bin; ZHU, Jie-Jie; CHEN, Yong-He et al. Impacts of SiN passivation on the degradation modes of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors under reverse-bias stress. Online. *Applied Physics Letters*. 2014, roč. 105, č. 17. ISSN 0003-6951.
- (24) LYONS, J. L.; JANOTTI, A. a VAN DE WALLE, C. G. Carbon impurities and the yellow luminescence in GaN. Online. *Applied Physics Letters*. 2010, roč. 97, č. 15. ISSN 0003-6951.
- (25) POLYAKOV, Alexander Y. a LEE, In-Hwan. Deep traps in GaN-based structures as affecting the performance of GaN devices. Online. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2015, vol. 94, s. 1-56. ISSN 0927-796X.
- (26) CHEN, Cheng; LABROUSSE, Denis; LEFEBVRE, Stéphane; PETIT, Mickael; BUTTAY, Cyril et al. Study of short-circuit robustness of SiC MOSFETs, analysis of the failure modes and comparison with BJTs. Online. *Microelectronics Reliability*. 2015, roč. 55, č. 9-10, s. 1708-1713. ISSN 00262714.
- (27) INFINEON. *IGO60R070D1: 600 V CoolGaN™ e-mode power transistor for ultimate efficiency and reliability*. Online. 2020.
- (28) EL BOUADBELLATI, Mohamed. Etude par spectroscopie DLTS de structures formées sur InP(n) par oxydation plasma. Dizertačná práca. Metz: Univerzita Metz.
- (29) CHO, H. K.; KIM, C. S. a HONG, C.-H. Electron capture behaviors of deep level traps in unintentionally doped and intentionally doped n - type GaN. Online. *Journal of Applied Physics*. 2003, roč. 94, č. 3, s. 1485-1489. ISSN 0021-8979.
- (30) BISI, Davide; MENEGHINI, Matteo; DE SANTI, Carlo; CHINI, Alessandro; DAMMANN, Michael et al. Deep-Level Characterization in GaN HEMTs-Part I: Advantages and Limitations of Drain Current Transient Measurements. Online. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2013, roč. 60, č. 10, s. 3166-3175. ISSN 0018-9383.
- (31) AURET, F. D.; MEYER, W. E.; WU, L.; HAYES, M.; LEGODI, M. J. et al. Electrical characterisation of hole traps in n-type GaN. Online. *Physica status solidi (a)*. 2004, roč. 201, č. 10, s. 2271-2276. ISSN 0031-8965.
- (32) KOZÁRIK, Jozef. Meranie a charakterizácia energetickej odolnosti moderných výkonových elektronických prvkov zaťažených UIS a SC testom. Dizertačná práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2023.

- (33) INFINEON. GS66516B-TR CoolGaNTM Transistor 650 V $\leq$ G3 for ultimate efficiency and reliability. Online. Dostupné z: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/gallium-nitride/gallium-nitride-transistor/gs66516b-tr/#>.
- (34) XU, X B; LI, B; CHEN, Y Q; WU, Z H; HE, Z Y et al. Analysis of trap and recovery characteristics based on low-frequency noise for E-mode GaN HEMTs with p-GaN gate under repetitive short-circuit stress. Online. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020, roč. 53, č. 17. ISSN 0022-3727. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab713a>.
- (35) FU, J-Z.; FOUQUET, F.; KADI, M. a DHERBECOURT, P. Experimental study of 600V GaN transistor under the short-circuit aging tests. Online. In: *2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*. IEEE, 2018, s. 249-253. ISBN 978-1-5386-3738-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MELCON.2018.8379102>.
- (36) STUCHLIKOVÁ, L.; MATUS, M.; CINCURAK, D.; MAREK, J.; BENKO, P. et al. Study of the defect distribution in power SiC-MOSFET before and after applied electrical stress. Online. In: *2022 14th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (ASDAM)*. IEEE, 2022, s. 1-4. ISBN 978-1-6654-6977-7.
- (37) ASGHAR, M.; MURET, P.; BEAUMONT, B. a GIBART, P. Field dependent transformation of electron traps in GaN p-n diodes grown by metal-organic chemical vapour deposition. Online. *Materials Science and Engineering: B*. 2004, roč. 113, č. 3, s. 248-252. ISSN 09215107. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2004.09.001>. [cit. 2025-07-07].
- (38) RAJA, P. Vigneshwara; BOUSLAMA, Mohamed; SARKAR, Sujan; PANDURANG, Khade Ramdas; NALLATAMBY, Jean-Christophe et al. Deep-Level Traps in AlGaIn/GaN- and AlInN/GaN-Based HEMTs With Different Buffer Doping Technologies. Online. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2020, roč. 67, č. 6, s. 2304-2310. ISSN 0018-9383. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2988439>. [cit. 2025-07-07].
- (39) POLYAKOV, Alexander Y.; SMIRNOV, N. B.; TURUTIN, A. V.; SHEMEROV, I. S.; REN, Fan et al. Deep traps and instabilities in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors on Si substrates. Online. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*. 2016, roč. 34, č. 4. ISSN 2166-2746. Dostupné z: <https://doi.org/10.1116/1.4953347>. [cit. 2025-07-07].