

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ústav elektroniky a fotoniky

Ing. Marián Molnár

**NÁVRH A CHARAKTERIZÁCIA PROGRESÍVNYCH
VÝKONOVÝCH ELEKTRONICKÝCH PRVKOV PODPorená
MODELOVANÍM A SIMULÁCIOU**

DESIGN AND CHARACTERIZATION OF ADVANCED POWER
ELECTRONIC DEVICES SUPPORTED BY MODELING AND
SIMULATION

Autoreferát dizertačnej práce

Stupeň kvalifikácie: vedecko-akademická hodnosť philosophiae doctor (PhD.) v odbore
doktorandského štúdia

5. 2. 13 Elektronika

Študijný program: Mikroelektronika

Bratislava 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na pracovisku Ústavu elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava.

Predkladateľ: **Ing. Marián Molnár**
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Daniel Donoval, DrSc.**
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Oponenti: **Ing. Jozef Osvald, DrSc.**
Elektrotechnický ústav SAV
Dúbravská cesta 9
841 04 Bratislava

Prof. Ing. Miroslav Husák, Csc.
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky
Technická 2
166 27 Praha 6

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia 5.2.13 Elektronika, študijný program Mikroelektronika, vymenovanou predsedom odborovej komisie v knižnici Ústavu elektroniky a fotoniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava.

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD
Dekan FEI STU

Obsah

1. ÚVOD.....	1
2. PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU	3
3. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	5
4. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY A PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE	5
5. ZÁVER.....	15
6. SUMMARY	16
7. POUŽITÁ LITERATÚRA.....	18
8. ZOZNAM VLASTNÝCH PUBLIKÁCIÍ	19

1. Úvod

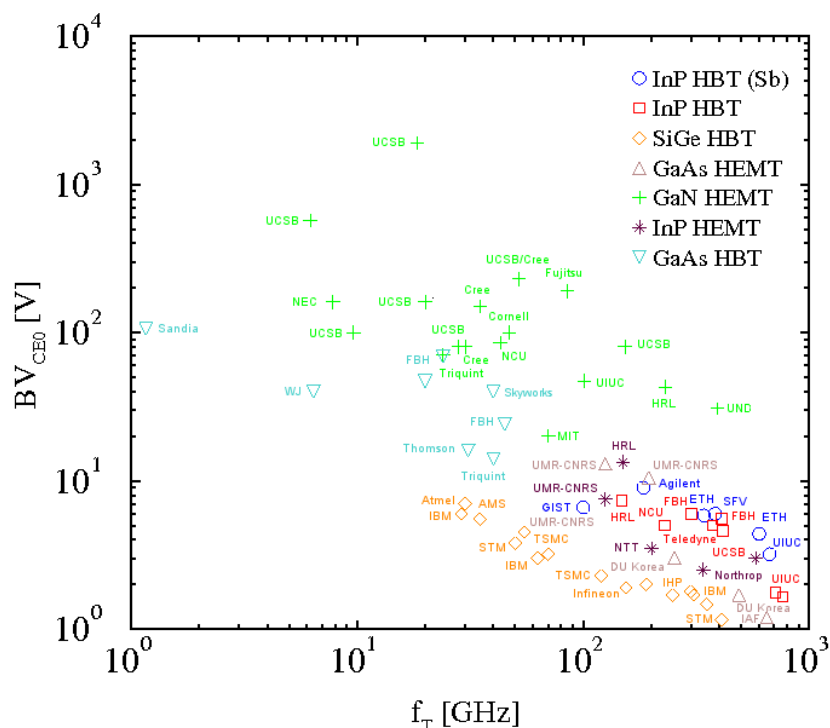
Výskum a vývoj vo svete elektroniky dramaticky napredujú, pričom vedecko-technický pokrok v tejto oblasti je podmienený výrobou novších a vlastnosťami lepších polovodičových materiálov, štruktúr a zariadení, ktoré sú schopné spĺňať stále vyššie a vyššie požiadavky zákazníkov. S rýchlym rozvojom výkonovej elektroniky, ktorá v dnešnej dobe umožňuje ovládať stále väčšie výkony a tento trend neustále pokračuje, napreduje aj rozvoj a vylepšovanie vlastností výkonových prvkov, ktoré sú základnou stavebnou časťou všetkých elektronických systémov a zariadení. Polovodičové súčiastky sú a aj vždy budú neoddeliteľnou súčasťou výpočtovej, komunikačnej alebo mikrovlnnej techniky. Narastajú požiadavky na schopnosť pracovať s vysokými výkonmi, pri vysokých frekvenciách, pri vysokých pracovných teplotách, a taktiež na spoľahlivosť, bezúdržbovosť, vysokú elektrickú a mechanickú odolnosť. Samozrejme veľmi dôležitým, ba niekedy dokonca až rozhodujúcim faktorom je nízka nadobúdacía cena.

Donedávna najpoužívanejším polovodičovým materiálom bol kremík (Si), ktorý však už dosahuje svoje fyzikálne limity. Stále nachádza uplatnenie v mnohých aplikáciách, avšak v istých oblastiach elektroniky už prestáva spĺňať výkonové a frekvenčné požiadavky mnohých moderných polovodičových zariadení, ktoré vyžadujú napr. vyššie záverné a prierazné napätia, vyššie pracovné frekvencie alebo prevádzkové teploty. Z tohto hľadiska je nevyhnutný vývoj a výskum nových elektronických prvkov na báze nových polovodičových materiálov, ktoré by tieto požiadavky spĺňali.

Jedným z takýchto materiálov je GaN (gálium nitrid), ktorý sa radí medzi širokopásmové polovodiče ($E_g \sim 3.4$ eV) a svojimi vlastnosťami spĺňa takmer všetky zo spomínaných požiadaviek. Na báze tohto polovodiča a v kombinácií s ostatnými nitridmi, ako sú napr. AlN, InN a ich ternárne zlúčeniny, sa vyrábajú vysoko výkonové tranzistory HEMT (High Electron

Mobility Transistor) – tranzistory s vysokou pohyblivosťou elektrónov. Ich využitie je vhodné do oblastí vysokých výkonov aj frekvencií (viď obr. 1). Podstatou týchto tranzistorov je heteropriechod, ktorý vzniká na rozhraní dvoch materiálov s rôznou šírkou zakázaného pásma. Na tomto rozhraní vzniká dvojrozmerný elektrónový plyn, ktorý disponuje vysokou hustotou a pohyblivosťou elektrónov. Práve tento tvorí základ tranzistora HEMT, ktorého štúdiu, fyzikálnymi a elektrotepeľnými vlastnosťami sa budeme zaoberať v tejto práci.

Rýchly a dynamický vývoj nových štruktúr je založený na využívaní moderných počítačových návrhových prostriedkov CAD (Computer-Aided Design). Pomocou týchto prostriedkov sme schopní simulovať výrobné procesy a správanie sa jednotlivých súčiastok alebo celých obvodov a systémov. Nové navrhnuté štruktúry dokážeme rýchlo testovať a pozorovať ich elektrické vlastnosti. Modelovanie a simulácia nám často pomáhajú lepšie pochopiť vnútorné elektrofizikálne správanie sa skúmaných štruktúr. Sme schopní meniť jednotlivé parametre a tým vyšetriť ich vplyv na funkčnosť a vlastnosti štruktúry, a taktiež sme schopní vylepšovať vlastnosti už existujúcich štruktúr. Je však potrebné vytvoriť dostatočne presný model a zahrnúť do simulácií všetky fyzikálne deje prebiehajúce vo vyšetrovanej štruktúre, aby sme dostali čo najlepšiu zhodu so správaním sa reálnej súčiastky. Využitím simulačných programov nahrádzame zdĺhavé experimentálne práce, znižujeme tým náklady na cenu výroby a celý proces vývoja niekoľkonásobne urýchlime. V súčasnosti dochádza k snahe o znižovanie rozmerov elektronických polovodičových prvkov súčasne so zvyšovaním výkonov, ktoré tieto prvky riadia, čím dochádza k ich elektrotepeľnému namáhaniu. Dizertačná



Obrázok 1 Porovnanie využitia tranzistorov z hľadiska pracovných napätí a frekvencií.

práca je zameraná na získanie nových poznatkov o elektrofyzikálnych a elektrotepelných vlastnostiach výkonových polovodičových štruktúr HEMT s využitím 2-D a 3-D modelovania a počítačových simulácií.

V práci sú zhrnuté výsledky z experimentálnych meraní HEMT štruktúr, následné vytvorenie modelu meranej štruktúry, jeho kalibrácia na základe výsledkov meraní, a napokon výsledky z 2-D a 3-D elektrotepelných simulácií, ktoré nám prezradili vnútorné správanie sa štruktúry pri zaťažení. Významným prínosom práce je vytvorenie 3-D FEM modelu vyšetrovaného tranzistora a vytvorenie metodológie pre rýchlu elektrotepelnú analýzu elektronických prvkov. V poslednej časti práce je popísaná štúdia, ktorá analyzuje vplyv pascí na vlastnosti obohacovacieho tranzistora HEMT.

Problematika a výsledky obsiahnuté v práci boli riešené v rámci grantov VEGA 0866/11, APVV-0367-11, projektov ENIAC JU 324280/2012 E2COGaN a START Project Y247-N13.

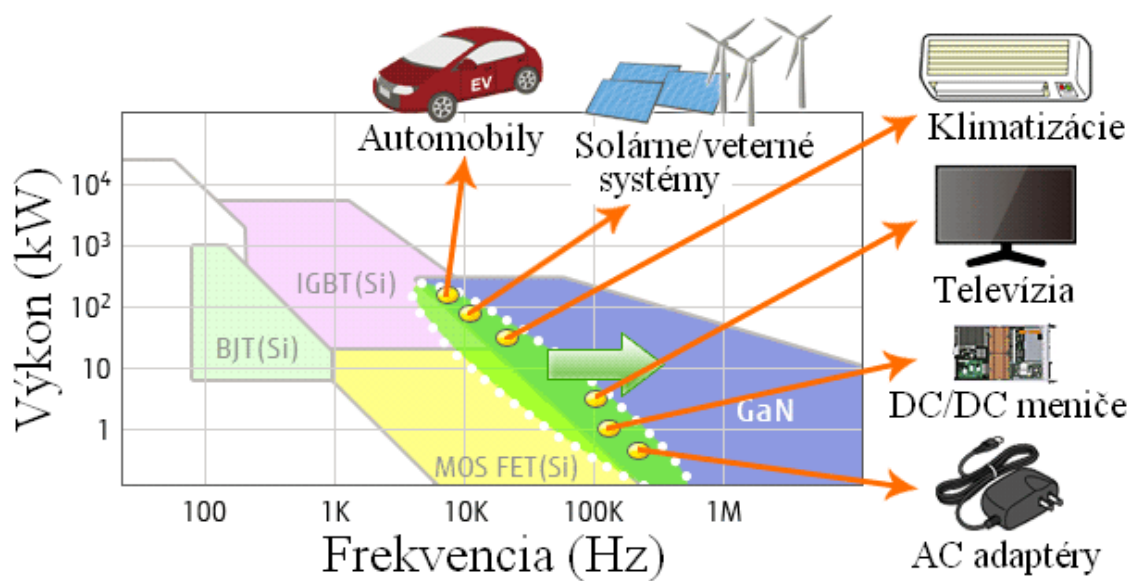
2. Prehľad súčasného stavu

Výkonová elektronika už našla významné miesto v moderných technológiách a ponúka nám revolučné ovládanie výkonu a energie. Vzhľadom k neustále sa zlepšujúcej napäťovej, prúdovej zaťažiteľnosti a spínacím vlastnostiam výkonových polovodičových súčiastok sa možnosti ich aplikácie neustále rozširujú. HEMT sa najčastejšie využívajú v oblasti vysokofrekvenčných (RF) satelitných a mobilných (širokopásmových) komunikácií, radarových technológií, samozrejme v oblasti senzorov a UV LED, solárnych a veterných systémov, a taktiež sa využívajú v DC/DC meničoch v automobilovom priemysle (Obr. 2). V poslednom desaťročí sledujeme značný pokrok v oblasti mobilných komunikácií, kde vďaka materiálom ako GaN prechádzame z rýchlostí 2G (GPRS) ~ 100 kbit/s (2002) cez 3G (HSDPA) ~ 15Mbit/s (2005) až k úctyhodným 4G (LTE) ~ 350 Mbit/s (2011). V oblasti radarových technológií sa HEMT najčastejšie využívajú pre účely výskumu vo vesmíre (extrémne teploty, radiácia a pod.), prípadne v špecifických vojenských aplikáciách, kde vysoká cena nieje rozhodujúca. V poslednej dobe sa intenzívny výskum venuje taktiež alternatívnym zdrojom energie a alternatívnym pohonom automobilov. Vznikajú hybridné automobily, ale i automobily na čiste elektrický pohon. Práve v tomto odvetví automobilového priemyslu GaN nachádza svoje uplatnenie. Vlastnosti ako vysoké prierné napätie, nízky odpor a schopnosť pracovať pri vysokých prevádzkových teplotách ho predurčujú pre využitie vo vysokonapäťových meničoch.

V súčasnosti jeden z najrýchlejších InAlN/AlN/GaN D-HEMT s dĺžkou hradla pod 30 nm dosahuje frekvenciu $f_T = 370$ GHz, čo je doposiaľ najvyššia nameraná hodnota u HEMT tranzistorov na báze GaN [1]. Ako spomínajú autori, táto hodnota by samozrejme teoreticky mohla ešte vzrásť so zmenšovaním dĺžky hradla. Existujú samozrejme i rýchlejšie štruktúry HEMT, postavené napr. na InP alebo GaAs. Tieto však ani zďaleka nie sú schopné konkurovať GaN HEMT po výkonovej stránke, kde GaN HEMT sú doposiaľ najlepšou variantou

optimalizácie výkonu a rýchlosti. Pri vysokovýkonových elektronických aplikáciách, spínacie prvky pracujú s vysokými napätiami. V prípade vysokonapäťových GaN HEMT, dynamicky narastá odpor v zopnutom stave s aplikovaným napätím z dôvodu prúdového kolapsu. Bolo experimentálne potvrdené, že štruktúry tranzistorov s využitím technológie *field-plate* potláčajú tento nárast odporu v zopnutom stave [2-5].

Stále viac populárnymi sa však stávajú štruktúry pracujúce v obohacovacom režime EHEMT (Enhancement-mode HEMT) pre aplikácie s digitálnymi a zmiešanými signálmi. Tieto dosahujú rekordné hodnoty, ako napr. výstupná prúdová hustota 2 A/mm, extrinzická transkonduktancia 890 mS/mm, a f_t/f_{max} je 95/135 GHz pre 150 nm dĺžky hradla [6]. Mriežkovo prispôbený InAlN/AlN/GaN HEMT pracujúci v obohacovacom režime dokazuje po zažihaní pri teplote 400 °C výborné hodnoty ako napr. záverný zvodový hradlový prúd sa zmení z hodnoty 10^{-7} na 10^{-12} A/mm pri $V_{GS} = -1$ V a $V_{DS} = 6$ V alebo rozdiel medzi zopnutým a vypnutým stavom je 10^{12} , čo je najvyššia doposiaľ dosiahnutá hodnota u všetkých tranzistorov na báze GaN [7]. Zaujímavé výsledky dosiahla tiež skupina pod vedením J.S.Xue, ktorá vytvorila veľmi dobre mriežkovo prispôbený InAlN/AlN/GaN HEMT narastený na SiC substráte pulznou MOCVD [8] alebo skupina pod vedením A. Vinczeho, ktorá metódou SIMS odhalila, že v procese rastu vrstiev metódou MOCVD sa jednotlivé prvky ako In, Al alebo Si dostávajú do susedných vrstiev, čo má vplyv na tzv. „*in-plane stress*“ vo vrstve AlN [9]. Nevýhodou súčasných EHEMT je vysoká hodnota zvodového prúdu. Je to faktor, ktorý limituje výkon aj spoľahlivosť. Práve z tohto dôvodu sa často vkladá tenká oxidová vrstva medzi hradlový kov a bariérovú vrstvu, čím vzniká štruktúra MOS-HEMT, ktorá jednak redukuje zvodový prúd od hradla a taktiež zvyšuje kolektorový prúd [10].



Obrázok 2 Širokospektrálne využitie GaN v rôznych priemyselných odvetviach (zdroj: Fujitsu).

3. Ciele dizertačnej práce

Vzhľadom na uvedenú analýzu aktuálneho stavu problematiky je moja dizertačná práca zameraná na výskum a analýzu vlastností parametrov výkonových HEMT podporenú numerickým modelovaním a simuláciou. Témy k dizertačnej práci možno definovať v nasledovných bodoch:

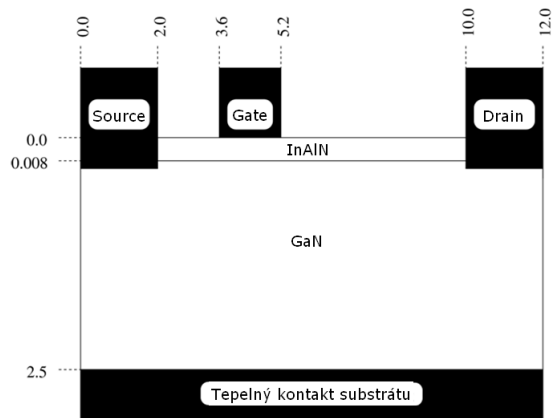
- Získať nové poznatky o HEMT tranzistoroch, analyzovať vplyvy jednotlivých parametrov tranzistora na jeho funkčnosť a spoznať jeho elektrofyzikálne vlastnosti.
- Porovnaním výsledkov simulácie a experimentálnych meraní optimalizovať elektrofyzikálne modely a kalibrovať ich parametre tak, aby bola dosiahnutá čo možno najlepšia zhoda medzi meraniami a simuláciami.
- Spresniť súčasný model tranzistora, resp. upraviť jeho parametre, aby sme lepšie dokázali fyzikálne interpretovať dosiahnuté výsledky.
- Výsledky simulácií využiť pre návrh nových štruktúr HEMT tranzistorov, resp. pre presnejšiu fyzikálnu interpretáciu nameraných výsledkov.

4. Dosiahnuté výsledky a prínos dizertačnej práce

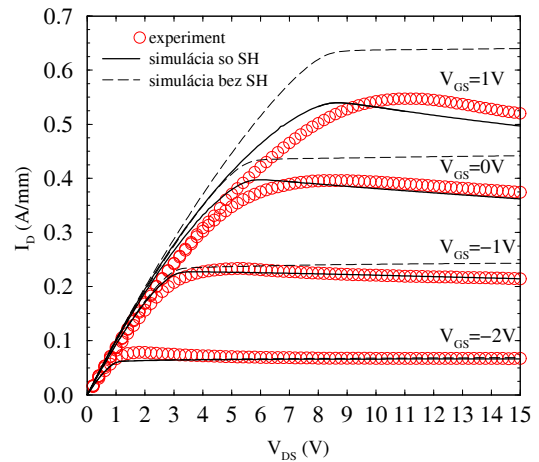
V experimentálnej časti dizertačnej práce je detailne popísaná vyšetovaná štruktúra tranzistora HEMT a vytvorenie jej 2-D modelu. Sú tu zhrnuté výsledky z vlastných experimentálnych meraní a z 2-D elektrotepelných simulácií získané využitím hydrodynamického transportného modelu v Minimos-NT [11], kde sme aplikovali nový spresnený teplotne závislý model pre výpočet šírky zakázaného pásma E_g viaczožkových polovodičov [12]. Ďalej je popísaná nami navrhnutá metodológia pre rýchlu 3-D elektrotepelnú simuláciu, založená na interakcii simulačných nástrojov SDevice od Synopsys [13] a HSPICE, ktorej správnosť sme overili využitím nami vyšetovanej DHEMT (Depletion-mode HEMT – tranzistor pracujúci v ochudobňovacom režime) štruktúry. Vytvorili sme tiež model EHEMT, pomocou ktorého sme vyšetřili vplyv pasci na vlastnosti takéhoto tranzistora. Výsledky sme publikovali v karentovanom časopise.

2-D elektrotepelná analýza DHEMT

Širokospektrálne využitie GaN HEMT v oblasti mikrovlnných výkonových zosilňovačov a výkonových spínačov [14] prináša potrebu udržania vysokej účinnosti pri vysokom výkone, kde obmedzenia prichádzajú pôsobením parazitných tepelných účinkov [15]. Práve z tohto



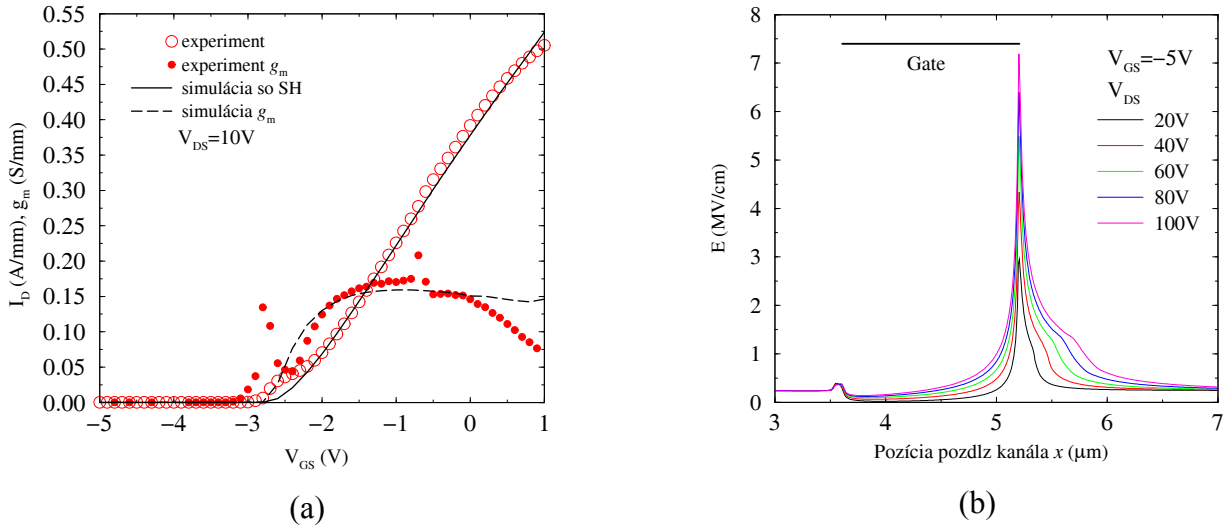
(a)



(b)

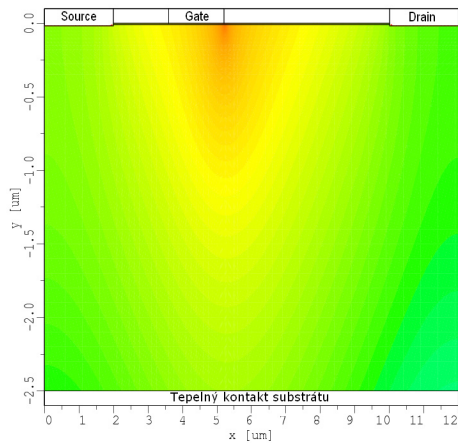
Obrázok 3 (a) Schematický náčrt vyšetrovanej InAlN/GaN HEMT štruktúry.
 (b) Porovnanie meraných a simulovaných výstupných charakteristík.

dôvodu, problémy ako je prúdový kolaps a samoohrev súčastky pri práci s vysokými výkonmi musia byť riešené. Vyšetovaná štruktúra tranzistora je schematicky zobrazená na obrázku 3a. Je rastená technikou MOVPE (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy). Na semi-izolačnom substráte 6H-SiC je narastená asi 300 nm hrubá nukleačná vrstva AlN, nasleduje vrstva GaN (tzv. *buffer layer*) s hrúbkou 2.5 μm , 1 nm hrubá medzivrstva AlN a bariérová vrstva InAlN s hrúbkou 7 nm [16]. Dĺžka hradlovej „gate“ elektródy je $L_G = 1.6 \mu\text{m}$, vzdialenosť medzi hradlovou elektródou a emitorom je $L_{GS} = 1.6 \mu\text{m}$ a medzi hradlovou elektródou a kolektorom je $L_{GD} = 4.8 \mu\text{m}$. Šírka hradlovej elektródy je $w_G = 400 \mu\text{m}$. Detailný popis štruktúry je možné nájsť v [16]. V našich simuláciách sme uvažovali s 8 nm hrubou vrstvou InAlN namiesto 1 nm hrubej AlN medzivrstvy a 7 nm hrubej InAlN bariérovej vrstvy, pretože celkový polarizačný náboj ostáva zachovaný [17] a výsledok simulácie nezmenený. Využili sme modely pre termoemisiu na heterorozhraní, nový „two-valley“ teplotne závislý pohyblivostný model uvažujúci so saturáciou elektrónovej rýchlosti pri veľmi vysokých elektrických poliach, model pre nárazovú ionizáciu a samoohrev (SH) štruktúry, nový teplotne závislý model pre výpočet šírky zakázaného pásma a tepelnej vodivosti. Náboj na heterorozhraní InAlN/GaN charakterizujeme hodnotou $n_{2\text{DEG}} = 2.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, ktorá nám poskytuje najlepšiu zhodu s meranými dátami. Na povrchu štruktúry, na rozhraní InAlN bariéry s okolitým prostredím, by sa mal teoreticky nachádzať náboj s veľkosťou $n_{\text{surf.}} = -2.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, ktorý je kompenzačný náboj k náboju na heterorozhraní, a ktorý udržiava systém v nábojovej rovnováhe (suma všetkých nábojov pozdĺž štruktúry v reze by mala byť nulová). Táto hodnota je však v našich simuláciách mierne znížená na hodnotu $n_{\text{surf.}} = -1.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, aby sme dosiahli zhodu s experimentálnymi meraniami. Zo znížením tejto hodnoty náboja môžeme uvažovať preto, že naša štruktúra nieje pasivovaná a na povrchu vzniká tenká vrstva oxidu, ktorá spôsobuje tento rozdiel. Ako vidíme na obr. 3b, ktorý

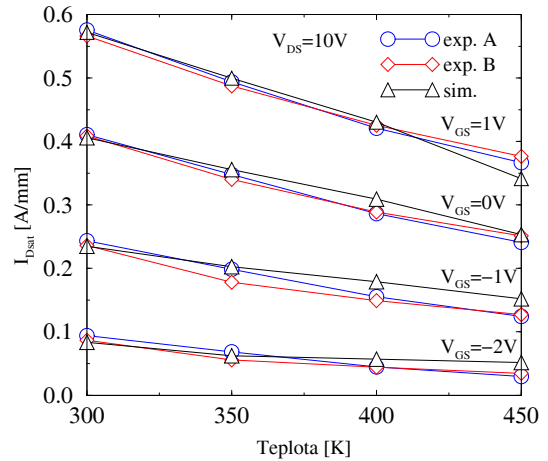


Obrázok 4 (a) Porovnanie meraných a simulovaných prevodových charakteristík a strmosti prevodovej charakteristiky pre $V_{DS} = 10$ V. (b) Rozloženie elektrického poľa E (V/cm) pozdĺž kanála.

porovnáva merané a simulované výstupné charakteristiky tranzistora, efekt samoohrievania (SH) štruktúry má významný vplyv na výsledok simulácie, a preto nesmie byť v našich simuláciách zanedbaný. Najviac sa prejaví v podmienkach, kedy tranzistor pracuje s vyššími výkonmi ($V_{GS} = 1$ V), kedy výkonový rozptyl vrcholí. Obr. 4a porovnáva merané a simulované prevodové charakteristiky tranzistora a strmosti prevodovej charakteristiky pre $V_{DS} = 10$ V. Z prevodovej charakteristiky vieme určiť hodnotu prahového napätia $V_{TH} = -2.5$ V. Nasledujúci obr. 4b ukazuje rozloženie elektrického poľa ako funkciu polohy pozdĺž kanála pre $V_{GS} = -5$ V a V_{DS} v rozmedzí od 20 V do 100 V. Maximum elektrického poľa sa nachádza na kolektorovej hrane hradlovej elektródy, a dosahuje pre danú štruktúru maximálnu hodnotu $E_{max} = 7.2$ MV/cm pri $V_{DS} = 100$ V. Takáto vysoká hodnota elektrického poľa môže spôsobiť elektrický prieraz v GaN HEMT štruktúrach. Experimentálne výsledky, ktoré sú popísané v dizertačnej práci, podobne ako aj výsledky z meraní pri zvýšených teplotách (do 450 K) sme získali použitím analyzátoru Agilent 4155C. Pre teplotné merania bol k analyzátoru pridaný vyhrievaný „chuck“ (podložka s prísavnými otvormi na upevnenie vzorky), na povrchu ktorého vieme nastaviť teplotu s vysokou presnosťou až 0.1 K. Nastavovali sme teploty na substráte v rozmedzí 300 - 450 K. V simuláciách sme na spodnú časť štruktúry umiestnili tepelný kontakt, na ktorom sme menili teploty v rovnakom rozmedzí ako počas meraní. Veľkosť odporu tepelného kontaktu sme uvažovali $R_{TH} = 10^{-3}$ Kcm²/W. Táto hodnota v sebe zahŕňa tepelný odpor nukleačnej vrstvy AlN, SiC substrátu a prípadných 3-D tepelných efektov [18] a je vo výbornej zhode s výsledkami získanými z optických meraní [19]. Obr. 5a znázorňuje 2-D rozloženie teploty mriežky pri $V_{GS} = 1$ V a $V_{DS} = 10$ V. Maximálna hodnota teploty mriežky vo vnútri štruktúry sa pre dané napätia pohybuje od 380 K pri 300 K na substráte (obr. 5a), až do 500 K pri 450 K na



(a)



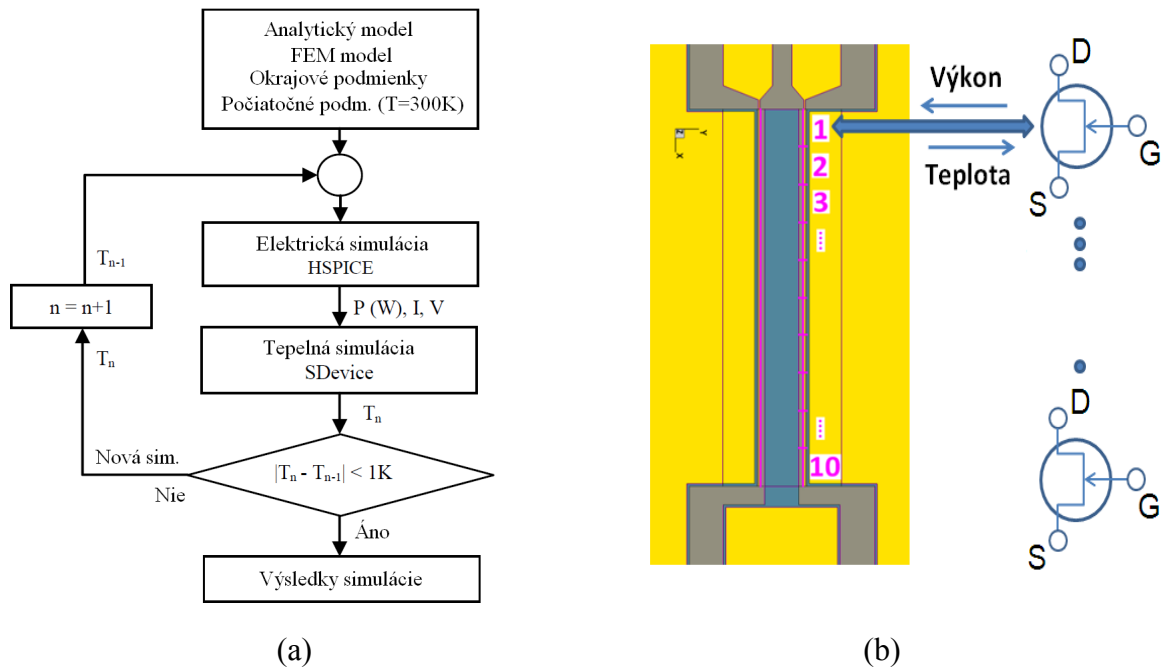
(b)

Obrázok 5 (a) Rozloženie teploty mriežky pre $V_{GS} = 1\text{ V}$ a $V_{DS} = 10\text{ V}$ pri teplote substrátu 300 K . (b) Experimentálne a simulované hodnoty kolektorového prúdu v saturácii v závislosti od teploty pre $V_{DS} = 10\text{ V}$ a pre V_{GS} od -2 V do 1 V .

substráte (neukázané). Obr. 5b ukazuje pokles kolektorového prúdu v saturácii v závislosti od zvyšujúcej sa teploty pri $V_{DS} = 10\text{ V}$ a pre V_{GS} od -2 V do 1 V . Veľmi dobrá zhoda medzi meraním a simuláciou bola dosiahnutá obzvlášť pre nižšie teploty do 400 K .

3-D elektrotepelná analýza DHEMT

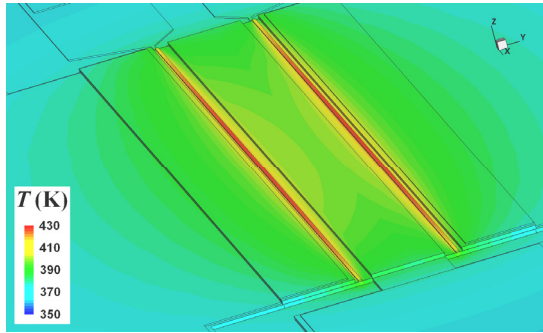
Ak nás zaujímajú tepelné efekty a nerovnomerné rozloženie teplôt na okrajoch a hranách štruktúry, výsledky 2-D simulácií sú nepostačujúce. Preto sme vytvorili 3-D FEM model vyšetrovanej štruktúry s rovnakými parametrami ako v 2-D simuláciách. Keďže 3-D elektrotepelné simulácie využitím FEM sú časovo náročné a vyžadujú veľmi výkonné hardwarové vybavenie, využili sme efektívnu metodológiu založenú na relaxačnej metóde, ktorá niekoľkonásobne skráti čas potrebný na získanie požadovaných výsledkov s ešte väčšou presnosťou. 3-D simulácie sú založené na interakcii medzi TCAD a HSPICE simulátormi využitím linuxového skriptu [20]. Naš model prináša presné výsledky vo veľmi krátkom čase, pretože iba prenos tepla v štruktúre je počítaný pomocou FEM v SDevice a elektrické simulácie sú vykonávané pomocou SPICE analytických modelov, extrahovaných a kalibrovaných na základe výsledkov z experimentálnych meraní a 2-D simulácií. Obr. 6a znázorňuje vývojový diagram popisujúci priebeh simulácie. Na základe teplôt v príslušných miestach štruktúry sú počítané aj teplotne závislé elektrické parametre HEMT štruktúry počas elektrickej simulácie. Maximálne 5 cyklov je potrebných, aby sme dosiahli požadovanú presnosť simulácie. Tepelnú vodivosť GaN potrebnú pre výpočet a šírenie tepla pomocou FEM simulácie sme uvažovali $\kappa = 130\text{ W/mK}$ (pre 300 K). Na obr. 6b je znázornená vyšetovaná štruktúra pre FEM simuláciu



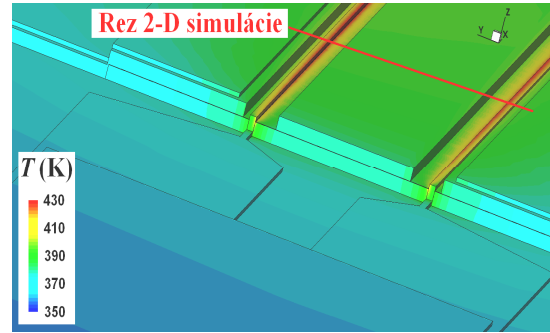
Obrázok 6 (a) Vývojový diagram popisujúci priebeh 3-D simulácie, (b) Schematické znázornenie prenosu dát medzi SDevice a HSPICE a znázornenie tepelných kontaktov.

s vyznačením tepelných kontaktov a schematicky znázornené analytické modely. Aplikovali sme 10 paralelne prepojených analytických modelov na každú vidličku hradla.

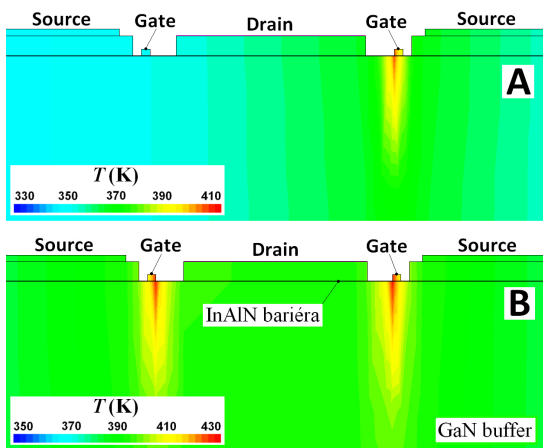
Obr. 7a ukazuje 3-D rozloženie teploty mriežky pre $V_{GS} = 1$ V a $V_{DS} = 15$ V. Obr. 7b predstavuje detailný záber na okraj štruktúry znázorňujúci prechod tepla do spodných polovodičových vrstiev so znázornením 2-D rezu. Ďalej, obr. 7c je 2-D rez pre simuláciu s nakontaktovaným jedným hradlom (A) a simuláciu s dvoma hradlami (B). Obr. 7d ukazuje 1-D rozloženie teploty v reze. Vidíme, že v prípade zapojenia oboch hradiel štruktúra dosahuje vyššiu maximálnu teplotu (~ 430 K), ako pri zapojení iba jedného hradla (~ 410 K), pretože generovaného tepla je menej a odvádza sa do vnútra štruktúry ľahšie. Obr. 7e porovnáva merané (A, B) a simulované (A, B, a B bez uvažovania odporu kontaktov R_{metal}) výstupné charakteristiky pre teplotu substrátu 300 K a $V_{GS} = 1$ V. Napokon obr. 7f ukazuje porovnanie meraných a simulovaných (2-D/3-D) výstupných charakteristík pre rôzne teploty substrátu. Z obrázku vidíme, že naša 3-D metodológia prináša presnejšie výsledky hlavne pri vyšších teplotách (450 K). Využitie 3-D simulácií nám prinesie veľmi presné informácie o rozložení teploty v celej štruktúre tranzistora. Keby sme chceli vykonať elektrotepelnú simuláciu celej štruktúry iba použitím FEM v TCAD, museli by sme vygenerovať hustú mriežku a simulácia by trvala mnohonásobne dlhšie, pričom by sa vyskytli problémy s konvergenciou a dosiahli by sme výsledky veľmi neefektívne. 2-D FEM elektrotepelná simulácia s mriežkou $\sim 30\,000$ bodov trvá asi 15 minút, pričom naša 3-D elektrotepelná simulácia komplexnej štruktúry s mriežkou $\sim 270\,000$ bodov trvá iba 10 minút.



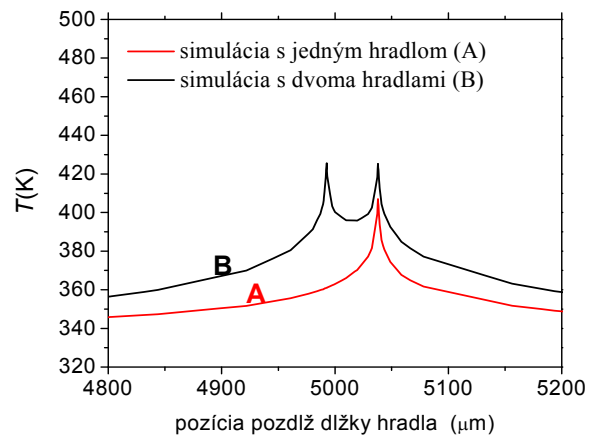
(a)



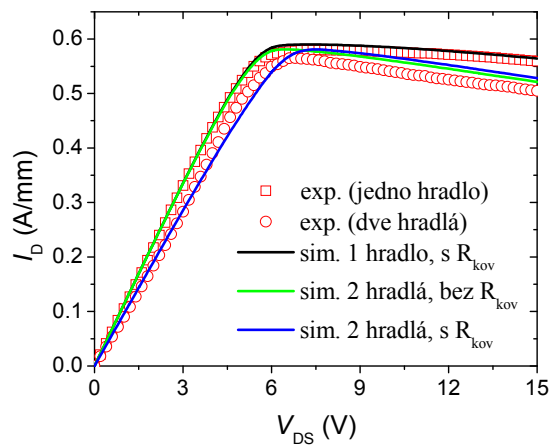
(b)



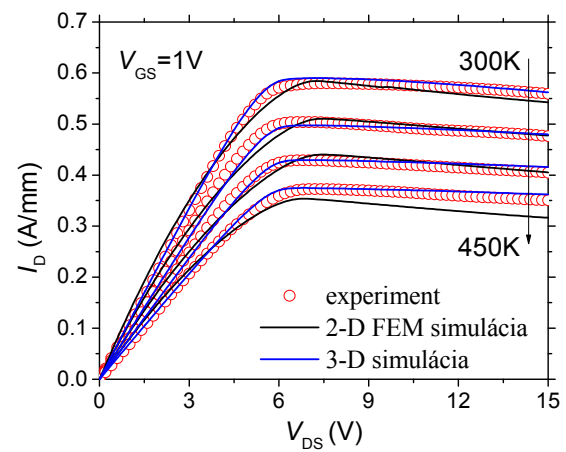
(c)



(d)



(e)

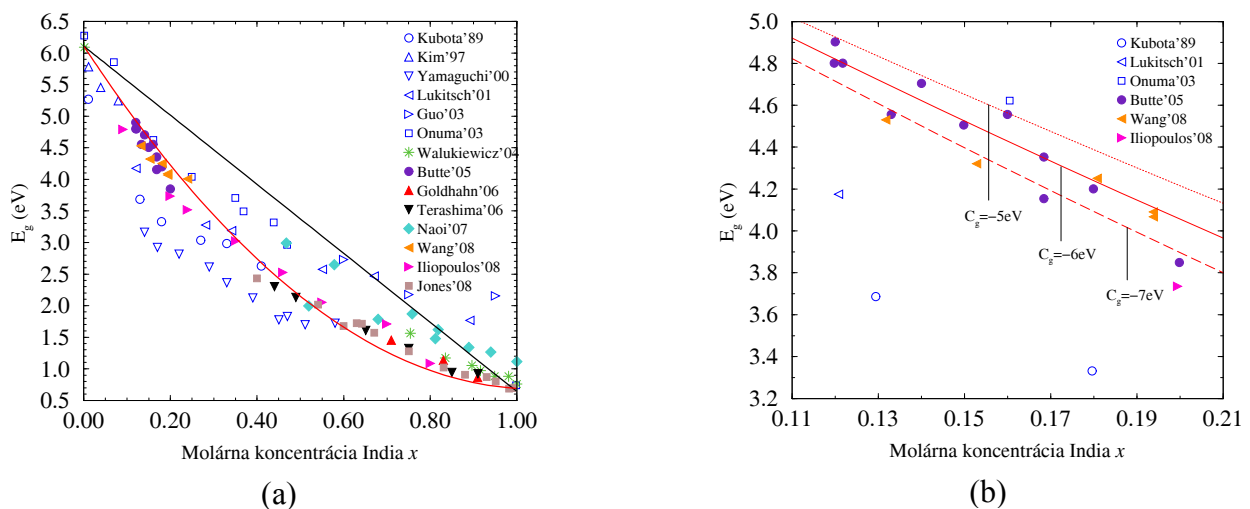


(f)

Obrázok 7 (a) Rozloženie teploty mriežky pre $V_{GS} = 1 \text{ V}$ a $V_{DS} = 15 \text{ V}$. (b) Detailný záber na okraj štruktúry znázorňujúci prechod tepla do spodných polovodičových vrstiev so znázornením 2-D rezu. (c) 2-D rez pre simuláciu s jedným hradlom (A) a simuláciu s dvoma hradlami (B). (d) 1-D rozloženie teploty v reze. (e) Porovnanie meraných (A, B) a simulovaných (A, B, a B bez uvažovania odporu kontaktov R_{metal}) výstupných charakteristík pre teplotu substrátu 300 K a $V_{GS} = 1 \text{ V}$. (f) Porovnanie meraných a simulovaných (2-D/3-D) výstupných charakteristík pre rôzne teploty substrátu.

Teplotne závislý model pre výpočet šírky zakázaného pásma E_g viaczožkových polovodičov

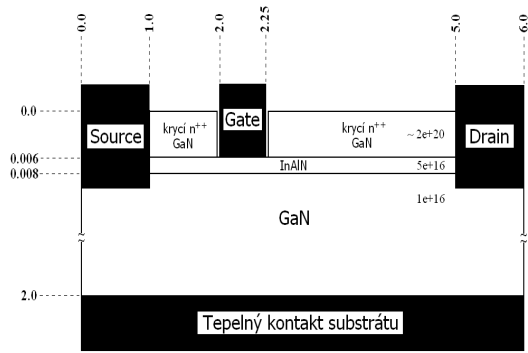
Na základe výsledkov z meraní šírky zakázaného pásma E_g zlučieniny InAlN (obr. 8) od rôznych autorov sme zistili, že bežne používané modely v simulačných programoch založené na lineárnej interpolácii, nie sú schopné správne vypočítať $E_g^{(\text{InAlN})}$ v závislosti od zmeny molárnej koncentrácie India x . Z kolekcie údajov z experimentálnych meraní a výpočtov $E_g^{(\text{InAlN})}$ pri 300 K na obr. 8a vidíme, že indikujú nelineárnu závislosť tohto parametra. Preto sme do simulátora Minimos-NT implementovali nový spresnený model pre výpočet šírky zakázaného pásma InAlN, kalibrovaný na základe uvedených meraní. V modeli uvažujeme s kvadratickou interpoláciou $E_g^{(\text{InAlN})} = (1-x)E_g^{(\text{AlN})} + xE_g^{(\text{InN})} + x(1-x)C_g$, medzi šírkami zakázaného pásma AlN ($E_g^{(\text{AlN})} = 6.12$ eV) a InN ($E_g^{(\text{InN})} = 0.64$ eV), ktorých hodnoty sú priamo zadané v parametrickom súbore. Najlepšiu zhodu s experimentálnymi meraniami [12] sme dosiahli použitím tzv. faktoru zakrivenia $C_g = -6$ eV (obr. 8b). A teda, výsledná hodnota pre $E_g^{(\text{InAlN})} = 4.84$ eV pri 300 K pre $x = 0.12$. Lineárnou interpoláciou by sme získali hodnotu $E_g^{(\text{InAlN})} = 5.45$ eV, ktorá sa významne odlišuje od experimentálnej hodnoty.



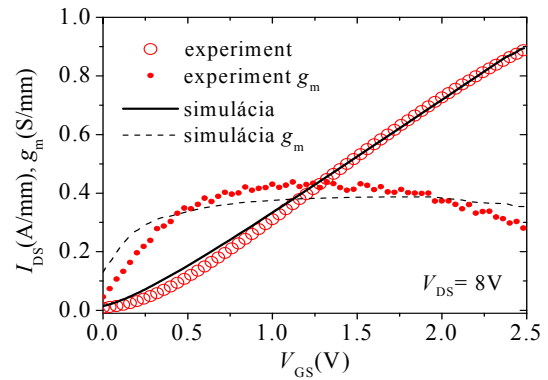
Obrázok 8 (a) Súbor experimentálnych hodnôt $E_g^{(\text{InAlN})}$ pri $T = 300$ K pre rôzne hodnoty x a porovnanie lineárnej a kvadratickej interpolácie. (b) Detailný záber na vybranú časť obrázku, porovnanie výslednej interpolácie modelu pre rôzne hodnoty faktoru zakrivenia C_g .

Vplyv pascí na vlastnosti EHEMT

InAlN/GaN HEMT s mriežkovo prispôsobenou InAlN bariérovou vrstvou vykazujú vyššiu hodnotu polarizačného náboja v kvantovej jame, v porovnaní s viacerými konvenčnými HEMT tranzistorami a v dôsledku toho sú viac odolné voči relaxačným degradačným mechanizmom, a tiež tento systém možno ľahko škálovať až k zariadeniam so submikrónovými dĺžkami hradiel. Vzhľadom k uvedeným vlastnostiam sa stali dobrou alternatívou bežne používaných



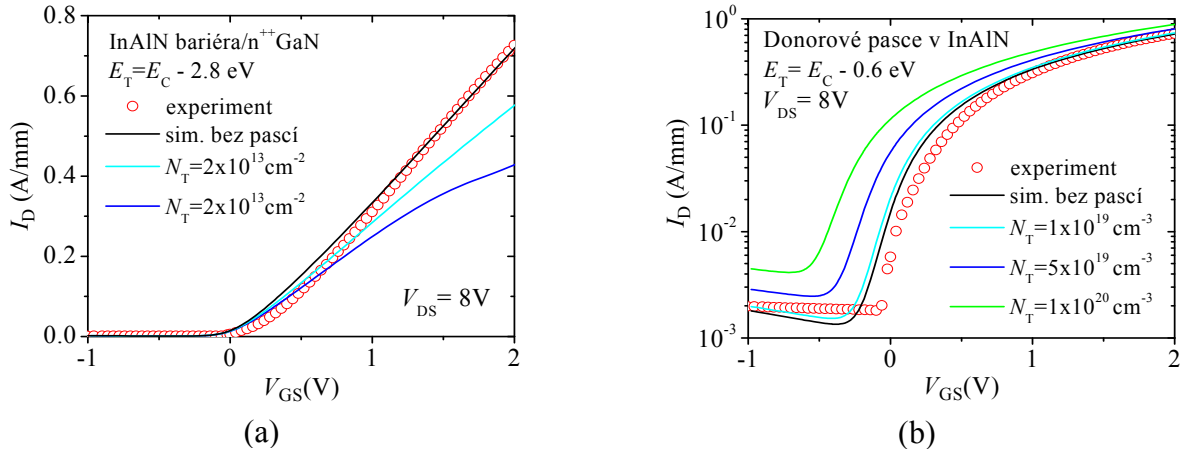
(a)



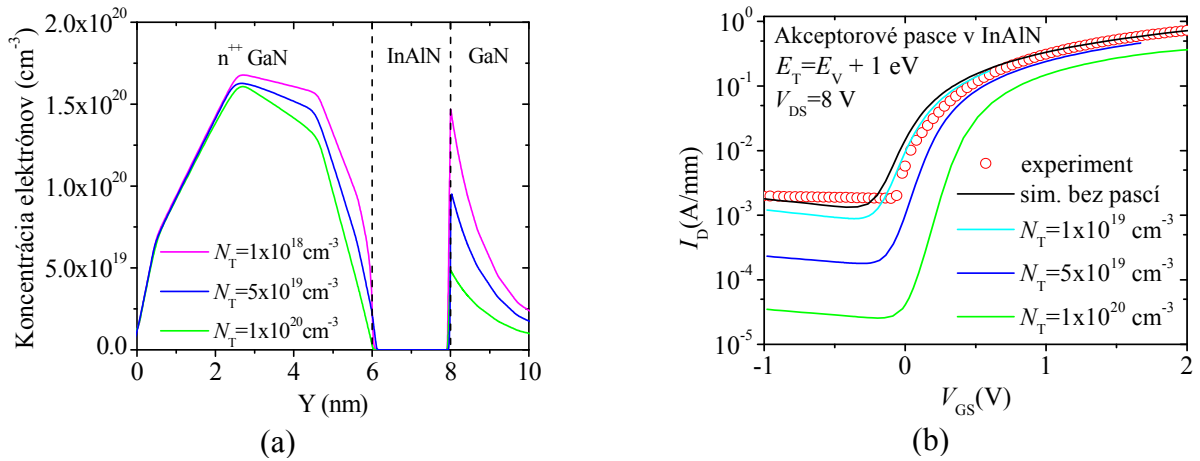
(b)

Obrázok 9 (a) Schematické znázornenie štruktúry tranzistora EHEMT. (b) Porovnanie meranej a simulovanej prevodovej charakteristiky tranzistora a meranej a simulovanej strmosti.

AlGaN/GaN HEMT v širokej škále aplikácií, či už RF alebo výkonových [21]. Hoci sa dosiahol v štúdií týchto tranzistorov veľký pokrok, k dispozícii je len málo publikácií [22-24], ktoré vysvetľujú alebo popisujú vplyv hlbokých pascí v týchto štruktúrach. Preto sme sa rozhodli skúmať vplyv pascí na vlastnosti n^{++} GaN/InAlN/AlN/GaN HEMT [25] pomocou 2-D Sentaurus TCAD simulácií s využitím termodynamického transportného modelu. Vyšetrovali sme vplyv pascí na rozhraní InAlN bariéry a vysoko-dopovaného GaN a taktiež vplyvu donorových a akceptorových pascí v InAlN bariére. V našich simuláciách sme uvažovali s rôznymi koncentraciami akceptorových pascí na rozhraní InAlN bariéra/ n^{++} GaN. Obr. 10a ukazuje, že rastúca koncentrácia akceptorových pascí na rozhraní spôsobuje pokles kolektorového prúdu I_D . Obr. 10b ukazuje vplyv donorových pascí uvažovaných v InAlN bariére pre rôzne koncentrácie týchto pascí. Poloha hladiny pascí v zakázanom pásme InAlN, ktorú sme použili v našich simuláciách je $E_T = E_C - 0.6$ eV. Spozorovali sme nárast kolektorového prúdu I_D a taktiež posuv prahového napätia V_{TH} smerom ku záporným hodnotám s rastúcou koncentráciou donorových pascí v InAlN. Obr. 11a ukazuje koncentračný profil voľných nosičov náboj v n^{++} GaN/InAlN/GaN štruktúre, pre rôzne koncentrácie akceptorových pascí v InAlN bariére. Hladina akceptorových pascí $E_T = E_V + 1$ eV, ktorá rovnako ako záchytný prierez pascí $\sigma_n = 3 \times 10^{-15}$ cm², boli identifikované použitím “drain-current deep level transient spectroscopy” (CI_D-DLTS) [24]. Ako vidíme z obr. 11a prítomnosť akceptorových pascí významne ovplyvňuje koncentráciu voľných nosičov náboja v kanáli. Vertikálny rez je zhotovený v strede medzi kontaktmi source a gate. Obr. 11b ukazuje vplyv akceptorových pascí lokalizovaných v InAlN bariére na prevodovú charakteristiku tranzistora. Spozorovali sme významný pokles kolektorového prúdu I_D a zvodového prúdu tečúceho tranzistorom v zatvorenom stave s rastúcou koncentráciou akceptorových pascí. Z porovnania simulovanej



Obrázok 10 (a) Vplyv akceptorových pascí na rozhraní InAlN bariéra/ n^{++} GaN na prevodovú charakteristiku pri $V_{DS} = 8$ V. Poloha pascí v zakázanom pásme je špecifikovaná 2.8 eV od vodivostného pásma InAlN. (b) Vplyv donorových pascí lokalizovaných v InAlN bariére na prevodovú charakteristiku pri $V_{DS} = 8$ V. Poloha pascí v zakázanom pásme je špecifikovaná 0.6 eV od vodivostného pásma InAlN.



Obrázok 11 (a) Simulovaný koncentračný profil voľných nosičov náboja v štruktúre n^{++} GaN/InAlN/GaN, pre rôzne koncentrácie akceptorových pascí v InAlN bariére. Vertikálny rez je zhotovený vo vzdialenosti 0.5 μm od hrany kontaktu source smerom ku hradlu. (b) Vplyv akceptorových pascí lokalizovaných v InAlN bariére na prevodovú charakteristiku tranzistora pri $V_{DS} = 8$ V. Hladina pascí sa nachádza 1 eV od valenčného pásma InAlN [24].

a experimentálnej charakteristiky vidíme, že vrstva InAlN bola narastená s koncentráciou pascí, ktoré významne neovplyvňujú správanie sa tranzistora.

Tento výsledok je tiež v súlade s koncentráciou akceptorových pascí v InAlN, ktorá je $\sim 1.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ [24]. Na druhej strane, vyššia koncentrácia akceptorových pascí môže byť potrebná kvôli redukcií kolektorového podprahového zvodového prúdu tranzistora. V našich simuláciách sme uvažovali iba s diskretnými hladinami pascí, pretože použitie diskretnej hladiny pascí je dostatočné na kvalitatívne popísanie vplyvu pascí na vlastnosti tranzistora. Podrobnejšie výsledky sú zhrnuté v [26].

Na základe výsledkov dosiahnutých modelovaním a simuláciou HEMT tranzistorov, ako aj na základe výsledkov z experimentálnych meraní týchto štruktúr môžeme prínosy dizertačnej práce definovať nasledovne:

- Získali sme nové poznatky o HEMT tranzistoroch, analyzovali sme vplyvy jednotlivých parametrov tranzistora na jeho funkčnosť a spoznali jeho elektrofyzikálne vlastnosti
- Porovnaním výsledkov z vlastných experimentálnych meraní a počítačových simulácií sme optimalizovali elektrofyzikálne modely a kalibrovali sme ich parametre tak, aby bola dosiahnutá čo možno najlepšia zhoda medzi meraniami a simuláciami
- Vytvorili sme nový, spresnený teplotne závislý model pre výpočet šírky zakázaného pásma viaczožkových polovodičov v závislosti od molárnej koncentrácie, založený na kvadratickej interpolácii, ktorý sme úspešne aplikovali v simulátore Minimos-NT
- Experimentálnymi meraniami pohyblivosti pri 300 K a pri zvýšených teplotách sme overili správnosť výsledkov našich 2-D simulácií
- Spresnili sme súčasný model tranzistora a upravili sme jeho parametre tak, aby sme lepšie dokázali fyzikálne interpretovať dosiahnuté výsledky
- Vyšetřili sme vplyv pascí lokalizovaných na rozhraní InAlN bariérovej vrstvy a vysokodopovanej krycej GaN vrstvy a vplyv pascí v bariérovej vrstve tranzistora na prevodovú charakteristiku EHEMT
- Navrhli a vytvorili sme metodológiu pre rýchlu 3-D elektrotepelnú simuláciu komplexných štruktúr, založenú na relaxačnej metóde a na interakcií medzi SDevice a HSPICE

5. Záver

Výkonové elektronické prvky zohrávajú veľmi dôležitú úlohu nielen vo svete mikroelektroniky, a preto výskum a vývoj v tejto oblasti neustále napredujú. S ohľadom na svoje výhodné frekvenčné vlastnosti a nízky šum, našli tranzistory HEMT široké uplatnenie v družicových širokopásmových komunikačných prístrojoch, mobilných telefónoch a monolitických mikrovlnných integrovaných obvodoch (MMIC). V súčasnosti sa obrovskou rýchlosťou zvyšujú požiadavky a nároky na mnohé výkonové štruktúry (DC-DC meniče, spínače a pod.) najmä v oblasti automobilového priemyslu. Aby sme dokázali udržať krok s vývojom moderných technológií, a aby sme dokázali rýchlo a operatívne neustále vylepšovať vlastnosti spomínaných výkonových štruktúr, využívame moderné počítačové návrhové a testovacie prostriedky. Práve tieto nám slúžia k lepšiemu pochopeniu elektrofyzikálnych vlastností jednotlivých štruktúr a fyzikálnych javov, ktoré v nich prebiehajú, a ktoré sme schopní čiastočne ovplyvniť a dosiahnuť tak požadované výsledky efektívne a pomerne rýchlo.

Aby sme dokázali splniť stanovené ciele tejto dizertačnej práce, bolo samozrejme potrebné dokonale poznať a tiež vedieť interpretovať fyzikálne procesy prebiehajúce v analyzovaných HEMT štruktúrach. Bolo tiež potrebné zvládnuť metodiku elektrickej charakterizácie daných štruktúr. Až po zvládnutí všetkých týchto požiadaviek sme boli schopní vytvoriť elektrofyzikálny model vyšetrovanej štruktúry, ktorý sme ďalej analyzovali. Dosiahnuté výsledky sme podrobne popísali v kapitole 6, kde sme výsledky z našich experimentálnych meraní porovnali s výsledkami získanými z 2-D a 3-D počítačových simulácií. Z porovnaní medzi experimentálnymi meraniami a simuláciami sme boli schopní spresniť vstupné parametre pre simulácie, vybrať vhodné fyzikálne modely a kalibrovať parametre týchto použitých modelov tak, aby sme získali správne výsledky. V našich simuláciách sme sa venovali obom typom HEMT štruktúr, a síce DHEMT a EHEMT, vyšetrovali sme ich správanie sa pri izbovej i pri zvýšených teplotách, venovali sme sa tiež vplyvu pascí na vlastnosti tranzistora a načrtli sme spôsob, akým sa simulujú kapacity C_{GS} , C_{GD} a C_{GG} , ktoré sú ďalšou oblasťou nášho výskumu, potrebnou a nevyhnutnou pre vytvorenie veľkosignálového modelu tranzistora.

Výsledky, ktoré sme v predloženej práci popísali, sme získali využitím niekoľkých simulačných nástrojov. 2-D elektrotepelnú analýzu DHEMT sme vykonávali pomocou simulátora Minimos-NT použitím hydrodynamického transportného modelu. Naše 3-D elektrotepelné simulácie sme vykonávali pomocou spolupráce medzi simulátorom HSPICE a SDevice od Synopsys, ktorý je v súčasnosti jedným z najpoužívanejších komerčných simulátorov polovodičových súčiastok. Veríme, že nami navrhnutá metodológia pre rýchle 3-D elektrotepelné simulácie komplexných štruktúr prinesie množstvo užitočných informácií, odhalí a analyzuje kritické oblasti vo vyšetrovaných štruktúrach a bude nápomocná pri optimalizácií

elektrických parametrov už vytvorených testovacích polovodičových štruktúr alebo výkonových elektronických prvkov, ktoré sú ešte len v štádiu vývoja a výskumu.

Predložená dizertačná práca bola vypracovaná na Ústave elektroniky a fotoniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave s podporou grantov VEGA 0866/11, APVV-0367-11, projektov ENIAC JU 324280/2012 E2COGaN a START Project Y247-N13.

6. Summary

Power electronic components play a very important role not only in a wide range of microelectronic applications, and therefore research and development in this area is constantly progressing. With respect to its favorable frequency characteristics and low noise HEMT transistors have found wide application in satellite broadband communication devices, mobile phones and monolithic microwave integrated circuits (MMIC). Currently, tremendous speed increase requirements and demands for many power structures (DC-DC converters, switches, etc..) especially in the automotive industry. To be able to keep pace with the development of modern technologies, so that we can quickly and continuously improve operational performance properties of such structures, we use modern computer design and testing facilities. It serves to a better understanding of electrophysical properties of individual structures and physical phenomena that take place in them, and that we are able to influence and partly to achieve the desired results as efficiently and fairly quickly.

To meet the objectives of the thesis, it was necessary perfectly interpret the physical processes occurring in the analyzed HEMT structures. It was also necessary to master the methodology of the electrical characterization of the structures. Only after mastering all these requirements, we were able to create electrophysical model of a structure, we further analyzed. The achieved results were described in detail in Chapter 6, where our experimental measurements were compared with results obtained from 2-D and 3-D computer simulations. From the comparison between experimental measurements and simulations we specified the input parameters for the simulation, choose appropriate physical models and calibrate the parameters of these models used so as to obtain correct results. In our simulations we dealt with both types of HEMT structures, namely DHEMT and EHEMT, we investigate their behavior at room and at elevated temperatures, we also addressed the impact of traps on the properties of the transistor and we outlined the way to simulate capacity C_{GS} , C_{GD} and C_{GG} , which is another area of our research, a necessary and essential for the creation of large-signal transistor model.

The results that we have described in the present work, we have gained by using several simulation tools. 2-D electrothermal DHEMT analysis we performed using the Minimos-NT using hydrodynamic transport model. Our 3-D electrothermal simulations we performed through

cooperation between HSPICE simulator and SDevice from Synopsys, which is currently one of the most widely used commercial simulators of semiconductor devices. We believe that our proposed methodology for fast 3-D electrothermal simulation of complex structures will bring a wealth of useful information and analyzes reveal critical areas of the investigated structures and will be instrumental in optimizing electrical parameters already created test semiconductor structures or power electronic elements that are still in R & D phase.

The results that we have described in the present work was achieved with support of grants VEGA 0866/11, APVV-0367-11, projects ENIAC JU 324280/2012 E2COGaN a START Project Y247-N13.

7. Použitá literatura

- [1] Yuanzheng, Y.: InAlN/AlN/GaN HEMTs With Regrown Ohmic Contacts and f_T of 370 GHz. In: IEEE Electron Device Letters, vol. 33, no. 7, 2012, 988-990
- [2] Ikeda, N., Kaya, S., Li, J., Kokawa, T., Masuda, M. and Katoh, S.: High-power AlGaIn/GaN MIS-HFETs with field-plates on Si substrates. In: Proceedings of ISPSD'09, 2009, 251-254
- [3] Saito, W., Kuraguchi, M., Takada, Y., Tsuda, K., Saito, Y., Omura, I. and Yamaguchi, M.: Current collapseless high-voltage GaN-HEMT and its 50-W boost converter operation. In: Technical Digest of IEDM'07, 2007, 869-872
- [4] Tipirneni, N., Adivarahan, V., Simin, G. and Khan, A.: Silicon dioxide-encapsulated high-voltage AlGaIn/GaN HFETs for power-switching applications. In: IEEE Electron Device Letters, vol. 28, 2007, 784-786
- [5] Saito, W., Nitta, T., Kakiuchi, Y., Saito, Y.: Influence of Electric Field upon Current Collapse Phenomena and Reliability in High Voltage GaN-HEMTs. In: Proceedings of The 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, Hiroshima, 2010, 339-342
- [6] Saunier, P. et al.: GOMACTech, Reno, 2010.
- [7] Wang, R., et al.: Enhancement-Mode InAlN/AlN/GaN HEMTs With 10^{-12} A/mm Leakage Current and 10^{12} ON/OFF Current Ratio. In: IEEE Electron Device Letters, vol. 32, no. 3, 2011.
- [8] Xue, J. S., et al.: Nearly lattice-matched InAlN/GaN high electron mobility transistors grown on SiC substrate by pulsed metal organic chemical vapor deposition. In: Applied Physics Letters, vol. 98, no. 11, 2011.
- [9] Vincze, A., et al.: SIMS depth profile characterisation of InAlN/GaN structures. In: Proceedings of ASDAM'10 Conference, Smolenice, Slovakia, 2010.
- [10] Pardeshi, H. et al.: Effect of underlap and gate length on device performance of an InAlN/GaN underlap MOSFET. In: Journal of Semiconductors, vol. 33, no. 12, 2012, 124001.
- [11] Palankovski, V., Quay, R.: Analysis and Simulation of Heterostructure Devices, Springer, Wien New York, 2004.
- [12] Molnár, M. et al.: Characterization, modeling, and simulation of In_{0.12}Al_{0.88}N/GaN HEMTs. In: Proceedings from APCOM 2012 Conference, High Tatras, Slovakia, 2012.
- [13] Synopsys, TCAD Sentaurus Device User Manual, version G-2012.06
- [14] Saito, W. et al.: High Breakdown Voltage AlGaIn-GaN Power-HEMT Design and High Current Density Switching Behavior. In: IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 50, no. 12, 2003, 2528-2531
- [15] Matulionis, A.: In: Proceedings Device Research Conference, Notre Dame, 2004, 146-149
- [16] Behmenburg, H. et al.: Investigation of AlN buffer layers on 6H-SiC for AlInN HEMTs grown by MOVPE. In: J. Crystal Growth (2011), doi: 10.1016/j.jcrysgro.2010.12.058.
- [17] Gonschorek, M. et al.: Two-dimensional electron gas density in In_xAl_{1-x}N /AlN/GaN heterostructures ($0.03 \leq x \leq 0.23$). In: J. Appl. Phys, vol. 103, 2008, 093714
- [18] Vitanov, S. et al.: In Proc. HETECH'08, Venice, Italy, 2008, 159-160

- [19] Kuzmík, J. et al.: Investigation of the thermal boundary resistance at the III-Nitride/substrate interface using optical methods. In: J. Appl. Phys., vol. 101, 2007, 054508
- [20] Chvála, A. et al.: Fast 3-D Electrothermal Device/Circuit Simulation of Power Superjunction MOSFET Based on SDevice and HSPICE Interaction. In: IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 61, no. 4, 2014, 1116-1122
- [21] Kuzmík, J. et al.: Buffer-related degradation aspects of single and double-heterostructure quantum well InAlN/GaN high electron mobility transistors. In: Japanese Journal of Appl. Phys., vol. 51, 2012, 054102
- [22] Chini, A. et al.: Deep levels characterization in GaN HEMTs-Part2: Experimental and numerical evaluation of self-heating effects on the extraction of traps activation energy. In: IEEE Trans. Electron Devices, vol. 60, no. 10, 2013, 3176-3182
- [23] Faqir, M. et al.: Analysis of current collapse effect in AlGaIn/GaN HEMT: Experiments and numerical simulations. In: Microelectronics reliability, vol. 50, 2010, 1520-1522
- [24] Sasikumar, A. et al.: Direct comparison of traps in InAlN/GaN and AlGaIn/GaN high electron mobility transistors using constant drain current deep level transient spectroscopy. In: Appl. Phys. Lett., vol. 103, no. 3, 2013, 033509
- [25] Kuzmík, J. et al.: Proposal and Performance Analysis of Normally Off n^{++} GaN/InAlN/AlN/GaN HEMTs With 1-nm-Thick InAlN Barrier. In: IEEE Trans. Electron Devices, vol. 57, no. 9, 2010, 2144-2154
- [26] Molnár, M., Donoval, D., Kuzmík, J., et al.: Simulation study of interface traps and bulk traps in n^{++} GaN/InAlN/AlN/GaN High electron mobility transistors. In: Applied Surface Science. – Vol. 312, (2014), s. 157- 161

8. Zoznam vlastných publikácií

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- ADC1 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Beňo, Peter - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Analysis of Reliability and Optimization of ESD Protection Devices Support by Modeling and Simulation. In: Microelectronics Reliability. - ISSN 0026-2714. - Vol. 52 (2012), s. 1031-1038
- ADC2 Príbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Molnár, Marián: Electro-Thermal Analysis and Optimization of Edge Termination of Power Diode Supported by 2D Numerical Modeling and Simulation. In: Microelectronics Reliability. - ISSN 0026-2714. - Vol. 52 (2012), s. 463-468
- ADC3 Marek, Juraj – Chvála, Aleš – Donoval, Daniel – Príbytný, Patrik – Molnár, Marián – Mikolášek, Miroslav: Compact model of power MOSFET with temperature dependent Cauer RC network for more accurate thermal simulations. In: Solid-State Electronics. – ISSN 0038-1101. –Vol. 94 (2014), s. 44 - 50
- ADC4 Chvála, Aleš – Donoval, Daniel – Marek, Juraj – Príbytný, Patrik – Molnár, Marián – Mikolášek, Miroslav: Fast 3-D Electrothermal Device/Circuit Simulation of Power Superjunction MOSFET Based on SDevice and HSPICE Interaction. In: IEEE

- ADC5 Molnár, Marián – Donoval, Daniel – Kuzmík, Ján – Marek, Juraj – Chvála, Aleš – Příbytný, Patrik – Mikolášek, Miroslav – Rendek, Karol – Palankovski, Vassil: Simulation study of interface traps and bulk traps in $n^{++}\text{GaN}/\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ high electron mobility transistors. In: Applied Surface Science. – Vol. 312, (2014), s. 157-161
- ADC6 Mikolášek, Miroslav – Příbytný, Patrik – Donoval, Daniel – Marek, Juraj – Chvála, Aleš – Molnár, Marián – Kováč, Jaroslav: Suppression of interface recombination by buffer layer for back contacted silicon heterojunction solar cells. In: Applied Surface Science. – Vol. 312, (2014), s. 145-151
- ADC7 Kuzmík, Ján - Ľapajna, Milan - Valík, Lukáš - Molnár, Marián - Donoval, Daniel – Fleury, Clement - Pogany, Dionýz - Strasser, Gottfried - Brunner, Frank - Hilt, Oliver - Wuerfl, Joachim. Self-heating in GaN Transistors Designed for High Power Operation. In: IEEE Transactions on Electron Devices. (2014) In process.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC1 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Šatka, Alexander - Kováč, Jaroslav - Marek, Juraj - Molnár, Marián - Příbytný, Patrik: A New Equivalent Circuit Model of InAlN/GaN E-HEMT. In: WOCSDICE 2013 : 37th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Warnemünde, Germany, May 26- 29, 2013. - Berlin : Ferdinand-Braun-Institut, Leibnitz-Institut für Höchstfrequenztechnik, 2013. - ISBN 978-3-00-041435-0. - S. 133-134
- AFC2 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Molnár, Marián - Příbytný, Patrik - Kováč, Jaroslav - Kordoš, Peter: Analysis of the Leakage Current of AlGaIn/GaN Schottky Diode Dependent on Ohmic Contact PAD Electrode Position. In: WOCSDICE 2011 : 35th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Catania, Italy, May 29 - June 1, 2011. - Catania : CNR-IMM, 2011. - S. 127-128
- AFC3 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Příbytný, Patrik - Molnár, Marián: Education of Electronic Devices Supported by 3-D Simulations. In: EWME 2012 : 9th European Workshop on Microelectronics Education. Grenoble, France, May 9-11, 2012. - : EDA Publishing, 2012. - ISBN 978-2-35500-019-5. - S. 6-9
- AFC4 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Příbytný, Patrik - Molnár, Marián: Fast 3D Electro-Thermal Device/Circuit Simulation Based on Automated Interaction of SDevice and HSpice Simulators. In: 18th International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices : Glasgow, Scotland, September 3-5, 2013. - Piscataway : IEEE, 2013. - ISBN 978-1-4673-5733-3. - S. 224-227
- AFC5 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Příbytný, Patrik - Molnár, Marián: Power Transistor Models with Temperature Dependent Parasitic Effects for SPICE-

Like Circuit Simulation. In: 28th International Conference on Microelectronics : Niš, Serbia and Montenegro, 13-16 May, 2012. - Piscataway : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-0235-7. - S. 255-260

- AFC6 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Příbytný, Patrik - Molnár, Marián: Three-Dimensional Electro-Therman Verilog-A Model of Power MOSFET for Circuit Simulation. In: Official Proceedings of Microtherm 2013 : Microtechnology and Thermal Problems in Electronics. Lodz, Poland, June 25-28, 2013. - Lodz : Lodz University of Technology, 2013. - ISBN 978-83-932197-1-1. - S. 222-227
- AFC7 Jurkovič, M. - Gregušová, Dagmar - Haščík, Štefan - Blaho, Matej - Molnár, Marián - Palankovski, Vassil - Donoval, Daniel - Carlin, J.F. - Grandjean, N. - Kuzmik, J.: GaN/InAlN/AlN/GaN Normally-Off HEMT with Etched Acces Region. In: WOCS-DICE-EXMATEC 2012 [elektronický zdroj] : 36th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits and 11th Expert Evaluation & Control of Compound semiconductor Materials and Technologies. Island of Porquerolles, France, May 30 - June 1, 2012. - Valbonne : CNRS, 2012. - CD-ROM, [2] s.
- AFC8 Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Kováč, Jaroslav - Molnár, Marián - Chvála, Aleš - Kordoš, Peter: Analysis of structure geometry and interface charge on electrical characteristics of InAlN/GaN HEMTs. In: ASDAM 2010. The Eighth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, 25 - 27 October 2010. - Piscataway : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. - ISBN 978-1-4244-8572-7
- AFC9 Marek, Juraj - Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Příbytný, Patrik - Molnár, Marián: Temperature Dependent Cauer RC Network for More Accurate SPICE-Like Circuit Simulations of Power MOSFET with Parasitic Elements. In: ISPS '12 : 11th International Seminar on Power Semiconductors. Prague, Czech Republic, 29.-31.8.2012. - Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2012. - ISBN 978-80-01-05100-9. - S. 207-212
- AFC10 Molnár, Marián - Donnarumma, Gesualdo - Palankovski, Vassil - Kuzmík, Ján - Donoval, Daniel - Kováč, Jaroslav - Selberherr, Siegfried: Electrothermal Analysis of In_{0.12}Al_{0.88}N/GaN HEMTs. In: ASDAM 2012 : 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012. - Piscataway : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-1195-3. - S. 55-58
- AFC11 Molnár, Marián - Palankovski, Vassil - Donoval, Daniel - Kuzmík, Ján - Kováč, Jaroslav - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Příbytný, Patrik - Selberherr, Siegfried: Characterization of In_{0.12}Al_{0.88}N/GaN HEMTs at Elevated Temperatures Supported by Numerical Simulation. In: WOCS-DICE 2013 : 37th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Warnemünde, Germany, May 26- 29, 2013. - Berlin : Ferdinand-Braun-Institut, Leibnitz-Institut für Höchstfrequenztechnik, 2013. - ISBN 978-3-00-041435-0. - S. 135-136
- AFC12 Příbytný, Patrik - Mikolášek, Miroslav - Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš

- Molnár, Marián - Nemeč, Michal: Analysis and Optimization of Silicon Heterojunction Solar Cells with Back Contact Arrangement by 2-D Numerical Modeling and Simulation. In: WOCSDICE 2013 : 37th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Warnemünde, Germany, May 26- 29, 2013. - Berlin : Ferdinand-Braun-Institut, Leibnitz-Institut für Höchstfrequenztechnik, 2013. - ISBN 978-3-00-041435-0. - S. 137-138

AFC13 Příbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Molnár, Marián: Electro-Thermal Analysis and Optimization of Edge Termination of Power Diode Supported by 2-D/3-D Numerical Modeling and Simulation. In: Official Proceedings of Microtherm 2013 : Microtechnology and Thermal Problems in Electronics. Lodz, Poland, June 25-28, 2013. - Lodz : Lodz University of Technology, 2013. - ISBN 978-83-932197-1-1. - S. 65-70

AFC14 Molnár, Marián – Donoval, Daniel – Chvála, Aleš – Marek, Juraj – Příbytný, Patrik: Characterization of InAlN/GaN high electron mobility transistors supported by fast 3-D electrothermal device/circuit simulation. In: WOCSDICE 2014: 38th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Delphi, Greece, June 15-18, 2014. – FORTH: Institute of Electronic Structure and Laser. – S.121-122

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD1 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Příbytný, Patrik - Molnár, Marián: Characterisation of Thermal Equivalent Circuit for SPICE-like Electro-Thermal Model of Power MOSFET. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011. - Žilina : Žilinská univerzita, 2011. - ISBN 978-80-554-0386-1. - S. 90-93

AFD2 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Příbytný, Patrik - Molnár, Marián: Low Voltage Power Transistor Model for Spice-Like Electro-Thermal Circuit Simulation. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 223-226

AFD3 Chvála, Aleš - Příbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Molnár, Marián: Modelovanie a simulácia technologického procesu výroby a elektrických vlastností polovodičových prvkov. In: Fotonika 2012 : 7.výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Bratislava, 9. 2. 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-970493-3-1. - S. 46-47

AFD4 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Příbytný, Patrik - Molnár, Marián: Three-Dimensional Electro-Thermal Circuit Model for Power Devices. In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013. - Žilina : University of Žilina, 2013. - ISBN 978-80-554-0689-3. - S. 173-176

- AFD5 Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: 2/3-D Circuit Electro-Thermal Model of Power MOSFET for SPICE-Like Simulation. In: ASDAM 2012 : 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012. - Piscataway : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-1195-3. - S. 179-182
- AFD6 Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Analysis of a Low Voltage Vertical Power MOS Transistor Failure During UIS Test Supported by 2-D and 3-D Simulations. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011. - Žilina : Žilinská univerzita, 2011. - ISBN 978-80-554-0386-1. - S. 94-97
- AFD7 Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Petrus, Miroslav - Stuchlíková, Ľubica - Chvála, Aleš - Molnár, Marián - Príbytný, Patrik: Degradation of the Low Voltage Power MOSFET Electrical Parameters During Multipulse UIS Test. In: ASDAM 2012 : 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012. - Piscataway : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-1195-3. - S. 183-186
- AFD8 Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Determining of the Failure Mechanism during UIS Test Combining Single and Multipulse UIS Test. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 313-316
- AFD9 Marek, Juraj - Chvála, Aleš - Donoval, Daniel - Príbytný, Patrik - Molnár, Marián: Power MOSFET SPICE Like Model for More Accurate Thermal Simulations. In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013. - Žilina : University of Žilina, 2013. - ISBN 978-80-554-0689-3. - S. 169-172
- AFD10 Molnár, Marián - Donoval, Daniel - Kováč, Jaroslav - Marek, Juraj - Florovič, Martin - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik: Analysis of Electrical Properties of $\text{In}_{0.12}\text{Al}_{0.88}\text{N}$ /GaN Hemt Transistor Supported by TCAD Modeling and Simulation. In: ELITECH'11 : 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 17 May, 2011. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2011. - ISBN 978-80-227-3500-1. - S. 1-6
- AFD11 Molnár, Marián - Donoval, Daniel - Kováč, Jaroslav - Marek, Juraj - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik: Analysis of Electrical Properties of $\text{In}_{0.12}\text{Al}_{0.88}\text{N}$ /GaN HEMT Transistor Supported by TCAD Modeling and Simulation. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011. - Žilina : Žilinská univerzita, 2011. - ISBN 978-80-554-0386-1. - S. 188-191
- AFD12 Molnár, Marián - Donnarumma, Gesualdo - Palankovski, Vassil - Kuzmík, Ján -

- Donoval, Daniel - Kováč, Jaroslav - Selberherr, Siegfried: Characterization, Modeling, and Simulation of $\text{In}_{0.12}\text{Al}_{0.88}\text{N}/\text{GaN}$ HEMTs. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 190-194
- AFD13 Molnár, Marián - Palankovski, Vassil - Donoval, Daniel - Kuzmík, Ján - Kováč, Jaroslav - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Príbytný, Patrik - Selberherr, Siegfried: Modeling and Characterization of $\text{In}_{0.12}\text{Al}_{0.88}\text{N}/\text{GaN}$ HEMTs at Elevated Temperatures. In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013. - Žilina : University of Žilina, 2013. - ISBN 978-80-554-0689-3. - S. 48-51
- AFD14 Príbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Molnár, Marián: Analysis and Optimization of Power Diode Supported by Electro-Thermal Modeling and Simulation. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011. - Žilina : Žilinská univerzita, 2011. - ISBN 978-80-554-0386-1. - S. 155-159
- AFD15 Príbytný, Patrik - Dubecký, František - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Marek, Juraj - Molnár, Marián: Analysis and Optimization of Silicon Detector Supported by Electro-Physical Modeling and Simulation. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 349-352
- AFD16 Príbytný, Patrik - Mikolášek, Miroslav - Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Molnár, Marián - Nemeč, Michal: Optimization of Silicon Heterojunction Solar Cell Contacts by 2D Numerical Modelling and Simulation. In: Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013. - ISBN 978-80-89402-64-9. - S. 451-454
- AFD17 Príbytný, Patrik - Mikolášek, Miroslav - Marek, Juraj - Donoval, Daniel - Chvála, Aleš - Molnár, Marián - Nemeč, Michal: Recombination Mechanisms in a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells Studied by 2D Numerical Modeling and Simulation. In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013. - Žilina : University of Žilina, 2013. - ISBN 978-80-554-0689-3. - S. 101-104
- AFD18 Chvála, Aleš – Donoval, Daniel – Marek, Juraj – Príbytný, Patrik – Molnár, Marián: Dual Carrier Circuit Modeling for Simulation of Parasitic Current Injection in IC Substrates. In: ADEPT 2014. Advances in Electronics and Photonic Technologies: Proceedings of the 2nd International Conference. Tatranská Lomnica, Slovak Republic, June 1- 4, 2014. Bratislava : STU Bratislava, 2014. – ISBN 978-80-554-0881-1. – S. 112-115
- AFD19 Molnár, Marián - Donoval, Daniel – Chvála, Aleš - Marek, Juraj – Príbytný, Patrik: Fast

3-D Electrothermal Device Simulation of InAlN/GaN High Electron Mobility Transistors. In: ADEPT 2014. Advances in Electronics and Photonic Technologies: Proceedings of the 2nd International Conference. Tatranská Lomnica, Slovak Republic, June 1- 4, 2014. Bratislava : STU Bratislava, 2014. – ISBN 978-80-554-0881-1. – S. 128-131

AFD20 Marek, Juraj - Donoval, Daniel – Molnár, Marián - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik: Simulation Study of Enhancement Mode GaN MIS HEMT with High-K Gate Dielectric. In: ADEPT 2014. Advances in Electronics and Photonic Technologies: Proceedings of the 2nd International Conference. Tatranská Lomnica, Slovak Republic, June 1- 4, 2014. Bratislava : STU Bratislava, 2014. – ISBN 978-80-554-0881-1. – S. 132-135

AFD21 Mikolášek, Miroslav - Príbytný, Patrik - Marek, Juraj - Chvála, Aleš - Molnár, Marián - Donoval, Daniel – Kováč, Jaroslav: 2D Simulation and Analysis of Back Contacted Silicon Heterojunction Solar Cells for Achieving High Performance. In: ADEPT 2014. Advances in Electronics and Photonic Technologies: Proceedings of the 2nd International Conference. Tatranská Lomnica, Slovak Republic, June 1- 4, 2014. Bratislava : STU Bratislava, 2014. – ISBN 978-80-554-0881-1. – S. 233-236

AFH Abstrakty príspevkov z domácich konferencií

AFH1 Mikolášek, Miroslav - Príbytný, Patrik - Donoval, Daniel - Marek, Juraj - Marek, Juraj - Chvála, Aleš - Molnár, Marián: Suppression of the Interface Recombination by Implanted Buffer Layer for Back Contacted Silicon Heterojunction Solar Cells. In: 8th Solid State Surfaces and Interfaces : Extended Abstract Book. Smolenice Castle, Slovak Republic, November 25-28, 2013. - Bratislava : Comenius University, 2013. - ISBN 978-80-223-3501-0. - S. 111-112

AFH2 Molnár, Marián - Donoval, Daniel - Kuzmík, Ján - Marek, Juraj - Chvála, Aleš - Príbytný, Patrik - Mikolášek, Miroslav - Palankovski, Vassil: Simulation Study of Interface Traps and Bulk Traps in the n⁺⁺ GaN/InAlN/GaN High Electron Mobility Transistor. In: 8th Solid State Surfaces and Interfaces : Extended Abstract Book. Smolenice Castle, Slovak Republic, November 25-28, 2013. - Bratislava : Comenius University, 2013. - ISBN 978-80-223-3501-0. - S. 121-122

Meno autora: **Marián Molnár**

Názov práce:

“NÁVRH A CHARAKTERIZÁCIA PROGRESÍVNYCH VÝKONOVÝCH
ELEKTRONICKÝCH PRVKOV PODPORENÁ MODELOVANÍM A SIMULÁCIOU”

Náklad: 12 ks

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

Termín vytlačenia: 2014