

Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Ing. Roman STOKLAS

Autoreferát dizertačnej práce

**Characterization and properties of MIS-HFETs
based on GaN**

**Charakterizácia a vlastnosti štruktúr
typu MIS-HFET na báze GaN**

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:

26-13-9 Elektronika

v špecializácii: **Mikroelektronika**

Bratislava, Marec 2008

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Oddelení optoelektroniky Elektrotechnického ústavu Slovenskej akadémie vied v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Roman STOKLAS
Oddelenie optoelektroniky
Elektrotechnický ústav
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Školiteľ: RNDr. Dagmar GREGUŠOVÁ, Csc.
Oddelenie optoelektroniky
Elektrotechnický ústav
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Oponenti: Prof. Ing. Daniel Donoval, DrSc. FEI STU, Bratislava
Ing. Fedor Šrobár, DrSc. ÚRE ČAV, Praha
RNDr. Milan Držík, CSc. Laserové centrum, Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod.
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia, vymenovanou
predsedom spoločnej odborovej komisie dňa

26-13-9 Elektronika
špecializácia: Mikroelektronika

na Elektrotechnickom ústave SAV
Dúbravská cesta 9
841 04 Bratislava

Predseda spoločnej odborovej komisie:

.....
Doc. Ing. Jozef NOVÁK, DrSc.
Elektrotechnický ústav SAV
Oddelenie optoelektroniky
Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

ÚVOD

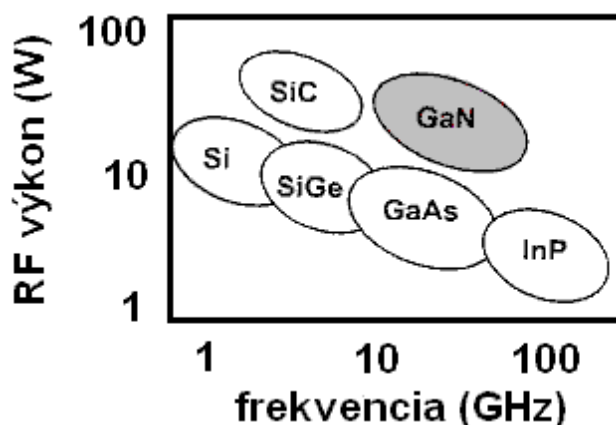
V súčasnom svete polovodičových súčiastok dominujú tranzistory na báze kremíka Si. V oblasti vysokých frekvencií sa v súčasnosti vo väčšej miere využívajú tranzistory s vysokou pohyblivosťou elektrónov (HEMTs) a bipolárne tranzistory s heteropriechodom (HBTs) na báze GaAs. V oblasti vysoko-frekvenčných aplikácií s nízkym výkonom ponúka určitú výhodu polovodičový materiál InP. Ďalšími dôležitými požiadavkami sú hlavne vysoká účinnosť, produkovateľnosť a v neposlednom rade cena. Polovodičové materiály zo skupiny III-V však nespĺňajú také vysoké nároky, čo bolo hlavným dôvodom skúmania širokopásmových polovodičových materiálov zo skupiny III-N pre danú oblasť. Do tejto skupiny polovodičových materiálov zaraďujeme materiály so šírkou energetickej medzery E_G od 0.9eV pre InN cez 3.4eV pre GaN až do 6.2eV pre AlN. Vývoj v oblasti Blue-LED, laserov a ultra-fialových fotodetektorov na báze GaN zaznamenal v posledných rokoch výrazný pokrok [1]. Tab.1 znázorňuje vzájomne porovnanie základných elektrických a materiálových parametrov GaN-u s ďalšími polovodičovými materiálmi. Hlavnými výhodami súčiastok pripravených na GaN polovodičovom materiáli v porovnaní s konvenčnými polovodičovými materiálmi sú:

- väčšia šírka energetickej medzery E_G umožňuje použitie štruktúr vo vysoko-teplotných aplikáciách a na výrobu laserov a fotodetektorov v UV oblasti,
- nižšia hodnota dielektrickej konštanty ϵ v porovnaní s Si a GaAs umožňuje vytvoriť súčiastky s väčšou aktívnou plochou, čím je možné dosiahnuť vyšší vysoko-frekvenčný výkon P_{out}^{RF} štruktúry pri danej impedancii,
- vysoká hodnota tepelnej vodivosti σ_t je dôležitá najmä z hľadiska extrakcie rozptyľového výkonu P_d štruktúry,
- vysoká hodnota kritickej intenzity elektrického poľa E_{crit} umožňuje dosiahnuť vyšší vysoko-frekvenčný výkon, a tým dosiahnuť vyššie hodnoty prúdovej hustoty $I_{DS,sat}$ bez prerazu štruktúry,
- vysoká hodnota elektrónovej pohyblivosti μ_n a driftovej saturačnej rýchlosti v_{sat} umožňuje použiť štruktúry na báze GaN vo vysoko-frekvenčných aplikáciách.

Súčiastky vyrobené na báze GaN ponúkajú kompromis medzi nízko-výkonovými materiálmi ako InP v oblasti vysokých frekvencií a nízko-frekvenčnými materiálmi ako SiC v oblasti vysokého vysoko-frekvenčného výkonu obr. 1. Hodnoty spontánnej P_{SP} a piezoelektrickej polarizácie P_{PE} GaN polovodičového materiálu sú v porovnaní s inými III-V polovodičovými materiálmi pomerne vysoké, čo umožňuje vytvárať tranzistory riadené elektrickým poľom s heteropriechodom (HFET) resp. tranzistory s vysokou pohyblivosťou elektrónov (HEMTs), aj bez prídavnej dotácie. V dôsledku silného gradientu polarizácie pri AlGaN/GaN heterorozhraní dosahuje plošná hustota náboja n_S v 2DEG-u približne 3 až 10-krát vyššie hodnoty v porovnaní so štruktúrami založenými na báze GaAs a InP (tab. 2), v ktorých sa 2DEG formuje v dôsledku prídavnej dotácie bariérovej vrstvy, kde však dochádza k zníženiu pohyblivosti μ_{2DEG} v 2DEG-u v dôsledku rozptylu na ionizovaných prímiesiach. AlGaN/GaN heteroštruktúra s porovnateľnou špičkovou hodnotou rýchlosti v_{peak} a približne 3-krát vyššou hodnotou saturačnej rýchlosti v_{sat} v porovnaní s heteroštruktúrami na báze GaAs a InP, je aj napriek nižšej pohyblivosti $\mu_{E,low}$ v oblasti nízkych elektrických polí na vrchole záujmového rebríčka.

Tab. 1 Porovnanie základných elektrických a materiálových parametrov GaN s ďalšími polovodičovými materiálmi [2, 3]

Veličina	GaN		SiC	GaAs	Si
	wurtzite	zinc blende			
Šírka energetickej medzery E_G [eV] (300K)	3.39	3.2	3	1.43	1.12
Elektrónová pohyblivosť μ_n [cm ² /Vs] (300K)	1350	1000	<400	8500	1350
Elektrónová afinita χ_S [eV]	4.1		3.6 – 3.9	4.07	4.05
Maximálna operačná teplota T_{max} [°C]	900		1000	200	150
Dielektrická konštanta ϵ_s	8.9	9.7	9.6	12.5	11.9
Tepelná vodivosť σ_l [W/K.cm]	1.3		3.0 – 3.8	0.5	1.5
Kritická intenzita el. poľa E_{crit} [MV/cm]	3.3		2.5	0.4	0.3
Driftová saturačná rýchlosť v_{sat} [x10 ⁷ cm/s]	2.5		2	2	1



Obr. 1. Závislosť vysokofrekvenčného výkonu od frekvencie pre rôzne polovodičové materiály [4]

Tab. 2 Porovnanie parametrov heteropriechodu [5]

Heteropriechod (bariéra/kanál)	ΔE_C [eV]	Plošná hustota 2DEG n_S [10 ¹² cm ⁻²]	Pohyblivosť v oblasti nízkych polí $\mu_{E,low}$ [cm ² /Vs]	Špičková rýchlosť v_{peak} [x10 ⁷ cm/s]	Saturačná rýchlosť v_{sat} [x10 ⁷ cm/s]
Al _{0.3} Ga _{0.7} As/GaAs	0.22	1.5	8000	2.0	0.8
Al _{0.25} Ga _{0.75} As/In _{0.2} Ga _{0.8} As	0.36	3.0	7000	2.3	0.7
In _{0.52} Al _{0.48} As/In _{0.53} Ga _{0.47} As	0.52	4 - 5	10000	2.6	0.7
Al _{0.3} Ga _{0.7} N/GaN	0.42	10 - 15	1400	2.5	2.0

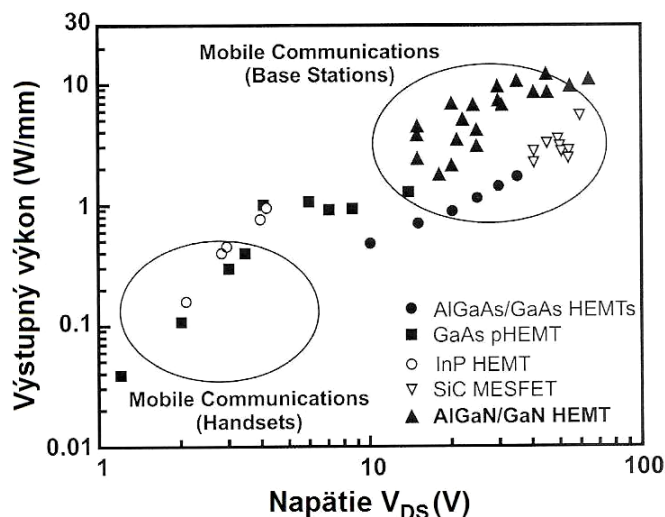
Tak ako aj kvalita vyrobených AlGaN/GaN heteroštruktúr, tak aj použitý substrát ovplyvňuje parametre heteroštruktúry. Z dôvodu vysokej teploty tavenia GaN-u (~2500°C) a disociačných tlakov je pomerne ťažké získať monokryštál z III-N zloženia v požadovanej veľkosti potrebný pre homoepitaxný rast. Preto sa ako substrát používajú materiály rôzneho chemického zloženia s rozdielnym mriežkovým parametrom, koeficientom tepelnej rozťažnosti β a rozdielnou hodnotou tepelnej vodivosti σ_t (tab. 3) [6]. Na základe spomenutých dôvodov je výber vhodných substrátu s príslušnou orientáciou, s nízkym mriežkovým neprispôsobením a dobrou tepelnou vodivosťou σ_t veľmi dôležitý, najmä z hľadiska prípravy kvalitných GaN epitaxných vrstiev. V súčasnosti medzi najpoužívanejšie substráty patria Si, SiC a zafír (Al_2O_3).

Tab. 3 Porovnanie niektorých vlastností substrátov používaných pre rast GaN [2, 7]

Substrát	GaN	Al_2O_3	SiC	Si
Veľkosť substrátu	~4cm ²	6''	3''	12''
Cena	vysoká	stredná	vysoká	nízka
Mriežkové neprispôsobenie [%]	0	-13	+3.5	-17
Koeficient tepelnej rozťažnosti β [%]	0	-34	+25	+100
Tepelná vodivosť σ_t [W/cmK]	1.3	0.5	3.5	1.5

AlGaN/GaN HEMT tranzistory dosahujú vysoké hodnoty saturačnej prúdovej hustoty $I_{DS,sat}$ vysoko nad 1A/mm a vysoké hodnoty strmosti g_m nad 300mS/mm. Prvý AlGaN/GaN HEMT tranzistor so saturačnou prúdovou hustotou 60mA/mm a strmostou 27mS/mm bol vyrobený v roku 1994 [8]. Oveľa vyššie hodnoty saturačnej prúdovej hustoty ~ 1.4A/mm a extrinzieckej strmosti 437mS/mm resp. 345mS/mm boli dosiahnuté na AlGaN/GaN HEMT tranzistoroch s dĺžkou hradla $L_G = 0.25\mu\text{m}$ na SiC resp. zafirovom substráte [9, 10].

Vďaka tomu, že AlGaN/GaN HEMT tranzistory sú schopné pracovať vo frekvenčnej oblasti nad 100GHz (obr. 3) a dosahujú vysoké hodnoty hustoty výstupného výkonu P_{out}^D nad 10W/mm, je možné ich použiť na výrobu veľmi malých a výkonných súčiastok, čo je v súčasnosti jednou z najdôležitejších priemyselných požiadaviek. AlGaN/GaN HEMT tranzistory sú schopné pracovať aj v oblasti veľmi vysokých frekvencií (desiatky GHz).



Obr. 3 Závislosť výstupného výkonu od napätia medzi kontaktami Source a Drain V_{DS} [11]

Hlavné obmedzenia HFET tranzistorov v oblasti vysokých frekvencií sú:

- **vysoký zvodový prúd cez Schottky-ho kontakt** – spôsobený vysokou hustotou defektov v objeme štruktúry, ako aj v blízkosti hradlovej oblasti resp. pod hradlovou oblasťou HEMT tranzistora [12]

Redukcia:

- ⇒ použitím MOS štruktúry, kde pomocou dielektrickej vrstvy dochádza k izolácii hradla. Dielektrická vrstva je deponovaná pred hradlovou metalizáciou.
- ⇒ zvýšením efektívnej výšky Schottky-ho bariéry nedotovanou GaN vrstvou narastenou na povrchu AlGaIn vrstvy,
- ⇒ procesom tepelného žihania na zníženie hustoty defektov na povrchu a v objeme štruktúry v závislosti od pracovných podmienok (teplota a čas žihania),
- **prúdový kolaps** – spôsobený rozšírením ochudobnenej oblasti v GaN vrstve vplyvom pasív na povrchu AlGaIn vrstvy hlavne medzi oblasťami D a G [13]

Redukcia:

- ⇒ povrchovou pasiváciou AlGaIn vrstvy pomocou dielektrickej vrstvy.

Medzi skúmané dielektrické vrstvy pre AlGaIn/GaN HEMT tranzistory, ktoré sa používajú na pasiváciu povrchu AlGaIn vrstvy resp. depozíciu dielektrickej vrstvy medzi hradlo a kanál tranzistora, patria hlavne SiO₂, Si₃N₄, Ga₂O₃, Gd₂O₃, Al₂O₃, Sc₂O₃ a mnohé ďalšie. Je predpoklad, že týmto spôsobom je možné výrazne zlepšiť elektrické vlastnosti AlGaIn/GaN HEMT tranzistorov [14, 15].

Z vyššie uvedených skutočností vyplývajú nasledovné ciele predkladanej práce:

- charakterizácia GaN polovodičového materiálu,
- charakterizácia pripravených HFET a MOS-HFET tranzistorov na báze GaN,
- analýza elektrických vlastností daných typov štruktúr,
- vhodný výber a realizácia MOS-HFET tranzistora s najvhodnejšou dielektrickou vrstvou.

Dizertačná práca je rozdelená do troch hlavných častí. Prvá časť je venovaná opisu problematiky súčasného stavu a skúmaniu HEMT tranzistorov na báze GaN, ktoré sú vhodnými kandidátmi na výrobu vysoko-výkonových, vysoko-teplotných a vysoko-frekvenčných súčiastok.

V druhej časti mojej dizertačnej práce som sa zameril na teoretický opis GaN-u, základného princípu činnosti tranzistora s vysokou elektrónovou pohyblivosťou – HEMT a diskusii špecifických efektov, ktoré spôsobujú degradáciu vysoko-frekvenčného výstupného výkonu AlGaIn/GaN HEMT tranzistorov.

Tretia časť je venovaná najmä technologickému procesu vzniku HEMT tranzistora, pasivácii, opisu dielektrických vrstiev, používaných na výrobu MOS-HFET tranzistorov a experimentálnej časti, v ktorej sú uvedené základné metódy merania a vyhodnocovania základných elektrických vlastností AlGaIn/GaN HFET a MOS-HFET tranzistorov získaných z I-V, C-V, TLM a Impulzných meraní.

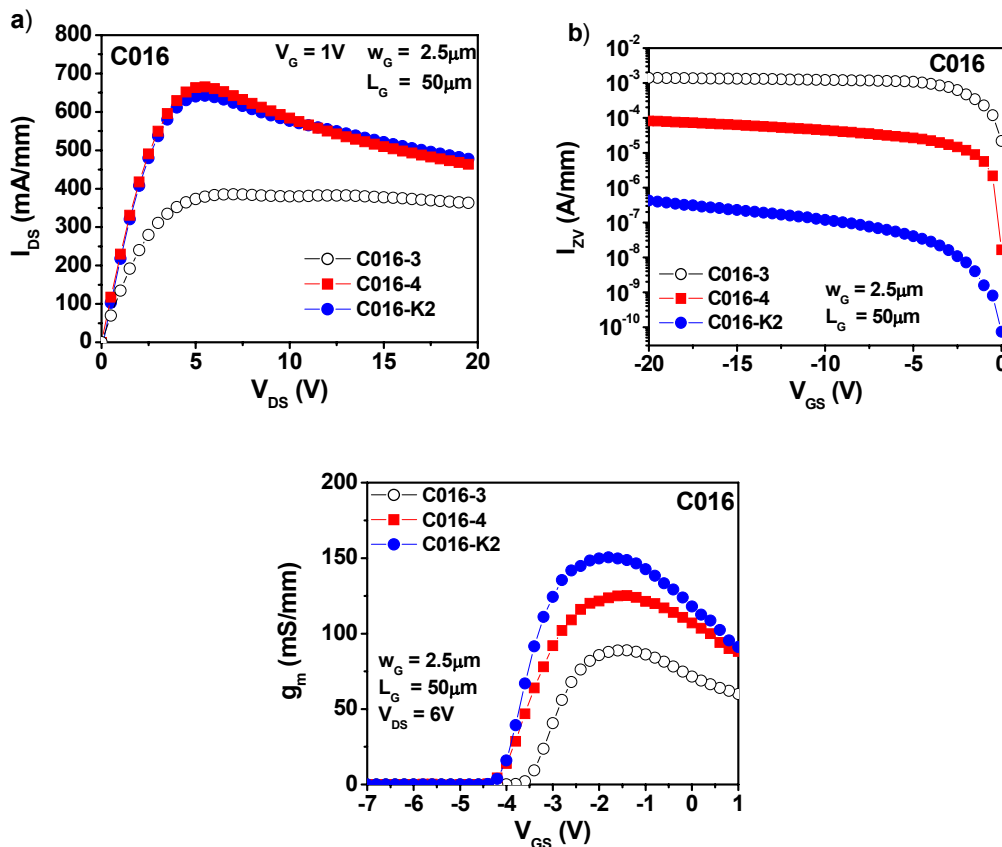
ZHRNUTIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

Namerané výsledky, ktoré sú zosumarizované v tejto práci, boli získané na AlGaIn/GaN heteroštruktúre rastenej na zafirovom substráte – Al₂O₃. Meranie som uskutočnil na vzorkách s označením D980 a C016. Ako ohmické kontakty bola použitá multivrstva Ti/Al/Ni/Au žihaná pri teplote 850°C po dobu 30s v N₂ ochrannej atmosfére. Ako Schottky-ho kontakt bola použitá dvojvrstva Ni/Au. Ako dielektrická vrstva deponovaná

pred hradlovou metalizáciou bola použitá Al_2O_3 . Na deponovanie Al_2O_3 dielektrickej vrstvy s rôznou hrúbkou boli použité techniky – MOCVD a technika naprášenia Al vrstvy s následnou oxidáciou. Podrobnejšie informácie ohľadne daných štruktúr je uvedené v dizertačnej práci v časti „7. Experiment“ (str. 75 a 76). Na pripravených vzorkách sme uskutočnili Hall-ovské, TLM merania a sériu I-V a C-V meraní.

V prípade MOS-HFET tranzistorov som v tomto zhrnutí zameral len na porovnanie AlGaIn/GaN HFET a MOS-HFET tranzistorov s označením C016.

Obr. 4 znázorňuje porovnanie výstupných, vstupných charakteristík a strmostí HFET (C016-3) a MOS-HFET (C016-4 a C016-K2) tranzistorov dĺžkou hradla $L_G = 2.5\mu\text{m}$ a šírkou hradla $w_G = 50\mu\text{m}$. Väčšie hodnoty výstupného prúdu I_{DS} a strmosti g_m MOS-HFET tranzistorov v porovnaní s HFET tranzistorom súvisia so vzrastom plošnej hustoty náboja n_s , pohyblivosti elektrónov μ_{2DEG} v 2DEG-u a s poklesom parazitného sériového odporu R_{Se} v kanáli [16], ako aj s použitím polovodivej dielektrickej vrstvy namiesto vysoko-izolačnej dielektrickej vrstvy [17]. V prípade MOS-HFET tranzistora s označením C016-K2, kde Al_2O_3 dielektrická vrstva bola pripravovaná naprášením hliníka Al s následnou oxidáciou Al vrstvy, je hodnota prúdovej hustoty I_{DS} , ako aj hodnota strmosti g_m vyššia v porovnaní s MOS-HFET tranzistorom s označením C016-4, kde Al_2O_3 dielektrická vrstva bola pripravovaná metódou MOCVD.

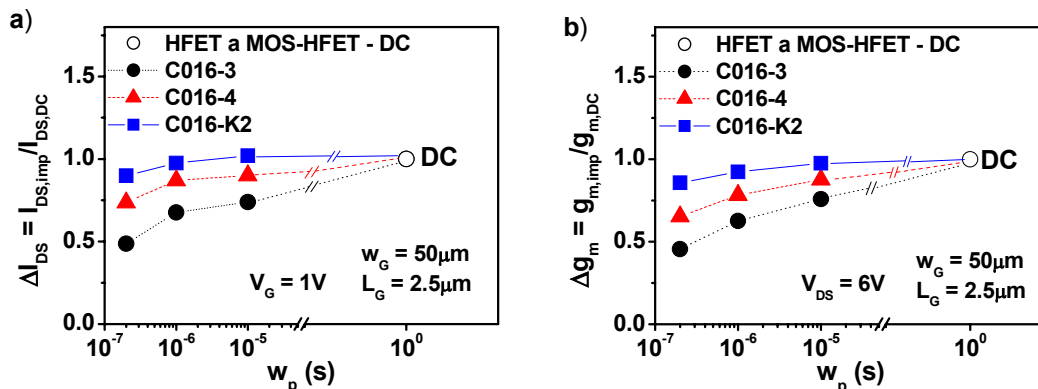


Obr. 4 Porovnanie výstupných a) a vstupných b) charakteristík a strmostí c) HFET a MOS-HFET tranzistorov dĺžkou hradla $L_G = 2.5\mu\text{m}$ a šírkou hradla $w_G = 50\mu\text{m}$ [18].

Je to spôsobené najmä najmenšou hodnotou sériového odporu R_{Se} a najväčšou hodnotou plošnej hustoty náboja n_s v 2DEG-u, spomedzi všetkých meraných vzoriek.

Vyššia hodnota prahového napätia V_T MOS-HFET tranzistorov je spôsobená väčšou separáciou kanála tranzistora od hradlového kontaktu v porovnaní s HFET tranzistorom. Nižšie hodnoty zvodového prúdu I_{ZV} MOS-HFET tranzistorov v porovnaní s HFET tranzistorom (obr. 4b) sú spôsobené redukciami hustoty povrchových stavov v blízkosti hradla a pod hradlovou oblasťou a redukciami povrchových stavov medzi oblasťami S a G resp. G a D kontaktov HFET tranzistora. Najnižšia hodnota zvodového prúdu I_{ZV} bola nameraná na MOS-HFET tranzistore s označením C016-K2.

Na obr. 5 sú znázornené a vzájomne porovnané výstupné charakteristiky a strmosti HFET (C016-3) a MOS-HFET (C016-4 a C016-K2) tranzistorov s dĺžkou hradla $L_G = 2.5\mu\text{m}$, ktoré boli získané z I-V DC a impulzných meraní. Impulzné merania boli realizované pri frekvencii $f = 1\text{kHz}$ s rôznou dĺžkou impulzu – $w_p = 10, 1$ a $0.2\mu\text{s}$.



Obr. 5 Porovnanie výstupných charakteristík a strmostí HFET (C016-3) a MOS-HFET (C016-4 a C016-K2) tranzistorov s dĺžkou hradla $L_G = 2.5\mu\text{m}$.

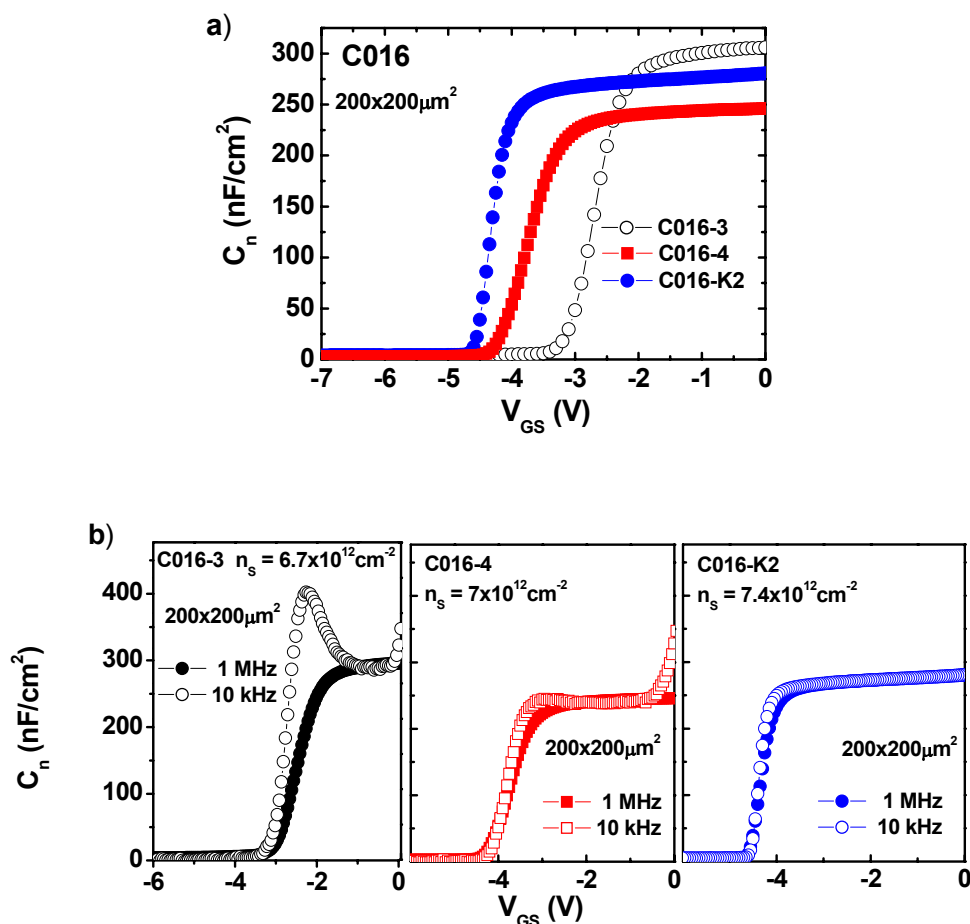
Pri impulznom meraní v porovnaní s DC meraním dochádza k miernemu poklesu hodnoty prúdovej hustoty I_{DS} a strmosti g_m . Avšak daný pokles sa výraznejšie prejavuje u HFET tranzistora (C016-3) v porovnaní s MOS-HFET tranzistormi (C016-4, C016-K2). Je to spôsobené spomínaným prúdovým kolapsom, ktorý spôsobuje tzv. DC/RF disperziu v HFET tranzistoroch na báze GaN. Ako môžeme vidieť na nameraných závislostiach (obr. 5) dochádza vplyvom dielektrickej vrstvy k výraznému zníženiu DC/RF disperzie. Aj v tomto prípade bol vplyv prúdového kolapsu najnižší u MOS-HFET tranzistora s označením C016-K2.

Na obr. 6 sú znázornené C-V charakteristiky, ako aj frekvenčná disperzia fat-HFET a fat-MOS-HFET tranzistorov s hodnotou aktívnej plochy $200 \times 200 \mu\text{m}^2$. Vplyvom dielektrickej vrstvy dochádza u fat-MOS-HFET tranzistorov v porovnaní s fat-HFET tranzistorom:

- k poklesu hodnoty kapacitnej reaktancie C_n a k vzrastu prahového napätia V_T => **väčšia separácia kanála tranzistora od hradlového kontaktu,**
- k vzrastu hodnoty plošnej hustoty náboja n_s a k poklesu frekvenčnej disperzie => **zníženie hustoty povrchových stavov medzi oblasťami S a D, ako aj v blízkosti hradla a pod hradlovou oblasťou HFET tranzistora a redukcia stavov rozhrania.**

Vzrast hodnoty plošnej hustoty náboja n_s a pokles frekvenčnej disperzie MOS-HFET tranzistorov v porovnaní s HFET tranzistorom je spôsobný redukciami hustoty povrchových stavov a záchytných centier v blízkosti hradlovej oblasti resp. pod hradlovou oblasťou, ako aj

medzi областami S a G resp. D a G MOS-HFET tranzistora a redukcíou stavov na rozhraní $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}$ resp. AlGaN/GaN . Schopnosť dielektrickej vrstvy znížiť frekvenčnú disperziu závisí však aj od techniky depozície dielektrickej vrstvy. Najvyššia hodnota plošnej hustoty náboja n_s a najnižšia frekvenčná disperzia bola nameraná na MOS-HFET tranzistore s označením C016-K2 (obr. 6b).



Obr. 6 Porovnanie C-V charakteristík a) a znázornenie frekvenčnej disperzie b) fat-HFET a fat-MOS-HFET tranzistorov s hodnotou aktívnej plochy $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ [19 – 21]

Na základe výsledkov z I-V (DC a Impulzné) a C-V merania môžeme konštatovať, že technika naprášenia s následnou oxidáciou naprášenej vrstvy je vhodnou technikou prípravy dielektrickej vrstvy pre MOS-HFET tranzistory.

ZÁVER

Prúdový kolaps a veľké hodnoty zvodových prúdov sú hlavnými obmedzeniami HEMT tranzistorov na báze GaN v oblasti vysokých frekvencií. Pre zníženie vplyvu prúdového kolapsu sa využíva pasivácia povrchu AlGaIn vrstvy HEMT tranzistora pomocou dielektrických vrstiev, ktoré sa využívajú aj na izolovanie hradla (realizácia MIS štruktúr), čím sa dosiahne výrazné zníženie zvodových prúdov HEMT tranzistorov. Analýzou nameraných závislostí AlGaIn/GaN HFET a MOS-HFET tranzistorov sme dosiahli nasledovné zlepšenie elektrických vlastností:

- výstupný prúd I_{DS} vyšší o 39%,
- strmosť g_m vyššia o 30%,
- zvodový prúd I_{ZV} nižší o viac ako 1-rád (tab. 7.4a),
- zmena plošnej hustoty náboja $\Delta n_S = n_{S,100kHz} - n_{S,1MHz}$ nižšia o 83% (obr. 7.26a),
- zníženie vplyvu prúdového kolapsu na - prúdovú hustotu ΔI_{DS} o 6% a strmosť Δg_m o 2% pri frekvencii $f = 1\text{kHz}$ a šírke impulzu $w_p = 10\mu\text{s}$ (obr. 7.21) \Rightarrow D980,
- výstupný prúd I_{DS} vyšší o 51%,
- strmosť g_m vyššia o 69%, zvodový prúd I_{ZV} nižší o viac ako 4-rády,
- driftová pohyblivosť μ_{2DEG} vyššia o 20%,
- plošná hustota náboja n_S vyššia o 11% (tab. 7.4b)
- zmena plošnej hustoty náboja $\Delta n_S = n_{S,10kHz} - n_{S,1MHz}$ nižšia o 90% (obr. 7.26b),
- zníženie vplyvu prúdového kolapsu na - prúdovú hustotu ΔI_{DS} o 41% a strmosť Δg_m o 38.5% pri frekvencii $f = 1\text{kHz}$ a šírke impulzu $w_p = 200\text{ns}$ (obr. 7.22) \Rightarrow C016.

Je však ešte stále veľa otvorených otázok ohľadne AlGaIn/GaN heteroštruktúr, najmä čo sa týka prúdového kolapsu (DC/RF disperzia), vhodnej povrchovej pasivácie resp. depozície dielektrickej vrstvy medzi hradlo a kanál tranzistora (MOS-HFET), ako aj otázok ohľadne technologickej prípravy AlGaIn/GaN heteroštruktúr. Preto je veľmi dôležité neustále skúmanie GaN polovodičového materiálu, ako aj efektov, ktoré v konečnom dôsledku degradujú vysoko-frekvenčný výstupný výkon HEMT tranzistorov na báze GaN.

Táto práca je riešená v rámci projektu VEGA (2/6099/26) – Vplyv dielektrickej pasivácie na vlastnosti AlGaIn/GaN HEMT-ov, ako aj v spolupráci s oddeleniami ELU SAV – najmä s Oddelením mikroelektronických štruktúr a Oddelením tenkých vrstiev oxidov.

SUMMARY

AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors (HEMTs) based on GaN suffer from the phenomenon of current collapse, i.e. at high-frequencies their drain current becomes lower compared with the static value. Another limitation of AlGaN/GaN HEMTs is the high gate leakage current, which is a major technological limitation of GaN-based devices in general. Trapping effects caused by surface states are supposed to be responsible for both phenomena [13, 22]. Surface passivation with an SiN insulator has been shown to reduce the current collapse and to improve the power performance [23]. A SiN material has also been used as the gate insulator. Such metal–insulator–semiconductor HEMTs (MIS-HEMTs) exhibited a highly suppressed gate leakage current [15]. Various insulators, mainly oxides have currently been studied in detail for use in the passivation layers and gate insulators. They include SiO₂, MgO, Al₂O₃, ZrO, Sc₂O₃, Ga₂O₃, HfO₂, and Gd₂O₃ ([19, 24 – 26] and references therein).

The CC causes the DC/RF dispersion due to an extended depletion region in a GaN layer via the influence of traps on the AlGaN surface. Surface passivation is very useful for the reduction of the current collapse. The reduction of the gate leakage current can be achieved by employing an insulated gate metal–oxide–semiconductor (MOS) technique.

The aims of this work were as follows:

- Characterization of a GaN semiconductor material,
- Analysis of electrical properties of HFETs and MOS-HFETs based on GaN,
- Available alternative and the realization of MOS-HFETs with an appropriate dielectric layer,

I have mainly dealt with the realization of a measurement system for the analysis of DC and pulse electrical properties of AlGaN/GaN HFETs and MOS-HFETs:

- DC output current I_{DS} , transconductance g_m a leakage current I_{ZV}
 - Current-Voltage measurement,
- Capacitance reactance C_n and sheet carrier density n_s
 - Capacitance-Voltage measurement,
- Drift mobility μ_{2DEG} and velocity v_d
 - Current and Capacitance-Voltage measurement,
- Contact R_c , sheet R_{sheet} a specific ρ_c resistance
 - TLM measurement,
- High-frequency current density $I_{DS,imp}$ and transconductance $g_{m,imp}$
 - Pulse measurement.

The thesis is divided into three parts. The first one contains an introduction followed by an analysis of the present status of AlGaN/GaN HEMTs, which are a good candidate for high-frequency, high-temperature and high-power applications. The second part theoretically describes gallium-nitride, the formation of a heterostructure using AlGaN/GaN, the basic principles of high-electron mobility transistors, followed by a discussion of special effects concerning the GaN-based material system. The final part describes the technological process used for the HEMTs fabrication. It also discusses dielectric layers for the surface passivation and gate insulators of HEMTs. The experimental part covers measurement methods, an evaluation and analysis of electrical properties of the AlGaN/GaN HFETs and MOS-HFETs). The work is closed with a conclusion.

The measurement structure definitions were D980 and C016. The layer structure was grown by MOCVD on sapphire substrate. The device fabrication consisted of conventional HFET fabrication steps. At first, mesa-etching isolation using Ar⁺ sputtering was performed. After that ohmic contacts were prepared by evaporating a multilayered Ti/Al/Ni/Au stack followed by a rapid thermal annealing at 850°C for 30s in a N₂ ambient. An ohmic contact resistance of 0.22–0.35Ωmm and a specific contact resistivity of 10⁻⁶Ωcm² were measured using a transmission-line method. The Schottky gate metallization consisted of a double Ni/Au layer. The Schottky contact dimensions are present in the dissertation work (page 60 – Tab.5.2). The same preparation procedure was used to create MOS-HFET devices. The only difference was that the Al₂O₃ gate oxide was deposited on the access surface region between the source and drain before gate metallization. The MOCVD technique and a 600 °C deposition temperature were utilized to prepare the Al₂O₃ gate oxide layers with a thickness of 4, 6, 9 and 14 nm. The next technique for the preparation of 4nm-thick Al₂O₃ layer was Ar⁺ sputtering and followed by the oxidation of an Al layer. The thickness of the Al₂O₃ layers was evaluated by reflectivity measurements. The improvement of the static and pulse electrical properties of the AlGaIn/GaN HFETs was achieved as a consequence of the Al₂O₃ dielectric layer:

- A 39% increase of the output current I_{DS} ,
- A 30% increase of the transconductance g_m ,
- More than one order of magnitude lower gate leakage current I_{ZV} (page 98 – Tab. 7.4a),
- A 83% decrease of the frequency dispersion (page 97 – pic. 7.26a),
- A decrease of the CC influence on – output current 6%, transconductance 2% (frequency $f = 1\text{kHz}$, 1% duty cycle) (page 93 – Tab. 7.3) => **D980**,
- A 51% increase of the output current I_{DS} ,
- A 69% increase of the transconductance g_m ,
- More than four orders of magnitude lower gate leakage current I_{ZV} ,
- A 20% increase of the drift mobility μ_{2DEG} ,
- A 11% increase of the sheet carrier density n_S (page 98 – Tab. 7.4b),
- A 90% decrease of the frequency dispersion (page 97 – pic. 7.26b),
- A decrease of the CC influence on – output current 41%, transconductance 38.5% (frequency $f = 1\text{kHz}$, 0.02% duty cycle) (page 93 – Tab. 7.3) => **C016**.

The thermal annealing led to about two orders of magnitude lower the gate leakage currents of the HFETs and the MOS-HFET (page 100 – pic. 7.27b, page 101 – pic 7.28b). It was caused by an efficient reduction of bulk traps and trapping centres over the channel of the AlGaIn/GaN heterostructure. An increase of the sheet carrier density n_S (MOS-HFET D980-9 – page 103, pic. 7.29) was caused by a change in the fixed charge Q_{fix} and in the properties of the MOS-HFET.

However, unanswered questions concerning AlGaIn/GaN heterostructures have remained. Often discussed is the current collapse (CC) and the DC/RF dispersion [27, 28], an appropriate surface passivation and gate insulation [29 – 31] and the source of electrons in 2DEG [14]. It is therefore very important to go on studying GaN intensively. I hope that the thesis has helped to clarify some of the issues.

This work has been supported by the Slovak Scientific Grant Agency VEGA (contract No. 2/6099/26) and with co-operation of the IEE SAS department (Department of Microelectronic Structures and Thin Oxide Films).

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] S.Karmalkar, M.S.Shur, R.Gaska, „*GaN-based power high-electron mobility transistors*“, Fan Ren & John C. Zolper, Wide Bandgap Electronic Devices, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2003)
- [2] J.Bernát, „*Fabrication and characterization of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors for power applications*“, dizertačná práca, FZ Jülich (2005)
- [3] R.Stoklas, „*Meranie a hodnotenie vybraných vlastností Schottky-ho štruktúr na GaN*“, diplomová práca, FEI STU Bratislava (2005)
- [4] J.Y.Duboz, „*GaN as seen by the industry*“, Phys.Stat.Solidi (a) **176**, 5 (1999)
- [5] A.Khan, M.J.N.Kuzina, D.T.Olson, W.J.Schaff, J.W.Burm, M.S.Shur, „*Microwave performance of a 0.25 μ m gate AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor*“, Appl.Phys.Lett. **65**, 1121 (1994)
- [6] J.Stejskal, L.Leitner, „*Nitridy hliníka, gallia a india jako perspektivní materialy v elektronice, stav anorganické chemie a stav inženýrství pevných látek*“, Chem. Listy **96**, 311 Praha (2002)
- [7] P.Kordoš, „*Material and device issues of AlGaIn/GaN HEMTs*“, in: Handbook of Semiconductor Nanostructures and Devices, Eds.: A.A. Balandin and K.L. Wang, American Scientific Publisher (ISBN:158883-073-X) Vol. **5**, Chapter 28, 58 pages (2006)
- [8] A.Khan, M.J.N.Kuzina, D.T.Olson, W.J.Schaff, J.W.Burm, M.S.Shur, „*Microwave performance of a 0.25 μ m gate AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor*“, Appl.Phys.Lett. **65**, 1121 (1994)
- [9] V.Kumar, G.Chen, S.Guo, I.Adesida, „*Field-plated 0.25- μ m gate-length AlGaIn/GaN HEMTs with varying field-plate length*“, IEEE Transactions on Electron Devices **53**, 1477 (2006)
- [10] V.Kumar, A.Kuliev, R.Schwindt, M.Muir, G.Simin, J.Yang, M.A.Khan, I. Adesida, „*High performance 0.25 μ m gate-length AlGaIn/GaN HEMTs on sapphire with power density of over 4.5 W/mm at 20 GHz*“, Solid-State Electron. **47**, 1577 (2003)
- [11] F.Schwierz, O.Ambacher, „*Recent advanced in GaN HEMT development*“, Technische Universität Ilmenau, Institut für Feskorperelektronik, PF 100565, 986 84 Ilmenau, Germany (2003)
- [12] T.Sawada, Y.Ito, K.Imai, K.Suzuki, H.Tomozawa, S.Sakai, „*Electrical properties of metal/GaN and SiO₂/GaN interfaces and effects of thermal annealing*“, Applied Surface Science **159–160**, 449 (2000)
- [13] R.Vetury, N.Zhang, S.Keller, U.Mishra, „*The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HFETs*“, IEEE Transactions on Electron Devices **48**, 560 (2001)
- [14] M.A.Khan, G.Simin, J.Yang, J.Zhang, A.Koudymov, M.S.Shur, R.Gaska, X.Hu, A.Tarakji, „*Insulating gate III-N heterostructure field-effect transistors for high-power microwave and switching applications*“, IEEE Trans.Microwave Theory Tech. **51**, 624 (2003)

- [15] M.A.Khan, M.S.Shur, G.Simin, „*Strain-engineered novel III-N electronic devices with high quality dielectric/semiconductor interfaces*“, Phys.Stat.Solidi (a) **200**, 155 (2003)
- [16] D.Gregušová, R.Stoklas, K.Čičo, T.Lalinský, P. Kordoš, „*AlGa_N/Ga_N metal–oxide–semiconductor heterostructure field-effect transistors with 4 nm thick Al₂O₃ gate oxide*“, Semicond.Sci.Technol. **22** (2007) 947–951
- [17] D.Kikuta, J.P.Ao, Y.Ohno, „*Gate leakage and electrical performance of AlGa_N/Ga_N MIS-type HFET with evaporated silicon oxide layer*“, Solid State Electron. **50**, 316 (2006).
- [18] A.Koudymov, V.Adivarahan, J.Yang, G.Simin, M.A.Khan, „*Mechanism of current collapse removal in field-plated nitride HFETs*“, IEEE Electron Device Lett. **26**, 704 (2005).
- [19] B.P.Gila, G.T.Thaler, A.H.Onstine, M.Hlad, A.Gerger, A.Herrero, K.K.Allums, D.Stodilka, S.Jang, B.Kang, T.Anderson, C.R.Abernathy, F.Ren, S.J.Pearnton, „*Novel dielectrics for gate oxides and surface passivation on Ga_N*“, Solid State Electron. **50**, 1016 (2006)
- [20] R.Stoklas, Š.Gaži, D.Gregušová, J.Novák, P.Kordoš, „*Enhancement of effective carrier velocity in AlGa_N/Ga_N MOSHFETs with Al₂O₃ gate oxide*“, Phys. Stat. Solidi (c) (2008), accepted 26.12.2007
- [21] P.Kordoš, D.Gregušová, R.Stoklas, Š.Gaži, J.Novák, „*Transport properties of AlGa_N/Ga_N metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with Al₂O₃ of different thickness*“, Solid State Electron., accepted 31.1.2008
- [22] S.C.Binari, P.B.Klein, T.E.Kazior, „*Trapping effects in Ga_N and SiC microwave FETs*“, Proc. IEEE **90**, 1048 (2002)
- [23] B.M.Green, K.K.Chu, E.M.Chumbes, J.A.Smart, J.R.Shealy, L.F.Eastman, „*The effect of surface passivation on the microwave characteristics of undoped AlGa_N/Ga_N HEMTs*“, IEEE Electron Device Lett. **21**, 268 (2000)
- [24] C.J.Kao, M.C.Chen, C.J.Tun, G.C.Chi, J.K.Sheu, W.C.Lai, M.L.Lee, F.Ren, S.J.Pearnton, „*Comparison of low-temperature Ga_N, SiO₂, and SiN_x as gate insulators on AlGa_N/Ga_N heterostructure field-effect transistors*“, J. Appl.Phys. **98**, 064506 (2005)
- [25] P.Kordoš, G.Heidelberger, J.Bernát, A.Fox, M.Marso, H.Lüth, „*High-power SiO₂/AlGa_N/Ga_N metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors*“, Appl.Phys. Lett. **87** 143501, (2005)
- [26] Ch.Liu, E.F.Chor, L.S.Tan, „*Investigations of HfO₂/AlGa_N/Ga_N metal-oxide-semiconductor high electron mobility transistors*“, Appl. Phys. Lett. **88** 173504, (2006)
- [27] J.A.Mittereder, S.C.Binari, P.B.Klein, J.A.Roussos, D.S.Katzer, D.F.Storm, D.D.Koleske, A.E.Wickenden, R.L.Henry, „*Current collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs by bias stress*“, Appl.Phys.Lett. **83**, 1650 (2003)
- [28] W.Lanford, V.Kumar, R.Schwindt, A.Kuliev, I.Adesida, M.Dabiran, A.M.Wowchack, P.P.Chow, J.W.Lee, „*AlGa_N/Ga_N HEMTs for RF current collapse suppression*“, Electron.Lett. **40**, 771 (2004)
- [29] B.Luo, R.Mehandru, J.Kim, F.Ren, B.P.Gila, A.H.Onstine, C.R.Abernathy, S.J.Pearnton, R.Fitch, J.Gillespie, T.Jenkins, J.Sewell, D.Via, A.Crespo, Y.Irokawa, „*Comparison of surface passivation films for reduction of current collapse in AlGa_N/Ga_N high-electron mobility transistor*“, J.Electrochem.Soc. **149**, G613 (2002)
- [30] B.Luo, J.W.Johnson, B.P.Gila, A.H.Onstine, C.R.Abernathy, F.Ren, S.J.Pearnton, A.G.Baca, A.M.Dabiran, A.M.Wowchack, P.P.Chow, „*Surface passivation of AlGa_N/Ga_N HEMTs using MBE-grown MgO or Sc₂O₃*“, Solid-State Electron. **46**, 467 (2002)
- [31] I.Harrison, N.W.Clayton, N.J.Jeffs, „*High temperature PF characterisation of SiN passivated and unpassivated AlGa_N/Ga_N HFETs*“, Phys.Status Solidi (a) **188**, 275 (2001)

ZOZNAM PUBLIKOVANÝCH PRÁC

Publikované práce

- [1] P.Kordoš, D.Gregušová, **R.Stoklas**, Š.Gaži, J.Novák, „*Transport properties of AlGaN/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with Al₂O₃ of different thickness*“, Solid State Electron., accepted 31.1.2008
- [2] **R.Stoklas**, Š.Gaži, D.Gregušová, J.Novák, P.Kordoš, „*Enhancement of effective carrier velocity in AlGaN/GaN MOSHFETs with Al₂O₃ gate oxide*“, Phys. Stat. Solidi (c) (2008), accepted 26.12.2007
- [3] D.Gregušová, **R.Stoklas**, K.Čičo, T.Lalinský, P.Kordoš, „*AlGaN/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with 4nm thick Al₂O₃ gate oxide*“, Semicond. Sci Technol. 22 (2007) 947-951.
- [4] D.Gregušová, **R.Stoklas**, K.Čičo, G.Heidelberg, M.Marso, J.Novák, P.Kordoš, „*Characterization of AlGaN/GaN MOSHFETs with Al₂O₃ as gate oxide*“, Physica Status Solidi c 4 (2007) 2720-2723.
- [5] K.Čičo, J.Kuzmík, D.Gregušová, **R.Stoklas**, T.Lalinský, A.Georgakilas, D.Pogany, K.Fröhlich, „*Optimization and performance of Al₂O₃/GaN metal-oxide-semiconductor structures*“, Microelectr. Reliability 47 (2007) 790-793.
- [6] P.Kordoš, D.Gregušová, **R.Stoklas**, K.Čičo, J.Novák, „*Improved transport properties of Al₂O₃/AlGaN/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistor*“, Applied Phys. Lett. 90 (2007) art. no. 123513.
- [7] P.Kordoš, D.Gregušová, **R.Stoklas**, T.Lalinský, J.Novák, „*Transconductance enhancement in AlGaN/GaN MOSHEFTs with Al₂O₃ gate oxide*“, In: Proc. 31st Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. Ed. G. Meneghesso. Venice 2007. P. 381-384.
- [8] D.Gregušová, **R.Stoklas**, K.Čičo, T.Lalinský, K.Fröhlich, J.Novák, P.Kordoš, „*Preparation and properties of MOSHFETs based on MOVPE grown AlGaN/GaN heterostructure and MOCVD deposited Al₂O₃ gate oxide*“, In: 12th European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy – EW-MOVPE XII: extended abstracts. Bratislava: IEE SAS, 2007. P. 85-88.
- [9] **R.Stoklas**, K.Čičo, D.Gregušová, J.Novák, P.Kordoš, „*Preparation and properties of AlGaN/GaN MOSHFETs with MOCVD Al₂O₃ as gate oxide*“, In: ASDAM 2006. Proc. 6th Int. Conf. on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Eds. J. Breza et al. Piscataway: IEEE 2006. ISBN: 1-4244-0396-0. P. 249-252.

Príspevky prezentované na konferenciách

- [1] **R.Stoklas**, „*Príprava a vlastnosti štruktúr typu MIS-HFET na báze GaN*“, CENG seminár, September 2007, Smolenice.
- [2] **R.Stoklas**, D.Gregušová, J.Novák, P.Kordoš, „*Suppression of traps in AlGaN/GaN heterostructures due to annealing*, XXXVI International School on the Physics of Semiconducting Compounds, June 2007, Jaszowiec, Poland.
- [3] **R.Stoklas**, „*Zlepšenie elektrických vlastností HFET tranzistorov na báze GaN použitím "high-k;" Al₂O₃ hradlového oxidu*, CENG seminár, September 2006, Smolenice.
- [4] **R. Stoklas**, P. Kordoš, D. Gregušová, J. Novák, „*Impact of passivation on electrical properties of GaN-based Schottky diodes*, XXXV International School on the Physics of Semiconducting Compounds, June 2006, Jaszowiec, Poland.
- [5] K.Čičo, J.Kuzmík, D.Gregušová, **R.Stoklas**, T.Lalinský, A.Georgakilas, D.Pogany, K.Fröhlich, „*Optimalization and performance of Al₂O₃/GaN metal-oxide-semiconductor*

structures, 14th Workshop on Dielectrics in Microelectronics WODIM 2006, June 2006, Catania, Italy.

[6] P. Kordoš, **R. Stoklas**, P. Kúdela, D. Gregušová, and D. Donoval, *Transport properties of GaN-based heterostructures*, 12th Intern. Workshop on Applied physics of condensed matter APCOM 2006, Jún 2006, Malá Lúčivná.

[7] **R. Stoklas**, D. Gregušová, *Electrical characterization on AlGaIn/GaN heterostructure using the fat-HFET*, EliTech 2006, Máj 2006, FEI STU Bratislava.