

Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Ing. Gabriel Vanko

Autoreferát dizertačnej práce

AlGaIn/GaN HEMT pre senzorické aplikácie

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

vo vednom odbore doktorandského štúdia: 5.2.13 Elektronika
v študijnom programe : Mikroelektronika

Bratislava, 2010

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Elektrotechnickom ústave Slovenskej akadémie vied v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Gabriel Vanko
Oddelenie mikroelektronických štruktúr
Elektrotechnický ústav
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Školiteľ: Ing. Tibor Lalinský, DrSc.
Oddelenie mikroelektronických štruktúr
Elektrotechnický ústav
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Oponenti: Prof. Ing. Jaroslav Kováč, PhD.
FEI STU, Bratislava

Prof. RNDr. Andrej Plecenik, DrSc.
FMFI UK, Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

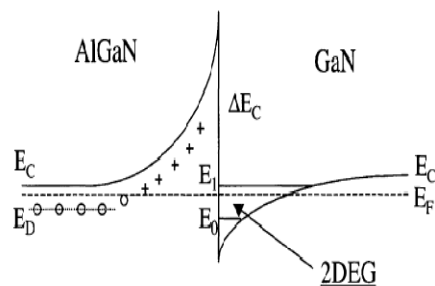
Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa ..24. 2. 2010. o .10,00 hod. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia 5.2.13 Elektronika, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie na Elektrotechnickom ústave SAV, Dúbravská cesta 9, v zasadačke ústavu.

Predseda spoločnej odborovej komisie:

.....
Prof. Ing. Daniel DONOVAL, DrSc.
Katedra mikroelektroniky, FEI STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Úvod

Tranzistory s vysokou pohyblivosťou elektrónov (ďalej len HEMT-y) na báze materiálového systému AlGaIn/GaN sú vhodnými kandidátmi pre mikrovlnné aplikácie so širokým rozsahom využitia či v satelitných spojeniach alebo v bezdrôtovej komunikácii. Veľký potenciál vykazujú však aj pre aplikácie, kde sú vysoké požiadavky na mechanickú, chemickú a tepelnú odolnosť. Využívajú prítomnosť 2-rozmerného elektrónového plynu (2-Dimensional Electron Gas - 2DEG) lokalizovaného na heterorozhraní AlGaIn/GaN. 2DEG možno definovať ako tenkú vrstvu nosičov náboja fixovaných v smere osi z s možnosťou pohybu len v smere osí x a y . Táto nábojová vrstva vytvára oblasť s vysokou pohyblivosťou a koncentráciou nosičov. Na obr.1 je znázornené vodivostné pásmo AlGaIn/GaN



heteroštruktúry s miestom formovania 2-DEG na rozhraní AlGaIn/GaN. Akumulácia nosičov náboja v trojuholníkovej kvantovej jame heteroštruktúry AlGaIn/GaN je spôsobená spontánnou P_{sp} a piezoelektrickou P_{pz} polarizáciou v napätej AlGaIn vrstve a spontánnou polarizáciou v GaN vrstve.

Obr.1 Vodivostné pásmo AlGaIn/GaN heteroštruktúry so znázornením 2-DEG v trojuholníkovej kvantovej jame [1]

Piezoelektrická polarizácia, prítomná len v AlGaIn vrstve, pochádza z pružného namáhania v neprispôbenej mriežke. Ak je hustota náboja indukovaná celkovou polarizáciou kladná, voľné elektróny sa budú snažiť kompenzovať indukovaný náboj, čo vedie k formovaniu 2-rozmerného elektrónového plynu.

Napriek nesporným výhodám elektronických súčiastok typu HEMT na báze heteroštruktúry AlGaIn/GaN, z pohľadu mechanizmu formovania 2DEG, sa pri ich aplikáciách začínali objavovať parazitné efekty v transporte elektrónov, ktoré si vyžadovali hlbšie štúdium a zvýšené úsilie technológov na ich potlačenie. Jedným takýmto parazitným efektom je prúdový kolaps, ktorý sa pozoruje v dynamických podmienkach činnosti prvku a bráni v dosiahnutí teoreticky predpokladaných hodnôt v výkonu [2]. Tieto pozorovania viedli k záverom, že v štruktúre musia existovať pasce spôsobujúce redukcii výstupného prúdu v závislosti od frekvencie vstupného signálu (koncept virtuálneho hradla [3]).

Za účelom potlačenia a eliminácie parazitného efektu prúdového kolapsu bolo realizovaných viacero experimentov s vyššou ako aj nižšou technologickou náročnosťou. Najznámejšie

z týchto prístupov sú: optimalizovaná povrchová pasivácia [4-8], využitie GaN-krycej vrstvy [9], dodatočné potenciálové elektródy v oblasti L_{GD} [10,11], alebo najnovšie modulácia elektrického poľa a hustoty 2DEG plytkou implantáciou iónov F^- v plazme plynu CF_4 [12,13]. Táto práca má snahu predstaviť a priblížiť AlGaIn/GaN HEMT z pohľadu aktuálnych problémov návrhu, procesnej technológie a charakterizácie s dôrazom na pôvodné návrhy a nekonvenčné prístupy. Počiatočnou snahou teda je vypracovať procesnú technológiu AlGaIn/GaN HEMT s pôvodným definovaním procesných krokov a vypracovať metodológiu hodnotenia jeho vlastností v podmienkach riešiteľského pracoviska. Cieľom je navrhnúť taký konštrukčný typ tranzistora, aby bolo možné optimálnou voľbou parametrov technológie jeho vlastnosti veľmi dobre kontrolovať a vhodne modifikovať z pohľadu predpokladaného dominantného využitia v sensorovej technike, či už vo funkcii snímacieho prvku (senzor tlaku a mechanického napätia), tepelného mikrožiaríča (chemické senzory a senzory plynov), prípadne aktívneho stavebného prvku pre riadiacu a kontrolnú elektroniku senzorov. Snahou teda nie je predstaviť AlGaIn/GaN HEMT pre konvenčne skúmané vysokovýkonové aplikácie. Načrtnuté konkrétne príklady využitia navrhnutého konštrukčného typu AlGaIn/GaN HEMT, sú pre nás motiváciou a zdrojom inšpirácie. Udávajú nám ďalšie smerovanie v oblasti štúdia technológie, charakterizácie ako aj hľadania nových spôsobov využitia v mikroelektronike a sensorovej technike.

Predložená dizertačná práca bola vypracovaná v Centre Excelencie – CENAMOST (Agentúra na podporu výskumu a vývoja) VVCE-0049-07 v rámci riešeného projektu APVV-0655-07 s účinnou podporou tiež projektu FP7 – MORGaIn.

Ciele dizertačnej práce

Na základe získaného aktuálneho prehľadu poznatkov v technológii a charakterizácii AlGaIn/GaN HEMT a aktuálnych potrieb výskumu novej generácie senzorov a sensorických systémov boli sformulované nasledovné ciele dizertačnej práce:

- Vypracovať procesnú technológiu AlGaIn/GaN HEMT s pôvodným definovaním procesných krokov v podmienkach riešiteľského pracoviska
- Vypracovať metodológiu jednosmernej a vysokofrekvenčnej charakterizácie AlGaIn/GaN HEMT
- Špecifické vlastnosti AlGaIn/GaN HEMT (vysokoteplotná, chemická a mechanická stabilita, piezoelektricitá...) využiť v konštrukčnom návrhu vybraných MEMS sensorických štruktúr

Procesná technológia AlGaN/GaN HEMT

Epitaxná heteroštruktúra bola rastená metódou MO CVD na východiskovom substráte Al_2O_3 (zafir). Bola zakúpená od firmy CREE, Inc. (USA). Pozostávala z prvej tenkej nukleačnej

“MESA“-izolácia

- RIE v plyne CCl_4

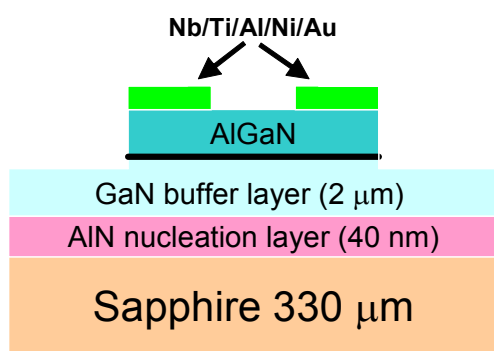


Obr.2 MESA – izolačné leptanie

vrstvy AlN (40 nm), základnej nedotovanej oddeľujúcej (buffer) vrstvy GaN (2 000 nm) a vrchnej tenkej nedotovanej bariérovej vrstvy $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ (28 nm). Zloženie bariérovej AlGaN vrstvy (obsah Al, $x = 0.25$) určuje plošnú hustotu náboja v kanáli (n_s) ako aj pohyblivosť (μ).

Navrhli sme technologickú modifikáciu tranzistora HEMT na báze “MESA“ – izolačného leptania. Tento technologický krok v príprave tranzistorov je schematicky znázornený na obr.2. “MESA“ – izolačné leptanie aktívnych oblastí tranzistora bolo realizované metódou selektívneho reaktívneho iónového leptania (SRIE) v plazme plynu CCl_4 (pri pracovnom tlaku 0.8 Pa, výkone 100 W, prietoku He 4 sccm, pracovnom predpätí $U_{sb} = -160\text{V}$, po dobu 1 min 30 sec), využitím fotorezistu vo funkcii dodatočne tvarovanej leptacej masky. “MESA“ - izolačné leptanie prebiehalo do kontrolovateľnej hĺbky približne 100 nm.

Formovanie ohmických kontaktov (obr. 3) je hlavným problémom pri dosahovaní požadovaných elektrických vlastností AlGaN/GaN HEMT štruktúr. Z tohto dôvodu je dôležité nájsť vhodný metalizačný systém a optimalizovať parametre rozhrania využitím



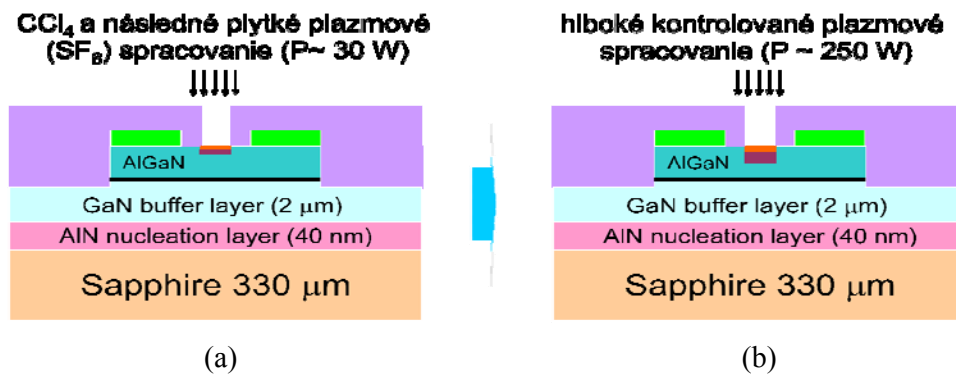
Obr.3 Formovanie ohmických kontaktov

dodatočného tepelného spracovania. Pre formovanie ohmických kontaktov sme navrhli nový modifikovaný metalizačný systém na báze Nb/Ti/Al/Ni/Au [14]. Optimálne podmienky formovania (optimálne zloženie a podmienky žihania) a charakterizácia kontaktov sú podrobne uvedené v kap. 5.1.

Na depozíciu metalizačného systému Nb/Ti/Al/Ni/Au optimálneho zloženia bola využitá technika naparovania pomocou elektrónového zväzku (Nb, Ti, Ni, Al) a konvenčný odporový ohrev (Au). Teplota držiaka sa počas naparovania udržiavala na úrovni izbovej teploty. Tlak v depozičnej vákuovej komore s kryočerpacím systémom bol nižší než 10^{-5} Pa. Povrch

bariérovej vrstvy AlGaN pred depozíciou bol krátkodobo ($t = 40$ s) vystavený pôsobeniu plazmy O_2 . Po tvarovaní metalizačného systému zdvihovou technikou “lift-off“ prebiehal proces zlievania v optimálnych podmienkach rýchleho izotermálneho žihania (RTA, $T=850$ °C po dobu 35 s) v prietoku čistého dusíka.

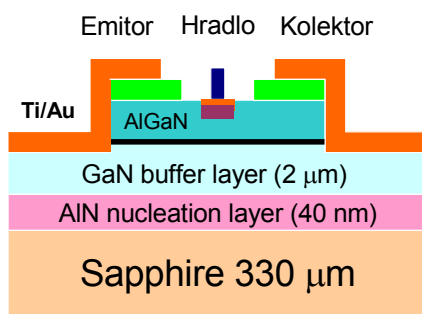
Následným procesným krokom v technológii AlGaN/GaN HEMT bol kontrolovaný úber a pasivácia povrchovej bariérovej AlGaN vrstvy pred depozíciou hradlového kontaktu (recess-gate etching). Uvedený procesný krok je veľmi kritický, nakoľko rozhoduje o konečných transportných vlastnostiach tranzistorov. Navrhli sme pôvodnú metódu kontrolovaného úberu a pasivácie hradlovej bariérovej vrstvy AlGaN.



Obr.4 Procesný postup v hradlovom “recesovom“ leptaní a pasivácii.

Navrhnutý procesný postup je schematicky znázornený na obr. 4. Pozostáva z jemného úberu bariérovej vrstvy AlGaN (~ 2-3 nm) v plazme CCl_4 a plytkej povrchovej pasivácie v plazme SF_6 (obr. 4a). Následne (in situ) opäť prebieha kontrolované spracovanie povrchu v plazme SF_6 , avšak spravidla pri väčšom plazmovom výkone za účelom nastavenia požadovaného prahového napätia tranzistora a potlačenia vplyvu povrchových záchytných centier (pascí) (obr. 4b). Dopad navrhutej metódy bol priamo hodnotený analýzou jednosmerných ako aj mikrovlnných parametrov tranzistorov (viď kap. 5.3, 5.4, 5.5).

Redukcia zvodového prúdu Schottkyho hradlového kontaktu je hlavnou výzvou pri



dosahovaní budúcich zdokonalení AlGaN/GaN HEMT [15]. V našich experimentoch, v procese prípravy Schottkyho hradlových kontaktov, sme overovali metalizačné systémy na báze Ni/Au ako aj Ni/Pt/Au. Formovanie Schottkyho hradlovej elektródy je schematicky znázornené na obr.5.

Obr.5 Formovanie Schottkyho hradla

Metalizačné systémy, analogicky ako v prípade ohmických kontaktov, boli deponované vo vákuovej komore s kryogénnym čerpacím systémom využitím elektrónového naparovania (Ni, Pt) resp. odporového ohrevu (Au). V tvarovaní bola využitá zdvihová technika lift-off. Hradlá tranzistorov boli navrhnuté s rozlíšením 1.5 – 2 μm (expozícia konvenčnou optickou litografiou) a 0.5 – 1 μm (expozícia elektrónovou litografiou). Získané výsledky v charakterizácii Schottkyho hradlových kontaktov sú zosumarizované v kapitole 5.2.

Charakterizácia AlGaN/GaN HEMT

Jednosmerná elektrická charakterizácia

V štúdiu vplyvu plazmového spracovania (plazma plynu SF_6) sme vychádzali z predpokladu, že ióny F^- zabudované do vrstvy AlGaN v blízkom okolí hradla na strane kolektora sú zdrojom negatívneho pevného náboja, ktorý je schopný ovplyvniť elektrické pole na povrchu a taktiež hustotu 2DEG. Po druhé, zabudované ióny F^- dokážu efektívne rozšíriť energetické pásmo na povrchu vzorky, čím potláčajú proces zachytávania a uvoľňovania na povrchových pasciach. Defekty vzniknuté na rozhraní po ožarovaní v plazme a zabudovaní iónov F^- možno regenerovať pomocou rýchleho izotermálneho žihania RTA, čo zároveň vedie aj k zníženiu hradlového zvodového prúdu [13].

Efekt plazmového spracovania v plazme plynu SF_6 sme vyšetrovali na AlGaN/GaN HEMT štruktúrach pripravených využitím konvenčnej optickej litografie s rozlíšením v dĺžke hradiel približne 2 μm (kap. 4.2.6). Analyzované vzorky sme spracovávali v plazme plynu SF_6 s výkonom 150 W po dobu 3 min, najskôr pod hradlom, potom aj v oblasti hradlo-kolektor. Dôležitým poznatkom je, že pri postupnom zabudovávaní iónov F^- do heteroštruktúry AlGaN/GaN prechádza tranzistor z ochudobňovacieho režimu do režimu obohacovacieho, čo znamená posun prahového napätia smerom ku kladným hodnotám, ktorý je na úrovni približne 2.2 V.

Vzorky sme ďalej podrobili dodatočnému tepelnému spracovaniu v atmosfére dusíka pri rôznych teplotách a analyzovali sme jeho vplyv na charakteristiky štruktúry HEMT. Zmena prahového napätia referenčného tranzistora vplyvom žihania je nepatrná (asi o 0,2 V). Situácia je iná v prípade plazmou spracovaného tranzistora. Prahové napätie má tendenciu dosiahnuť pôvodnú hodnotu prahového napätia referenčného tranzistora bez tepelného spracovania ($V_{\text{th}} \sim -4.25$ V). Posuv prahového napätia smerom do záporných hodnôt poukazuje pravdepodobne na znížený tieniaci účinok iónov fluóru (F^-). Zásadným rozdielom v priebehoch strmostí je, že v prípade plazmou spracovaného tranzistora sa vplyvom žihania

znižuje hodnota maxima strmosti (o približne 13% po žíhaní pri teplote 500°C v porovnaní so stavom bez žíhania) a súčasne dochádza k jeho posunu smerom do záporných hodnôt hradlového predpätia. Naopak, v prípade referenčného tranzistora sa hodnota maxima strmosti pohybuje na približne rovnakej úrovni (medzi 120-125 mS/mm) a zostáva pri tom lokalizované pri rovnakej hodnote hradlového predpätia.

Analýza vplyvu plazmy SF₆ na parametre HEMT-ov spočívala taktiež i v meraní CV-závislostí Schottkyho hradlových elektród, pomocou ktorých sme schopní určiť plošnú koncentráciu elektrónov n_s v kanáli tranzistora, a to integrovaním CV – krivky od hodnoty prahového napätia po V_G = 0V. Ukazuje sa, že plazmové spracovanie hradlovej oblasti pred depozíciou Schottkyho kontaktu pri plazmovom výkone 250 W a dobe pôsobenia 120s spôsobuje výrazný posuv CV-krivky, čo sa odzrkadlí v poklese plošnej koncentrácie elektrónov n_s (2DEG) v kanáli tranzistora takmer o 50%. Domnievame sa preto, že pôsobením plazmy SF₆ dochádza k efektívnemu vyprázdneniu kanála v oblasti pod Schottkyho kontaktom, čo je samozrejme sprevádzané tiež zmenou prahového napätia V_{th} [16]. Je to v súlade s I-V analýzou tranzistorov v kap. 5.3.2.

Tab.1 Súhrn nameraných a vypočítaných parametrov referenčného a plazmou spracovaného tranzistora po žíhaní pri rôznych teplotách.

	Bez RTA		RTA (400°C, 35 s)		RTA (500°C, 35 s)	
	Referenčný	SF ₆	Referenčný	SF ₆	Referenčný	SF ₆
μ [cm ² /Vs]	750	550	740-780	520-540	630-650	520-540
V _{th} [V]	- 4,25	- 2,34	- 4,07	- 2,85	- 4,11	- 4,13
g_m [mS/mm]	125	133	125	122	118	116
n _s [cm ⁻²]	9,02x10 ¹²	4,97x10 ¹²	9,58x10 ¹²	6,03x10 ¹²	9,52x10 ¹²	8,80x10 ¹²

V snahe zhodnotiť priamy dopad plazmového spracovania na transportné vlastnosti tranzistorov (mechanizmy rozptylu elektrónov v kanáli) rozpracovali sme tiež metodiku merania a určovania driftovej pohyblivosti elektrónov (μ), ktorá využíva diferenciálnu vodivosť g_d získanú z kolektorového prúdu pri nízkych hodnotách kolektorového a hradlového predpätia (V_G = -2 až -3 V, V_{DS} = 0 až 2 V). Vtedy môžeme zanedbať sériový odpor R_s a očakávať lineárnu závislosť g_d voči V_{DS}. Zo smernice vynesenej závislosti

počítame pohyblivosť elektrónov μ [17]. Súhrn základných parametrov referenčného a plazmou spracovaného tranzistora je uvedený v tab. 1.

Mikrovlňná elektrická charakterizácia

Okrem jednosmerných meraní boli HEMT-y podrobené aj v analýze, ktorá spočívala v meraní S-parametrov vo frekvenčnom rozsahu 100 MHz až 40 GHz v niekoľkých pracovných bodoch tranzistorov. Zamerali sme sa najmä na vyhodnotenie medznej frekvencie prúdového zisku (f_t) a maximálnej frekvencie oscilácií (f_{max}), ktoré sa určujú pomocou lineárnej extrapolácie frekvenčnej závislosti prúdového zosilňovacieho činiteľa h_{21} a výkonového zosilňovacieho činiteľa U , získaných z nameraných S-parametrov.

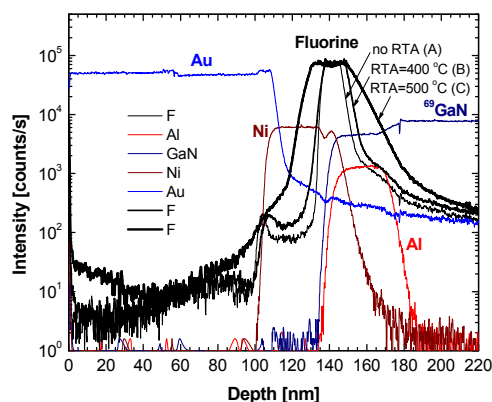
Zistili sme, že sledované parametre sú silne závislé od vyššie zmieneného spracovania Schottkyho hradlového kontaktu, a preto by mohli slúžiť na určovanie veľkosti dopadu plazmového spracovania v plyne SF₆ na výkonnosť HEMT-ov aj s ohľadom na optimalizáciu ich procesnej technológie. V prípade selektívneho plazmového spracovania Schottkyho hradlovej oblasti pozorujeme nárast f_t a f_{max} o takmer 60%. Vzorky sme ďalej podrobili dodatočnému tepelnému spracovaniu v atmosfére dusíka pri rôznych teplotách a analyzovali sme jeho vplyv na vlnkové charakteristiky štruktúry HEMT. Analýza bola zameraná najmä na teplotnú stabilitu vplyvu plazmového spracovania na mikrovlňné parametre HEMT (f_t , f_{max}). Súhrn získaných výsledkov je uvedený v tab. 2.

Tab. 2 Súhrn získaných hodnôt medznej frekvencie a maximálnej frekvencie oscilácií referenčného a plazmou spracovaného tranzistora (SF₆) pri rôznych teplotách žihania

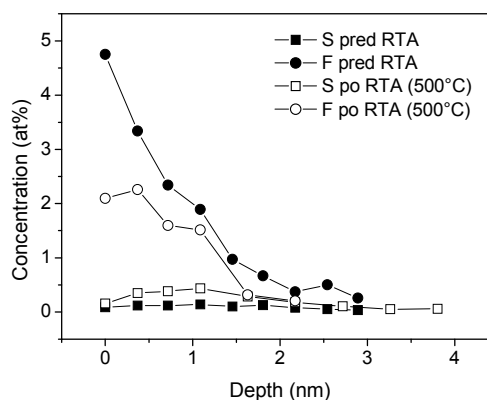
	Bez RTA		RTA (400°C, 35 s)		RTA (500°C, 35 s)	
	Referenčný	SF ₆	Referenčný	SF ₆	Referenčný	SF ₆
f_t [GHz]	3,72	5,25	3,65	5,20	2,89	3,79
f_{max} [GHz]	14,39	18,61	12,83	17,85	7,85	10,21

Nárast hodnôt f_t a f_{max} , ktorý bol pozorovaný bezprostredne po príprave HEMT, zostal zachovaný aj po následnom izotermálnom žihaní, treba však dodať, že zvyšovaním teploty RTA dochádzalo k postupnej degradácii hodnôt f_t aj f_{max} , pričom pri teplote RTA 400°C vykazovali ešte pomerne dobrú stabilitu. Toto tvrdenie platí rovnako pre konvenčný aj plazmou ovplyvnený typ tranzistorov. Zistili sme však, že dodatočným tepelným spracovaním

pri teplotách $T > 400$ °C dochádza k redistribúcii atómov fluóru na rozhraní s priamym dopadom na transportné vlastnosti tranzistorov. Pôvodný profil distribúcie sa s nárastom teploty rozširuje v dôsledku uplatňujúcich sa procesov difúzie na rozhraní, čo bolo potvrdené a zaznamenané SIMS analýzou (kap.5.6). Hĺbkový profil redistribuovaných atómov F vplyvom žihania, získaný metódou SIMS, vidíme na obr. 8. Dodatočná AES analýza (obr. 9) potvrdila zároveň pokles koncentrácie fluóru v maxime profilu. Teplotou indukovaná redistribúcia atómov fluóru má zanedbateľný vplyv na strmosť tranzistorov a pohyblivosť elektrónov v kanáli 2DEG.



Obr.8 SIMS hĺbkový profil redistribuovaných atómov F na rozhraní



Obr.9 AES hĺbkový profil atómov F a S na rozhraní po žihaní (RTA, $T=500$ °C)

Ovplyvňuje však celkovú hustotu náboja 2DEG kanála, čo je následne sprevádzané odpovedajúcou zmenou v prahovom napätí tranzistora. V konečnom dôsledku vedie k zníženiu medzných frekvencií tranzistora (f_i , f_{max}), ktoré sú aj napriek tomu stále vyššie než u konvenčného tranzistora bez plazmového spracovania. Získané výsledky podporujú model zabudovania atómov fluóru (vo forme záporne nabitých iónov F^-) prednostne v intersticiálnych polohách mriežky materiálu AlGaIn.

Aplikácie HEMT

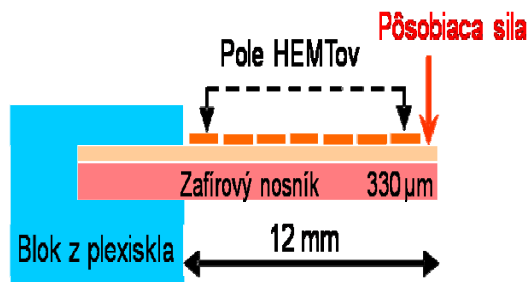
Senzor tlaku a mechanického napätia

Špecifický efekt formovania 2DEG (indukovaného piezoelektrickou a spontánnou polarizáciou) na rozhraní materiálového systému AlGaIn/GaN je predurčený pre snímanie zmien mechanického napätia a tlaku. Ukazuje sa, že piezoelektrická zložka polarizácie môže spôsobiť zmenu v koncentrácii 2DEG až do výšky 50 %. Navyše, nakoľko daný materiálový

systém je chemicky veľmi odolný, je tiež ideálny pre návrh mikro-senzorov v extrémnych podmienkach vysokých teplôt a vysoko korozívneho prostredia.

V našom priblížení sme sa rozhodli merať piezoodozvu na jednostranne votknutom nosníku z heteroštruktúry AlGaIn/GaN rastenej na zafirovom substráte. Úlohou bolo zaznamenať piezoodozvu tranzistora pri pôsobiacom vonkajšom tlaku v smere jednej osi. To si vyžadovalo zostavenie takého meracieho pracoviska, na ktorom by sa dal vyvolať presne definovaný vonkajší tlak s následným (in situ) meraním zmien v transportných vlastnostiach HEMT štruktúry. Obdĺžnikový makro-nosník s poľom HEMTov (tvarovaný pílením) s rozmermi 12 x

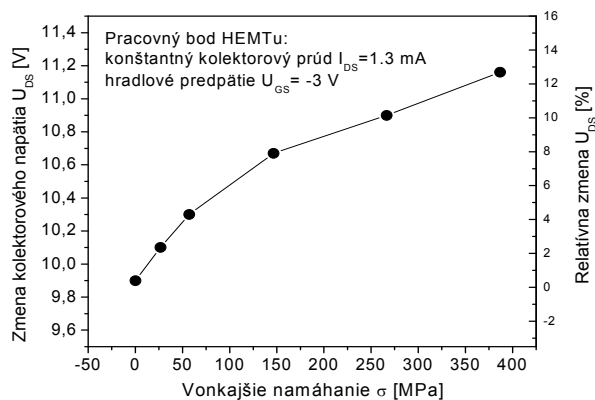
4 mm² je zobrazený na obr. 10. Vzorku s viacerými tranzistormi so známymi výstupnými a prevodovými charakteristikami sme votkli na jednom konci do plexisklového bloku. Blízko strany votknutia sa vybral a nakontaktoval jeden konkrétny tranzistor, na ktorom sa uskutočnilo meranie.



Obr.10 Rez štruktúrou makro-nosníka

Pôsobením sily na voľnom konci nosníka sme vyvinuli tlak, ktorý indukoval ťahové napätie v GaN vrstve a tým sa piezoelektricky indukoval náboj, ktorý menil koncentráciu nosičov

náboja v 2DEG vrstve. To sa odrazilo na zmene odporu kanála a tým pádom aj na zmene úbytku napätia V_{DS} . Pomocou zdroja konštantného prúdu a napätia (HP4145B) sme nastavili pracovný bod tranzistora tak, aby vykazoval čo najväčšiu citlivosť na zmeny mechanického napätia ($I_D = 1,3 \text{ mA}$, $V_G = -3 \text{ V}$).



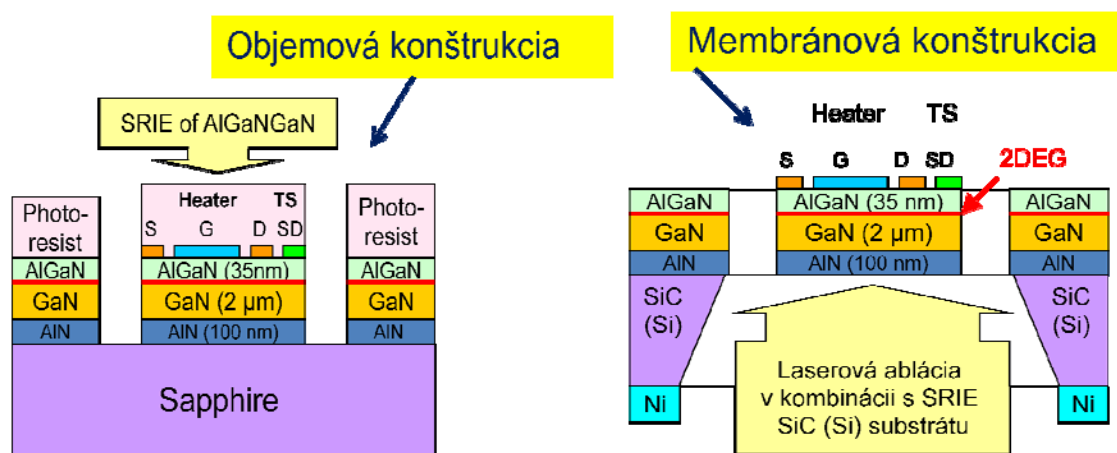
Obr.11 Absolútne a relatívne zmeny kolektorového napätia pri pôsobení vonkajšieho mechanického namáhania

V závislosti od veľkosti tiažovej sily, ktorú sme prepočítali na namáhacie napätie σ , sme vyniesli grafy závislostí absolútnej a relatívnej zmeny kolektorového napätia od vonkajšieho namáhacieho napätia (obr. 11). Z uvedených grafických závislostí vyplýva kontinuálny nárast absolútnej zmeny kolektorového napätia v závislosti od pôsobiaceho externého tlaku. Pri

najvyššom pôsobiacom tlaku sme namerali absolútnu zmenu na úrovni približne 11,15 V, čo predstavuje relatívnu zmenu cca 13%. Citlivosť senzora je na úrovni 3% pri náraste mechanického napätia o 100 MPa. Tieto hodnoty citlivosti korešpondujú s výsledkami, ku ktorým dospeli iné výskumné skupiny [18, 19]. Uvedený experiment poskytol prvý (pôvodný) výsledok v štúdiu HEMT piezo-odozvy pri pôsobiacom externom mechanickom namáhaní. Získané výsledky sú výzvou pre následne komplexné štúdium a vyšetovanie optimálnych pracovných podmienok snímania, distribúcie piezo-odozvy ako aj vplyvu orientácie a pasivácie HEMT z pohľadu dosiahnutia maximálnej citlivosti prvku.

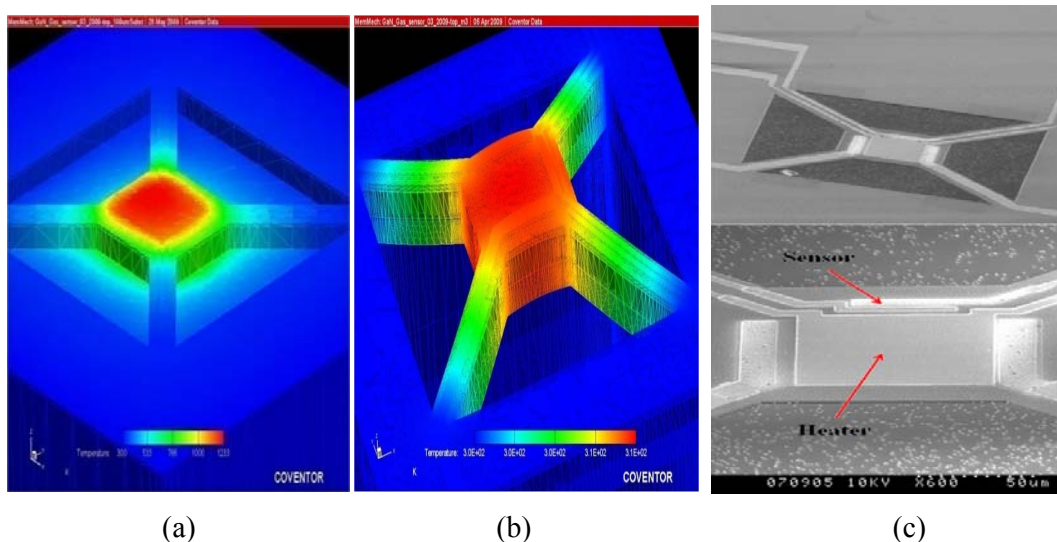
Mikrožiarič pre senzory plynov

V našich prácach sme prezentovali zavesenú GaN membránovú štruktúru s integrovaným HEMT vo funkcii žiariča a Schottkyho diódou, resp. 2DEG rezistorom ako teplotným sensorom [20-22]. Navrhnutým zdrojom tepelnej energie žiariča je 2-rozmerný elektrónový plyn tranzistora HEMT lokalizovaný na heterorozhraní AlGaIn/GaN. Pripravené sú dva koncepty návrhu, ktoré sú znázornené na obr. 12: objemová a membránová konštrukcia. Keďže tepelná vodivosť substrátu Al_2O_3 je nižšia v porovnaní s materiálovým systémom AlGaIn/GaN takmer 4 krát, môžeme to využiť pri návrhu relatívne jednoduchej konštrukcie objemového mikrožiariča ako je znázornené na obr. 12a. Tepelná izolácia je dosiahnutá priamo využitím selektívneho reaktívneho iónového leptania (SRIE) heteroštruktúry AlGaIn/GaN.



Obr.12 Schematický rez navrhnutých mikrožiaričov v (a) objemovom a (b) membránovom priblížení

Pri membránovom priblížení sa uvažuje o raste na SiC, resp. Si substráte za účelom využitia dostupných metód objemového mikrotvarovania substrátového materiálu, ako napríklad laserová ablácia v kombinácii so selektívnym reaktívnym iónovým leptaním (obr.12b).



Obr.13 Rozloženie teploty mikrožiaríčov v (a) objemovom a (b) membránovom priblížení spolu (c) s reálnym zobrazením vyrobeného objemového mikrožiaríča a detailným pohľadom na aktívne prvky

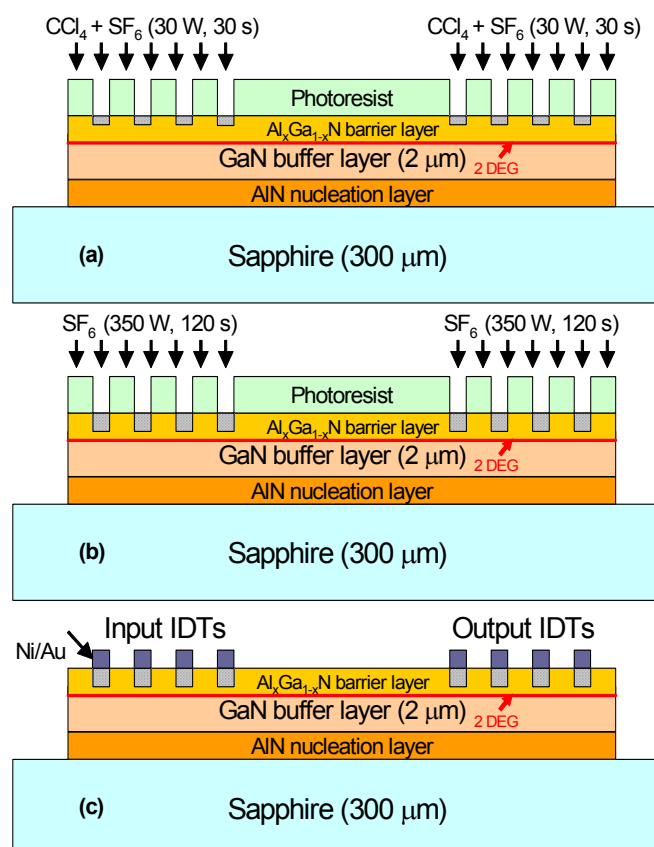
Na určenie rozloženia teploty na membráne a tepelného odporu aktívnych prvkov membrány sme využili elektro-teplnú analýzu v programových prostrediach ANSYS (spolupráca s Katedrou mechaniky STU v Bratislave) a CoventorWare (spolupráca s Katedrou mikroelektroniky ČVUT v Prahe). Na obr. 13 je znázornená teplotná distribúcia objemového aj membránového mikrožiaríča, rovnako aj reálny pohľad na pripravené štruktúry získané z rastrovacieho elektrónového mikroskopu. Simulácie ukazujú, že v prípade objemového mikrožiaríča na dosiahnutie teploty $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ je potrebný stratový výkon na úrovni takmer 1.7 W , zatiaľ čo pri membránovej konštrukcii mikrožiaríča postačuje stratový výkon iba vo veľkosti 110 mW (extrahovaná hodnota tepelného odporu $R_{th} \sim 7\text{ K/mW}$). Experimentálna verifikácia simulovaných elektro-teplných vlastností mikrožiaríčov na báze AlGaIn/GaN HEMT štruktúr je predmetom aktuálneho výskumu v rámci riešeného projektu APVV 0655-07. Ťažiskovým problémom v aktuálnom výskume je práve problém objemového mikrotvarovania SiC substrátu technikou laserovej ablácie v kombinácii s technikou selektívneho reaktívneho iónového leptania.

HEMT – SAW chemické senzory

Princíp snímania spočíva v tom, že medzi dva interdigitálne meniče (prvý vo funkcii vysielajúca a druhý vo funkcii snímača) je umiestnená chemicky citlivá absorpčná vrstva, ktorá po interakcii so snímaným médiom mení parametre šíriacej sa excitovanej SAW (z vysielajúca)

a na strane snímača sa deteguje a pomocou vhodne navrhnutej elektroniky aj vyhodnotí indukovaná zmena parametrov (zmena fáze a rýchlosti SAW).

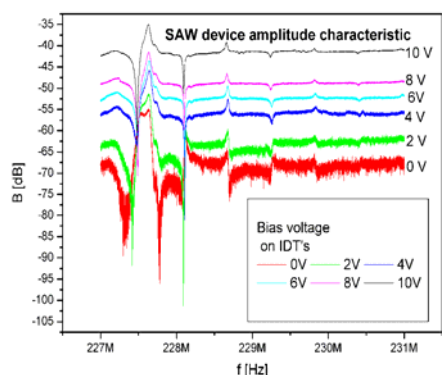
Priama interakcia budiaceho elektrického poľa a 2 – rozmerného elektrónového plynu však bráni excitácii SAW kvôli tieniacemu efektu vysoko-vodivého 2DEG indukovaného na AlGaN/GaN heterorozhraní. Aby sa predišlo stratám pri excitácii SAW v heteroštruktúre AlGaN/GaN, bola použitá jednoduchá metóda pripojenia jednosmerného predpätia medzi elektródy interdigitálnych meničov [23,24]. Priložené predpätie spôsobilo ochudobnenie 2DEG v oblasti pod elektródami, čím umožnilo elektro-akustický prevod. Ďalšie priblíženie nami navrhnuté [25,26] využíva efekt selektívneho plazmového spracovania hradlovej oblasti AlGaN/GaN HEMT (kap.4.2.4), ktorým dokážeme efektívne modifikovať hustotu 2DEG v kanáli tranzistora a tým aj v oblasti interdigitálnych meničov SAW štruktúr. Preto sme za účelom potlačenia strát pri excitácii SAW v materiálovom systéme AlGaN/GaN využili selektívne plazmové spracovanie (využitím plazmy SF₆) v oblasti interdigitálnych meničov [25]. Na obr. 14 sú znázornené jednotlivé procesné kroky plazmového spracovania oblasti



pod elektródami interdigitálnych meničov. V prvom kroku sme použili plytké recesované plazmové reaktívne iónové leptanie bariérovej vrstvy AlGaN (1-2 nm) v plazme CCl₄ s následným “in situ” povrchovým plazmovým spracovaním v plazme SF₆ s výkonom 30 W po dobu 30 s. V následnom kroku (obr. 16b) sa aplikovalo SF₆ plazmové spracovanie pri zvýšenom výkone 350 W po dobu 120 s, kedy dochádza k úplnému ochudobneniu 2DEG na AlGaN/GaN heterorozhraní, čo možno považovať za podmienky optimálne pre SAW excitáciu [25].

Obr.14 Procesné kroky plazmového spracovania oblasti pod elektródami interdigitálnych meničov

Meraním prenosových charakteristík sme potvrdili excitáciu SAW už pri nulovom predpätí na interdigitálnych meničoch. Dodatočne priložené externé predpätie ako je zrejmé z obr. 15



degraduje faktor kvality ako aj amplitúdu SAW, čo je možné vysvetliť zvýšenou vodivosťou oddeľujúcej GaN vrstvy [25]. Výber východiskovej AlGaIn/GaN heteroštruktúry je preto veľmi dôležitý pre dosiahnutie optimálnej prenosovej charakteristiky SAW štruktúr, čo je tiež aktuálnym cieľom v rámci riešeného projektu APVV 0655-07.

Obr.15 Prenosové charakteristiky SAW štruktúr

Súhrn získaných výsledkov a poznatkov

Riešením predloženej dizertačnej práce sa získali nasledovné hlavné výsledky a poznatky:

- Významným prínosom v problematike štúdia podmienok prípravy a vlastností AlGaIn/GaN tranzistorov HEMT bol návrh nového metalizačného systému vhodného na formovanie zlievaných ohmických kontaktov, vyznačujúcich sa nízkou hodnotou merného kontaktného odporu a dokonalou morfológiou povrchu. Originalita návrhu spočíva v tom, že do konvenčného metalizačného systému na báze sekvenčne deponovaných vrstiev Ti/Al/Ni/Au sa dodatočne do rozhrania s bariérovou vrstvou AlGaIn zahrnú tiež tenké vrstvy Nb v optimálnom pomere hrúbok s vrstvou Ti. Týmto sa pri následnom vysokoteplotnom spracovaní (RTA-850 °C, t = 35 s) vytvoria podmienky pre formovanie intermetalických nitridových fáz nielen s Ti ale aj Nb (TiN, NbN). Tvorba nitridových fáz je sprevádzaná tvorbou N-vakancií vo vrstve AlGaIn, ktoré sú donorového charakteru. V konečnom dôsledku v podmienkach vysokoteplotného spracovania dochádza teda k tvorbe povrchovej vysokodopovanej vrstvy s vodivosťou typu n^+ , ktorá stenšuje potenciálovú bariéru na rozhraní. Domnievame sa preto, že práve prítomnosť NbN fázy na rozhraní vedie k ďalšiemu zníženiu a zúženiu potenciálovej bariéry a tým zníženiu celkového merného kontaktného odporu ($\rho_c \sim 2 \cdot 10^{-6} \Omega \text{cm}^{-2}$). Elektrické parametre rozhrania boli vyšetřované vypracovanou metódou CTLM (Circular Transmission

Method). Modelové predstavy formovania ohmického kontaktu boli tiež podporené spektroskopickými metódami analýzy rozhrania (AES, SIMS).

- Navrhli sme nový alternatívny prístup v pasivácii AlGaN/GaN tranzistorov, ktorý využíva kontrolovaný úber bariérovej AlGaN vrstvy technikou reaktívneho iónového leptania v plazme plynu CCl_4 s následnou (in situ) pasiváciou povrchu v plazme plynu SF_6 . Dopad navrhutej metódy bol priamo hodnotený analýzou jednosmerných ako aj mikrovlnných parametrov tranzistorov. Zistili sme, že zaradením tohto procesného kroku je možné veľmi dobre kontrolovať prahové napätie, strmosť a najmä zvýšiť medznú frekvenciu prúdového zisku (f_t) a maximálnu frekvenciu oscilácií (f_{max}) takmer o 60% , čo považujeme za výsledok veľmi významný z pohľadu možnej preferovanej aplikácie tejto metódy v submikrometrovej technológii tranzistorov AlGaN/GaN HEMT pre oblasť milimetrového pásma ($f_t, f_{\text{max}} > 30 \text{ GHz}$).
- V snahe fyzikálne interpretovať pozitívny účinok selektívnej plazmovej pasivácie, analyzovali sme transportné vlastnosti AlGaN/GaN HEMT štruktúr v priamej korelácii s hĺbkovým profilom koncentrácie atómov fluóru na hradlovom (Au-Ni/AlGaN) Schottkyho rozhraní. Zistili sme, že dodatočným tepelným spracovaním pri teplotách $T > 400 \text{ }^\circ\text{C}$ dochádza k redistribúcii atómov fluóru na rozhraní s priamym dopadom na transportné vlastnosti tranzistorov. Pôvodný profil distribúcie sa s nárastom teploty rozširuje v dôsledku uplatňujúcich sa procesov difúzie na rozhraní, čo bolo potvrdené a zaznamenané SIMS analýzou. Dodatočná AES analýza potvrdila zároveň pokles koncentrácie fluóru v maxime profilu. Teplotou indukovaná redistribúcia atómov fluóru má zanedbateľný vplyv na strmosť tranzistorov a pohyblivosť elektrónov v kanáli 2DEG. Ovplyvňuje však celkovú hustotu náboja 2DEG kanála, čo je následne sprevádzané odpovedajúcou zmenou v prahovom napätí tranzistora. V konečnom dôsledku vedie k zníženiu medzných frekvencií tranzistora (f_t, f_{max}), ktoré sú aj napriek tomu stále vyššie než u konvenčného tranzistora bez plazmového spracovania. Získané výsledky podporujú model zabudovania atómov fluóru (vo forme záporne nabitých iónov F^-) prednostne v intersticiálnych polohách mriežky materiálu AlGaN.
- Poznatky získané v štúdiu vlastností plazmou spracovaných AlGaN/GaN tranzistorov HEMT nás motivovali k návrhu novej metódy formovania interdigitálnych elektro-mechanických meničov (IDTs) definujúcich chemické senzory na báze povrchových akustických vln (SAW). Navrhnutá metóda využíva selektívne pôsobenie plazmy plynu SF_6 v oblasti pod hradlovými interdigitálnymi prstami (pred depozíciou hradlovej

metalizácie prstov). Výberom požadovaného plazmového výkonu a doby spracovania je možné takýmto spôsobom modifikovať hustotu 2DEG separátne v oboch oblastiach IDTs a tým dosiahnuť podmienky pre excitáciu SAW (potlačenie vplyvu vložných strát spôsobených prítomnosťou vodivých elektrónov 2DEG) bez požadovaného vysokého jednosmerného napätia aplikovaného na IDTs. Uvedená novo-navrhnutá metóda umožňuje teda excitáciu SAW priamo v heteroštruktúre AlGaIn/GaN pri nulovom jednosmernom predpätí na IDTs. Metóda bola priamo overená meraním prenosových charakteristík modelových SAW štruktúr chemických senzorov v širokom rozsahu frekvencií. Bol pozorovaný veľmi dobrý súlad medzi nameranými a simulovanými parametrami SAW štruktúr (pracovná-rezonančná frekvencia $f_0 = 254$ MHz, šírka prenášaného pásma $\Delta f = 4$ MHz).

- Pripravené štruktúry AlGaIn/GaN HEMT boli overované vo funkcii snímačov tlaku a mechanického napätia. Bola vypracovaná metodológia snímania, na báze zafírových substrátových makro-nosníkov ($h \sim 300 \mu\text{m}$) s integrovanými štruktúrami HEMT, mechanicky votknutých do meracieho modulu umožňujúceho (in situ) snímanie zmien vodivosti kanála pri kontrolovanom externom mechanickom namáhaní. AlGaIn/GaN HEMT lokalizovaný v blízkosti roviny votknutia makro-nosníka, externe namáhaný napätím v ťahu ($\sigma \sim 350$ MPa) vykazoval zmenu vo vodivosti takmer 12 %, čo považujeme za výsledok veľmi povzbudivý z pohľadu jeho očakávanej integrácie priamo na GaN nosníku s hrúbkou $2 \mu\text{m}$ (MEMS konštrukčný typ senzora).
- Vysoká tepelná, mechanická a chemická stabilita AlGaIn/GaN HEMT štruktúr bola overovaná tiež v konštrukčnom návrhu mikrožiaričov pre senzory plynov. Boli navrhnuté dve navzájom odlišné konštrukčné priblíženia. Objemová konštrukcia, ktorá využíva “MESA“ – leptanú AlGaIn/GaN heteroštruktúru na tepelne izolačnom zafírovom substráte a membránová konštrukcia, ktorá využíva priamo vytvarovanú AlGaIn/GaN membránu na substráte SiC. V oboch konštrukčných typoch AlGaIn/GaN HEMT je navrhnutý vo funkcii tepelného žiariča a rezistor na báze 2DEG vo funkcii teplotného senzora. Simulovaná konverzná charakteristika membránovej konštrukcie mikrožiariča (MEMS micro-hotplate) predpovedá teplotu zavesenej membrány $T=800$ °C dosiahnuteľnú pri stratovom výkone v žiariči AlGaIn/GaN HEMT približne 110 mW. Aktuálny proces optimalizácie objemového mikrotvarovania SiC substrátu ($h=300 \mu\text{m}$) technikou laserovej ablácie v kombinácii s technikou RIE bráni zatiaľ experimentálnej verifikácii simulovaných výsledkov.

Záver

Táto práca je zameraná na heteroštruktúru AlGa_N/Ga_N, vyzdvihuje jej hlavné výhody a popisuje fyzikálne javy prebiehajúce na rozhraní AlGa_N/Ga_N. V práci bol navrhnutý technologický postup prípravy HEMT na zmienenej heteroštruktúre s ohľadom na jeho využitie v senzorických aplikáciách.

Významným prínosom v problematike štúdia podmienok prípravy a vlastností AlGa_N/Ga_N HEMT bol návrh nového metalizačného systému vhodného na formovanie zlievaných ohmických kontaktov, ktoré sa vyznačujú nízkou hodnotou merného kontaktného odporu ($\rho_c \sim 2 \cdot 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$) a dokonalou morfológiou povrchu.

Navrhli sme pôvodnú procesnú technológiu prípravy AlGa_N/Ga_N HEMT štruktúr s kontrolovaným úberom (v plazme CCl₄) a následnou (in situ) pasiváciou hradlovej bariérovej vrstvy AlGa_N (v plazme SF₆). Dokážeme tak veľmi dobre kontrolovať prahové napätie, strmosť a najmä zvýšiť medznú frekvenciu prúdového zisku (f_i) a maximálnu frekvenciu oscilácií (f_{max}) takmer o 60%. Získané výsledky podporujú model zabudovania záporne nabitých iónov F⁻ prednostne v intersticiálnych polohách mriežky materiálu AlGa_N.

Získané poznatky v technológii nás viedli k návrhu novej metódy formovania interdigitálnych elektro-mechanických meničov (IDTs) definujúcich chemické senzory na báze povrchových akustických vln (SAW). Uvedená novo-navrhnutá metóda umožňuje excitáciu SAW priamo v heteroštruktúre AlGa_N/Ga_N pri nulovom jednosmernom predpätí na IDTs. Pripravené štruktúry AlGa_N/Ga_N HEMT boli overované vo funkcii snímačov tlaku a mechanického napätia a taktiež v konštrukčnom návrhu mikrožiaričov pre senzory plynov.

Summary

This work is aimed to study various physical effects observed at both AlGa_N/Ga_N heterointerface and Au-Ni/AlGa_N Schottky interface after rapid thermal annealing (RTA). The processing technology of the HEMTs based on the named heterostructure considering their usage in sensor applications is also presented.

We have demonstrated a novel metallic system proposed to form ohmic contact to AlGa_N/Ga_N heterostructures. It uses the deposition of a thin Nb layer in contact with the AlGa_N barrier layer before the deposition of the conventional Ti/Al/Ni/Au metallic system. This approach allows us to prepare ohmic contacts with low contact resistance ($\rho_c \sim 2 \cdot 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$) and excellent surface morphology.

Shallow recess-gate etching of AlGaN (~ 5 nm) was performed in CCl₄ plasma through photoresist mask. Subsequently, recess-gate etching followed *in situ* by SF₆ plasma. The plasma treatment can (1) enable the technologist to set the threshold voltage of the HEMTs controllably; (2) provide the AlGaN/GaN heterostructure with surface passivation; (3) modify the 2DEG in any area of a HEMT channel; and (4) make it possible to convert a HEMT operation from depletion mode to enhancement mode. The increase of the current gain cut-off frequency and the maximum oscillation frequency of almost 60% was observed.

The new approach using the two-step plasma treatment was employed to form IDT structures on the AlGaN/GaN heterostructures in chemical sensing applications based on surface acoustic waves. The AlGaN/GaN HEMTs were also introduced as sensing elements in pressure and strain sensors as well as in the role of microheaters in gas sensors.

Zoznam publikovaných prác

- **v periodikách evidovaných v CC :**

- [1] Š. Haščík, I. Hotový, T. Lalinský, **G. Vanko**, V. Řeháček, and Ž. Mozolová: Preparation of thin GaAs suspended membranes for gas microsensors using plasma etching, *Vacuum* **82** (2007) 236-239.
- [2] **G. Vanko**, T. Lalinský, Ž. Mozolová, J. Liday, P. Vogrinčič, A. Vincze, F. Uherek, Š. Haščík, I. Kostič, Nb-Ti/Al/Ni/Au based ohmic contacts to AlGaN/GaN, *Vacuum* **82** (2007) 193-196.
- [3] T. Lalinský, L. Rufer, **G. Vanko**, S. Mir, Š. Haščík, Ž. Mozolová, A. Vincze, and F. Uherek: AlGaN/GaN heterostructures based surface acoustic wave structures for chemical sensors, *Applied Surface Sci* **255** (2008) 712-714.
- [4] I. Hotový, V. Řeháček, F. Mika, T. Lalinský, Š. Haščík, **G. Vanko**, and M. Držík: Gallium arsenide suspended microheater for MEMS sensor arrays, *Microsyst. Technol.* **14** (2008) 629-635.
- [5] T. Lalinský, M. Držík, J. Jakovenko, **G. Vanko**, Ž. Mozolová, Š. Haščík, J. Chlpík, I. Hotový, V. Řeháček, I. Kostič, L. Matay, and M. Husák: GaAs based micromachined thermal converter for gas sensors, *Sensors Actuators A* **142** (2008) 147-152.
- [6] **G. Vanko**, T. Lalinský, Š. Haščík, I. Rýger, Ž. Mozolová, J. Škriniarová, M. Tomáška, I. Kostič, A. Vincze: Impact of SF₆ plasma treatment on performance of AlGaN/GaN HEMT, *Vacuum* **84** (2009) 235-237.
- [7] T. Lalinský, I. Rýger, L. Rufer, **G. Vanko**, Š. Haščík, Ž. Mozolová, J. Škriniarová, M. Tomáška, I. Kostič, A. Vincze: Surface acoustic wave excitation on SF₆ plasma-treated AlGaN/GaN heterostructure, *Vacuum* **84** (2009) 231-234.

- **na vedeckých podujatiach:**

- [1] T. Lalinský, I. Hotový, Š. Haščík, **G. Vanko**, Ž. Mozolová, V. Řeháček, I. Kostič, L. Matay, Micromachined GaAs based thermal converter for gas sensors, presented at Eurosenors XX, September 2006, Göteborg, Sweden
- [2] T. Lalinský, **G. Vanko**, Š. Haščík, Ž. Mozolová, I. Kostič, AlGaN/GaN HEMT Based Thermal Converter on Sapphire Substrate, presented at Eurosenors XX, September 2006, Göteborg, Sweden

- [3] **G. Vanko**, T. Lalinský, M. Grujbár, Ž. Mozolová, Š. Haščík, I. Kostič, A new approach in forming of Ti/Al/Ni/Au based ohmic contacts to AlGaIn/GaN, presented at JVC 11, September 2006, Prague, Czech Republic
- [4] Š. Haščík, I. Hotový, T. Lalinský, **G. Vanko**, V. Řeháček, Ž. Mozolová, Preparation of thin GaAs suspended membranes for gas microsensors using plasma etching, presented at JVC 11, September 2006, Prague, Czech Republic
- [5] T. Lalinský, M. Držík, J. Jakovenko, **G. Vanko**, Ž. Mozolová, Š. Haščík, M. Grujbár, I. Hotový, I. Kostič, L. Matay, M. Husák, GaAs based micromachined thermal converter for gas sensors, presented at MME06, Southampton, England
- [6] J. Jakovenko, M. Husák, T. Lalinský, M. Držík, **G. Vanko**.: Design and Modeling of GaAs Based Hot Plate for Gas Sensors, Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP 2007, Stresa, Italy, 25-27 April 2007, pp. 147-150, ISBN 978-2-35500-000-3
- [7] J. Jakovenko, M. Husák, T. Lalinský, M. Držík, **G. Vanko** .: Micromechanical GaAs Thermal Converter for Gas Sensors, Technical Proceedings of NSTI Nanotech, Nanotech 2007, Santa Clara CA – USA, 20-24 May 2007, pp. 244-247, ISBN 1-4200-6349-9
- [8] T. Lalinský, L. Rufer, **G. Vanko**, S. Mir, Š. Haščík, Ž. Mozolová, A. Vincze, and F. Uherek.: AlGaIn/GaN heterostructure based surface acoustic wave structures for chemical sensors. In: 11th Inter. Conf. on the Formation of Semicond. Interfaces – ICFSI-XI. Manaus – Amazonas (Brazilia) 2007.
- [9] T. Lalinský, **G. Vanko**, Š. Haščík, Ž. Mozolová, J. Škriniarová, M. Tomáška, I. Kostič, A. Vincze.: Impact of SF₆ plasma treatment on performance of AlGaIn/GaN HEMTs, 12th Joint Vacuum Conference, 10th European Vacuum Conference, 7th Annual Meeting of the German Vacuum Society, Balatonalmádi, Lake Balaton – Hungary, September 22 – 26 2008, Oral presentation.
- [10] T. Lalinský, I. Rýger, L. Rufer, **G. Vanko**, Š. Haščík, Ž. Mozolová, M. Tomáška, A. Vincze.: Surface Acoustic Wave Excitation on SF₆ plasma treated AlGaIn/GaN heterostructure, 12th Joint Vacuum Conference, 10th European Vacuum Conference, 7th Annual Meeting of the German Vacuum Society, Balatonalmádi, Lake Balaton – Hungary, September 22 – 26 2008, Poster presentation.
- [11] T. Lalinský, **G. Vanko**, Š. Haščík, Ž. Mozolová, J. Škriniarová, M. Tomáška, I. Kostič, A. Vincze.: DC and microwave performance of SF₆ plasma treated AlGaIn/GaN HEMTs, 34th International Conference on Micro and Nano Engineering, Athens – Greece, September 15 – 18 2008, Poster presentation.
- [12] M. Tomáška, T. Lalinský, **G. Vanko**, M. Mišun.: Microwave characterization and properties of 2 μm gate length AlGaIn/GaN HEMT structures. In: COMITE 2008. The 14th Conference on Microwave Technique: Proceedings, Prague, Czech Republic, 2008.
- [13] Jakovenko, J., Lalinský, T., Držík, M., Ivanova, M., **Vanko, G.**, Husák, M.: GaN, GaAs and Silicon based micromechanical free standing hot plates for gas sensing, Eurosensors XXIII Conference, Lausanne, Switzerland (2009), Poster presentation.
- [14] Lalinský, T., Kutiš, V., Jakovenko, J., Ivanova, M., **Vanko, G.**, Murín, J., Husák, M.: GaN micro-hotplates for high temperature MEMS gas sensor applications, MME 2009, The 20th Micromechanics Europe Workshop, Toulouse, France, September 20-22, 2009, Poster and (flash) oral presentation.
- [15] Lalinský, T., **Vanko, G.**, Jakovenko, J., Kutiš, V., Ivanova, M., Haščík, Š., Murín, J., Husák, M. and Kostič, I.: AlGaIn/GaN HEMT based micro-hotplate for high temperature gas sensors, MNE09, The 35th Inter. Conf. on Micro & Nano Engineering, Ghent, Belgium, September 28 - October 1, 2009, Poster presentation.
- [16] T. Lalinský, **G. Vanko**, Ž. Mozolová, J. Liday, P. Vogrinčič, A. Vincze, F. Uherek, Š. Haščík, I. Kostič, Nb-Ti/Al/Ni/Au Ohmic Metallic System to AlGaIn/GaN, presented at ASDAM, October 2006, Smolenice, Slovakia
- [17] L. Rufer, T. Lalinský, D. Grobelný, S. Mir, **G. Vanko**, Zs. Őszi, Ž. Mozolová, GaAs and GaN based SAW chemical sensors: acoustic part design and technology, presented at ASDAM, October 2006, Smolenice, Slovakia

- [18] **Vanko, G.**, Lalinský, T., Tomáška, M., Haščík, Š., Mozolová, Ž., Škriniarová, J., Kostič, I., Vincze, A., and Uherek, F.: Impact of SF₆ plasma on DC and microwave performance of AlGa_N/Ga_N HEMT structures. In: ASDAM 2008. The 7th Inter. Conf. Advanced Semicond. Devices Microsyst. Oral presentation.
- [19] Lalinský, T., Rufer, L., **Vanko, G.**, Rýger, I., Haščík, Š., Tomáška, M., Mozolová, Ž., and Vincze, A.: Surface acoustic wave excitation on SF₆ plasma treated AlGa_N/Ga_N heterostructure. In: ASDAM 2008. The 7th Inter. Conf. Advanced Semicond. Devices Microsyst. Poster presentation.
- [20] Tomáška, M., Lalinský, T., **Vanko, G.** and Mišun, M.: High frequency characterization and properties of AlGa_N/Ga_N HEMT structures. In: ASDAM 2008. The 7th Inter. Conf. Advanced Semicond. Devices Microsyst. Oral presentation.

Literatúra

- [1] P. Tripathi, B.K. Ridley, *Dynamics of hot-electron scattering in GaN heterostructures*, Phys. Rev. B 66, 195301, 2002
- [2] D. Mistele, O. Katz, A. Horn, G. Bahir, J. Salzman, *Engineering and impact of surface states on AlGa_N/Ga_N-based HFETs*, Semicond. Sci. Technol., Vol. 20, p. 972-978, 2005
- [3] R. Vetury, N. Q. Zhang, S. Keller, U. K. Mishra, *Impact of surface states on the dc and rf characteristics of AlGa_N/Ga_N HFETs*, IEEE Trans. On Electron Devices, Vol. 48, No.3, 2001
- [4] Arulkumaran S, Egawa T, Ishikawa H and Jimbo T, *Surface passivation effects on AlGa_N/Ga_N high-electron-mobility transistors with SiO₂, Si₃N₄ and silicon oxynitride*, Appl. Phys. Lett. 84, pp. 613–5, 2004
- [5] Higashiwaki M., Hirose N., Matsui T., *Cat-CVD SiN-passivated AlGa_N/Ga_N HFETs with thin and high Al composition barrier layers*, IEEE Electron Device Letters 26, No.3, pp. 139-141, 2005
- [6] Kikkawa T., Nagahara M., Okamoto N., Tateno Y., Yamaaguchi Y., Hara N., Joshin K., Asbeck P.M., *Surface-charge controlled AlGa_N/Ga_N-power HFET without current collapse and gm dispersion*, IEDM Tech. Dig., vol.585, 2001
- [7] Lu W., Kumar V., Schwindt R., Piner E., Adesida I., *A comparative study of surface passivation on AlGa_N/Ga_N HEMTs*, Solid State Electron. Vol.46, pp.1441, 2002
- [8] Zhang N.Q., Moran B., DenBaars S.P., Mishra U.K., Wang X.W., Ma T.P., *Effects of surface traps on breakdown voltage and switching speed of GaN power switching HEMTs*, IEDM Tech. Dig., p.589, 2001
- [9] Mistele D., Katz O., Horn A., Bahir G., Salzman J., *Engineering and impact of surface states on AlGa_N/Ga_N-based hetero field effect transistors*, Semicond. Sci. Technol. Vol.20, pp.972-978, 2005
- [10] Wu Y.F., Saxler A., Moore M., Smith R.P., Sheppard S., Chavarkar P.M., Wisleder T., Mishra U.K., Parikh P., *30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization*, IEEE Electron Device Letters 25, No.3, pp. 117-119, 2004
- [11] Karmalkar S., Shur M.S., Simin G., Khan M.A., *Field-plate engineering for HFETs*, IEEE Trans. Electron Devices 52, No. 12, pp. 2534-2540, 2005
- [12] Song D., Liu J., Cheng Z., Tang W.C.W., Lau K.M., Chen K.J., *Normally off AlGa_N/Ga_N low-density drain HEMT (LDD-HEMT) with enhanced breakdown voltage and reduced current collapse*, IEEE Electron Device Letters 28, No.3, pp. 189-191, 2007

- [13] Cai Y., Zhou Y., Chen K.J., Lau K.M., *High-performance enhancement-mode AlGaIn-GaN HEMTs using fluoride-based plasma treatment*, IEEE Electron Device Letters 26, No. 7, pp. 435-437, 2005
- [14] G. Vanko, T. Lalinský, Ž. Mozolová, J. Liday, P. Vogrinčič, A. Vincze, F. Uherek, Š. Haščík, I. Kostič, *Nb-Ti/Al/Ni/Au based ohmic contacts to AlGaIn/GaN*, Vacuum 82, Issue 2, pp. 193-196, 2007
- [15] N. Miura et al.: *Effects of interfacial thin metal layer for high-performance Pt-Au based Schottky contacts to AlGaIn/GaN*, IEEE Trans. Electron Devices, vol.51, pp.297-302, 2004
- [16] G.Vanko, T.Lalinský, Š.Haščík, I.Rýger, Ž.Mozolová, J.Škriniarová, M.Tomáška, I.Kostič, A.Vincze: *Impact of SF₆ plasma treatment on performance of AlGaIn/GaN HEMT*, Vacuum 84, Issue 1, pp. 235-237, 2009
- [17] Y. Liu, P. P. Ruden, J. Xie, H. Morkoc et al.: *Effect of hydrostatic pressure on the dc characteristic of AlGaIn/GaN heterojunction field effect transistors*, Applied Physics Letters Vol. 88, No. 1, 2006
- [18] Chia-Ta Chang, Shih-Kuang Hsio, Edward Yi Chang et al.: *Changes of Electrical Characteristic for AlGaIn/GaN HEMT Under Uniaxial Tensile Strain*, IEEE Electron Device Letters, Vol. 30, No. 3, 2009
- [19] B.S. Kang, K. Baik, C.C. Pan, T. Nishida et al.: *Effect of external strain on the conductivity of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors*, Applied Physics Letters Vol. 88, No. 23, 2003
- [20] Jakovenko, J., Lalinský, T., Držik, M., Ivanova, M., Vanko, G., Husák, M.: *GaN, GaAs and Silicon based micromechanical free standing hot plates for gas sensing*, Procedia Chemistry 1 (2009), p. 804-807 as the proceedings of the Eurosensors XXIII Conference.
- [21] Lalinský, T., Kutiš, V., Jakovenko, J., Ivanova, M., Vanko, G., Murín, J., Husák, M.: *GaN micro-hotplates for high temperature MEMS gas sensor applications*. In: MME 2009. The 20th Micromechanics Europe Workshop. P. B18.
- [22] Lalinský, T., Vanko, G., Jakovenko, J., Kutiš, V., Ivanova, M., Haščík, Š., Murín, J., Husák, M. and Kostič, I.: *AlGaIn/GaN HEMT based micro-hotplate for high temperature gas sensors*. In: MNE09. The 35th Inter. Conf. on Micro & Nano Engineering. P-MEMS-20.
- [23] F. Calle, J. Pedrós, T. Palacios and J. Grajal, *Nitride-based surface acoustic wave devices and applications*, Phys. Status Solidi 2, No. 3, pp. 976-983, 2005
- [24] F. Calle, J. Grajal, and J. Pedrós, *Active SAW devices on 2DEG heterostructures*, Electron. Lett. 40, pp. 1384-1386, 2004
- [25] Lalinský, T., Rýger, I., Rufer, L., Vanko, G., Haščík, Š., Mozolová, Ž., Škriniarová, J., Tomáška, M., Kostič, I., Vincze, A.: *Surface acoustic wave excitation on SF₆ plasma-treated AlGaIn/GaN heterostructure*, Vacuum 84, pp. 231-234, 2009
- [26] Lalinský, T., Rufer, L., Vanko, G., Mir, S., Haščík, Š., Mozolová, Ž., *AlGaIn/GaN heterostructure-based surface acoustic wave structures for chemical sensors*, Appl. Surf. Sci. 255, p.712, 2008