

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra mikroelektroniky

Doc. Ing. Ivan Hotový, PhD.

**TECHNOLÓGIA A CHARAKTERIZÁCIA TENKÝCH  
VRSTIEV NITRIDOV A OXIDOV KOVOV PRE  
POUŽITIE V MIKROELEKTRONIKE, SENZORIKE  
A MIKROSYSTÉMOVEJ TECHNIKE**

**Autoreferát dizertačnej práce**  
na získanie vedeckej hodnosti doktora technických vied

Vedný odbor: 26-35-9  
Elektrotechnológia a materiály

Bratislava, november 2009

Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre mikroelektroniky, FEI STU v Bratislave.

Uchádzač: Doc. Ing. Ivan Hotový, PhD.  
Katedra mikroelektroniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU  
Ilkovičova 3  
812 19 Bratislava

Oponenti:

Stanovisko k dizertačnej práci vypracoval Elektrotechnický ústav SAV v Bratislave.

Autoreferát bol rozoslaný dňa .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa ..... o ..... hod. pred komisiou pre obhajoby doktorských dizertácií vo vednom odbore 26-35-9 "Elektrotechnológia a materiály" v zasadačke Elektrotechnického ústavu SAV v Bratislave, Dúbravská cesta 9.

S dizertáciou je možné sa oboznámiť v knižnici Elektrotechnického ústavu SAV.

Predseda komisie pre obhajoby doktorských  
dizertačných prác v odbore 26-35-9

Doc. Ing. Peter Kordoš, DrSc.  
Elektrotechnický ústav SAV

## Obsah

<b>1. Úvod</b>	2
<b>2. Súčasný stav poznatkov</b>	4
<b>3. Ciele dizertačnej práce</b>	8
<b>4. Zvolené metódy spracovania</b>	9
<b>5. Výsledky dizertácie s uvedením nových poznatkov</b>	11
5.1 Reaktívne magnetrónové naprašovanie tenkých vrstiev	11
5.2 Tenké vrstvy NbN a NiO v mikroelektronike	12
5.2.1 NbN tenké vrstvy pre Schottkyho kontakty na GaAs	12
5.2.2 NiO tenké vrstvy pre ohmické kontakty na p-GaN	13
5.3 Tenké polovodivé a povrchovo modifikované NiO vrstvy v senzorike	14
5.3.1 Technológia a vlastnosti NiO vrstiev a ich použitie na detekciu plynov	14
5.3.2 Technológia a vlastnosti povrchovo modifikovaných NiO vrstiev a ich použitie na detekciu plynov	15
5.4 Technológia prípravy a charakterizácia tenkovrstvových mikrovyhrievačov pre mikrosystémovú techniku	17
5.4.1 Návrh a elektrotepelné simulácie mikrovyhrievača na zavesenej membráne	17
5.4.2 Návrh a vývoj technológie mikrovyhrievača na zavesenej GaAs membráne	18
5.4.3 Testovanie elektrotepelných vlastností a tepelnomechanická stabilita mikrovyhrievača	19
<b>6. Závery pre realizáciu v spoločenskej praxi a pre ďalší rozvoj vedy</b>	20
<b>7. Použitá literatúra</b>	23
<b>8. Zoznam publikácií, ktoré sú predmetom dizertačnej práce</b>	25
<b>9. Ďalšie publikované práce uchádzača majúce väzbu na dizertačnú prácu</b>	26
<b>10. Citačný ohlas prác uchádzača</b>	32
<b>Summary</b>	48
<b>Zusammenfassung</b>	48

## 1. Úvod

Moderné metódy prípravy tenkých vrstiev sa neustále rozvíjajú do širokého spektra sofistikovaných techník slúžiacich na výrobu rôznych výrobkov a produktov. Tieto aplikácie zahŕňajú nielen tenké vrstvy pre mikroelektroniku, sensoriku a mikrosystémovú techniku, ale aj optické, ochranné a dekoratívne tenké vrstvy. Plazmatické technológie predstavujú progresívne metódy prípravy, pričom majú veľa podôb, od jednoduchých jednosmerných výbojov až po zložitú plazmu budenú elektrónovou cyklotrónovou rezonanciou (ECR) alebo induktívne viazanou plazmou (ICP). Tenké vrstvy môžu byť pripravované a následne tvarované v rôznych typoch aparátov, ktoré zahŕňajú vysokofrekvenčné diódové systémy, magnetrónové zdroje, širokozväzkové iónové zdroje, zdroje s dutou katódou, s oblúkovým výbojom a mnohé iné. Každú z uvedených metód môžeme využívať v základnom móde s použitím inertných plynov alebo v reaktívnom móde, kedy povrchy v pracovnej komore sú vystavené pôsobeniu chemických reakcií, a špeciálne chemické zlúčeniny sú potom deponované na substráty. Súčasný rýchly rozvoj plazmatických technológií a procesov je dôsledkom ich každodenného využívania v mikroelektronickom priemysle, najmä pri výrobe kremíkových integrovaných obvodov, v sensorovej technike a pri výrobe mikroelektromechanických (MEMS) prvkov a elementov.

Výroba zložitých CMOS integrovaných obvodov zahŕňa depozíciu vrstiev poly-Si, nitridu kremíka ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), oxidu kremíka ( $\text{SiO}_2$ ), ktoré môžu byť dopované atómami P alebo B, ďalej prípravu Al-Si zliatin, Cu a difúzných bariér ako sú nitridy ťažkovitých kovov. Ďalšie mikroelektronické prvky pre GaAs integrované obvody vyžadujú depozíciu epitaxného GaAs, vrstiev na báze Au/Ge/Ni a  $\text{WSi}_x$ . Niektoré z nich môžu byť pripravované fyzikálnymi metódami ako sú naprašovanie alebo napařovanie, iné vyžadujú chemické metódy ako je plazmou podporovaná chemická depozícia z pár (PE CVD). Reaktívne naprašovanie využívané na depozíciu nitridov a oxidov kovov kombinuje chemický a fyzikálny princíp.

Zhoršujúce sa životné prostredie, rýchly rozvoj automobilovej dopravy a vysoké emisie priemyselných škodlivín podmieňujú zvýšený záujem vedeckých pracovísk o výskum a vývoj senzorov plynu. Veľké množstvo senzorov sa využíva pri monitorovaní životného prostredia. Avšak potreba detekovania rôznych znečisťujúcich látok (ako sú: oxidy uhlíka, dusíka, síry, ozón, uhľovodíky) vyžaduje neustály výskum nových, miniatúrnych, inteligentných, jednoduchých a lacných senzorov, ktoré sú nenáročné na spotrebu elektrickej energie a obsluhu. Takéto senzory musia byť vysoko citlivé, selektívne a stabilné. Polovodivé senzory plynu využívajú ako plynocitlivé materiály oxidy kovov ako sú:  $\text{SnO}_2$ , ZnO,  $\text{TiO}_2$  a  $\text{WO}_3$ , pričom práve  $\text{SnO}_2$  patrí doposiaľ k najviac používaným. Pri takomto type senzora meranie špecifických oxidačných a redukčných plynov je založené na reverzibilných zmenách vodivosti týchto materiálov pri teplotách do  $500^\circ\text{C}$ , pričom využíva chemickú aktivitu ich povrchu.

Súčasný stav na poli polovodivých senzorov plynov zahŕňa sensorové prvky vo forme tenkých a hrubých vrstiev deponovaných na keramickom substráte ako aj integrované mikrosenzory na kremíkových mikromechanických štruktúrach, pričom sa využívajú mikroelektronické technológie a mikrotvarovanie kremíka. Výskum je smerovaný hlavne na vývoj integrovaných senzorov a mikrosystémov. Takéto mikrosenzory plynu obsahujú základné mikroelektromechanické systémy vo forme membrán, mikromostíkov a nosníkov a sú pripravované mikrotvarovaním kremíka za podpory depozičných, leptacích a fotolitografických metód používaných v technológii výroby integrovaných obvodov. Depozičné metódy pre spoľahlivú prípravu nových typov zložených tenkých vrstiev sú stále stredobodom výskumu nových progresívnych plynocitlivých materiálov.

Pri reaktívnom magnetrónovom naprašovaní rôznych zložených tenkých vrstiev (oxidov, nitridov, karbidov) sa často vynárajú problémy, ktoré sú spôsobené silnou interakciou

reaktívneho plynu (kyslíka, dusíka, metánu) s povrchom terča (napr. Al, Ti, Zr, Si). Vytváranie tenkej elektricky nevodivej zlúčeniny na povrchu terča spôsobuje elektrické nestability v obvode napájania magnetrónu, výsledkom čoho je nekontrolovateľný posun pracovných podmienok depozície smerom k módu vytvárania zlúčeniny na povrchu. Tento jav potom spôsobuje prudký pokles depozičnej rýchlosti a je spojený so vzrastom parciálneho tlaku reaktívneho plynu.

Predložená dizertačná práca predstavuje súbor publikovaných prác, ktoré sa venujú technológii a charakterizácii zložených tenkovrstvových nitridov a oxidov kovov pre ich nasadenie v mikroelektronike, sensorike a mikrosystémovej technike. Spoločnou črtou všetkých prezentovaných príspevkov je použitie jednosmerného reaktívneho magnetrónového naprašovania ako vhodného technologického nástroja na vytváranie takýchto tenkovrstvových materiálov. Pozornosť je venovaná nielen výskumu samotnej metódy vytvárania tenkých vrstiev naprašovaním, ale aj príprave, charakterizácii a modifikácii tenkovrstvových štruktúr a ich možných atraktívnych aplikácií.

Experimentálne výsledky a nové vedecké poznatky uvedené v dizertačnej práci boli získané riešiteľským kolektívom v rámci viacerých domácich a medzinárodných projektov pod priamym vedením autora predloženej práce. Medzi tieto projekty môžeme zaradiť nasledovné:

- **VEGA projekt č. 1/4229/97:** *Moderné plazmatické technológie v mikroelektronike a mikromechanike*, 1997-1999, Vedecká grantová agentúra MŠ SR a SAV.
- **VEGA projekt č. 1/7614/20:** *Plazmatické technológie pre mikroelektronické a mikromechanické prvky a systémy*, 2000-2002, Vedecká grantová agentúra MŠ SR a SAV.
- **VEGA projekt č. 1/0170/03:** *Mikrosenzory plynov založené na polovodivých kovových oxidoch a mikromechanických štruktúrach*, 2003-2005, Vedecká grantová agentúra MŠ SR a SAV.
- **VEGA projekt č. 1/3095/06:** *Nanokryštalické tenkovrstvové štruktúry pre sensoriku a mikrosystémovú techniku*, 2006-2008, Vedecká grantová agentúra MŠ SR a SAV.
- **Vedeckotechnický projekt č. AV/1115/2004:** *Plynovocitlivý mikrosystém na báze GaAs mikromechanických štruktúr*, 2004-2007, MŠ SR.
- **APVV projekt č. APVT-20-021004:** *Monoliticky integrovaný mikrosystém na detekciu plynov na báze GaAs mikromechanických štruktúr*, 2005-2007, Agentúra na podporu vedy a výskumu.
- **Bilaterálny projekt Taliansko-Slovensko č. Bil/Tal/SR/STU/06:** *Plyno-citlivý mikrosystém založený na mikromechanických štruktúrach*, 2003-2005, MŠ SR.
- **Bilaterálny projekt Anglicko-Slovensko č. Engl/Slov/04 FEI:** *NiO tenké vrstvy povrchovo modifikované pomocou Pt na detekciu plynov*, 2004-2006, MŠ SR.
- **Bilaterálny projekt Rakúsko-Slovensko č. 34s11:** *Polovodivé tenké vrstvy kovových oxidov pre aplikácie v životnom prostredí*, 2001-2002, Akcia Rakúsko-Slovensko.
- **Bilaterálny projekt Nemecko-Slovensko BMBF:** *NiO vrstvy pre senzory plynu*, 2002-2004, Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- **Bilaterálny projekt Nemecko-Slovensko DAAD č. 4/2004:** *Nové povrchovo modifikované tenké vrstvy pre mikrosenzory plynu na GaAs*, 2005-2006, Deutsche Akademische Austauschdienst a Ministerstvo školstva SR.
- **Bilaterálny projekt Nemecko-Slovensko DAAD č. 10/2006:** *Nanokryštalické tenkovrstvové štruktúry pre sensoriku a mikrosystémovú techniku*, 2007-2008, Deutsche Akademische Austauschdienst a Ministerstvo školstva SR.

## 2. Súčasný stav poznatkov

### 2.1 Jednosmerné reaktívne magnetronové naprašovanie tenkých vrstiev

Jednosmerné (js) reaktívne magnetronové naprašovanie je v súčasnosti veľmi rozšírená technológia prípravy tenkých vrstiev, ktorá umožňuje pripravovať rôzne dvojzložkové materiály (zlúčeniny) ako sú nitridy [1-5], karbidy [6,7], oxidy [8], boridy [9] rôznych kovov. Má však jednu veľkú nevýhodu. Keď parciálny tlak reaktívneho plynu (dusíka, kyslíka, metánu) dosiahne správnu hodnotu na vytvorenie stechiometrickej zlúčeniny na povrchu substrátu, zároveň sa vytvára zlúčenina aj na povrchu terča, čo nazývame otrávením povrchu terča. Reaktívny plyn sa nespotrebováva tak rýchle ako pred otrávením a parciálny tlak reaktívneho plynu prudko stúpa, zatiaľ čo rýchlosť rastu vrstvy podstatne klesá.

Reaktívne naprašovanie zlúčeninových vrstiev môže teda prebiehať v dvoch odlišných pracovných módoch, ktoré korešpondujú so zlúčeninovým a s čistým kovovým povrchom terča. Pri vysokých prietokoch reaktívneho plynu pokrytie povrchu terča prebieha pri rýchlosti, ktorá preyšuje odprašovaciú rýchlosť materiálu terča a povrch terča sa mení na zlúčeninu príslušného materiálu terča. Pri nižších prietokoch reaktívneho plynu odprašovacia rýchlosť materiálu terča je naopak väčšia ako rýchlosť pokrytia povrchu terča a povrch terča je kovový. Ak naprašovanie začína v čistej argónovej atmosfére a prietok reaktívneho plynu sa postupne zvyšuje, sú pozorované malé zmeny v hodnote jeho parciálnom tlaku. Tieto zmeny sú spôsobené veľmi efektívnou getrovacou schopnosťou kovovej vrstvy na substráte a taktiež aj vystavených povrchov v naprašovacej komore. Keď prietok reaktívneho plynu dosiahne maximum čerpacej kapacity kovu, parciálny tlak reaktívneho plynu začína rásť. Pri kritickej hodnote prietoku, parciálny tlak reaktívneho plynu je dosť veľký, aby sa začínala tvoriť príslušná zlúčenina na povrchu terča. Skúsenosti z experimentov ukázali, že pracovný bod, kedy sa vytvára stechiometrická zlúčenina je ten, kde parciálny tlak reaktívneho plynu začína prudko rásť [10]. Znižuje sa množstvo naprašovaného kovu na substráte, ktoré je schopné getrovať reaktívny plyn a hodnota jeho parciálneho tlaku prudko rastie, pokiaľ sa celý povrch terča nepokryje vrstvou prílušnej zlúčeniny. Ďalšie zvyšovanie prietoku reaktívneho plynu spôsobuje lineárne narastanie parciálneho tlaku, pričom sklon je určený čerpacou rýchlosťou reaktívneho plynu čerpaného vákuovými vývevami. Spätné znižovanie prietoku reaktívneho plynu pod kritickú hodnotu bude mať za následok postupné znižovanie parciálneho tlaku, pokiaľ sa nedosiahne druhú dôležitú hodnotu prietoku. Pri tejto hodnote odprašovacia rýchlosť zlúčeniny vytvorenej na povrchu terča preyšuje rýchlosť rastu zlúčeniny. Terč sa postupne čistí od tejto zlúčeniny, znova sa začína uplatňovať getrovanie a parciálny tlak reaktívneho plynu sa znižuje na svoju počiatočnú hodnotu.

Pri príprave tenkovrstvových zlúčenín, ako sú nitridy, oxidy, karbidy a iné, s definovaným zložením, musí byť pri substráte konštantný tok atómov odprašovaného kovu z terča, konštantná hodnota prietoku reaktívneho plynu (konštantný parciálny tlak) a konštantná spotreba reaktívneho plynu rastúcou vrstvou. Uvedené parametre sú navzájom závislé. Tok atómov odprašovaného kovu závisí od stavu terča a ten je závislý od parciálneho tlaku reaktívneho plynu. Prietok reaktívneho plynu pri substráte tiež závisí od parciálneho tlaku. Preto práve parciálny tlak reaktívneho plynu je dôležitý parameter, ktorý ovplyvňuje stabilitu systému.

Na terči a na substráte prebiehajú chemické reakcie, ktoré závisia od parciálneho tlaku. Povrch terča je nepretržite otravovaný a čistený odprašovaním. Tam, kde rýchlosť otravovania preyšuje čistiacu rýchlosť, tak tam existuje otrávený povrch a rastúci parciálny tlak potom zväčšuje otrávenú plochu terča. Vo väčšine prípadov zo zlúčeninového povrchu sa naprašuje oveľa pomalšie ako z kovového a to vedie k znižovaniu toku odprašovaných častíc kovu s narastajúcim tlakom reaktívneho plynu. Toto znižovanie pokračuje dovtedy, kým nie

je celý povrch terča otrávený a potom tok kovu zostáva približne konštantný. Na substráte, pri nízkych tlakoch sa vytvára vrstva, ktorá je limitovaná hodnotou prietoku reaktívneho plynu a využívaním reaktívneho plynu a tak vznikajúca vrstva je bohatá na kov. Keď tlak reaktívneho plynu rastie, prietoková rýchlosť tiež rastie a vrstva sa stáva menej kovovou. Tento proces pokračuje, až kým nie je vrstva nasýtená plynom. Spotreba reaktívneho plynu je potom diktovaná množstvom odprašovaného kovu. Spojením opísaných procesov na terči a na substráte dostávame krivku spotreby reaktívneho plynu v závislosti od parciálneho tlaku.

O tom, že procesy reaktívneho magnetronového naprašovania sú neustále predmetom základného výskumu svedčia aj nedávno publikované rozsiahle štúdie [11-13].

## 2.2 Tenké vrstvy nitridov ťažkotaviteľných kovov v mikroelektronike

Tenké vrstvy nitridov ťažkotaviteľných kovov sa používajú v rôznych aplikáciách ako oteruvzdorné, dekoratívne a optické vrstvy, pretože sa vyznačujú vysokou tvrdosťou a vysokým bodom tavenia. Sú chemicky a tepelne stabilné a majú výborné mechanické vlastnosti [14]. Zároveň sú však veľmi zaujímavé aj ich elektrické vlastnosti, najmä nízky merný odpor, čo je dôvodom pre ich využitie v mikroelektronike pre kontaktné metalizácie v kremíkovej i v gálium arzenidovej technológii [15]. Vďaka nízkemu difúznemu koeficientu sa používajú ako difúzne bariéry medzi prepojovacou sieťou a polovodičovým substrátom [16-22]. Sú perspektívne aj ako hradlový materiál v samozákrytovej MESFET technológii na GaAs, vďaka vysokoteplotnej stabilite elektrických parametrov.

Počas uplynulých 15 rokov MESFETy pripravené na substrátoch z arzenidu gália (GaAs) našli vďaka pokračujúcemu pokroku v technologických procesoch použitie v mikrovlnných a číslicových integrovaných obvodoch. Pritom sa darí zúžitkovať prirodzené výhody GaAs, ako je vysoká pohyblivosť nosičov náboja (elektrónov) a možnosť pracovať so semiizolačnými substrátmi, pre veľmi vysokú hustotu integrácie jednotlivých štruktúr na čipe. Tieto vlastnosti sa s výhodou využívajú, keďže dovoľujú takýmto integrovaným obvodom pracovať s frekvenciami do niekoľko desiatok GHz.

Technológia samozákrytového hradla (SAG) využíva hradlovú štruktúru ako masku pre implantáciu do oblastí kolektora a emitora budúceho MESFET tranzistora. Toto umožňuje: vynechať masku práve pre vytvorenie kolektora a emitora, znížiť počet technologických operácií a tým zvýšiť výťažnosť a spoľahlivosť obvodov. Zároveň sa odstráni prekrytie pri použití fotolitografickej masky, čím sa zníži parazitná kapacita, čo umožňuje zvýšiť pracovnú frekvenciu integrovaného obvodu. Prvky pripravované touto technológiou majú aj ďalšie výborné vlastnosti: vysokú prenosovú vodivosť, veľké prierazné napätie a minimálnu parazitnú kapacitu a odpor hradla. Vysokoteplotný SAG MESFET proces využíva materiál hradla ako samozákrytovú masku pre  $n^+$  implantáciu a samotné hradlo je potom vystavené vysokým žihacím teplotám, zvyčajne 750°C až 950°C. Takéto žihacie teploty sú potrebné na aktiváciu implantovaných prímiesí a na odstránenie implantačného poškodenia v GaAs substráte. Potom nasleduje vytvorenie ohmických kontaktov a FET tranzistor je vyrobený. Uvedený proces však vyžaduje vhodný hradlový materiál, ktorý musí mať mechanickú, metalurgickú a elektrickú stabilitu na rozhraní s GaAs až do uvedených teplôt.

Ak sa podarí zvládnuť a vysvetliť základné interakcie vhodných hradlových materiálov s GaAs pri vysokých teplotách a reprodukovateľnosť prípravy takýchto hradlových kovov, potom jednoduchosť tejto technológie sa stane dôležitým faktorom pre jej prípadné zavedenie do výroby integrovaných obvodov na GaAs. Pozornosť výskumníkov je zameraná hlavne na tenké vrstvy  $WN_x$  [23-28], TiN, ZrN a NbN [29-32] a  $TiWN_x$  [33].

Vrstvy NbN sú mnohými autormi skúmané ako atraktívny materiál pre supravodivú elektroniku, hlavne z hľadiska vysokej kritickej teploty a výborných mechanických vlastností [34-39]. Podľa našich skúmaní takéto vrstvy môžu byť vďaka predpokladanej vysokoteplotnej

stabilite elektrických parametrov perspektívnym materiálom pre vyššie uvedenú aplikáciu v GaAs integrovaných obvodoch. Z tohto dôvodu sme skúmali zloženie, štruktúrne a elektrické charakteristiky NbN tenkých vrstiev, pripravených metódou reaktívneho magnetronového naprašovania, v závislosti od obsahu dusíka v pracovnej atmosfére a teploty žihania. Následne NbN vrstvy, pripravené pri rôznych technologických parametroch, boli použité vo forme Schottkyho kontaktu na GaAs substráte.

### 2.3 Ohmické kontakty pre p-tyt GaN

Po úspešnom vývoji materiálov a rôznych elektronických a optoelektronických prvkov ako sú svetlo emitujúce a laserové diódy na báze nitridu gália (GaN) pretrváva naďalej záujem vedcov o túto oblasť. Avšak v dôsledku veľkej hodnoty šírky zakázaného pásma a nízkej úrovne dopovania je veľmi obtiažne dosiahnuť nízky kontaktný odpor k p-typu GaN. Hoci doposiaľ bolo dosiahnutých veľa zaujímavých výsledkov vo GaN prvkov, stále zostáva ešte mnoho technických problémov neriešených. Vieme, že správanie a vlastnosti prvkov pripravovaných na báze GaN sú silne ovplyvňované hodnotami elektrického kontaktného odporu k polovodiču cez ktorý komunikuje štruktúra s vonkajším prostredím. Aby sa zabránilo zohrievaniu v týchto miestach, čo má často za následok poruchy samotného prvku, vyžaduje sa, aby kontaktný odpor pre svetlo emitujúce diódy bol nižší ako  $10^{-3} \Omega\text{cm}^{-2}$  a pre laserové diódy  $10^{-4} \Omega\text{cm}^{-2}$ . Preto nízky kontaktný odpor je dôležitým faktorom pre väčšinu elektronických a optických prvkov pripravovaných na báze polovodičov s veľkou hodnotou šírky zakázaného pásma. V posledných niekoľkých rokoch bolo publikovaných veľa experimentálnych prác [40-45], v ktorých sa objavilo mnoho kombinácií metalizačných schém, rôznych postupov pred samotnou depozíciou ako aj po nej, vrátane čistiacich procedúr GaN povrchu, žihania metalizačných systémov a rôznych foriem prípravy vhodných tenkých vrstiev. Avšak doteraz žiadna univerzálna nízkoohodporová kontaktná štruktúra k p-typu GaN nebola nájdená.

Snaha získať ohmické kontakty s nízkou hodnotou kontaktného odporu je úzko spätá s problémom vytvoriť p-tyt GaN vrstiev vyznačujúcich sa nízkou hodnotou odporu a vysokou koncentráciou dopujúcich prímiesí. Dvojvrstvové kovové systémy ako sú Ni/Au a Pd/Au boli študované viacerými autormi [46-47]. Tieto boli vybrané z dôvodu stability ich elektrických a tepelných vlastností ako aj ich vysokej výstupnej práce, ktorá je jedným z kritérií na vytvorenie vhodných ohmických kontaktov s nízkou hodnotou kontaktného odporu k p-typom polovodičov. Bolo zistené, že oxidáciou tenkej dvojvrstvy Ni/Au na vzduchu alebo vo vodnej pare môžeme dosiahnuť nízke hodnoty kontaktného odporu, pokiaľ sa zvyšuje transparentnosť metalického systému. Taktiež bolo dokázané, že ďalšie zníženie tohto odporu pre systém Ni/Au, po oxidácii sa jedná o NiO/Au dvojvrstvu, by bolo možné dosiahnuť znížením hrúbky kovových vrstiev na hodnotu okolo 5 nm.

### 2.4 Tenké vrstvy polovodivých oxidov kovov v senzorike a mikrosystémovej technike

V poslednom období sa venuje stále väčšia pozornosť životnému prostrediu, ktoré je znečisťované toxickými plynmi ako sú CO, SO<sub>x</sub> a NO<sub>x</sub> ako aj plynmi CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub>, ktoré spôsobujú skleníkový efekt. S tým úzko súvisí záujem vedy a techniky o mikrosenzory plynov. Ich hlavné použitie je pri monitorovaní rôznych znečisťujúcich látok a taktiež ponúkajú spätnú väzbu na dosiahnutie optimálnych hodnôt rôznych systémov. Následne takéto mikrosenzory môžu byť súčasťou inteligentných mikrosystémov. Mikrosenzory musia zabezpečovať isté požiadavky a vlastnosti podľa typu použitia, medzi ktoré patria citlivosť, selektivita a stabilita prvku, ako aj krátky čas odozvy, jednoduchá príprava, dostatočne dlhá životnosť a nízka cena. Ďalšou nevyhnutnou požiadavkou je miniaturizácia týchto prvkov,



aby sa mohli stať kompatibilnými s mikroelektronickými prvkami a zároveň využívali technológie mikroelektroniky a mikrotvarovania [48]. V závislosti od princípu činnosti senzora plynu (potenciometrický, odporový alebo kapacitný) sa skúmajú rôzne prístupy za účelom vývoja inovatívnych a zlepšených materiálov na detekciu plynov.

Aj v materiálovom výskume zaznamenávame trend smerom k miniaturizácii, avšak z iných príčin, pričom samotné zmenšovanie nie je cieľom, ale prostriedkom k dosiahnutiu nových vlastností materiálov. Podrobný záujem vedcov sa sústreďuje na vývoj nanoštruktúr a nanomateriálov, ktoré sa vyznačujú väčšou povrchovou plochou ako bežné materiály [49-51]. Veľká hodnota povrchovej plochy môže byť dosiahnutá buď prípravou malých častíc alebo zoskupení častíc (klastrov), pri ktorých pomer hodnoty povrchu a objemu každej častice je veľký, alebo vytváraním materiálov s pórmi v povrchu, ktorých veľkosť je neporovnateľne väčšia ako podkladového objemového materiálu.

Ďalším aspektom, ktorý výrazne ovplyvňuje vlastnosti týchto senzorov plynov, je modifikovanie a ovládanie povrchových vlastností nanoštruktúrneho kovového oxidu zavádzaním aditív na báze vzácnych kovov, hlavne Pt a Pd. Popri nich sa skúmajú aj iné kovy ako sú: Ag, Al, Cu, Ni, Au, Sb. Viacerými autormi bolo konštatované, že ich prítomnosť dovoľuje znížiť pracovnú teplotu, zlepšiť citlivosť na rôzne plyny a znížiť čas odozvy [52, 53]. Od týchto katalytických aditív očakávame, že vytvoria zoskupenia častíc (klastre) týchto prvkov, ktoré sú buď vo forme kovu alebo príslušného oxidu v závislosti od spôsobu prípravy vzácneho kovu, interakcie s plynom a od pracovnej teploty senzora. V takomto prípade kontakt vzácneho kovu s polovodivým oxidom modifikuje výšku bariéry, ktorá je charakterizovaná elektrónovou afinitou, hodnotami výstupnej práce a hustotou povrchových stavov lokalizovaných vo vnútri zakázaného pásma polovodiča. Všetky tieto tri príspevky vytvárajú Schottkyho bariéru prostredníctvom vytvorenia ochudobnenej oblasti v polovodičovom povrchu, ktorý je v kontakte so zhlukom častíc použitého kovu. Vo všeobecnosti môžeme tiež tvrdiť, že zlepšenie odozvy na plyn v prípade aditívnych vzácnych kovov môže pochádzať aj z interakcií molekúl plynu s elektrónmi nachádzajúcimi sa blízko hrany valenčného pásma, to znamená cez ovládanie hustoty stavov a následnej zmeny zakrivenia energetického pásma. Pri príprave nanoštruktúrnych katalytických materiálov sa objavuje niekoľko kritických momentov. Medzi ne zaradíme výber vhodnej metódy pre vytvorenie nanoštruktúrneho materiálu s vysokou katalytickou aktivitou a selektivitou, pričom tieto vlastnosti závisia od podkladového materiálu, pracovnej teploty a vlhkosti okolitého prostredia.

Samozrejme, že pri vývoji nových prvkov na detekciu plynov musíme mať na pamäti možnosť ich integrácie do mikroelektromechanických prvkov a systémov pomocou štandardných výrobných postupov a metód používaných v technológii integrovaných obvodov. Tu sa jedná hlavne o využitie mikrotvarovania na vytváranie trojrozmerných mikromechanických štruktúr z polovodičového substrátu alebo na ňom [54]. Takýmto spôsobom je možné realizovať potrebné mikrovyhrievače s nízkou spotrebou elektrického príkonu, čím sa vytvorí vhodná platforma pre depozíciu nanoštruktúrnych materiálov v kombinácii s katalytickými materiálmi.

### 3. Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je sumarizovať metódu jednosmerného reaktívneho magnetrónového naprašovania ako vhodného technologického nástroja na vytváranie zložených tenkovrstvových kovových nitridových a oxidových materiálov pre ich nasadenie v mikroelektronike, senzorike a mikrosystémovej technike. Pozornosť je venovaná nielen výskumu samotnej metódy vytvárania tenkých vrstiev naprašovaním, ale aj príprave, charakterizácii a modifikácii tenkovrstvových štruktúr a ich možných atraktívnych aplikácií. Predstavené a detailne charakterizované sú procesy prebiehajúce na povrchu terča, výbojové parametre, ale aj simulácie pokrytia terča počas reaktívnych procesov v zmesi pracovných plynov  $N_2+Ar$  a  $O_2+Ar$ , ale aj modifikovaný proces jednosmerného reaktívneho magnetrónového naprašovania pomocou pulzného napúšťania reaktívneho plynu. Tenké vrstvy NbN a NiO pripravené pri rôznych tlakovo-prietokových pomeroch v depozičnej aparatuře a pri rôznych parametroch výboja následne charakterizované dostupnými metódami na určenie zloženia, štruktúry a povrchovej morfológie sú buď aplikované v mikroelektronike, ako ohmické a Schottkyho kontakty, alebo v senzorike a v mikrosystémovej technike ako plynovocitlivé, teplotnecitlivé materiály, materiály pre difúzne bariéry.

Dizertačná práca je chronologicky a tématicky usporiadaná tak, že popisuje základné štúdium jednosmerného reaktívneho magnetrónového naprašovania, hľadanie optimálnych technologických podmienok prípravy tenkých vrstiev, charakterizáciu ich vlastností s kontinuálnym prechodom do aplikácií.

Dizertačná práca predstavuje súbor 14 prác publikovaných v medzinárodných karentovaných časopisoch, pričom je rozdelená do troch častí s nasledovnou špecifikáciou čiastkových cieľov:

- **Technológia reaktívneho magnetrónového naprašovanie tenkých vrstiev**
  - Procesy na povrchu terča a tlakovo-prietokové parametre v zmesi  $N_2-Ar$
  - Procesy na povrchu terča a tlakovo-prietokové parametre v zmesi  $O_2-Ar$
  - Modifikované pulzné naprašovanie
- **Tenké vrstvy NbN a NiO pre mikroelektronické aplikácie**
  - Príprava a charakterizácia NbN tenkých vrstiev pre Schottkyho kontakty na GaAs
  - Príprava a charakterizácia NiO tenkých vrstiev pre ohmické kontakty na p-GaN
- **Tenké polovodivé a povrchovo modifikované NiO vrstvy v senzorike**
  - Technológia prípravy a charakterizácia vlastností NiO tenkých vrstiev
  - Procesná technológia prípravy mikrosenzorov plynu
  - Povrchová modifikácia NiO vrstiev pomocou promotérov Pt a Au
  - Vyšetrovanie vlastností senzorových štruktúr na prítomnosť  $NO_2$  a  $H_2$ .
- **Technológia tenkovrstvových mikrovyhrievačov pre MEMS senzorové polia**
  - Návrh a elektrotepelné simulácie mikrovyhrievača na báze GaAs mikromechanických štruktúr
  - Procesná technológia a charakterizácia TiN/Pt mikrovyhrievača
  - Testovanie elektrotepelných vlastností a tepelnomechanickej stability mikrovyhrievača

#### 4. Zvolené metódy spracovania

Z rôznych možných a používaných metód prípravy zložených tenkých vrstiev, ktoré boli uvedené v predchádzajúcej kapitole, sme študovali fyzikálnu depozíciu pomocou jednosmerného reaktívneho magnetrónového naprašovania. Pri výbere metódy sa prihliadalo na možnosť spojiť a využiť naše praktické skúsenosti získané pri depozícii tenkých kovových vrstiev ako aj z existencie reálnych technických podmienok na našom pracovisku. Vákuové depozičné zariadenie, ktoré by vyhovovalo našich požiadavkám musí obsahovať viaceré naprašovacie magnetrónové zdroje a v interiéri musí byť umiestnený držiak vzoriek pre postupnú depozíciu viacerých vzoriek bez prerušenia vákuu, pričom je nutné zabezpečiť presun podložiek na presne definované miesto pred naprašovací magnetrón. Na depozíciu sme používali upravené naparovacie zariadenie B 55.3 (fy H-V Dresden). Do daného zariadenia boli namontované štyri prírubové naprašovacie magnetróny pre rôzne veľkosti terča (2, 3 a dve 4"). Ako východiskové materiály pre prípravu tenkých vrstiev sme používali kovové terče minimálnej čistoty 99,9%. Testovanie a optimalizácia pracovných parametrov týchto zdrojov ako aj technické úpravy zlepšenia vákuovej aparatury, rozvodu pracovných plynov a zmeny interiéru boli realizované autorom práce a boli podrobne popísané v práci [55].

Pri depozícii tenkých vrstiev sme používali špeciálne plyny vysokej čistoty (99,999%), ktorých hodnoty prietokov pred transportom do vákuovej komory boli ovládané nezávislými hmotnostnými prietokometrami, pričom celkový pracovný tlak bol regulovaný automatickým napúšťacím zariadením pomocou piezokeramického ventilu so spätnou väzbou cez vákuometer. Hrúbka pripravovaných vrstiev bola meraná mechanickým snímačom hrúbok Talystep (fy Rank Taylor Hobson) a vyhodnocovaná systémom Talydata 2000.

Tvarovanie tenkovrstvových štruktúr bolo realizované optickou litografiou využitím expozičného zariadenia KSM MJB 3HP Mask Aligner (fy Karl Suss). Pri tvarovaní bola najčastejšie použitá technika lift-off pomocou rôznych pozitívnych a negatívnych fotorezistov. Fotolitografické masky pre jednotlivé technologické úrovne boli navrhované v programovom prostredí AutoCad a následne vyrobené pomocou elektrónového litografu na Ústave informatiky SAV v Bratislave.

Žihacie procesy boli vykonávané podľa účelu použitia pripravených štruktúr, pričom sme využívali rýchle izotermálne žihanie (RTA) ako aj klasické žihania v peci. Žihacie podmienky (teplota, čas a prostredie) záviseli od typu materiálu a jeho použitia. Túto operáciu sme využívali na stabilizáciu parametrov tenkých vrstiev ako aj pri skúmaní vplyvu teploty na vlastnosti materiálov.

Štúdium podmienok prípravy, parametrov výboja, prebiehajúcich procesov pri reaktívnom magnetrónovom naprašovaní v zmesi dusíka a argónu a kyslíka a argónu ako aj sledovanie ich vplyvu na procesy na povrchu terča počas depozície si vyžadovali vyvinúť a rozpracovať potrebné metodiky a modely. Taktiež bolo nevyhnutné rozvinúť spoľahlivé a jednoduché metodiky elektrickej charakterizácie tenkovrstvových štruktúr a v neskoršom období aj elektrotepelnú charakterizáciu sensorových štruktúr a hodnotenie ich odoziev na rôzne druhy plynov nielen priamo na čípoch štruktúr, ale aj na zapúzdrených sensorových prvkoch. Navrhnuté a realizované techniky a metodiky taktiež vytvárali podmienky pre optimalizáciu technologických procesov prípravy rôznych typov zložených tenkých vrstiev ako aj tenkovrstvových štruktúr pre mikroelektronické aplikácie a mikrosenzory plynov. Experimentálne výsledky a získané poznatky uvedené v predloženej dizertačnej práci boli získané na vzorkách výlučne pripravených v laboratóriách Katedry mikroelektroniky. Dosiahnuté pôvodné výsledky sú prezentované v jednotlivých článkoch, ktoré tvoria predmet dizertačnej práce.

Nanoštruktúrne analýzy, analýzy zloženia, pozorovania povrchov, optické metódy ako aj niektoré charakterizácie elektrických vlastností mikroelektronických štruktúr a sensorových

elementov boli uskutočnené v rámci priamej vedeckej spolupráce s domácimi a zahraničnými partnermi. Augerová elektrónová spektroskopia (AES) nám poskytovala užitočné informácie o chemickom zložení vrstiev, hĺbkových koncentračných profiloch viacvrstvových systémoch a bola použitá i pri vyšetrení tepelnej stability Schottkyho kontaktov. Metóda hmotnostnej analýzy sekundárnych iónov (SIMS) umožnila odhaliť jemné zmeny v koncentrácii prvkov pri pulzných naprašovacích procesoch ako aj procesy na rozhraní ohmických kontaktov na GaN. Metóda Rutherfordovho spätného rozptylu (RBS) uskutočnená na pracovisku SÚJV Dubna (Rusko) nám pomohla pri určovaní zloženia a stechiometrie NbN aj NiO vrstiev pripravených a spracovaných pri rôznych technologických podmienkach. Na odhalenie rôznych chemických väzieb prvkov prítomných v NiO tenkých vrstvách sme aplikovali metódu röntgenovej fotoelektrónovej spektroskopie (XPS). Pri nanoštruktúrnych pozorovaniach sme pravidelne využívali zariadenia röntgenovej difrakcie (XRD) a transmisnej elektrónovej mikroskopie (TEM) vybavené o moduly na elektrónovú energiovú disperznú analýzu (EDX) a spektroskopiu charakteristických strát elektrónov (EELS) nachádzajúce sa na partnerskom Inštitúte pre mikro a nanotechnologie, TU Ilmenau (Nemecko). Tieto metódy sa plne osvedčili nielen pri identifikácii jednotlivých kryštalografických fáz, veľkostí kryštálov, ich orientácii, určovaní mriežkových parametrov, ale aj pri odhaľovaní a distribúcii nanočastíc na aktívnych plochách NiO vrstiev. Nezanedbateľný úžitok poskytli aj pozorovania povrchovej morfológie pomocou rastrovacieho elektrónového mikroskopu (SEM) v rôznych módoch činnosti a atómového silového mikroskopu (AFM). Bilaterálna spolupráca s Inštitútom mikrosystémovej techniky IMM CNR Lecce (Taliansko) bola zameraná na testovanie senzorových štruktúr v širokom intervale teplôt a koncentrácií plynov.

## 5. Výsledky dizertácie s uvedením nových poznatkov

Predložené publikované práce predstavujú pôvodné vedecké poznatky a získané výsledky nielen o metóde reaktívneho magnetrónového naprašovania, ale aj o technológii prípravy tenkých vrstiev pomocou tejto metódy, pričom dôraz je kladený na samotné vlastnosti takto pripravených zložených vrstiev a ich aplikovanie v mikroelektronike, senzorike a mikrosystémovej technike. Tieto práce zahŕňajú experimentálny výskum pracovných parametrov samotnej depozície, opisujú a modelujú procesy na povrchu terča počas tvorby tenkej vrstvy v zmesi reaktívneho a inertného plynu, aby zároveň prispeli aj k modifikovaniu tejto metódy prípravy tenkej vrstvy pomocou pulzného napúšťania reaktívneho plynu. Nájde tu práce zamerané na technológiu prípravy NbN a NiO tenkých vrstiev a výskum ich vlastností ako aj možnosti ich uplatnenia v mikroelektronike ako ohmické kontakty pre p-typ GaN a Schottkyho kontakty na GaAs. Značná pozornosť je venovaná príprave a vlastnostiam nanoštruktúrnych tenkých vrstiev na báze NiO, ktoré sú zároveň povrchovo modifikované pomocou Pt a Au, pričom sa využívajú ako plynovocitlivé materiály, ktoré umožňujú detegovať plyny ako NO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>. Zvládnutie techniky vytvárania rôznych typov tenkých vrstiev nám umožnilo predstaviť aj koncept zavesených mikromechanických štruktúr vhodných pre MEMS senzorové polia.

V ďalších častiach tejto kapitoly sú jednotlivé riešené oblasti rozpísané a sú tu zdokumentované dosiahnuté nové vedecké poznatky a experimentálne výsledky.

### 5.1 Reaktívne magnetrónové naprašovanie a procesy na povrchu terča počas tvorby tenkých NbN a NiO vrstiev

Na základe experimentálneho merania prietokových pomerov pracovných plynov počas depozície NbN pre rôzne čerpacie rýchlosti vákuového systému a s použitím teórie sme určili vhodné prietokovo-tlakové parametre pre reaktívne magnetrónové naprašovanie a stanovili sme priemernú hodnotu kritickej čerpaciej rýchlosti pre danú aparatúru [1]. Potvrdili sme, že pri čerpacích rýchlostiach väčších ako je kritická, nedochádza k hysterézii v tlakovo-prietokových pomeroch a depozícia prebieha plynule a definovane.

Vytvorili sme model popisujúci zmeny na povrchu terča počas depozície NbN vrstvy, umožňujúci vypočítať stupeň pokrytia terča nitridom v závislosti na obsahu dusíka privádzaného do vákuovej komory, pričom parametrami boli výbojový prúd magnetrónu a celkový tlak v naprašovacej komore. Numerickým riešením modelu bola určená závislosť stupňa pokrytia terča od podielu dusíka v pracovnom plyne pre rôzne výbojové prúdy a celkové tlaky, ako aj závislosť rýchlosti rastu od podielu dusíka pre rôzne výbojové prúdy.

Z priebehov získaných numerickým riešením vytvoreného modelu vyplynulo, že stupeň pokrytia terča výrazne rastie pri zvýšení obsahu dusíka v pracovnom plyne nad 2 %, že rast výbojového prúdu magnetrónu značne redukuje pokrytie povrchu terča nitridom, zatiaľ čo zvýšenie celkového tlaku iba mierne zvyšuje toto pokrytie.

Využívajúc predchádzajúce skúsenosti s charakterizáciou procesu reaktívneho magnetrónového naprašovania pri príprave tenkých vrstiev nitridov ťažkotaviteľných kovov, sme študovali podobné procesy aj pri tvorbe tenkých vrstiev oxidu niklu (NiO). Implementovali sme model popisujúci zmeny na povrchu Ni terča počas reaktívneho procesu naprašovania v závislosti od obsahu kyslíka v naprašovacej zmesi, pričom parametrom bol príkon dodávaný do terča [2]. Tento model bol použitý na výpočet rýchlosti rastu NiO vrstvy, pričom bola zaznamenaná dobrá zhoda s experimentálne nameranými hodnotami depozičnej rýchlosti.

Zmeny v depozičnej rýchlosti indikovali proces oxidácie povrchu Ni terča. Keď bol obsah kyslíka vyšší ako 10%, pozorovali sme začiatok procesu pokrytia terča oxidom. Tento proces

spôsobil zníženie rýchlosti rastu vrstvy v dôsledku nižšej hodnoty rozprašovacieho výťažku pre oxid.

Zistili sme, že zvyšovanie obsahu kyslíka v naprašovacej zmesi redukuje rýchlosť rastu vrstvy (z 30 na 18 nm/min.), mení obsah kyslíka vo vrstve a spôsobuje zmenu kryštalografickej štruktúry z amorfnej fázy na polykryštalickú kubickú NiO fázu. Minimálna hodnota merného odporu ( $160 \Omega\text{cm}$ ) bola dosiahnutá v rozsahu 30 až 50% obsahu kyslíka a korelovala so spomenutou zmenou v kryštalografickej štruktúre.

V snahe prispieť k riešeniu problémov pri reaktívnom magnetrónovom naprašovaní, sme navrhli a popísali proces modifikovaného reaktívneho magnetrónového naprašovacieho procesu tvorby NiO pomocou pulzného napúšťania reaktívneho plynu [3]. Modifikovaný proces spočíval v periodicky sa opakujúcej a časovo modulovanej zmene hodnoty prietoku kyslíka, pričom počas zastavenia prietoku kyslíka dochádza k odstraňovaniu oxidu vytvoreného na povrchu Ni terča. Študovali sme vplyv rôznych hodnôt prietoku kyslíka na hodnotu potenciálu terča, depozičnú rýchlosť a zloženie NiO vrstvy.

Bolo zistené, že modulovanie prietoku kyslíka v čase spôsobuje oscilácie parciálneho tlaku kyslíka, vyvoláva zmeny v hodnotách potenciálu Ni terča a depozičnej rýchlosti. Dôležitým parametrom v tomto procese je doba, kedy je prietok kyslíka zastavený, pretože počas nej dochádza k odstráneniu vzniknutého oxidu z povrchu terča a taktiež pracovný mód naprašovania. Dokázali sme, že ak chceme zvýšiť rýchlosť rastu vrstvy v oxidovom naprašovacom móde, tak modulovanie hodnoty prietoku kyslíka je vhodnou metódou. Navyiac, táto metóda ovplyvuje aj chemické zloženie vrstvy a tým umožňuje prípravu tenkých NiO vrstiev s rôznymi pomermi Ni /O.

## 5.2 Tenké vrstvy NbN a NiO v mikroelektronike

### 5.2.1 NbN tenké vrstvy pre Schottkyho kontakty na GaAs

V práci [4] sme realizovali vyšetrenie vplyvu obsahu dusíka v naprašovacom plyne a vysokoteplotného rýchleho žihania vo vákuu na zloženie, štruktúru a elektrické vlastnosti NbN tenkých vrstiev, pričom som sa snažil nájsť vzájomné korelácie medzi parametrami prípravy a vlastnosťami vrstiev.

Potvrdili sme, že zmenou obsahu dusíka je možné ovládať vlastnosti NbN tenkých vrstiev. Zistili sme, že obsah dusíka v NbN vrstve závisí od obsahu dusíka v naprašovacom plyne, avšak pri hodnotám obsahu dusíka v plyne nad 10% sa jeho obsah vo vrstve zväčšuje len nepatrne. Ukázali sme, že pri najnižších (2 a 5%) a najvyšších (20%) koncentráciách dusíka v zmesi naprašovacích plynov majú vznikajúce NbN vrstvy amorfnú štruktúru. NbN vrstvy pripravené pri 10 a 15% obsahu dusíka sa vyznačovali kubickou NbN kryštalickou štruktúrou s dominantnou (111) a slabšou (200) čiarou. Rýchle izotermálne žihanie pri  $850^\circ\text{C}$  počas 10 s spôsobilo zmeny v kryštalografickej štruktúre NbN vrstiev pripravených pri 5 a 15% koncentrácii dusíka v pracovnej zmesi plynov. Pozorovania na TEM mikroskope odhalili jemnozrnnú štruktúru s veľkosťou zŕn v rozsahu 3 až 13 nm a hustotou  $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .

Na základe vykonaných analýz a meraní sme identifikovali NbN vrstvy s optimálnymi vlastnosťami, ktoré vznikajú pri 10% obsahu dusíka. V tomto prípade NbN vrstvy sa vyznačovali kubickou NbN štruktúrou a najnižším merným odporom.

Aby sme demonštrovali vhodnosť nami pripravovaných NbN tenkých vrstiev ako hradlového materiálu v samozákrytovej MESFET technológii na GaAs, pripravili sme vertikálne kruhové Schottkyho kontakty rôznych priemerov (od 400 do 800  $\mu\text{m}$ ) technikou lift-off na epitaxné GaAs substráty dotované Te s koncentraciou  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Analyzovali sme vplyv žihacej teploty na zloženie a štruktúru rozhrania a na elektrické vlastnosti Schottkyho kontaktu [5].

Spoločným znakom všetkých NbN/GaAs Schottkyho kontaktov bolo, že po depozícii vykazovali zlé I-V charakteristiky, ktoré sa však žíhaním zlepšujú. Bolo dokázané, že stav povrchu GaAs pred depozíciou má dôležitú úlohu pri tvorbe Schottkyho kontaktu s dobrými elektrickými vlastnosťami. Zistili sme, že teplotná stabilita NbN/GaAs Schottkyho kontaktov je závislá od obsahu dusíka v pracovnom plyne počas depozície, a tým aj od obsahu dusíka v samotnej vrstve. Konštatovali sme, že so zvyšujúcim sa obsahom dusíka použitým pri príprave NbN vrstiev, klesá výška bariéry a stúpa hodnota idealizačného koeficientu Schottkyho kontaktov. Schottkyho kontakty pripravené s NbN vrstvami pri dvoch najnižších obsahoch dusíka v pracovnom plyne (2 a 5%) boli stabilné do 900°C, zatiaľ čo ostatné spolu s Nb vrstvou vykazovali teplotnú stabilitu elektrických parametrov do 850°C. Zlepšenie teplotnej stability NbN/GaAs kontaktov oproti Nb/GaAs diódam sme prisúdili prítomnosti dusíkových atómov, ktoré zabraňujú vydifundovaniu Ga a As atómov, čiže NbN vrstva pôsobí ako difúzna bariéra.

Najlepšie elektrické parametre Schottkyho kontaktov s NbN vrstvou, dosiahnuté pri najvyššej žihacej teplote (900°C), boli nájdené pri najnižšom obsahu dusíka (2%) a to:  $\phi_B = 0,77$  eV a  $n = 1,11$ . Povrch kontaktov bol hladký a kovovo lesklý bez morfológických defektov. Dokázali sme, že vrstvy NbN pripravené pri nízkych obsahoch dusíka v pracovnom plyne (2 a 5%), sú vhodné pre Schottkyho kontakty na GaAs. Teplota 900°C počas 10 s nespôsobuje žiadne metalurgické zmeny na rozhraní a diódy majú pri nej výborné elektrické vlastnosti.

### 5.2.2 NiO tenké vrstvy pre ohmické kontakty na p-GaN

Keďže v predchádzajúcich prácach sme podrobne preskúmali technológiu prípravy NiO tenkých vrstiev ako aj vplyv rôznych parametrov prípravy na ich vlastnosti, rozhodli sme sa NiO aplikovať ako potenciálny materiál pre ohmický kontakt a takto prispieť pôvodnými poznatkami k riešeniu problematiky nízkoodporových ohmických kontaktov na relatívne novom polovodivom materiáli akým GaN v posledných rokoch nepochybne je. Naša pozornosť sa sústredila na vyšetovanie vplyvu tvorby NiO<sub>x</sub> vrstvy na elektrické vlastnosti oxidovaných Au/Ni/p-GaN ohmických kontaktov. Au/NiO<sub>x</sub> metalizačný systém s nízkou koncentráciou kyslíka (menšou ako 1 at%) v NiO<sub>x</sub> tenkej vrstve bol pripravovaný magnetronovým naprašovaním a žíhaný v zmesi plynov N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> a v čistom N<sub>2</sub>. Použili sme metódu AES a SIMS na vytvorenie hĺbkových koncentračných profilov a spolu v kombinácii s pozorovaniami na TEM a SEM a elektrickými meraniami kontaktového odporu pomocou metódy CTLM metalizačného systému sme sa snažili vysvetliť zníženie hodnoty kontaktového odporu ako dôsledok žihacej procedúry [6]. Zároveň sme skúmali vplyv čistenia p-GaN povrchu pred depozíciou metalizačného systému na hodnoty kontaktového odporu.

Proces chemického čistenia povrchu p-GaN v roztoku HCl:H<sub>2</sub>O (1:1) po dobu 2 min pred depozíciou Au-NiO<sub>x</sub> sa ukázal ako optimálny. Pri jeho použití boli dosiahnuté najnižšie hodnoty kontaktového odporu, pre vzorky žíhané v zmesi N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> to bolo  $8,0 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^{-2}$  a pre vzorky žíhané v čistom N<sub>2</sub>  $6,9 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^{-2}$ . Proces žíhania sa realizoval pri teplote 500°C po dobu 2 min.

AES a SIMS hĺbkové profily ako aj TEM pozorovania odhalili, že žíhanie v zmesi N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> spôsobuje transformáciu deponovaného kontaktového systému Au/NiO<sub>x</sub>/p-GaN do štruktúry Au/p-NiO/p-GaN. Naopak žíhanie v čistom N<sub>2</sub> mení deponovaný kontaktový systém na Au-Ni/p-NiO/p-GaN a Ni/p-NiO/p-GaN. V prípade oboch typov žíhania, čiže v čistom N<sub>2</sub> ako aj v zmesi N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>, je ohmický charakter správania sa kontaktov spôsobený vytvorením tenkej NiO vrstvy na rozhraní kov/p-GaN. Vytvorenie kontaktovej štruktúry kov/p-NiO/p-GaN, ktorá vznikla po žíhaní v čistom N<sub>2</sub> ako aj v zmesi N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> z deponovaného systému

Au/NiO<sub>x</sub>/p-GaN, je hlavným činiteľom zodpovedným za ohmický charakter metalizačného systému. K zníženiu hodnoty kontaktového odporu tiež prispievajú Ga vakancie nachádzajúce sa v oblasti rozhrania kov/p-GaN, ktoré vznikajú po difúzii Ga do kovovej vrstvy. Zlúčeniny Ga-Ni-O a MgO vznikajúce v priebehu depozície majú negatívny vplyv na ohmické vlastnosti samotného kontaktu.

AES koncentračné hĺbkové profily kontaktov žíhaných v čistom N<sub>2</sub> ukázali, že dobré ohmické vlastnosti kontaktovej štruktúry nie sú podmienené kompletnou oxidáciou Ni tenkej vrstvy. Vyššie hodnoty kontaktového odporu vzoriek žíhaných v zmesi plynov N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> môžeme zdôvodniť menšou efektívnou plochou samotného kontaktu na rozhraní vrstva/p-GaN v dôsledku vytvorenia medzier.

### 5.3 Tenké NiO vrstvy v senzorike

#### 5.3.1 Technológia a vlastnosti NiO vrstiev a ich použitie na detekciu plynov

Po počiatočnom štúdiu procesov na povrchu Ni terča a výbojových pomerov pri reaktívnom magnetronovom naprašovaní v zmesi pracovných plynov Ar + O<sub>2</sub> logicky vyvstala otázka, či pokračovať v príprave samotných tenkých vrstiev NiO pri rôznych pracovných podmienkach a následne charakterizovať ich vlastnosti, ale aj nájsť pre takéto vrstvy zmysluplnú aplikáciu. Hľadanie vhodnej aplikácie nám umožnili vlastnosti NiO, ktoré sú charakteristické excelentnou chemickou stabilitou, ako aj zaujímavými optickými, elektrickými a magnetickými vlastnosťami. NiO je polovodivý materiál p-typu so šírkou zakázaného pásma v intervale 3,6÷4,0 eV a môžeme ho používať ako antiferomagnetický materiál, transparentný vodivý materiál, materiál pre elektrochromické zobrazovacie prvky, ale tiež ako funkčný materiál v chemických senzoch. NiO vrstvy môžeme pripravovať rôznymi fyzikálnymi a chemickými metódami, ako sú najmä reaktívne naprašovanie alebo chemická depozícia z pár. Práve výber metódy a parametre depozičného procesu v rozhodujúcej miere ovplyvňujú vlastnosti vznikajúcej tenkej vrstvy.

V našich prvých experimentoch sme sústredili pozornosť na charakterizáciu výbojových podmienok a vyšetovanie vplyvu obsahu kyslíka v naprašovacom plyne na vlastnosti NiO tenkých vrstiev [7]. Na základe merania I-V charakteristík počas depozície pri rôznom obsahu kyslíka a rôznej čerpacej rýchlosti sme stanovili tri charakteristické módy naprašovania. Oxidový naprašovací mód sa vyznačoval nízkymi hodnotami napätia na terči (275 ÷ 295 V), zatiaľ čo pri kovovom naprašovacom móde sa zvýšili tieto hodnoty na 370 ÷ 375 V. Medzi oboma módmami sa nachádza prechodový naprašovací mód identifikovateľný prudkým nárastom napätia. Berúc do úvahy tieto módy naprašovania, skúmali sme tenké NiO vrstvy pripravované v kovovom a oxidovom móde, pričom obsah kyslíka sa menil od 20 do 60 % [8]. Vrstvy, pripravené v kovovom móde pri vysokej hodnote napätia terča, boli polykryštalickej štruktúry s takmer stechiometrickým zložením. Naproti tomu NiO vrstvy, deponované v oxidovom móde pri nízkom napätí terča, boli amorfné a obsahovali prebytok kyslíka. Chemické zloženie bolo charakterizované pomerom atómov niklu a kyslíka, pričom tento pomer sa menil od 0,71 do 1,02 a bol funkciou napätia terča. Zistili sme, že všetky skúmané NiO vrstvy boli polovodivé a ich vodivosť vzrástla o 4 rády pri zmene teploty od 25 do 350°C. Bolo dokázané, že povrchová morfológia NiO vrstiev je ovplyvnená nielen vlastnosťami použitého substrátu, ale aj naprašovacím módom prípravy tenkej vrstvy. NiO vrstvy pripravované v kovovom naprašovacom móde boli hladšie v porovnaní s vrstvami pripravenými v oxidovom naprašovacom móde a priemerné hodnoty drsnosti týchto vrstiev boli podobné ( $R_a = 30,7$  a  $29,4$  %). Naproti tomu hodnoty drsnosti vrstiev pripravených v oxidovom naprašovacom móde boli vyššie ( $R_a = 34,7$  a  $31,6$  %). Domnievame sa, že nižšie hodnoty priemernej drsnosti boli spôsobené rastom zŕn vo vrstvách NiO v kovovom



naprašovacím móde, ako aj vyplňaním medzizrnového priestoru menšími zrnami v prípade vrstiev so stechiometrickým zložením.

V práci [9] sme podrobne preskúmali vplyv vysokoteplotného žihania ( $500 \div 900^\circ\text{C}$ ) na štruktúrne vlastnosti a povrchovú morfológiu NiO vrstiev pripravených v dvoch naprašovacích módoch. Pozorovali sme, že všetky NiO vrstvy pripravené v kovovom móde sa po žihaní pri  $700^\circ\text{C}$  stávajú úplne polykryštalické, zatiaľ čo štruktúra vzoriek pripravených v oxidovom móde sa menila z amorfnej fázy na kubickú polykryštalickú NiO fázu. Pri vzorkách pripravených v kovovom móde sme zameranali silnú (200) difrakčnú čiaru, ktorá identifikovala preferenčnú kryštalografickú orientáciu v smere [100]. So zvyšujúcou sa žihacou teplotou jej intenzita rástla. Naproti tomu, vzorky pripravené v oxidovom móde ukázali silnú (111) difrakčnú čiaru a jej intenzita taktiež rástla so zvyšujúcou sa teplotou žihania. Na základe výpočtov sme indikovali textúru pre NiO vrstvy pripravené v kovovom móde v kryštalografickom smere [100].

Aby sme vyhodnotili vplyvy depozičných podmienok a preskúmali perspektívnosť použitia NiO vrstiev ako senzora citlivého na oxid dusičný ( $\text{NO}_2$ ) pripravili sme senzorové štruktúry na keramických substrátoch, ktoré obsahovali vyhrievače a interdigitálne elektródy. Po depozícii NiO citlivých vrstiev a ich vyžihaní boli takéto senzory namontované do štandardných TO-8 púzdiar. Skúmali sme ich odozvu na  $\text{NO}_2$  pri nízkych koncentráciách od 1 po 10 ppm pri rôznych pracovných teplotách od izbovej po  $400^\circ\text{C}$  v suchom vzduchu alebo pri relatívnej vlhkosti 50% [8]. Bola pozorovaná vysokocitlivá odozva NiO senzorových štruktúr v danom intervale  $\text{NO}_2$  koncentrácií pri nízkych pracovných teplotách ( $160 \div 200^\circ\text{C}$ ). Rozdielne pripravené NiO senzorové štruktúry vykazovali podobné senzorové charakteristiky. Najlepšie výsledky boli zaznamenané pri senzorech pripravených v oboch naprašovacích módoch (kovovom a oxidovom) pri vyšších obsahoch kyslíka v zmesi naprašovacích plynov (40 a 60% obsahu kyslíka) pri optimálnych pracovných teplotách. Bolo zistené, že vlhkosť v meracej zmesi zlepšuje odozvu NiO senzorov na prítomnosť  $\text{NO}_2$ . Najcitlivejšia NiO senzorová štruktúra je schopná detekovať minimálnu kritickú koncentráciu  $\text{NO}_2$  0,04 ppm.

### 5.3.2 Technológia a vlastnosti povrchovo modifikovaných NiO vrstiev a ich použitie na detekciu plynov

Po úspešnom zvládnutí prípravy nanokryštalických tenkých NiO vrstiev pri rôznych technologických parametroch sme našu pozornosť sústredili na ich následné povrchové modifikovanie pomocou veľmi tenkých katalytických promotérov typu Pt a Au [10-12]. Toto spracovanie sme uskutočňovali pomocou magnetronového naprašovania cez fotolitografickú masku, geometria ktorej pozostávala zo siete otvorov štvorcového tvaru  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  s rozstupom okolo  $40 \mu\text{m}$ . Týmto spôsobom sme naprašovali tenké Pt vrstvičky s hrúbkou asi 3 a 5 nm [10,11] ako aj Au vrstvičky s hrúbkou asi 1 a 7 nm [12]. Množstvo týchto promotérov na povrchu NiO sme ovládali na základe optimalizovaného času depozície, pričom hrúbku vzniknutých vrstvičiek sme merali pomocou AFM mikroskopu. Keďže dokázať prítomnosť takýchto malých množstiev materiálu na povrchu bolo nevyhnutné s ohľadom na ich predpokladaný vplyv na detekčné vlastnosti, použili sme viaceré dostupné analytické metódy ako boli: XRD, TEM, SEM, AES a AFM.

Pozorovania štruktúry nemodifikovaných ako aj Pt povrchovo modifikovaných NiO tenkých vrstiev pomocou XRD nám odhalili polykryštalický charakter vrstiev a ich kryštalizáciu v kubickej NiO fáze. Zistili sme, že v prípade povrchovo modifikovaných vrstiev dochádza k potlačeniu intenzít všetkých zastúpených NiO difrakčných čiar v spektre, ale na druhej strane žiadna difrakčná čiara odpovedajúca polohe Pt nebola pozorovaná. V tomto prípade hrúbka vrstvy bola príliš malá na to, aby umožňovala jeho odpovedajúcu

identifikáciu [10]. Preto sme na ďalšie podrobnejšie skúmanie štruktúrnych vlastností použili TEM mikroskop. Opäť sme z elektrónových difrakčných spektier identifikovali kubickú NiO fázu. Pozorovania jednoznačne potvrdili, že oba typy vrstiev (nemodifikované ako aj modifikované pomocou Pt) sú tvorené nanokryštálmi a amorfnou fázou a vykazujú jemnozrnnú štruktúru. Veľkosť nanokryštálov sa pohybovala od niekoľko jednotiek nm až po 10 nm v závislosti od polohy vo vrstve, pričom zrná boli čiastočne spájané do klastrov [11]. Aj keď sme predpokladali, že zaznamenáme Pt signál, tento v difrakčnom obraze nebol pozorovaný. Avšak na základe zistených malých zmien mriežkových konštánt v prípade Pt modifikovaných vrstiev predpokladáme, že Pt častice pokrývajúce NiO vrstvu sa vyskytujú v amorfnej fáze a vytvárajú konglomeráty. Toto konštatovanie potvrdila aj následná EELS analýza vykonaná počas TEM pozorovania, ktorá odhalila distribúciu Ni, O a Pt elementov, pričom Pt frakcia bola rovnomerná rozptýlená na povrchu NiO vrstvy a Pt sa vyskytovala vo forme ostrovčekov. Výsledky analýzy chemického zloženia realizované metódou AES boli v zhode s vyššie uvedenými závermi a preukázali prítomnosť Pt ako aj jej ostrovčekovitý charakter [11]. Nakoniec pôrovnosť Pt vrstvy ako aj skutočnosť, že hustota pórov pri depozícii 3 nm hrubej Pt vrstvičky je oveľa vyššia v porovnaní s 5 nm Pt vrstvičkou, bola pozorovaná na SEM mikroskope v móde sekundárnych elektrónov. V prípade 5 nm Pt vrstvičky Pt ostrožky pokrývali až 85÷90% povrchu NiO vrstvy. Aj merania na AFM mikroskope sa ukázali ako efektívne. Pomohli nám pri určovaní hrúbky deponovaných tenkých Pt a Au vrstvičiek, ako aj pri meraní drsnosti povrchu a veľkostí zrn. Podľa kvantitatívnej analýzy z AFM meraní sme určili, že hodnoty drsnosti povrchu záviseli na hrúbke Pt vrstvičky. Vzorky s 5 nm hrubou Pt vrstvičkou sa vyznačovali hladším povrchom s malými zrnami (okolo 22 nm) a s priemernou drsnosťou povrchu  $R_a = 29,8\%$ . Naproti tomu, povrch NiO vrstvy s 3 nm Pt vrstvičkou zobrazoval zrná vytvárajúce relatívne väčšie kryštality, pričom hodnota drsnosti bola vyššia ( $R_a = 32,7\%$ ) [10].

V prípade povrchovej modifikácie NiO vrstiev pomocou Au vrstvičiek sme jednoznačne dokázali ich prítomnosť nielen na základe pozorovaní na TEM mikroskope, ale aj SEM mikroskope [12]. Z HRTEM analýzy vzoriek po depozícii 1 nm Au vrstvičky sme zistili, že táto je nespojitá a neuzavretá. Avšak vplyvom žihania sa Au nanočastice zhluokovali a vytvárali uzavreté klastre kruhového tvaru s priemerom niekoľko desiatok nm a boli rovnomerne rozptýlené po povrchu NiO vrstvy. EDX spektrá zosnímané počas TEM pozorovania potvrdili, že sa jedná o Au. V tomto prípade aj SEM mikroskop zobrazil zreteľne definované Au zhlučky na povrchu NiO vrstvy.

Štúdium vplyvu povrchovej modifikácie NiO vrstiev pomocou Pt a Au katalytických promotérov na detekčné vlastnosti sme realizovali na podobných senzorových štruktúrach, ktoré boli už popísané v predchádzajúcej časti. Našu pozornosť sme upriamili na detekciu vodíka, pričom sme vyšetrovali vplyv pracovnej teploty senzora v rozsahu 150 ÷ 420°C a koncentrácie vodíka od 500 po 5 000 ppm. V prípade nemodifikovaných NiO senzorových štruktúr sme načrtli mechanizmus znižovania elektrickej vodivosti polovodivého NiO materiálu, ktorý prebieha pri expozícii redukčným plynom H<sub>2</sub>. Meraním elektrickej odozvy na prítomnosť vodíka sme preukázali, že Pt povrchovo modifikované NiO senzorové štruktúry dosahovali v celom skúmanom rozsahu pracovných teplôt až o rád vyššie hodnoty. Tým sme potvrdili skutočnosť, že prídanie naprašovaných tenkých Pt vrstvičiek pôsobí pre NiO ako optimálny promotér. Domnievame sa, že zlepšenie odozvy na prítomnosť H<sub>2</sub> je spôsobené katalytickými vlastnosťami Pt tenkej vrstvičky, čo tiež napomáha presunu aktívnych častíc vznikajúcich pri reakciách do povrchu kovového oxidu [10]. Podrobne sme diskutovali vplyv hrúbky Pt vrstvičky a jej morfológie na detekčné vlastnosti, pričom sme odhalili, že tieto vlastnosti sú významne ovplyvňované nielen veľkosťou zrn tvoriacich Pt klastrovité ostrožky, ale tiež pôrovnosťou Pt vrstvičky nachádzajúcej sa na NiO povrchu.

Demonštrovali sme, že pri nízkych pracovných teplotách ( $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ) NiO senzorové štruktúry s 3 nm Pt vrstvičkou majú v priemere 3 násobne vyššiu odozvu v skúmanom rozsahu  $\text{H}_2$  koncentrácií v porovnaní s tými, ktoré boli pripravené s 5 nm Pt vrstvičkou. Naproti tomu, pri vyšších pracovných teplotách ( $300 \div 420^{\circ}\text{C}$ ) sme zistili podobné hodnoty odozvy pri oboch rozdielnych Pt povrchových modifikáciách. Podarilo sa nám preukázať, že v prípade nízkych pracovných teplôt NiO senzorové štruktúry s 3 nm Pt vrstvičkou aj napriek tomu, že ich povrch je tvorený väčšími zrnami ( $>20$  nm) a je drsnejší v porovnaní so štruktúrami s 5 nm Pt vrstvičkou, čím by mali vykazovať horšiu katalytickú aktivitu, majú vyššiu odozvu. Vysvetlili sme to skutočnosťou, že ich povrch je viac pórovitý ako v prípade štruktúr s 5 nm Pt vrstvičkou, pri ktorých až takmer 90% povrchu je tvoreného Pt konglomerátmi zrn. Preto predpokladáme, že ďalšie zlepšovanie detekčných vlastností je hľadaním kompromisu medzi zmenšovaním veľkostí Pt zrn a zvyšovaním pórovitosti Pt vrstvy. Pri vyšších pracovných teplotách podobné detekčné vlastnosti súvisia s tým, že v prípade senzorových štruktúr s 3 nm Pt vrstvičkou dochádza k zmene morfológie, pri ktorej pozorujeme vyplňanie pórov a tým sa stáva povrch viac hladkým a menej pórovitým, čím sa ich povrch približuje povrchu štruktúry s 5 nm Pt vrstvičkou.

#### **5.4 Technológia prípravy a charakterizácia tenkovrstvových mikrovyhrievačov pre mikrosystémovú techniku**

Pre realizáciu a správnu činnosť miniatúrnych senzorových elementov detekujúcich plyn je nevyhnutné zabezpečiť rovnomernú distribúciu hodnôt teploty po celej aktívnej ploche pri čo najnižšej spotrebe elektrickej energie. Okrem toho nemôžeme zanedbať mechanickú stabilitu systému a rýchlu odozvu na detekovaný plyn. Všetky tieto podmienky sa dajú splniť vytvorením zavesenej mikromechanickej štruktúry, ktorá obsahuje integrovaný mikrovyhrievač a plynovocitlivý element. Mikromechanicky tvarované mikrovyhrievacie elementy vhodné pre MEMS senzorové polia sú zvyčajne zložené z viacvrstvových štruktúr zložené z materiálov, ktoré sa vyznačujú rôznymi tepelnomechanickými vlastnosťami. Preto vzhľadom na pôsobenie potrebných zmien pracovnej teploty až do  $400^{\circ}\text{C}$  dochádza k mechanickým deformáciám, ktoré je potrebné brať do úvahy. Našu pozornosť sme sústredili na TiN/Pt mikrovyhrievač umiestnený na GaAs mikromechanickej štruktúre [13], keďže takýto prvok na GaAs pre senzor plynu nebol doposiaľ vo vedeckom svete predmetom výskumu.

##### **5.4.1 Návrh a elektrotepelné simulácie mikrovyhrievača na zavesenej membráne**

Navrhli sme tri rôzne topológie mikrovyhrievacieho elementu na tenkej dielektrickej membráne, ktorá bola zavesená pomocou mikromostíkov na objemovom GaAs substráte s hrúbkou  $300\ \mu\text{m}$  [13]. Tenká dielektrická membrána pozostávala z dvojvrstvovej štruktúry  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$  (800 nm) a GaAs (200 nm), pričom TiN/Pt mikrovyhrievač tvaru dvojitej špirály bol umiestnený na membráne a pokrytý izolačnou a tepelne vodivou vrstvou SiC (500 nm). Uvažovali sme veľkosti membrány od  $400 \times 400\ \mu\text{m}^2$  po  $150 \times 150\ \mu\text{m}^2$ , ktorá zároveň predstavovala najmenšiu možnú plochu z hľadiska jej technologickej realizovateľnosti.

Pomocou komerčného simulačného programu ANSYS sme vykonali elektrotepelné simulácie všetkých troch modelových štruktúr v trojrozmernom priestore, pričom sme brali do úvahy teplotnú závislosť tepelnej vodivosti vzduchu ako aj hodnoty merných odporov použitých kovových materiálov. Výsledky simulácií potvrdili, že optimálne vlastnosti môžeme očakávať od zavesenej membrány s veľkosťou  $150 \times 150\ \mu\text{m}^2$ , kedy na dosiahnutie pracovnej teploty v intervale hodnôt od 470 po 600 K je potrebný vyhrievací výkon  $14 \div 22$  mW [13]. Taktiež v tomto prípade je hodnota tepelného odporu približne 15 K/mW.

## 5.4.2 Návrh a vývoj technológie mikrovyhrievača na zavesenej GaAs membráne

Po nevyhnutnej návrhovej a simulačnej fáze ako aj po vyhodnotení elektrotepelných a tepelnomechanických vlastností sme pristúpili k návrhu a výrobe sady potrebných fotolitografických masiek, ktoré nám umožnili realizovať experimentálny výskum a vývoj procesnej technológie jednotlivých elementov na GaAs substráte [13, 14]. V snahe zvládnuť technológiu prípravy rôznych typov vrstiev pre aplikáciu na novom type substrátu, venovali sme pozornosť experimentálnym úlohám, pričom sme kládli dôraz na ich kompatibilitu a využiteľnosť pre budúci plynovocitlivý mikrosystém. Naša experimentálna činnosť bola sústredená nielen na hlboké mikromechanické tvarovanie GaAs substrátu pre zavesenú mikroštruktúru, ale aj rastu a tvarovaniu tenkých vrstiev pre mikrovyhrievač, senzor teploty, elektródový systém a kontakty na GaAs povrchu.

V kontexte riešenia jednotlivých technologických krokov sme navrhli a vyvinuli novú procesnú metódu prípravy mikrovyhrievačov pozostávajúcu z aplikácie 9 fotolitografických masiek realizovaných na oboch stranách GaAs substrátu [13, 14]. Nosným prvkom mikroštruktúry bol 350  $\mu\text{m}$  hrubý substrát zo semiizolačného GaAs. Hlavným dôvodom jeho výberu bola najmä skutočnosť, že umožňuje presnejšie dosiahnutie tvarov definovaných pri samotnom mikrotvarovaní. To je veľmi žiaduce, najmä, ak rozmery zavesenej membrány sa zmenšili na  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$  a dutina pod zavesenou štruktúrou mikrovyhrievača mala rozmery  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ . Na druhej strane, merná tepelná vodivosť GaAs je výrazne nižšia (takmer tretinová) v porovnaní s klasicky používaným kremíkovým substrátom. Veľkosť čipu bola  $2 \times 2 \text{ mm}^2$ . Ako tepelnoizolačná membrána a zároveň ako stop-vrstva pri hlbokom plazmatickom leptaní GaAs bola použitá dvojvrstva (300 nm  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$  a 2  $\mu\text{m}$  GaAs) pripravená technológiou MO CVD na semiizolačnom GaAs. GaAs vrstva chráni chemicky nestabilnú  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$  vrstvu pri vysokých prevádzkových teplotách. Mikrovyhrievač nachádzajúci sa na membráne bol navrhnutý v tvare dvojitej špirály so šírkou pásika 15  $\mu\text{m}$ . Časť pásika bola rozšírená na 20  $\mu\text{m}$  kvôli kompenzácii posunutia vyhrievača na membráne. Toto posunutie muselo byť realizované z dôvodu umiestnenia snímača teploty na membráne v tej istej technologickej úrovni ako sa nachádza samotný vyhrievač. Hodnota odporu vyhrievača pri 20°C bola v intervale 63 až 71  $\Omega$ . Platinový vyhrievač s hrúbkou 200 nm bol pripravený pomocou magnetronového naprašovania, ako aj tenká adhézna TiN vrstva, ktorá zároveň predstavovala difúziu bariéru proti vydifundovaniu Ga zo substrátu pri zvýšených pracovných teplotách. Jej hrúbka bola 20 nm. Na tvarovanie oboch vrstiev bola použitá technika lift-off. Na úrovni mikrovyhrievača sa na membráne nachádza aj senzor teploty, tvarovaný taktiež technikou lift-off. Je tvorený 5  $\mu\text{m}$  širokým pásikom z Pt s hrúbkou 100 nm a adhéznou vrstvou TiN (20 nm). Miesta prekryvu vrstvy snímača s expandovanými kontaktmi boli optimalizované, aby bol dosiahnutý dokonalý súkryt i pri určitej technologickej nepresnosti prípravy.

Kritickým krokom pri príprave mikrosystému bolo vytvorenie tenkej membrány zavesenej na 4 mikromostíkoch. Samotný leptací proces prebiehal v dvoch fázach. Najskôr bolo potrebné povrchovým mikrotvarovaním cez rezistívnu masku, ktorá definuje laterálne rozmery štruktúry, odleptať z prednej strany substrátu 200 nm hrubú epitaxnú vrstvu GaAs pomocou vysoko selektívneho reaktívneho iónového leptania v  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ , pričom leptanie sa zastavilo na stop-vrstve z AlGaAs. Proces objemového mikrotvarovania na zadnej strane substrátu sa začal depozíciou Ni masky a jej tvarovaním pomocou techniky lift-off. Vertikálne rozmery štruktúry boli určené hlbokým RIE leptaním zo zadnej strany cez samotný GaAs substrát do AlGaAs stop vrstvy, čím hrúbka membrány bola presne definovaná hrúbkou epitaxnej GaAs vrstvy. Na toto leptanie sme tiež použili ako leptací plyn  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ . Pri optimalizovaní technológie suchého plazmatického leptania GaAs sme vyskúšali rôzne módy ako aj podmienky leptania, ktorých účinok sme vyhodnotili kvantitatívne na základe merania hĺbky

odleptaného GaAs pri dostatočnej kvalite leptaného povrchu. Ni vrstva s hrúbkou 100 až 200 nm sa ukázala dostatočne odolná voči leptaniu pri uvedených podmienkach leptania. Zistili sme, že na prípravu 2  $\mu\text{m}$  hrubej zavesenej membrány je potrebná rýchlosť leptania okolo 2  $\mu\text{m}/\text{min}$ , selektivita leptania GaAs voči Ni masku musí byť väčšia ako 2 000 a voči AlGaAs stop vrstve viac ako 1 000, pričom sa vyžaduje pracovný tlak 18 Pa a dodávaný výkon 150 W [14].

### 5.4.3 Testovanie elektrotepelných vlastností a tepelnomechanická stabilita mikrovyhrievača

Dôležitou súčasťou v oblasti tenkovrstvových mikrovyhrievčov je testovanie ich elektrotepelných a tepelnomechanických vlastností. Pred touto charakterizáciou bol mikrotvarovaný substrát naryhovaný hlbokým leptaním ešte počas objemového mikrotvarovania zo zadnej strany a niekoľko jednotlivých čipov bolo nakontaktovaných do TO-8 päťíc. Samotný mikrovyhrievač sa vyznačoval dobrou mechanickou integritou a bol kompaktný. Pozorovania na SEM mikroskope ako aj EDX analýzy odhalili rovnakú morfológiu a homogénnu disperziu jednotlivých elementov na povrchu. Neboli pozorované žiadne defekty v distribúcii prvkov v analyzovaných tenkovrstvových štruktúrach mikrovyhrievača.

Vypracovali a aplikovali sme metodiku merania vhodnú na hodnotenie elektrotepelnej konverznej účinnosti mikrovyhrievača, ktorý je vo funkcii tepelného prevodníka [13]. Prvým krokom bolo kvantifikovanie teplotnej závislosti senzora teploty a prevod hodnoty teploty na napätie. V ďalšom kroku sme určili závislosť medzi dodávaným príkonom a teplotou, ktorá umožňuje získať konverznú účinnosť prvku. Pozorovali sme veľmi dobrú lineritu tejto P-T konverzie a z nej sme určili hodnotu tepelného odporu 8,43 K/mW. Dosiahli sme teplotu 550 K v aktívnej oblasti mikrovyhrievača pri dodávanom príkone okolo 30 mW, pričom táto hodnota bola v dobrej zhode s očakávanou hodnotou 22 mW z elektrotepelných simulácií.

Keďže membránová štruktúra mikrovyhrievača je navrhnutá a realizovaná ako zložená viacvrstvová štruktúra pozostávajúca z materiálov s rôznymi tepelnomechanickými vlastnosťami, študovali sme jej deformačné správanie [13]. Naša štruktúra sa javí ako citlivý prvok, ktorý je nútený k mechanickým deformáciám a vibráciám už pri najmenšom pôsobení mechanickej energie alebo aktivovaní impulzom tepelnej energie. Ihneď po impulznom zaťažení sa objavujú rezonančné vibrácie a priehyby v strede membrány. Aby sme odhalili možné vibrácie mikrovyhrievacieho elementu, navrhli a uskutočnili sme optické merania spektier vibračnej odozvy na bezkontaktnom laserovom Dopplerovskom vibrometri. Na vybudenie sme používali periodicky sa opakujúci tepelný impulz. Podarilo sa nám zmapovať časové závislosti vybudených mechanických vibrácií, ktoré mali neharmonický priebeh a vznikali superpozíciou vyšších harmonických zložiek. Pozorovali sme spektrálnu distribúciu oscilácií tohto komplikovaného dynamického pohybu, kde jednoduché rezonančné frekvencie charakterizujú pôvod ako aj harmonické násobky rôznych častí mikrovyhrievacieho elementu. Zistili sme, že pri aplikovaných budiacich podmienkach priehyb membrány v strede mikrovyhrievača dosiahol niekoľko  $\mu\text{m}$ , zatiaľ čo pri zvýšených teplotách vibračné amplitúdy prekročili hodnotu 30 ÷ 40  $\mu\text{m}$ . Pri zvýšených teplotách však vplyvom zväčšenej mechanickej poddajnosti prvku sa potláčali vyššie harmonické frekvencie a zvýrazňoval sa základný mód kmitania. Konštatovali sme, že namerané hodnoty priehybov membrány počas statického ako aj dynamického pôsobenie budiaceho impulzu v žiadnom prípade negatívne neovplyvňujú funkčnosť membránovej štruktúry mikrovyhrievacieho elementu [13].

## 6. Závery pre realizáciu v spoločenskej praxi a pre ďalší rozvoj vedy

Doktorská dizertačná práca predstavuje príspevok k rozvoju technológie prípravy tenkovrstvových nitridov a oxidov kovov jednosmerným reaktívnym magnetrónovým naprašovaním, pričom poukazuje na ich aplikovateľnosť v mikroelektronike, senzoričke a mikrosystémovej technike. Riešená problematika navzájom spája samotnú technológiu prípravy tenkovrstvových štruktúr, podrobne skúma procesy prebiehajúce počas nej, ale zároveň sa aj zaoberá charakterizáciou pripravených materiálov a koreláciou ich vlastností s podmienkami prípravy. Integruje simulačné a modelové riešenia procesov prebiehajúcich počas naprašovania s experimentálne nameranými a vyhodnotenými vlastnosťami tenkých vrstiev, pričom získané výsledky implementuje do zložitejších prvkov. Dizertačná práca približuje nielen výskum základných stavebných prvkov mikroelektroniky, ako sú Schottkyho kontakty na GaAs a ohmické kontakty pre p-GaN, ale predstavuje aj implementovanie tenkých vrstiev ako plynovocitlivých materiálov do senzorových elementov a taktiež sleduje základne aspekty ich miniaturizácie až do MEMS štruktúr.

Prínosy predloženej dizertačnej práce možno zhrnúť do nasledovných bodov:

- Na základe experimentálnych meraní tlakovo-prietokových charakteristík pri magnetrónovom výboji v pracovnej zmesi dusík-argón, ako aj kyslík-argón boli dosiahnuté pôvodné výsledky, ktoré nám umožnili podrobne charakterizovať vlastnosti procesu tvorby týchto tenkých vrstiev ako aj samotného reaktívneho naprašovacieho procesu. Bol vytvorený model popisujúci zmeny na povrchu terča počas depozície NbN vrstvy, umožňujúci vypočítať stupeň pokrytia terča nitridom v závislosti od obsahu dusíka prívádzaného do vákuovej komory, pričom parametrami boli výbojový prúd magnetrónu a celkový tlak v naprašovacej komore. Využitím odvodených vzťahov bolo možné kvantitatívne vyhodnotiť aj rýchlosť rastu vznikajúcich vrstiev. Podobným pracovným postupom sme overili platnosť dosiahnutých výsledkov aj pre prípad depozície NiO vrstiev.
- Prínosom k štúdiu reaktívneho procesu pri jednosmernom magnetrónovom naprašovaní bolo použitie modulácie prietoku kyslíka v čase študovaného pri depozícii NiO, pričom počas uzavretia prietoku kyslíka dochádza k odstraňovaniu oxidu vytvoreného na povrchu terča. Úspešne bol kvantifikovaný vplyv rôznych hodnôt periodicky sa meniaceho prietoku kyslíka, na parciálny tlak kyslíka a rýchlosť rastu NiO vrstvy, pričom zmeny zloženia takto pripravovaných vrstiev sme jednoznačne dokázali metódou SIMS. Nami navrhnutý a skúmaný reaktívny naprašovací proces umožňuje prípravu vrstiev s meniacou sa stechiometriou počas rastu. Je vhodný na prípravu striedajúcich sa vrstiev alebo multivrstvových štruktúr. Preukázali sme, že modifikovanie procesu reaktívneho magnetrónového naprašovania pomocou pulzného napúšťania reaktívneho plynu prispieva k odstráneniu vzniknutej tenkej nevodivej vrstvy na povrchu terča, a tým k zvýšeniu rýchlosti rastu vrstvy ako aj k ovplyvneniu chemického zloženia.
- Poznatky zo skúmania jednosmerného reaktívneho magnetrónového naprasovania boli využité pri príprave NbN tenkých vrstiev pre Schottkyho kontakty v samozákrytovej MESFET technológii na GaAs. Schottkyho kontakty s NbN vrstvou pripravenou pri najnižšom obsahu dusíka (2%) mali po žíhaní vo vákuu pri teplote 900°C výšku bariery  $\phi_B=0,77$  eV a idealizačný koeficient  $n=1,11$ . Povrch kontaktov bol hladký a kovovo lesklý, bez morfológických defektov a metalurgických zmien na rozhraní. Zároveň sme dokázali,

že stav povrchu GaAs pred depozíciou má dôležitú úlohu pri tvorbe Schottkyho kontaktu s dobrými elektrickými vlastnosťami.

- Prispeli sme k hľadaniu vhodných materiálov pre ohmické kontakty na p-GaN na báze Au/NiO<sub>x</sub>. Z našich meraní vyplynulo, že metalizačný systém Au/NiO<sub>x</sub> s nízkym obsahom kyslíka v NiO vrstve zabezpečuje dostatočne nízku hodnotu kontaktového odporu za predpokladu následného tepelného spracovania pri teplote 500°C počas 2 min. v zmesi N<sub>2</sub> alebo O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>. Pomocou merania koncentračných profilov a pozorovania na TEM mikroskope sme zistili, že žihanie v prostredí O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> vedie k transformácii deponovanej Au/NiO<sub>x</sub>/p-GaN kontaktovej štruktúry do systému Au/p-NiO/p-GaN. V prípade, že žihanie prebieha v N<sub>2</sub>, dochádza k rekonštrukcii pôvodnej kontaktovej štruktúry do metalurgických systémov: Au-Ni/p-NiO/p-GaN a Ni/p-NiO/p-GaN. Z uvedeného nám vyplynulo, že pri žihaniach v oboch zmesiach plynov sú dobré ohmické vlastnosti kontaktu predurčené vytvorením tenkej NiO vrstvy na rozhraní kov/p-GaN. Objasnili sme, že vytvorenie kontaktovej štruktúry typu kov/p-NiO/p-GaN po žihaní buď v N<sub>2</sub> alebo O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>, je hlavným mechanizmom, ktorý je zodpovedný za vytvorenie ohmického charakteru kontaktovej štruktúry.
- Úspešne sme skúmali prípravu tenkých NiO vrstiev v zmesi plynov Ar a O<sub>2</sub> v dvoch naprašovacích módoch, pričom obsah kyslíka sa menil od 20 do 60 %. Vrstvy, pripravené v kovovom móde pri vysokej hodnote napätia terča (370 ÷ 375 V), boli polykrystalické štruktúry s takmer stechiometrickým zložením. Naproti tomu NiO vrstvy, deponované v oxidovom móde pri nízkom napätí terča (275 ÷ 295 V), boli amorfné a obsahovali prebytok kyslíka. Chemické zloženie bolo charakterizované pomerom atómov niklu a kyslíka, pričom tento pomerom sa menil od 0,71 do 1,02 a bol funkciou napätia terča. Všetky skúmané NiO vrstvy boli polovodivé a ich vodivosť vzrástla o 4 rády pri zmene teploty od 25 do 350°C. Bolo zistené, že povrchová morfológia NiO vrstiev je ovplyvnená nielen vlastnosťami použitého substrátu, ale aj naprašovacím módom prípravy tenkej vrstvy. NiO vrstvy pripravované v kovovom naprašovacom móde boli hladšie v porovnaní s vrstvami pripravenými v oxidovom naprašovacom móde a priemerné hodnoty drsnosti týchto vrstiev boli podobné (R<sub>a</sub>= 30,7 a 29,4 %). Naproti tomu hodnoty drsnosti vrstiev pripravených v oxidovom naprašovacom móde boli vyššie (R<sub>a</sub>= 34,7 a 31,6 %). Predpokladáme, že nižšie hodnoty priemernej drsnosti sú spôsobené rastom zŕn vo vrstvách NiO v kovovom naprašovacom móde, ako aj vyplňaním medzizrnového priestoru menšími zrnami v prípade vrstiev so stechiometrickým zložením. Na základe nami publikovaných výsledkov o príprave a vlastnostiach NiO tenkých vrstiev sme boli oslovení japonskou firmou ASAHI GLASS Co., Ltd., Yokohama, pre ktorú sme následne pripravili sadu NiO vrstiev požadovaných optických vlastností. Výsledky nášho výskumu boli taktiež úspešne aplikované aj na domácej pôde. Vyvinuli a vyrobili sme 4 sady etalónov drsnosti typu A1 podľa ISO 5436 pre Slovenský metrologický ústav, pričom každá sada pozostávala z 8 etalónov drsnosti s rozdielnymi menovitými hodnotami hĺbky rysiek od 0,032 do 3,2 μm.
- Boli zistené vysokocitlivé odozvy NiO tenkých vrstiev pri aplikácii v senzorových štruktúrach plynu, keď sme exponovali oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>) s koncentráciou v rozsahu 1 až 10 ppm pri nízkych pracovných teplotách 160 ÷ 200°C. Okrem toho bolo pozorované, že vlhkosť vzduchu v pracovnej atmosfére zlepšuje odozvu senzorových štruktúr. Prínosom bolo zistenie, že najcitlivejšia NiO senzorová štruktúra bola schopná detekovať minimálnu kritickú koncentráciu NO<sub>2</sub> 0,04 ppm.

- Významným prínosom sa ukázalo, že Pt modifikované NiO senzory dosahujú významnú odozvu a citlivosť na veľmi malé koncentrácie H<sub>2</sub> (500 ÷ 5000 ppm) vo vzduchu, keď berieme do úvahy, že explózný limit pre H<sub>2</sub> je 40 000 ppm. Dosiahnuté výsledky robia z Pt modifikovaných NiO senzorov perspektívneho kandidáta pre ich implementáciu ako vodíkový detektor netesností. Pritom sme podrobne preskúmali vplyv hrúbky a povrchovej morfológie tenkých Pt vrstvičiek. Dokázali sme, že detekčné vlastnosti na prítomnosť H<sub>2</sub> závisia nielen od veľkosti zŕn v Pt klastrových ostrovčekoch, ale tiež od pórovitosti Pt vrstvičky na NiO povrchu. Vykonané experimenty potvrdili, že pri nízkych pracovných teplotách (~200°C) NiO senzory s 3 nm Pt vrstvičkou majú lepšie detekčné vlastnosti na H<sub>2</sub> v porovnaní s NiO senzormi s 5 nm Pt vrstvičkou. Avšak pri vyšších pracovných teplotách (300 ÷ 420°C) mali obidva typy týchto NiO senzorov podobné detekčné charakteristiky. Túto skutočnosť sme vysvetlili na základe podrobnej morfologickej analýzy tým, že v prípade NiO senzorov s 3 nm Pt vrstvičkou dochádza k zmene jej morfológie vplyvom teploty.
- Riešiteľský kolektív pod vedením autora predloženej práce po prvý krát predstavil mikrovyhrievač na báze TiN/Pt zavesený na GaAs mikromechanickej štruktúre pre aplikáciu v MEMS senzoroch plynu. Počas riešenia jednotlivých technologických krokov sme navrhli a vyvinuli novú procesnú metódu prípravy mikrovyhrievačov pozostávajúcu z aplikácie 9 fotolitografických masiek realizovaných na oboch stranách GaAs substrátu. Takýto nový a perspektívny prvok pre mikrosystémovú techniku bol po zvládnutí originálnej technológie aj experimentálne charakterizovaný. Optimalizovaná zavesená membrána (150 × 150 μm<sup>2</sup>) spojená s objemovým GaAs substrátom 4 mikromostíkmi bola pripravená pomocou kombinácie povrchového a objemového mikrotvarovania. Vlastnosti vyvinutej a experimentálne pripravenej mikromechanickej štruktúry boli podrobené elektrotepelnej analýze, ktorá potvrdila, že teplota na membráne môže dosiahnuť až 550 K pri veľmi nízkej spotrebe okolo 30 mW. Táto experimentálne nameraná hodnota bola v dobrej zhode s očakávanou hodnotou 22 mW, ktorá vyplynula z elektrotepelných simulácií. Úspešne sme otestovali a potvrdili mechanickú stabilitu vyhrievanej viacvrstvovej membránovej štruktúry. Poznatky získané výskumom v tejto oblasti sme plne využili pri riešení úlohy aplikovaného výskumu na tému Inteligentný modul na detekciu plynov, pričom sme sa podielali na výrobe a testovaní miniatúrneho modulu spolu s potenciálnym užívateľom firmou LOX Technologies, s.r.o. Piešťany.



## 7. Použitá literatura

- [1] Johansson, B.O., Helmersson, U., Hibbs, M.K. and Sungren, J.E.: *J. Appl. Phys.* **58** (1985) 3104.
- [2] Mehrotra, B. and Stimmell, J.: *J. Vac. Sci. Technol.* **B5** (1987) 1736.
- [3] So, F., Kolawa, E., Zhao, X.A. and Nicolet, A.: *Thin Solid Films* **153** (1987) 507.
- [4] Johansson, B.O., Sungren, J.E., Greene, J.E., Rockett, A. and Barnett, S.A.: *J. Vac. Sci. Technol. A* **3** (1985) 303.
- [5] Shih, K.K. and Dove, D.B.: *J. Vac. Sci. Technol. A* **8** (1990) 1359.
- [6] Sundgen, J.E., Johansson, B.O., Karlsson, S.E. and Hentzell, H.T.: *Thin Solid Films* **105** (1983) 367.
- [7] Sundgren, J.E., Johanson, B.O., Hentzell, H.T. and Karlsson, S.E.: *Thin Solid Films* **105** (1983) 385.
- [8] Spencer, A.G., Howson, R.P. and Lewin, R.W.: *Thin Solid Films* **158** (1988) 141.
- [9] Blom, H.O., Larsson, T. and Berg, S.: *J. Vac. Sci. Technol. A* **7** (1989) 162.
- [10] Sproul, W.D., Rudnik, P.J. and Gogol, C.A.: *Thin Solid Films* **171** (1989) 171.
- [11] Berg, S., Nyberg, N.: *Thin Solid Films* **476** (2005) 215.
- [12] Sproul, W.D., Christie, D.J., Carter, D.C.: *Thin Solid Films* **491** (2005) 1.
- [13] Kubert, T., Zhao, S., Wingqvist, G., Nyberg, T., Wäckelgård, E., Berg, S.: *J. Phys.: Conf. Ser.* **100** (2008) 082024.
- [14] Shappirio, J.R.: *Solid State Technology* **28** (1985) 161.
- [15] Pramanik, D. and Jain, V.: *Solid State Technology* **36** (1993) 73.
- [16] Braslau, N.: *J. Vac. Sci. Technol. A* **4** (1986) 3085.
- [17] Joswig, H., Kohlhase, A. and Kucher, P.: *Thin Solid Films* **175** (1989) 17.
- [18] Kumar, N., Fissel, M.G., Pourrezaei, K., Lee, B. and Douglas, E.C.: *Thin Solid Films* **153** (1987) 287.
- [19] Murarka, S.P.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **2** (1984) 693.
- [20] Kumar, N., Pourrezaei, K., Lee, B. and Douglas, E.C.: *Thin Solid Films* **164** (1988) 417.
- [21] Kanamori, S.: *Thin Solid Films* **136** (1986) 195.
- [22] Josefowicz, J.Y. and Rensch, D.B.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **5** (1987) 1707.
- [23] Yu, K.M., Jaklevic, J.M., Haller, E.E., Cheung, S.K. and Kwok, S.P.: *J. Appl. Phys.* **64** (1988) 1284.
- [24] Uchitomi, N., Nagaoka, M., Shimada, K., Mizoguchi, T. and Toyoda, N.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **4** (1986) 1392.
- [25] Cheung, S.K., Kwok, S.P., Kaleta, A., Yu, K.M., Jaklevic, J.M., Liang, C.L., Cheung, N.W. and Haller, E.E.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **6** (1988) 1779.
- [26] Geissberger, A.E., Sadler, R.A., Leyenaar, F.A. and Balzan, M.L.: *J. Vac. Sci. Technol. A* **4** (1986) 3091.
- [27] Steiner, K., Uchitomi, N. and Toyoda, N.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **8** (1990) 1113.
- [28] Lee, J.S., Park, C.S., Kang, J.Y., Ma, D.S. and Lee, J.Y.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **8** (1990) 1117.
- [29] Zhang, L.C., Liang, C.L., Cheung, S.K. and Cheung, N.W.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **5** (1987) 1716.
- [30] Zhang, L.C., Cheung, S.K., Liang, C.L. and Cheung, N.W.: *Appl. Phys. Lett.* **50** (1987) 445.
- [31] Wu, X.W., Zhang, L.C., Bsadley, P., Chin, D.K. and Van Duzer, T.: *Appl. Phys. Lett.* **50** (1987) 287.
- [32] Waldrop, J.R.: *Appl. Phys. Lett.* **43** (1983) 87.
- [33] Geissberger, A.E., Sadler, R.A., Balzan, M.L. and Crites, J.W.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **5** (1987) 1701.
- [34] Westra, K.L., Brett, M.J. and Vaneldik, J.F.: *J. Vac. Sci. Technol. A* **8** (1990) 1288.
- [35] Herzog, R., Weber, H.W., Kampwirth, R.T., Gray, K.E. and Gerstenberg, H.: *J. Appl. Phys.* **69** (1991) 3172.
- [36] Dawson-Elli, D.F., Fung, C.A. and Nordman, J.E.: *IEEE Trans. Magnetics, MAG-27* (1991) 1592.
- [37] Shoji, A., Kiryu, S. and Kohjiro, S.: *Appl. Phys. Lett.* **60** (1992) 1624.
- [38] Maung, W.N., Butler, D.P. and Huang, C.L.: *J. Vac. Sci. Technol. A* **11** (1993) 615.
- [39] Wong, M.S. and Sproul, W.D.: *J. Vac. Sci. Technol. A* **11** (1993) 1528.

- [40] Liu, Q.Z., Lau, S.S., *Solid-State Electron.* **42** (1998) 667.
- [41] Lee, J.L., Kim, J.K., Lee, J.W., Park, Y.J., Kim, T., *Electrochem. Solid State Lett.* **3** (2000) 53.
- [42] Ishika Wa, H., Kobayashi, S., Koide, Y., Yamasaki, S., Nagai, S., Umezaki, J., Koike, M., Murakami, J., *J. Appl. Phys.* **81** (1997) 1315.
- [43] Jang, J.S., Park, K.H., Jang, H.K., Kim, H.G., Park, S.J., *J. Vac. Sci. Technol. B* **16** (1998) 3105.
- [44] Mistele, D., Fedler, F., Klausung, H., Rotter, T., Stemmer, J., Semchinova, O.K., Aderhold, J., *J. Crystal Growth* **230** (2001) 564.
- [45] Horng, R.H., Wu, D.S., Lien, Y.Ch., Lan, W.H., *Appl. Phys. Lett.* **29** (2001) 2925.
- [46] Koide, Y., Maeda, T., Kawakami, T., Fujita, S., Uemura, T., *J. Elec, Mat.*, **28** (1999) 341.
- [47] Trexler, J.T., Pearton, S.J., Holloway, P.H., Mier, M.G., Evans, K.R., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **449** (1997) 1091.
- [48] Cosandey, F., Skandan, G., Singhal, A., *Materials and Processing Issues in Nanostructured Semiconductor Gas Sensors. JOM* **52** (10) (2000) 14.
- [49] Koch, C.C. a et al., *Nanostructured Materials – Processing, Properties and Potential Applications, Wiliam Andrew Publishing / Noyes* 2002, ISBN 0-8155-1451-4.
- [50] Pitkethly, M.J., *Nanotoday* December 2003 36.
- [51] Kholmanov, I.N., Barborini, E., Vinati, S., Piseri, P., et al., *Nanotechnology* **14** (2003) 1168.
- [52] Schweizer-Berberich, M., Zheng, J.G., Weimar, U., et al., *Sensors and Actuators B* **31** (1996) 71.
- [53] Menini, P., Parret, F., Guerrero, M., Soulantica, K., et al., *Sensors and Actuators B* **103** (2004) 111.
- [54] Choongho Yu, Qing Hao, Sanjoy Saha, Li Shi, et al., *Applied Physics Letters* **86** (2005) 063101.
- [55] Hotový, I., *Kandidátska dizertačná práca*, FEI STU Bratislava, 1994.

## 8. Zoznam publikácií, ktoré sú predmetom dizertačnej práce

1. Brčka, J. and **Hotový, I.**: Processes on the target and discharge and NbN film behaviour in dc magnetron deposition. *Vacuum* **46** (1995), 1407-1412.
2. **Hotový, I.**, Búc, D., Haščík, Š. and Nennewitz, O.: Characterization of NiO thin films deposited by reactive sputtering. *Vacuum* **50** (1998), 41-44.
3. **Hotový, I.**, Huran, J. and McPhail, D.S.: Study of enhanced magnetron sputtering process of NiO by using flow modulation of oxygen. *Czech. J. Phys.*, **54** (2004), C976-C983.
4. **Hotový, I.**, Búc, D., Brčka, J. and Srnánek, R.: Study of niobium nitride films produced by dc reactive magnetron sputtering. *Phys. Stat. Solidi (a)* **160** (1997), 97-104.
5. **Hotový, I.**, Huran, J., Haščík, Š. and Lalinský, T.: Reactively sputtered NbN Schottky contacts on GaAs and their thermal stability. *Vacuum* **50** (1998), 403-406.
6. Liday, J., **Hotový, I.**, Sitter, H., Vogrinčič, P., Vincze, A., Vávra, I., Šatka, A., Ecke, G., Bonnani, A., Breza, J., Simbrunner, C., Plochberger, B.: Investigation of NiO<sub>x</sub>-based contacts on p-GaN. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **19** (2008), 855-862.
7. **Hotový, I.**, Huran, J., Janík, J. and Kobzev, A.P.: Deposition and properties of NiO films produced by reactive magnetron sputtering. *Vacuum* **51** (1998), 157-160.
8. **Hotový, I.**, Řeháček, V., Siciliano, P., Capone, S. and Spiess, L.: Sensing characteristics of NiO thin films as NO<sub>2</sub> gas sensor. *Thin Solid Films* **418** (2002), 9-15.
9. **Hotový, I.**, Huran, J. and Spiess, L.: Characterization of sputtered NiO films using XRD and AFM. *Journal of Materials Science* **39** (2004), 2609-2612.
10. **Hotový, I.**, Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L., Řeháček, V.: Enhancement of H<sub>2</sub> sensing properties of NiO-based thin films with a Pt surface modification. *Sensors and Actuators B* **103** (2004), 300-311.
11. **Hotový, I.**, Huran, J., Spiess, L., Romanus, H., Búc, D., Kosiba, R.: NiO-based nanostructured thin films with a Pt surface modification for gas detection. *Thin Solid Films* **515** (2006), 658-661.
12. **Hotový, I.**, Huran, J., Spiess, L., Romanus, H., Capone, S., Řeháček, V., Taurino, A.M., Donoval, D., Siciliano, P.: Au-NiO nanocrystalline thin films for sensor application. *Journal of Physics: Conference Series* **61** (2007), 435-439.
13. **Hotový, I.**, Řeháček, V., Mika, F., Lalinský, T., Haščík, Š., Vanko, G., Držík, M.: Gallium arsenide suspended microheater for MEMS sensor arrays. *Microsystem Technologies* **14** (2008), 629-635.
14. Haščík, Š., **Hotový, I.**, Lalinský, T., Vanko, G., Řeháček, V., Mozolová, Z.: Preparation of thin GaAs suspended membranes for gas microsensors using plasma etching. *Vacuum* **82** (2008), 236-239.

## 9. Další publikované práce uchádzača majúce väzbu na dizertačnú prácu

### 1. Recenzované vedecké štúdie v časopisoch evidovaných v CC

#### a) zahraničné

35

1. **Hotový, I.**, Búc, D., Harman, R., Zeman, M. and Liday, J.: Preparation and properties of reactively sputtered TiN films for diffusion barriers on GaAs. *Crystal Properties & Preparation* **19 & 20** (1989), 199-202.
2. **Hotový, I.** and Huran, J.: Properties of NbN films prepared by reactive magnetron sputtering. *Phys. Stat. Sol. (a)* **137** (1993), K25-28.
3. **Hotový, I.**, Srnánek, R. and Búc, D.: Effects of thermal annealing on the properties of NbN thin films. *Journal of Material Science Letters* **13** (1994), 1226-1228.
4. Brčka, J. and **Hotový, I.**: Processes on the target and discharge and NbN film behaviour in dc magnetron deposition. *Vacuum* **46** (1995), 1407-1412.
5. **Hotový, I.**, Búc, D., Brčka, J. and Srnánek, R.: Study of niobium nitride films produced by dc reactive magnetron sputtering. *Phys. Stat. Solidi (a)* **160** (1997), 97-104.
6. Belayev, A.A., **Hotový, I.**, Venger, E.F., Lyapin, V.G., Konakova, R.V., Milenin, V.V., Tkhорik, Y.A. and Kashin, G.N.: Relationship between the electronic properties of the interface and the interphase interactions in NbN-GaAs heterostructures. *Technical Physics* **43** (1998), 56-59.
7. **Hotový, I.**, Huran, J., Búc, D. and Srnánek, R.: Thermal stability of NbN films deposited on GaAs substrates. *Vacuum* **50** (1998), 45-48.
8. **Hotový, I.**, Huran, J., Haščík, Š. and Lalinský, T.: Reactively sputtered NbN Schottky contacts on GaAs and their thermal stability. *Vacuum* **50** (1998), 403-406.
9. **Hotový, I.**, Búc, D., Haščík, Š. and Nennewitz, O.: Characterization of NiO thin films deposited by reactive sputtering. *Vacuum* **50** (1998), 41-44.
10. **Hotový, I.**, Huran, J., Janík, J. and Kobzev, A.P.: Deposition and properties of NiO films produced by reactive magnetron sputtering. *Vacuum* **51** (1998), 157-160.
11. Búc, D., **Hotový, I.**, Haščík, Š. and Červeň, I.: Reactive unbalanced magnetron sputtering of AlN thin films. *Vacuum* **50** (1998), 121-123.
12. Belayev, A.A., Konakova, R.V., Milenin, V.V., **Hotový, I.** and Piaczenski, G.: The effect of structural-phase transitions in metallization layers on radiation stability of NbN<sub>x</sub>-GaAs. *Journal of the Korean Physical Society* **34** (1999), S443-S446.
13. **Hotový, I.**, Huran, J., Spiess, L., Haščík, Š. and Řeháček, V.: Preparation of nickel oxide thin films for gas sensors applications. *Sensors and Actuators B* **57** (1999), 147-152.
14. **Hotový, I.**, Huran, J., Spiess, L., Čapkovič, R. and Haščík, Š.: Preparation and characterization of NiO thin films for gas sensor applications. *Vacuum* **58** (2000), 300-307.
15. **Hotový, I.**, Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L. and Řeháček, V.: The influences of the preparation parameters on NiO thin film properties for gas-sensing application. *Sensors and Actuators B* **78** (2001), 126-132.

16. **Hotový, I.**, Řeháček, V., Siciliano, P., Capone, S. and Spiess, L.: Sensing characteristics of NiO thin films as NO<sub>2</sub> gas sensor. *Thin Solid Films* **418** (2002), 9-15.
17. **Hotový, I.**, Huran, J., Spiess, L., Liday, J., Sitter, H. and Haščík, Š.: The influences of process parameters and annealing temperature on the physical properties of sputtered NiO thin films. *Vacuum* **69** (2003), 237-242.
18. **Hotový, I.**, Liday, J., Spiess, L., Sitter, H. and Vogrinčič, P.: Study of Annealed NiO Thin Films Sputtered on Unheated Substrate. *Jpn. J. App. Phys.* **42** (2003), L1178-L1181.
19. **Hotový, I.**, Huran, J. and Spiess, L.: Characterization of sputtered NiO films using XRD and AFM. *Journal of Materials Science* **39** (2004), 2609-2612.
20. **Hotový, I.**, Huran, J. and McPhail, D.S.: Study of enhanced magnetron sputtering process of NiO by using flow modulation of oxygen. *Czech. J. Phys.* **54** (2004), C976-C983.
21. Haščík, Š., Lalinský, T., Krnáč, M., Mozolová, Ž., Matay, L., Hrkút, P., **Hotový, I.**: Polyimide-fixed GaAs island structures prepared using plasma etching technique. *Czech. J. Phys.* **54** (2004), C1001-C1005.
22. **Hotový, I.**, Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L., Řeháček, V.: Enhancement of H<sub>2</sub> sensing properties of NiO-based thin films with a Pt surface modification. *Sensors and Actuators B* **103** (2004), 300-311.
23. **Hotový, I.**, Huran, J., Spiess, L., Romanus, H., Búc, D., Kosiba, R.: NiO-based nanostructured thin films with a Pt surface modification for gas detection. *Thin Solid Films* **515** (2006), 658-661.
24. **Hotový, I.**, Donoval, D., Huran, J., Haščík, S., Spiess, L., Gubisch, M., Capone, S.: NiO nanostructured films with Pt coating prepared by magnetron sputtering. *Czech. J. Phys.* **56** (2006), B1192-B1198.
25. Haščík, S., Eliáš, P., Šoltýs, J., Martaus, J., **Hotový, I.**: CCl<sub>4</sub>-based reactive ion etching of semi-insulating GaAs and InP, *Czech. J. Phys.* **56** (2006), B1169-B1173.
26. Liday, J., **Hotový, I.**, Sitter, H., Schmidegg, K., Vogrinčič, P., Bonnani, A., Breza, J., Ecke, G., Vavra, I.: Auger electron spectroscopy of Au/NiO<sub>x</sub> contacts on p-GaN annealed in N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> ambients. *Applied Surface Science* **253** (2007), 3174-3180.
27. **Hotový, I.**, Huran, J., Spiess, L., Romanus, H., Capone, S., Řeháček, V., Taurino, A.M., Donoval, D., Siciliano, P.: Au-NiO nanocrystalline thin films for sensor application. *Journal of Physics: Conference Series* **61** (2007), 435-439.
28. Cimalla, V., Machleidt, T., Spiess, L., Gubisch, M., **Hotový, I.**, Romanus, H., Ambacher, O.: Analysis of nanocrystalline films on rough substrates. *Ultramicroscopy* **107** (2007), 989-994.
29. Buc, D., Bello, I., Kováč, J., Mikula, M., Čaplovičová, M., **Hotový, I.**, Chong, Y.M., Siu, G.G.: Magnetron sputtering of boron based oxides, *Thin Solid Films* **515** (2007), 8723-8727.
30. Búc, D., Stuchliková, L., Harmatha, L., **Hotový, I.**: Electrical characterization of 4H-SiC Schottky diodes with RuO<sub>2</sub> and RuWO<sub>x</sub> Schottky contacts, *J. Mater. Sci.: Mater Electron.* **19** (2008), 783-787.
31. **Hotový, I.**, Řeháček, V., Mika, F., Lalinský, T., Haščík, Š., Vanko, G., Držík, M.: Gallium arsenide suspended microheater for MEMS sensor arrays. *Microsystem Technologies* **14** (2008), 629-635.

32. Haščík, Š., **Hotový, I.**, Lalinský, T., Vanko, G., Řeháček, V., Mozolová, Z.: Preparation of thin GaAs suspended membranes for gas microsensors using plasma etching. *Vacuum* **82** (2008), 236-239.
33. Liday, J., **Hotový, I.**, Sitter, H., Vogrinčič, P., Vincze, A., Vávra, I., Šatka, A., Ecke, G., Bonnani, A., Breza, J., Simbrunner, C., Plochberger, B.: Investigation of NiO<sub>x</sub>-based contacts on p-GaN. *J. Mater. Sci.: Mater Electron.* **19** (2008), 855-862.
34. Lalinský, T., Držík, M., Jakovenko, J., Vanko, G., Mozolová, Ž., Haščík, Š., Chlpík, J., **Hotový, I.**, Řeháček, V., Kostič, I., Matay, L., Husák, M.: GaAs based micromachined thermal converter for gas sensors. *Sensors and Actuators A* **142** (2008), 147-152.
35. Fasaki, I., **Hotový, I.**, Reháková, A., Hotový, J., Řeháček, V., Kompitsas, M., Roubani-Kalantzopoulos, F.: Effects of post-deposition surface treatment on optical, structural and hydrogen sensing properties of TiO<sub>2</sub> thin films, *Thin Solid Films* **518** (2009), 1103-1108.

## 2. Recenzované vedecké štúdie v časopisoch nevidovaných v CC

### a) zahraničné

5

1. **Hotový, I.**, Ismajlov, K.A., Konakova, R.V., Milenin, V.V., Prokopenko, I.V. and Tkhorik, J.A.: Investigation of microstructure peculiarity and electrophysical properties of TiN/GaAs contacts exposed  $\gamma$ -radiation. *Poverchnost* **8-9** (1994), 74-80.
2. **Hotový, I.**, Ismajlov, K.A., Konakova, R.V., Milenin, V.V., Prokopenko, I.V. and Tkhorik, J.A.: Interface state study of TiN-GaAs contacts exposed to  $\gamma$ -radiation. *Fizika i chimija obrabotki materialov* **2** (1994), 19-23.
3. **Hotový, I.**, Brčka, J. and Huran, J.: Investigations of reactively sputtered NbN films. *Fizika A, Journal of Experimental and Theoretical Physics* **4** (1995), 337-342.
4. Venger, E.F., Milenin, V.V., Ermolovich, I.B., Konakova, R.V., Voitsikhovskiy, D.I., **Hotový, I.** and Ivanov, V.N. : Heat tolerance of titanium boride and titanium nitride contacts to gallium arsenide. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* **2** (1999), 124-132.
5. **Hotový, I.**, Belayev, A.A., Venger, E.F., Konakova, R.V., Lyapin, V.G., Milenin, V.V., Tkhorik, Yu.A. and Kashin, G.N.: Mežfaznye vzaimodejstviya v geteroperechodach NbN<sub>x</sub>-GaAs, stimulirovannye termičeskoj i radiacionnoj obrabotkami. *Fizika i chimija obrabotki materialov* **4** (1999), 72-77.

### b) domáce

7

1. Breza, J., **Hotový, I.**, Kadlečiková, M., Liday, J., Daniška, V., Ivančo, I., Senderák, P., Vasilovskij, S.A., Ermolovich, I.B., Konakova, R.V., Milenin, V.V., Tkhorik, Yu.A.: Interphase reaction at metal - GaAs interfaces. *Journal of Electrical Engineering* **45** (1994), 321-326.
2. Brčka, J. and **Hotový, I.**: Effects on the target surface and discharge behaviour in reactive DC magnetron deposition of NbN films. *Acta Physica Universitatis Comenianae* **1** (1995), 65-72.
3. Búc, D., Kromka, A., **Hotový, I.**, Červeň, I.: Deposition of AlN films by unbalanced reactive magnetron sputtering. *Journal of Electrical Engineering* **47** (1996), 265-268.
4. Belayev, A.A., **Hotový, I.**, Konakova, R.V., Lyapin, V.G., Milenin, Yu., Venger, E.F. and Kashin, G.N.: Physico-chemical properties and electrophysical characteristics of NbN-GaAs heterostructures. *Journal of Electrical Engineering* **50** (1999), 98-101.

5. **Hotový, I.**, Liday, J., Sitter, H., Vogrinčič, P.: Properties of sputtered NiO thin films. *Journal of Electrical Engineering* **53** (2002), 339-342.
6. Liday, J., **Hotový, I.**, Sitter, H., Schmidegg, K., Vogrinčič, P., Breza, J., Bonnani, A.: NiO-based contacts for blue emitting diodes. *Journal of Electrical Engineering* **56** (2005), 217-220.
7. **Hotový, I.**, Liday, J., Spiess, L., Romanus, H., Čaplovičová, M., Búc, D., Sitter, H., Bonnani, A., Vogrinčič, P.: TEM investigations of Au-NiO nanocrystalline thin films as gas sensing material. *Journal of Electrical Engineering* **58** (2007), 347-350.

### 3. Kapitoly v knihách 1

#### a) zahraničné 1

1. **Hotový, I.**, Řeháček, V., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L.: NiO thin films for gas sensing applications. In: *Sensors for Environmental Control*, Ed. Pietro Siciliano, New Jersey: World Scientific, ISBN 981-238-338-7, (2003), 58-63.

### 4. Recenzované príspevky v zborníkoch 25

1. **Hotový, I.** and Brčka, J.: Deposition and properties of NbN coatings. In: *Surface modification technologies*, Eds. Sudarshan, T.S. and Jeandin, M., London: The Institute of Materials, Book No. 617, 1995, 545-549.
2. **Hotový, I.**, Vaněk, O., Spiess, L. and Nennewitz, O.: NiO thin films applicable in gas sensors. In: *Proceedings of the 40-th International Scientific Colloquium* at Ilmenau, Germany, September 1995, 713-718.
3. **Hotový, I.** and Schwesinger, N.: The effect of mask material on the reactive ion etching of silicon structures. In: *The 41-th International Scientific Colloquium* at Ilmenau, Germany, September 1996, 71-75.
4. **Hotový, I.** and Schwesinger, N.: Reactive ion etching of silicon using SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> gas mixture. In: *International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems* at Smolenice, Slovakia, October 1996, 323-326.
5. Schwesiger, N., **Hotový, I.**, Sandig, T. and Pelzus, A.: Influence of the gas composition and the mask materials on the etch profile of dry etched structures in silicon. In: *SPIE's 1996 Symposium on Micromachining and Microfabrication*, Austin, Texas, USA, October 1996, 41-49.
6. **Hotový, I.**, Huran, J. and Srnánek, R.: Nickel oxide thin films for gas sensors applications. In: *Proceedings Eurosensors XII*, Southampton, United Kingdom, September 1998, 237-240.
7. **Hotový, I.**, Huran, J., Breternitz, V., Spiess, L., Teichert, G. and Schawohl, J.: Effect of oxygen concentration in the sputtering mixture on the properties of dc magnetron sputtered NiO films. In: *Proceedings 43. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium* Ilmenau, Germany, September 1998, 509-514.
8. **Hotový, I.**, Huran, J., Haščík, Š. and Srnánek, R.: Characterization of magnetron sputtering process of NiO by using flow modulation of oxygen. In: *14<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Chemistry*, Prague, Czech Republic, August 1999, 1579-1582.
9. **Hotový, I.** and Janík, J.: Modelling of processes on the target and discharge behavior in reactive magnetron deposition of nickel oxide. In: *14<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Chemistry*, Prague, Czech Republic, August 1999, 699-703.

10. **Hotový, I.**, Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L., Řeháček, V.: NiO thin films as gas sensors. In: *Proceedings of Eurosensors XIV*. August 27-30, 2000, Copenhagen, Denmark, 163-166.
11. **Hotový, I.**, Čapkovič, R., Huran, J., Siciliano, P., Rella, R. Spiess, L.: Characterization of NiO thin films for gas sensor. In: *Sensors and Microsystems*, Editors: C. Di Natale, A. D'Amico, P. Siciliano, Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2000, ISBN 981-02-4487-8, 180-185.
12. **Hotový, I.**, Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L., Kremmer, J.: NiO thin films for NO<sub>2</sub> and CO detection. In: *The 16<sup>th</sup> European Conference on Solid-State Transducers*, Prague, Czech Republic, September 2002, 176-179.
13. **Hotový, I.**, Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L. and Řeháček, V.: NiO-based thin films with Pt surface modification for H<sub>2</sub> detection. In: *Eurosensors XVIII - The 17<sup>th</sup> European Conference on Solid-State Transducers*, Guimaraes, Portugal, September 2003, 639-642.
14. Cimalla, V., Spiess, L., Gubisch, M., **Hotový, I.**, Romanus, H., Ambacher, O.: Analyse nanokristalliner schichten auf rauen substraten. In: *Thüringer Werkstofftag 2004*: Ilmenau, Germany, Ilmenau: TH, 2004, 177-183.
15. **Hotový, I.**, Kremmer, J., Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L.: Characterization and gas sensing properties of NiO thin films. In: *8th italian conference "Sensors and actuators"*, Trento, Italy, Singapore : World Scientific, 2004, 185-190.
16. **Hotový, I.**, Huran, J., McPhail, D.S. Řeháček, V.: Enhanced magnetron sputtering deposition of NiO by gas flow modulation. In: *17th International Conference on Plasma Chemistry* Toronto, Canada. 7.- 12. 8. 2005. Toronto : International Plasma Society Chemistry, 2005. CD ROM.
17. **Hotový, I.**, Lalinský, T., Řeháček, V., Spiess, L. Gubisch, M., Haščík, Š., Reháková, A.: Fabrication and characterization of microheater on GaAs for gas sensors. In: *51. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium : Information Technology and Electrical Engineering - Devices and Systems, Materials and Technologies for the Future*. - Ilmenau : Technische Universität Ilmenau, 2006. ISBN 3-938843-15-2, 269-270.
18. **Hotový, I.** Řeháček, V. Lalinský, T., Haščík, Š. Kúdela, P.: Gallium arsenide suspended microheater for MEMS gas sensors. In: *20th European Conference on Solid-State Transducers (Eurosensors XX)*: Goeteborg, Sweden, 17.-20.9.2006. Göteborg, 2006. ISBN 91-631-9281-0, CD ROM, 4 strany.
19. Lalinský, T., Držík, M. **Hotový, I.**, Haščík, Š., Vanko, G. Mozolová, Ž., Řeháček, V., Kostič, I., Matay, L.: Micromachined GaAs based thermal converter for gas sensors. In: *20th European Conference on Solid-State Transducers (Eurosensors XX)*: Goeteborg, Sweden, 17.-20.9.2006. Göteborg, 2006. ISBN 91-631-9281-0. CD ROM, 4 strany.
20. **Hotový, I.**, Řeháček, V., Lalinský, T., Haščík, Š., Mika, F.: Design and development of a microheater on GaAs for MEMS gas sensor array. In: *Proceedings of SPIE. Vol. 6589: Smart Sensors, Actuators, and MEMS III*: Maspalomas, Spain, 2.-4.5.2007. - Washington : SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007. ISBN 0277-786X. 658918.1-8.
21. **Hotový, I.**, Predanoc, M., Hotový, J., Kups, T., Spiess, L., Wang, CH., Řeháček, V.: Growth and characterization of indium oxide films for ozone detection. In: *53. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium : Prospects in Mechanical Engineering*. Ilmenau, Germany, 8.-12.9.2008. - Ilmenau : Technische Universität Ilmenau, 2008. - ISBN 978-3-938843-37-6. - ISBN 978-3-938843-40-6. - DVD-Rom.



22. Tengeri, D., Pullmannová, A., **Hotový, I.**, Řeháček, V., Haščík, Š., Lalinský, T.: Preparation and Properties of Micro-Hotplates for Gas Sensors Based on GaAs. In: *ASDAM 2008. The Seventh International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems*. - Piscataway : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. - ISBN 978-1-4244-2325-5. - S. 323-326.
23. Fasaki I, Antoniadou M, Giannoudakos A, Stamataki, M., Kompitsas, M., Roubani-Kalantzopoulou, F., **Hotový, I.**, Řeháček, V.: Hydrogen microsensor based on NiO thin films, NATO Science for Peace and Security Series B - Physics and Biophysics, 2008, 379-382.
24. **Hotový, I.**, Tengeri, D., Řeháček, V., Haščík, J., Pullmannová, A., Košč, I., Kups, T., Spiess, L.: Gas sensing micromachined structure based on gallium arsenide. In: *54. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Ilmenau, Germany, Technische Universität Ilmenau, 2009. - ISBN 978-3-938843-44-4. - CD-Rom.
25. **Hotový, I.**, Predanoc, M., Pezoldt, J., Wilke, M., Kups, T., Řeháček, V., Spiess, L.: Nanostructured indium oxide deposited at room temperature. In: *54. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Ilmenau, Germany, Technische Universität Ilmenau, 2009. - ISBN 978-3-938843-44-4. - CD-Rom.

## 5. Realizované technické riešenia

5

1. Návrh, realizácia a výroba platínových keramických sond pre snímače teploty, smeru a rýchlosti vetra (1989-1990). Aplikované v staniciach na meranie meteorologických veličín METEO Typ 01, vyrábaných v ÚVES š.p., Výskumno-výrobný závod Liptovský Hrádok.
2. Vývoj a výroba 4 sád etalónov drsnosti typu A1 podľa ISO 5436 na báze kremíka pre Slovenský metrologický ústav (1999-2000). Každá sada pozostávala z 8 etalónov drsnosti s rozdielnymi menovitými hodnotami hĺbky rysiek od 0,032 do 3,2 mikrometra.
3. Vývoj technológie plazmatického leptania platínových vrstiev pripravených sieťotlačov pre TESLU Lanškroun a.s. (2000-2001). Technologický proces reaktívneho iónového leptania v zmesi plynov  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  pri zvýšenej teplote umožňuje tvarovanie motívov širokých 30  $\mu\text{m}$  do platínových vrstiev hrúbky 5 až 7  $\mu\text{m}$ .
4. Transfer technológie prípravy NiO tenkých vrstiev požadovaných optických vlastností pre firmu ASAHI GLASS Co., Ltd., Yokohama (2001).
5. Vývoj a optimalizácia procesov plazmatického leptania kremíkových diódových štruktúr pre SEMIKRON, s.r.o. Vrbové (1999-2002).

## 10. Citačný ohlas prác uchádzača

### 1. Citácie prác podľa SCI

240

**Hotový, I.** and Huran, J.: Properties of NbN films prepared by reactive magnetron sputtering. *Phys. Stat. Sol. (a)* **137**, (1993) K25-28.

1. Siebold, T., Ziemann, P.: Temperature - dependence of the thermoelectric effect of ion-bombarded NbN films - evidence for the suppression of phonon drag and for renormalization. *Phys. Review B* **51** (1995) 6328-6335.
2. Hiroshima, T. Ishiguro, T. Kobayashi: Sequential deposition of NbN/MgO film on Si (100) using KrF excimer laser deposition method with different ambiances. *Japanese Journal Applied Physics* **35** (1996) 4021-4026.

Brčka, J. and **Hotový, I.**: Processes on the target and discharge and NbN film behaviour in dc magnetron deposition. *Vacuum* **46**, (1995) 1407-1412.

1. Iosad, N.N., Mijiritskii, A.V., Roddatis, V.V., Van der Pers, N.M., Jackson, B.D., Gao, J.R., Polyakov, S.N., Dmitriev, P.N., Klapwik, T.M.: Properties of  $(\text{Nb}_{0.35}\text{Ti}_{0.15})_x\text{Ni}_{1-x}$  thin films deposited on silicon wafers at ambient substrate temperature. *Journal of Applied Physics* **88** (2000), 5756-5759.
2. Torche, M., Schmerber, G., Guemaz, M., Mosser, A., Parlebas, J.C.: Non-stoichiometric niobium nitrides: structure and properties. *Thin Solid Films* **436** (2003) 208-212.
3. Depla, D., De Gryse, R.: Target poisoning during reactive magnetron sputtering: Part III: the prediction of the critical reactive gas mole fraction. *Surface and Coating Technology* **183** (2004), 196-203.
4. Fontalvo, G.A., Terziyska, V., Mitterer, C.: High-temperature tribological behaviour of sputtered  $\text{NbN}_x$  thin films, *Surface and Coating Technology* **202** (2007), 1017-1022.

**Hotový, I.**, Vaněk, O., Spiess, L. and Nennewitz, O.: NiO thin films applicable in gas sensors. In: *Proceedings of the 40-th International Scientific Colloquium* at Ilmenau, Germany, September 1995, 713-718.

1. Imawan, C., Solzbacher, F., Steffes, H., Obermeier, E.:  $\text{TiO}_x$  -modified NiO thin films for H<sub>2</sub> gas sensors: effects of TiO<sub>x</sub> -overlayer sputtering parameters. *Sensors and Actuators B* **68** (2000) 184-188.
2. Palcik, O., Avivi, S., Pinkert, D. and Gedanken, A.: Preparation and characterization of Ni/NiO composite using microwave irradiation and sonication. *NanoStructured Materials*, **11** (1999) 415-420.

Schwesiger, N., **Hotový, I.**, Sandig, T. and Pelzus, A.: Influence of the gas composition and the mask materials on the etch profile of dry etched structures in silicon. In: *SPIE's 1996 Symposium on Micromachining and Microfabrication*, Austin, Texas, USA, October 1996, 41-49.

1. Burkett, S.L., Qiao, X., Temple, D., Stoner, B., McGuire, G.: Advanced processing techniques for through-wafer interconnects, *Journal of Vacuum Science and Technology B* **22** (2004), 248-256.

**Hotový, I.**, Búc, D., Brčka, J. and Srnánek, R.: Study of niobium nitride films produced by dc reactive magnetron sputtering. *Phys. Stat. Solidi (a)* **160** (1997), 97-104.

1. Klingenberg, M.L., Demaree, J.D.: The effect of transport ratio and ion energy on the mechanical properties of IBA niobium nitride coatings. *Surface and Coating Technology* **146-147** (2001) 243-249.
2. Torche, M., Schmerber, G., Guemmaz, M., Mosser, A., Parlebas, J.C.: Non-stoichiometric niobium nitrides: structure and properties. *Thin Solid Films* **436** (2003) 208-212.
3. Chromik, S., Gazi, S., Strbik, V.: Electrical and structural properties of MgB<sub>2</sub> films prepared by sequential deposition of B and Mg on the NbN-buffered Si (100) substrate. *Journal of Applied Physics* **96** (2004), 4668-4670.
4. Aouadi, S.M., Debessai, M., Tomek, R., et al: Real time spectroscopic ellipsometry study during the growth of nanocrystalline nitride protective coatings. *Journal of Vacuum Science & Technology B* **22** (2004), 1822-1829.
5. Ma, J., Du, Y., Qian, Y.: Low-temperature synthesis of nanocrystalline niobium nitride via a benzene-thermal route. *Journal of Alloys and Compounds* **389** (2005), 296-298.
6. Olaya, J.J., Rodil, S.E., Muhl, S.: Comparative study of niobium nitride coatings deposited by unbalanced and balanced magnetron sputtering. *Thin Solid Films* **516** (2008), 8319-8326.
7. Olaya, J.J., Huerta, L., Rodil, S.E., Escamilla, L.: Superconducting niobium nitride films deposited by unbalanced magnetron sputtering, *Thin Solid Films* **516** (2008), 8768-8773.

**Hotový, I.,** Huran, J., Breternitz, V., Spiess, L., Teichert, G. and Schawohl, J.: Effect of oxygen concentration in the sputtering mixture on the properties of dc magnetron sputtered NiO films. In: Proceedings 43. *Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau*, Germany, September 1998, 509-514.

1. Tan, L., Crone, W.C.: Surface characterization of NiTi modified by plasma source ion implantation. *Acta Materialia* **50** (2002) 4449-4460.
2. Wang, B. W., Shen, H.: Study on Ni-Cr system solar selective thin films prepared by magnetron reactive sputtering process, *Acta Metallurgica Sinica* **15** (2002), 203-206.

**Hotový, I.,** Huran, J., Búc, D. and Srnánek, R.: Thermal stability of NbN films deposited on GaAs substrates. *Vacuum* **50**, (1998) 45-48.

1. Han, Z., Hu, X., Tian, J., Li, G., Mingyuan, G.: Magnetron sputtered NbN thin films and mechanical properties. *Surface and Coating Technology* **179** (2004) 188-192.
2. Han, Z. H., Hu, X. P., Tian, J. W., Li, G. Y., Gu, M. Y.: Effect of N<sub>2</sub> partial pressure on the microstructure and mechanical properties of magnetron sputtered NbN thin films. *Journal of Shanghai Jiaotong University* **38** (2004), 120-124.
3. Du, X.K., Wang, T.M., Wang, C., Chen, B.L., Zhou, L.: Microstructure and optical characterization of magnetron sputtered NbN thin films. *Chinese Journal of Aeronautics* **20** (2007), 140-144.
4. Koscielska, B., Winiarski, A.: Structural investigations of nitrated Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub> sol-gel derived. *J. Non-Cryst. Solids* **354** (2008), 4349-4353.
5. Linde, A.V., Marin-Ayral, R.M., Granier, D., et al.: Synthesis of cubic niobium nitride by reactive diffusion under nitrogen pressure. *Materials Research Bulletin* **44** (2009), 1025-1030.

**Hotový, I.,** Huran, J., Haščík, Š. and Lalinský, T.: Reactively sputtered NbN Schottky contacts on GaAs and their thermal stability. *Vacuum* **50**, (1998) 403-406.

1. Dmitruk, N.L., Ermolowich, I.B., Konakova, R.V. et al.: On the nature of transition layer and heat tolerance of TiB<sub>x</sub>/GaAs - based contacts. *Applied Surface Science* **166** (2000) 520-525.
2. Dmitruk, N.L., Ermolovich, I.B., Fursenko, O.V., Konakova, R.V., Milenin, V.V., Voitsithovskiy, D.I., Yastrubchak, O.B.: Analytical, optical and electrophysical investigations of TiB<sub>x</sub>-GaAs interface. *Surface Science* **482-485** (2001) 928-934.

3. Bendavid, A., Martin, P.J., Kinder, T.J., Preston, E.W.: The deposition of NbN and NbC thin films by filtered vacuum cathodic arc deposition. *Surface and Coating Technology* **163-164** (2003) 347-352.

**Hotový, I., Búc, D., Haščík, Š. and Nennewitz, O.:** Characterization of NiO thin films deposited by reactive sputtering. *Vacuum* **50**, (1998) 41-44.

1. Pejova, B., Kocareva, T., Najdoski, M., Grozdanov, I.: A solution route to nanocrystalline nickel oxide thin films. *Applied Surface Science* **165** (2000) 271-278.
2. Wang, S., Wang, W., Wang, W., Jiao, Z., Liu, J., Qian, Y.: Characterization and gas-sensing properties of nanocrystalline iron (III) oxide films prepared by ultrasonic spray pyrolysis on silicon. *Sensors and Actuators B* **69** (2000) 22-27.
3. Valeri, S., Altieri, S., di Bona, A., Giovanardi, C., Moia, T.S.: Structural study of thin MgO layers on Ag (001) prepared by either MBE or sputter deposition. *Thin Solid Films* **400** (2001) 16-21.
4. Porqueras, I., Bertan, E.: Electrochromic behaviour of NiO thin films deposited by thermal evaporation. *Thin Solid Films* **398-399** (2001) 41-44.
5. Kohmoto, O., Nakagawa, H., Ono, F., Chayahara, A.: Ni-defective value and resistivity of sputtered NiO films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **226-230** (2001) 1627-1628.
6. Sheng-Yue Wang, Wei Wang, Wen-Zhong Wang and You-Wei Du: Preparation and characterization of highly oriented NiO(200) films by a pulse ultrasonic spray pyrolysis method. *Materials Science and Engineering B*, **90** (2002) 133-137.
7. Patil, P.S. and Kadam, L.D.: Preparation and characterization of spray pyrolyzed NiO thin films., *Applied Surface Science* **199** (2002), 211-221.
8. Zheng, J.A., Wu, M.H., Gu, J.Z., Qin, Z.: Preparation and gas-sensing characteristics of nanocrystalline spinel zinc ferrite thin films. *IEEE Sensors Journal* **3** (2003), 435-438.
9. Giovanardi, C., di Bona, A., Valeri, S.: Oxygen-dosage effect on the structure and composition of ultrathin NiO layers reactively grown on Ag(001). *Physical Review B* **69** (2004) Art. No. 075418.
10. Lee, M., Seo, S., Seo, D., et al: Properties of nickel oxide films by DC reactive sputtering. *Integrated Ferroelectrics* **68** (2004), 19.
11. Kamal, H., Elmaghraby, E.K., Ali, S.A., et al.: Characterization of nickel oxide films deposited at different substrate temperatures using spray pyrolysis. *Journal of Crystal Growth* **262** (2004) 424-434.
12. Myoungjae, L., Sunae, S., Seo, D., Eunju, J., Yoo, I.K.: Properties of nickel oxide films by dc reactive sputtering. *Integrated Ferroelectrics* **68** (2004), 19-25.
13. Jiin-Long Yang, Yi-Sheng Lai, J.S. Chen: Effect of heat treatment on the properties of non-stoichiometric p-type nickel oxide films deposited by reactive sputtering. *Thin Solid Films* **488** (2005), 242-246.
14. Lee, J. W., Park, I. H., Chung, C. W.: Electrical characterization of nickel oxide thin films deposited by reactive sputtering for memory applications, *Integrated Ferroelectrics* **74** (2005), 71-77.
15. Moon, S.E., Park, J.H., Kim, E.K., et al: Oxygen pressure dependent resistance-switching properties of nickel-oxide films grown by using a pulsed laser deposition method, *Journal of the Korean Physical Society* **49** (2006), 1066-1070.
16. Huang, J.Z., Xu, Z., Li, H.L., Kang, G.H., Wang, W.J.: Influence of process parameters on electrochemical and physical properties of sputtered iron-doped nickel oxide thin films. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **16** (2006), 1301-1306.
17. Godsi, E.F., Khayatiyan, S.S.: Preparation and determination of optical properties of NiO thin films deposited by DIP coating technique. *Surface Review and Letters* **14** (2007), 219-224.
18. Huang, J.Z., Xu, Z., Li, H.L., Kang, G.H. Wang, W.J.: Preparation and characterization of iron-doped nickel oxide thin films. *Journal of Optoelectronics Laser* **18** (2007), 392-395.
19. Kobayashi, K., Yamaguchi, M., Tomita, Y., Maeda, Y.: Fabrication and characterization of In-Ga-Zn-O/NiO structures, *Thin Solid Films* **516** (2008), 5903-5906.
20. Salah A. Makhlof: Electrical properties of NiO films obtained by high-temperature oxidation of nickel. *Thin Solid Films* **516** (2008), 3112-3116.

21. Stamaki, M., Tsamakidis, D., Brilis, N., Fasaki, I., Giannoudakos, A., Kompitsas, M.: Hydrogen gas sensors based on PLD grown NiO thin film structures. *Physica Status Solidi A* **205** (2008), 2064-2068.
22. Makhoulouf, S.A., Kassem, M.A., Abdel-Rahim, M.A.: Particle size-dependent electrical properties of nanocrystalline NiO. *Journal of Materials Science* **44** (2009), 3438-3444.
23. Lee, Y.M., Lai, C.H.: Preparation and characterization of solid n-TiO<sub>2</sub>/p-NiO heterojunction electrodes for all-solid-state dye-sensitized solar cells. *Solid State Electronics* **53** (2009), 1116-1125.
24. Subramanian, B., Mohammed Ibrahim, M., Murali, K.R., et al. Structural, optoelectronic and electrochemical properties of nickel oxide films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **20** (2009), 953-957.
25. Patil, L.A., Shinde, M.D., Bari, A.R., Deo, V.V.: Highly sensitive and quickly responding ultrasonically sprayed nanostructured SnO<sub>2</sub> thin films for hydrogen gas sensing, *Sensors and Actuators B* **143** (2009), 270-277.

Búc, D., **Hotový, I.**, Haščík, Š. and Červeň, I.: Reactive unbalanced magnetron sputtering of AlN thin films. *Vacuum* **50**, (1998) 121-123.

1. Kao, K.S. Cheng, C.C., Chen, Y.C.: Synthesis and surface acoustic wave properties of AlN films deposited on LiNbO<sub>3</sub> substrates. *IEEE Transaction on ultrasonics ferroelectrics and Frequency control* **49** (2002) 345-349.
2. Wu, H.S., Zhang, F.Q., Xu, X.H., Zhang, C.J., Jiao, H.J.: Geometric and energetic aspects of aluminum nitride cages. *Journal of Physical Chemistry A* **107** (2003) 204-209.
3. Figueroa, U., Salas, O., Oseguera, J.: Production of AlN films: ion nitriding versus PVD coatings. *Thin Solid Films* **469-70** (2004), 295-303.
4. Guo, L., Wu, H., Jin, Z.: Magic behavior and bonding nature in hydrogenated aluminum nitride clusters, *Applied Surface Science* **242** (2005), 88-96.
5. Guo, L., Wu, H.S., Jin, Z.H.: First-principles investigation of structure and stability of Al<sub>n</sub>Nm clusters. *International Journal of Quantum Chemistry* **103** (2005), 291-298.
6. Guo, L., Wu, H. S.: Density functional study of structural and electronic properties of Al<sub>n</sub>N (1<n<12) clusters, *International Journal of Quantum Chemistry* **106** (2006), 1250-1257.
7. Figueroa, U., Salas, O., Oseguera, J.: Process-microstructure-properties relationship during formation of AlN layers by physical vapour deposition, *Surface Engineering* **22** (2006), 109-120.
8. Guo, L.: Density functional study of carbon monoxide adsorption on small cationic, neutral, and anionic aluminum nitride clusters. *International Journal of Quantum Chemistry* **107** (2007) 1624-1631.

**Hotový, I.**, Huran, J., Janík, J. and Kobzev, A.P.: Deposition and properties of NiO films produced by reactive magnetron sputtering. *Vacuum* **51**, (1998) 157-160.

1. Porquaras, I., Bertan, E.: Electrochromic behaviour of NiO thin films deposited by thermal evaporation. *Thin Solid Films* **398-399** (2001) 41-44.
2. Chan IM, Hsu TY, Hong FC: Enhanced hole injections in organic light-emitting devices by depositing nickel oxide on indium tin oxide anode. *Appl Phys Lett* **81** (2002) 1899-1901.
3. Bosco, C.A.C., Azevedo, A., and Acioli, L.H.: Laser-wavelength dependence of the picosecond ultrasonic response of a NiFe/NiO/Si structure. *Physical Review B* **66** (2002), Art. No. 125406.
4. Bruckner, W., Kaltofen, R., Thomas, J., Hecker M, Uhlemann M, Oswald S, Elefant D, Schneider CM: Stress development in sputtered NiO thin films during heat treatment, *Journal of Applied Physics*, **94** (2003) 4853-4858.
5. Yu, G.H., Zhu, F.W., Chai, C.L.: X-ray photoelectron spectroscopy study of magnetic films *Applied Physics B – Lasers and Optics* **76** (2003) 45-47.

6. Depla, D., De Gryse, R.: Target poisoning during reactive magnetron sputtering: Part III: the prediction of the critical reactive gas mole fraction. *Surface and Coating Technology* **183** (2004), 196-203.
7. Chan, I.M., Hong, F.C.: Improved performance of the single-layer and double-layer organic light emitting diodes by nickel oxide coated indium tin oxide anode. *Thin Solid Films* **450** (2004) 304-311.
8. Seo, S., Lee, M.J., Seo, D.H., et al: Reproducible resistance switching in polycrystalline NiO films. *Applied Physics Letters* **85** (2005), 5655-5657.
9. Lutzenkirchen-Hecht, D., Bruder, K., Haake, U., et al. Miniaturized multipurpose cell for in situ investigation of sputtered thin films with x-ray techniques. *Review of Scientific Instruments* **76** Art. No. 073905 Jul 2005.
10. Shuxi Zhao, E. Avendano, K. Gelin, J. Lu, E. Wackelgard: Optimization of an industrial DC magnetron sputtering process for graded composition solar thermal absorbing layer. *Solar Energy Materials & Solar Cells* **90** (2006), 308-328.
11. Zhao, S. X., Avendano, E., Gelin, K, et al.: Optimization of an industrial DC magnetron sputtering process for graded composition solar thermal absorbing layer, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **90** (2006), 308-328.
12. Lützenkirchen-Hecht, D., Frahm, R.: Time-resolved in situ investigations of reactive sputtering processes by grazing incidence X-ray absorption spectroscopy, *Surface Science* **600** (2006) 4380-4384.
13. Ying Zhou, Donghong Gu, Yongyou Geng, Fuxi Gan: Thermal, structural and optical properties of NiO<sub>x</sub> thin films deposited by reactive dc magnetron sputtering, *Materials Science and Engineering B* **135** (2006), 125-128.
14. Huang, J.Z., Xu, Z., Li, H.L., Kang, G.H., Wang, W.J.: Influence of process parameters on electrochemical and physical properties of sputtered iron-doped nickel oxide thin films. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **16** (2006), 1301-1306.
15. Zhou, Y., Geng, Y., Gu, D.: Effects of oxygen partial pressure on optical properties of NiO<sub>x</sub> films deposited by reactive dc-magnetron sputtering. *Chinese Optics Letters* **4** (2006), 678-681.
16. Ying Zhou, Yongyou Geng, Donghong Gu: Influence of thermal annealing on optical properties and surface morphology of NiO<sub>x</sub> thin films, *Materials Letters* **61** (2007), 2482-2485.
17. Lee, M.D., Ho, C.H., Lo, C.K., Peng, T.Y., Yao, Y.D.: Effect of oxygen concentration on characteristics of NiO<sub>x</sub>-based resistance random access memory. *IEEE Transactions on Magnetics* **43** (2007), 939-943.
18. Zhou, Y., Geng, Y.Y., Gu, D.H.: Structure and optical property changes of heat induced NiO<sub>x</sub> thin films. *Chinese Journal of Lasers* **34** (2007), 125-129.
19. Ringpfeil, C., Lutzenkirchen-Hecht, D., Frahm, R.: In-situ investigations of magnetron sputtering processes with laboratory X-ray equipment. *Thin Solid Films* **515** (2007), 5597-5600.
20. Tharayil, N.J., Sagar, S., Raveendran, R., Vaidyan, A.V.: Dielectric studies of nanocrystalline nickel-cobalt oxide. *Physica B: Condensed Matter* **399** (2007), 1-8.
21. Ringpfeil, C., Lützenkirchen-Hecht, D., Frahm, R.: A magnetron sputter deposition chamber for in-situ investigation of multilayer film growth using a state of the art Laboratory Diffractometer. *Physica status solidi (a)* **204** (2007) 2792-2797.
22. Ai, L., Fang, G., Yuan, L., Liu, N., Wang, M., Li, C., Zhang, Q.Z., Li, J., Zhao, X.: Influence of substrate temperature on electrical and optical properties of p-type semitransparent conductive nickel oxide thin films deposited by radio frequency sputtering. *Applied Surface Science* **254** (2008), 2401-2405.
23. Jang, W.,L., Lu, Y.M., Hwang, W.S., Hsiung, T.L., Wang, H.P.: Effect of substrate temperature on the electrically conductive stability of sputtered NiO films. *Surface & Coating Technology* **202** (2008), 5444-5447.

Venger, E.F., Milenin, V.V., Ermolovich, I.B., Konakova, R.V., Voitsikhovskiy, D.I., **Hotový, I.** and Ivanov, V.N. : Heat tolerance of titanium boride and titanium nitride contacts to gallium arsenide. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* **2**, (1999) 124-132.

1. Kryshab, T.G., Palacios Gomez, J., Lytvyn, P.M. and Lytvyn, O.S.: The influence of TiB<sub>2</sub>-thin film thickness on metal-GaAs structural characteristics. *Thin Solid Films* **373** (2000) 79-83.
2. Schultes, G., Schmitt, M., Goettel, D., Freitag-Weber, O.: Strain sensitivity of TiB<sub>2</sub>, TiSi<sub>2</sub>, TaSi<sub>2</sub> and WSi<sub>2</sub> thin films as possible candidates for high temperature strain gauges. *Sensors and Actuators A* **126** (2006) 287-291.
3. Oder, T.N., Martin, P., Lin, J.Y., Jiang, H.X., Williams, J.R., Isaacs-Smith, T.: Thermally stable Schottky contacts on n-type GaN using ZrB<sub>2</sub>. *Applied Physics Letters* **88** (2006), 183505.
4. Oder, T.N., Martin, P., Adedeji, A.V., Isaacs-Smith, T., Williams, J.R.: Improved Schottky contacts on n-type 4H-SiC using ZrB<sub>2</sub> deposited at high temperatures. *Journal of Electronic Materials* **36** (2007), 805-811.
5. Oder, T.N., Sutphin, E., Kumari, R.: Ideal SiC Schottky barrier diodes fabricated using refractory metal borides. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* **27** (2009), 1865-1869.

**Hotový, I.,** Huran, J., Spiess, L., Haščík, Š. and Řeháček, V.: Preparation of nickel oxide thin films for gas sensors applications. *Sensors and Actuators B* **57**, (1999) 147-152.

1. Porquaras, I., Bertan, E.: Electrochromic behaviour of NiO thin films deposited by thermal evaporation. *Thin Solid Films* **398-399** (2001) 41-44.
2. Bosco, C.A.C., Azevedo, A., and Acioli, L.H.: Laser-wavelength dependence of the picosecond ultrasonic response of a NiFe/NiO/Si structure. *Physical Review B* **66** (2002), Art. No. 125406.
3. Zhang, C.F., Zhan, J., Wu, J.U., Guo, X.Y., Okido, M.: Preparation of fibrous nickel oxide particles. *Transactions of nonferrous metals society of China* **13** (2003), 1440-1445.
4. Acosta, D.R., Magana, C.R., Rendon, L: Electrochromic nickel oxides thin films deposited on ITO: An electrochemical and electron microscopy study. *Microscopy and Microanalysis* **9** (2003), 620-621.
5. Zhan, Y., Yin, Ch., Zheng, Ch., Wang, W., Wang, G.: A simple method to synthesize NiO fibers. *Journal of Solid State Chemistry* **177** (2004) 2280-2283.
6. Jiin-Long Yang, Yi-Sheng Lai, Chen, J.S.: Effect of heat treatment on the properties of non-stoichiometric p-type nickel oxide films deposited by reactive sputtering. *Thin Solid Films* **488** (2005), 242-246.
7. Zhan, J., Zhang, C.F., Li, T.J., et al: Thermodynamic analysis on preparation of fibrous NiO precursor powders with oxalate precipitation process. *Transaction of Nonferrous metals Society of China* **15** (2005), 926-930.
8. Magana, C.R., Acosta, D.R., Martinez, A.I., Ortega, J.M.: Electrochemically induced electrochromic properties in nickel thin films deposited by DC magnetron sputtering. *Solar Energy* **80** (2006), 161-169.
9. Xueliang Li, Xiaoxi Zhang, Zirong Li, Yitai Qian: Synthesis and characteristics of NiO nanoparticles by thermal decomposition of nickel dimethylgloximate rods, *Solid State Communications* **137** (2006), 581-584.
10. Theodoros E. Karakasidis, E. Vamvakopoulos: Ni<sup>3+</sup> adsorbate dynamics on a NiO (001) surface, *Surface Science* **600** (2006), 1952-1964.
11. Mei Yu, Jianhua Liu, Songmei Li: Preparation and characterization of highly ordered NiO nanowire arrays by sol-gel template method, *Journal of University of Science and Technology Beijing* **13** (2006), 169-173.
12. Yang, L.X., Zhu, Y.J., Tong, H., Liang, Z.H., Li, L., Zhang, L.: Hydrothermal synthesis of nickel hydroxide nanostructures in mixed solvents of water and alcohol. *Journal of Solid State Chemistry* **180** (2007), 2095-2101.
13. Sasi, B., Gopchandran, K.G.: Nanostructured mesoporous nickel oxide thin films. *Nanotechnology* **18** (2007), Art. N. 115613.
14. Perentes, A., Sinicco, G., Boero, G., Dwir, B., Hoffmann, P.: Focused electron beam induced deposition of nickel, *Journal of Vacuum Science and Technology B* **25** (2007), 2228-2232.

15. Yuan, Z., Zhang, M., Zheng, C.: Influence of aluminum oxide substrate surface impurity on oxygen response characteristic of titania thick film. *Journal of the Chinese Ceramic Society* **36** (2008), 341-346.
16. Gundjekar, J.L., More, A.M., Lokhande, C.D.: Chemical deposition of nanocrystalline nickel oxide from urea containing bath and its use in liquefied petroleum gas sensor. *Sensors and Actuators B* **131** (2008), 356-361.
17. Varghese, B., Reddy, M.V., Yanwu, Z., Lit, C.S., Hoong, T.C., Rao, G.V.S., et al: Fabrication of NiO nanowall electrodes for high performance lithium ion battery. *Chemistry of Materials* **20** (2008), 3360-3367.
18. Yejun Qiu, Jie Yu, Cuili Tan, Jing Yin: Preparation of honeycomb-like NiO with nanogrooves by using electrospun nanofibrous webs as templates, *Materials Letters* **63** (2008), 200-202.
19. Wei, Z.Q., Qiao, H.X., Yang, H., Zhang, C.R., Yan, X.Y.: Characterization of NiO nanoparticles by anodic arc plasma method. *Journal of Alloys and Compounds* **479** (2009), 855-858.
20. Nandy, S., Maiti, U.N., Ghosh, C.K., Chattopadhyay, M.K.: Enhanced p-type conductivity and band gap narrowing in heavily Al doped NiO thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Journal of Physics : Condensed Matter* **21** (2009), art. no. 115804.
21. Ma, M., Zhu, J., Jiang, J., Sun, R.C.: Hydrothermal-polyol route to synthesis of beta-Ni(OH)<sub>2</sub> and NiO in mixed solvents of 1,4-butanediol and water. *Materials Letters* **63** (2009), 1791-1793.
22. Wei, Z., Qiao, H., Yang, H., Zhu, L., Yan, X.: Preparation and characterization of NiO nanoparticles by anodic arc plasma method. *Journal of Nanomaterials* (2009), art. no. 795928.
23. Qiu, Yejun., Yu, Jie, Tan, Cuili, Yin, Jing: Preparation of honeycomb-like NiO with nanogrooves by using electrospun nanofibrous webs as templates. *Materials Letters* **63** (2009), 200-202.
24. Salavati-Niasari, M., Mohandes, F., Davar, F., et al.: Preparation of NiO nanoparticles from metal-organic frameworks via a solid-state decomposition route. *Inorganica Chimica Acta* **362** (2009), 3691-3697.
25. Qiu, Yejun, Yu, J.Y., Tan, C., Yin, J.: Synthesis of porous NiO and ZnO submicro- and nanofibers from electrospun polymer fiber templates. *Nanoscale Research Letters* **4** (2009), 173-177.
26. Kumari, L., Li, W., Vannoy, C.H., et al.: Vertically aligned and interconnected nickel oxide nanowalls fabricated by hydrothermal route. *Crystal Research and Technology* **44** (2009), 498-499.
27. Rahman, M.M., Shu-Lei Chou, Chao Zhong, Jia-Zhao Wang, Wexler, D., Hua-Kun Liu: Spray pyrolyzed NiO-C nanocomposite as an anode material for the lithium-ion battery with enhanced capacity retention, *Solid State Ionics* (2009), doi:10.1016/j.ssi.2009.10.018.
28. Vimala Rani, J.D., Kamatchi, S., Dhathathreyan, A.: Nanoparticles of nickel oxide and nickel hydroxide using lyophilisomes of fibrinogen as template, *Journal of Colloid and Interface Science* **341** (2010), 48-52.

**Hotový, I.,** Huran, J., Spiess, L., Čapkovič, R. and Haščík, Š.: Preparation and characterization of NiO thin films for gas sensor applications. *Vacuum* **58**, (2000) 300-307.

1. Srivastava, D.N., Perkas, N., Seisenbaeva, G.A., Koltypin, Y., Kessler, V.G., Gedanken, A.: Preparation of porous cobalt and nickel oxides from corresponding alkoxides using a sonochemical technique and its application as a catalyst in the oxidation of hydrocarbons. *Ultrasonics Sonochemistry* **10** (2003) 1-9.
2. Wu, L., Wu, Y., Wei, H., Shi, Y. and Hu, Ch.: Synthesis and characteristics of NiO nanowire by a solution method. *Materials Letters* **58** (2004) 2700-2703.
3. Srivastava, D.N., Pol, V.G., Palchik, O., Zhang, L., Yu, J.C., Gedanken, A.: Preparation of stable porous nickel and cobalt oxides using simple inorganic precursor, instead of alkoxides, by a sonochemical technique. *Ultrasonics Sonochemistry* **12** (2005), 205-212.
4. Yang, T.S., Cho, W.T., Kim, M., et al: Atomic layer deposition of nickel oxide films using Ni (dmamp)(2) and water. *Journal of Vacuum Science & Technology A* **23** (2005), 1238-1243.
5. Mei Yu, Jianhua Liu, Songmei Li: Preparation and characterization of highly ordered NiO nanowire arrays by sol-gel template method, *Journal of University of Science and Technology Beijing* **13** (2006), 169-173.



6. Belous, A.G., Yanchevskii, O.Z., Kramarenko, A.V.: Synthesis of nanosize particles of cobalt and nickel oxides from solutions, *Russian Journal of Applied Chemistry* **79** (2006), 345-350.
7. Abbey, B., Lipp, J.D., Barber, Z.H.: Structure-film thickness relationship study of sputtered NiO/Ni bilayers using depth profiling and atomic force microscopy techniques, *Journal of Applied Physics* **99** (2006), 124914.
8. Han, Ch., Han, S.D., Singh, I.: Thermoelectric hydrogen sensor using  $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$  synthesized by molten salt method. *Korean Journal of Chemical Engineering* **23** (2006), 362-366.
9. Li, Q., Wang, L.S., Hu, B.Y., Yang, C., Zhou, L., Zhang, L.: Preparation and characterization of NiO nanoparticles through calcinations of malate gel, *Materials Letters* **61** (2007), 1615-1618.
10. Ying Wu, Yiming He, Tinghua Wu, Tong Chen, Weizheng Weng, Huilin Wan: Influence of some parameters on the synthesis of nanosized NiO material by modified sol-gel method. *Materials Letters* **61** (2007), 3174-3178.
11. Tresback, J.S., Vasiliev, A.L., Pature, N.P., Park, S.Y., Berger, P.R.: Characterization and electrical properties of individual Au-NiO-Au heterojunction nanowires, *IEEE Transaction on Nanotechnology* **6** (2007), 676-686.
12. Tresback, J.S., Pature, N.P.: Low-temperature gas sensing in individual metal-oxide-metal heterojunction nanowires, *Journal of Materials Research* **8** (2008), 2047-2052.
13. Luyo, C., Ionescu, R., Reyes, L.F., et al.: Gas sensing response of NiO nanoparticle films made by reactive gas deposition. *Sensors and Actuators B* **138** (2009), 14-20.

**Hotový, I.,** Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L. and Řeháček, V.: The influences of the preparation parameters on NiO thin film properties for gas-sensing application. *Sensors and Actuators B* **78**, (2001) 126-132.

1. Ferreira, F.F., Haddad, P.S., Fantini, M.C.A., Brito, G.E.S.: Composite Au-NiO films. *Solid State Ionics* **165** (2003) 161-168.
2. Zhang, Y., Zheng, CH., Liu, Y., Wang, G.: Synthesis of NiO nanowires by an oxidation route. *Materials Letters* **57** (2003) 3265-3268.
3. Zhang, C.F., Zhan, J., Wu, J.U., Guo, X.Y., Okido, M.: Preparation of fibrous nickel oxide particles. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **13** (2003), 1440-1445.
4. Sakata, O., Yi, M.S., Matsuda, A., Liu, J., Sato, S., Akiba, S., Sasaki, A., Yoshimoto, M.: Structural analysis of NiO ultra-thin films epitaxially grown on ultra-smooth sapphire substrates by synchrotron X-ray diffraction measurements. *Applied Surface Science* **221** (2004) 450-454.
5. Sakata, O., Takata, M., Suematsu, H., et al.: High-energy X-ray scattering in grazing incidence from nanometer-scale oxide wires. *Applied Physics Letters* **84** (2004), 4239-4241.
6. Haddad, P.S., Ferreira, F.F., Brito, G., et al: Gold-nickel hydroxide multi-layers with selective absorption in the visible range. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* **30** (2004), 179-185.
7. Martucci, A., Buso, D., De Monte, M., et al: Nanostructured sol/gel silica thin films doped with NiO and  $\text{SnO}_2$  for gas sensing applications. *Journal of Materials Chemistry* **14** (2004), 2889-2895.
8. Ottaviano, L., Pennisi, A, Simone, F.: Electrochromic nickel oxide films made by reactive rf sputtering from different targets. *Surface and Interface Analysis* **36** (2004), 1335-1339.
9. Doppiu, S., Langlais, V., Sort, J., et al: Controlled reduction of NiO using reactive ball milling under hydrogen atmosphere leading to Ni-NiO nanocomposites. *Chemistry of Materials* **16** (2004), 5664-5669.
10. Cantilini, C., Post, M., Buso, D., Guglielmi, M, Martucci, A.: Gas sensing properties of nanocrystalline NiO and  $\text{Co}_3\text{O}_4$  in porous silica sol-gel films. *Sensors and Actuators B* **108** (2005), 184-192.
11. Joshi, U.S., Takahashi, R., Matsumoto, Y., Koinuma, H.: Structure of NiO and Li-doped NiO single crystalline thin layers with atomically flat surface. *Thin Solid Films* **486** (2005), 214-217.
12. Sasaki, A., Akiba, S., Matsuda, A. et al: Crystallinity of NiO nanowires grown at step edges of sapphire substrate. *Japanese Journal of Applied Physics* **44** (2005), L256-L259.
13. Chiu, K.F., Chang, C.Y., Lin, C.M.: The electrochemical performance of bias-sputter-deposited nanocrystalline nickel oxide thin films toward lithium. *Journal of the Electrochemical Society* **152** (2005), A1188-A1192.

14. Zhan, J., Zhang, C.F., Li, T.J., et al: Thermodynamic analysis on preparation of fibrous NiO precursor powders with oxalate precipitation process. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China* **15** (2005), 926-930.
15. Yang, Y., Liu, Y., Li, F., Liu, H.: Preparation of nanometer NiO/Al composite particle. *Journal of Chemical Industry and Engineering* **56** (2005), 2228-2232.
16. Arshak, K., Gaidan, I.: NiO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> polymer thick films as room temperature gas sensors. *Thin Solid Films* **495** (2006), 286-291.
17. Zhang, Z. J., Zhao, Y., Zhu, M. M.: NiO films consisting of vertically aligned cone-shaped NiO rods, *Applied Physics Letters* **88** (2006), 033101.
18. Korosec, R.C., Bukovec, P.: Sol-gel prepared NiO thin films for electrochromic applications, *Acta Chimica Slovenica* **53** (2006), 136-147.
19. Han, Ch., Han, S.D., Singh, I.: Thermoelectric hydrogen sensor using Li<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub>O synthesized by molten salt method. *Korean Journal of Chemical Engineering* **23** (2006), 362-366.
20. Buso, D., Guglielmi, M., Martucci, A., Cantalini, C., Post, M.L., Hache, A.: Porous sol gel silica films doped with crystalline NiO nanoparticles for gas sensing applications, *Journal of Sol-Gel Science and Technology* **40** (2006), 299-308.
21. Mattei, G., Mazzoldi, P., Post, M.L., Buso, D., Guglielmi, M., Martucci, A.: Cookie-like Au/NiO nanoparticle with optical gas-sensing properties. *Advanced Materials* **19** (2007), 561-564.
22. Nandy, S., Saha, B., Mitra, M.K., Chattopadhyay, K.K.: Effect of oxygen partial pressure on the electrical and optical properties of highly (200) oriented p-type Ni<sub>1-x</sub>O films by DC sputtering. *J Mater Sci* **42** (2007), 5766-5772.
23. Zhang, K., Rossi, C., Alphonse, P., Tenailleau, C.: Synthesis of NiO nanowalls by thermal treatment of Ni film deposited onto a stainless steel substrate. *Nanotechnology* **19** (2008), Article number 155605.
24. Gundjaker, J.L., More, A.M., Lokhande, C.D.: Chemical deposition of nanocrystalline nickel oxide from urea containing bath and its use in liquefied petroleum gas sensor. *Sensors and Actuators B* **131** (2008), 356-361.
25. Nogues, J., Langlais, V., Sort, J., et al: Magnetic properties of Ni-NiO nanocomposites obtained from a partial mechanochemical reduction of NiO. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **8** (2008), 2923-2928.
26. Zhang, K.L., Rossi C, Alphonse P, et al.: NiO nanostructured honeycomb realized by annealing Ni film deposited on silicon *J. Nanosci Nanotechnol.* **8** (2008) 5903-5907.
27. Wisitsoraat, A., Tuantranont, A., Comini, E., Sberveglieri, G., Wlodarski, W.: Characterization of n-type and p-type semiconductor gas sensors based on NiO<sub>x</sub> doped TiO<sub>2</sub> thin films, *Thin Solid Films* **517** (2009), 2775-2780
28. Anjum Qureshi, Ayhan Mergen, Ahmet Altindal: Preparation and characterization of Li and Ti codoped NiO nanocomposites for gas sensors applications, *Sensors and Actuators B* **135** (2009), 537-540.
29. Qureshi, A.H., Atindal, A., Mergen, Ayhan: Electrical and gas sensing properties of Li and Ti codoped NiO/PVDF thin film. *Sensors and Actuators B* **138** (2009), 71-75.
30. Luyo, C., Ionescu, R., Reyes, L.F., et al.: Gas sensing response of NiO nanoparticle films made by reactive gas deposition. *Sensors and Actuators B* **138** (2009), 14-20.
31. Jang, W.L., Lu, Y.M., Hwang, W.S., Hsiung, T.L., Wang, H: Point defects in sputtered NiO films. *Applied Physics Letters* **94** (2009), art. no. 062103.

**Hotový, I., Řeháček, V., Siciliano, P., Capone, S. and Spiess, L.:** Sensing characteristics of NiO thin films as NO<sub>2</sub> gas sensor. *Thin Solid Films* **418** (2002), 9-15.

1. Arsak, K., Korostynska, O.: Preliminary studies of properties of oxide thin/thick films for gamma radiation dosimetry. *Materials Science and Engineering B* **107** (2004) 224-232.
2. Wu, L.L., Wu, Y., Wei, H., Shi, Y. and Hu, Ch.: Synthesis and characteristics of NiO nanowire by a solution method. *Materials Letters* **58** (2004) 2700-2703.

3. Li, Y., Pan, Q.Y., Zhang, J.P., Cheng, Z.X., Chen, H.H.: Preparation process of nanosized organic/inorganic thin films by sol-gel coating method. *Journal of Inorganic Materials* **19** (2004) 1065-1072.
4. Mazet, L., Varenne, C., Pauly, A., Brunet, J., Germain, J.P.: H<sub>2</sub>, CO and high vacuum regeneration of ozone poisoned pseudo-Schottky Pd-InP based gas sensor. *Sensors and Actuators B* **103** (2004), 190-199.
5. Nakaoka, K., Ueyama, J., Ogura, K.: Semiconductor and electrochromic properties of electrochemically deposited nickel oxide films. *Journal of Electroanalytical Chemistry* **571** (2004), 93-99.
6. Hernandez Torres, J., Mendoza Galvan, A.: Optical properties of sol-gel SiO<sub>2</sub> films containing nickel. *Thin Solid Films* **472** (2005), 130-135.
7. Cantilini, C., Post, M., Buso, D., Guglielmi, M., Martucci, A.: Gas sensing properties of nanocrystalline NiO and Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> in porous silica sol-gel films. *Sensors and Actuators B* **108** (2005), 184-192.
8. Shen, W.F., Zhao, Y., Zhang, C.: The preparation of ZnO based gas-sensing thin films by ink-jet printing method. *Thin Solid Films* **483** (2005), 382-387.
9. Chiu, K.F., Chang, C.Y., Lin, C.M.: The electrochemical performance of bias-sputter-deposited nanocrystalline nickel oxide thin films toward lithium. *Journal of the Electrochemical Society* **152** (2005), A1188-A1192.
10. Lee, C.Y., Chiang, C.M., Chou, P.C., Fu, L.M., Lin, C.H.: A novel microfabricated formaldehyde gas sensor with NiO thin film, *Proceedings of the ISA/ IEEE 2005 Sensors for Industry Conference*, (2005), Article number 4027444, 1-5.
11. Shishiyanu, S.T., Shishiyanu, T.S., Lupan, O.I.: Novel NO<sub>2</sub> gas sensor based on cuprous thin films, *Sensors & Actuators B* **113**, (2006), 468-476.
12. Arshak, K., Gaidan, I.: NiO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> polymer thick films as room temperature gas sensors. *Thin Solid Films* **495** (2006), 286-291.
13. Fernandez, C.D., Mattei, G., Sada, C., Battaglin, C., Mazzoldi, P.: Nanostructural and optical properties of cobalt and nickel-oxide/silica nanocomposites. *Materials Science and Engineering C* **26** (2006), 987-991.
14. Lopez-Beltran, A. M., Mendoza-Galvan, A.: The oxidation kinetics of nickel thin films studied by spectroscopic ellipsometry, *Thin Solid Films* **503** (2006), 40-44.
15. Wang, D., Xu, R., Wang, X., Li, Y.: NiO nanorings and their unexpected catalytic property for CO oxidation, *Nanotechnology* **17** (2006), 979-983.
16. Yu, M., Liu, J., Li, S.: Preparation and characterization of highly ordered NiO nanowire arrays by sol-gel template method, *Journal of University of Science and Technology Beijing* **13** (2006), 169-173.
17. Ferri, G., Stornelli, V.: A high precision temperature control system for CMOS integrated wide range resistive gas sensors, *Analog Integr Circ Sig Process* **47** (2006), 293-301.
18. Ferri, G., Stornelli, V., Cappucci, W., Cantalini, C.: Integrated CMOS interfaces for wide-range resistive gas sensors, *Sensors and Actuators B* **118**, (2006) 269-275.
19. Han, Ch., Han, S.D., Singh, I.: Thermoelectric hydrogen sensor using Li<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub>O synthesized by molten salt method. *Korean Journal of Chemical Engineering* **23** (2006), 362-366.
20. Buso, D., Guglielmi, M., Martucci, A., Cantalini, C., Post, M.L., Hache, A.: Porous sol gel silica films doped with crystalline NiO nanoparticles for gas sensing applications, *Journal of Sol-Gel Science and Technology* **40** (2006), 299-308.
21. Pan, Q., Huang, Y., Li, Y., Cheng, Z., Dong, X.: Study on stability and rheology of PEG6000/nano-Ni(OH)<sub>2</sub> sol. *International Journal of Nanoscience* **5** (2006), 943-949.
22. Lee, C.Y., Hsieh, P.R., Lin, C.H., Chou, P.C., Fu, L.M., Chiang, C.M.: MEMS-based formaldehyde gas sensor integrated with a micro-hotplate. *Microsystem Technologies* **12** (2006), 893-898.
23. Lee, C.Y., Chiang, C.M., Wang, Y., H., Ma, R.H.: A self-heating gas sensor with integrated NiO thin-film for formaldehyde detection, *Sensors and Actuators B* **122** (2007), 503-510.
24. Falconi, Ch., Martinelli, E., Di Natale, C., D'Amico, A., Maloberti, F., Malcovati, P., Baschiroto, V., Stornelli, V., Ferri, G.: Electronic interfaces. *Sensors and Actuators B* **121** (2007), 295-329.

25. Yue, W., Zhou, W.: Synthesis of porous single crystals of metal oxides via a solid-liquid route. *Chemistry of Materials* **19** (2007), 2359-2363.
26. Yue, Z., Niu, W.C., Xie, L.H., Quan, W.-M., Luo, C.: Study on dissolved carbon dioxide sensor with Pt-NiO mixed sensing film based on MISFET structure. *Chinese Journal of Sensors and Actuators* **20** (2007), 1203-1206.
27. Tresback, J.S., Vasiliev, A.L., Padture, N.P., Park, S.Y., Berger, P.R.: Characterization and electrical properties of individual Au-NiO-Au heterojunction nanowires, *IEEE Transaction on Nanotechnology* **6** (2007), 676-686.
28. Vidales-Hurtado, M.A., Mendoza-Galvan, A.: Optical and structural characterization of nickel oxide-based thin films obtained by chemical bath deposition, *Materials Chemistry and Physics* **107** (2008), 33-38.
29. Umegaki, T., Kuratani, K., Yamada, Y., Ueda, A., Kuriyama, N., Kobayashi, T., Xu, Q.: Hydrogen production via reforming of ethyl alcohol over nano-structured indium oxide catalysts. *Journal of Power Sources* **179** (2008), 566-570.
30. Nattestad, A., Ferguson, M. Kerr, R., et al: Dye-sensitized nickel(II) oxide photocathodes for tandem solar cell applications. *Nanotechnology* **19** (2008), Article Number: 295304.
31. Dong, L. et al: Controllable synthesis of nickel hydroxide and porous nickel oxide nanostructures with different morphologies. *Chemistr: a European Journal* **14** (2008), 5064-5072.
32. Tresback, J.S., Padture, N.P.: Low-temperature gas sensing in individual metal-oxide-metal heterojunction nanowires, *Journal of Materials Research* **8** (2008), 2047-2052.
33. Ta, M.T., Briand, D., Guhel, Y., Bernard, J., Pesant, J.C., Boudart, B.: Growth and structural characterization of cerium oxide thin films realized on Si (111) substrates by on-axis rf magnetron sputtering, *Thin Solid Films* **517** (2008), 450-452.
34. Anjum Qureshi, Ayhan Mergen, Ahmet Altindal: Preparation and characterization of Li and Ti codoped NiO nanocomposites for gas sensors applications, *Sensors and Actuators B* **135** (2009), 537-540.
35. Mendoza-Galvan, A., Vidales-Hurtado, M.A., Lopez-Beltran, A.M.: Comparison of the optical and structural properties of nickel oxide-based thin films obtained by chemical bath and sputtering., *Thin Solid Films* **517** (2009), 3115-3120.
36. Wang, X., Li, Y., Xiang, R., Wang, G.Z., et al.: Characterization of NiO thin film grown by two-step processes. *Physica B-Condensed Matter* **404** (2009), 1058-1060.
37. Nataraj, S.K., Kim, B.H., Yun, J.H., et al.: Effect of added nickel nitrate on the physical, thermal and morphological characteristics of polyacrylonitrile-based carbon nanofibers. *Materials Science and Engineering B. Solid State Materials for Advanced Technology* **162** (2009), 75-81.
38. Qureshi, A.H., Atindal, A., Mergen, Ayhan: Electrical and gas sensing properties of Li and Ti codoped NiO/PVDF thin film. *Sensors and Actuators B* **138** (2009), 71-75.
39. Luyo, C., Ionescu, R., Reyes, L.F., et al.: Gas sensing response of NiO nanoparticle films made by reactive gas deposition. *Sensors and Actuators B* **138** (2009), 14-20.
40. Fulvio, P.F., Liang, C.Q., Dai, S., Jaroniec, M.: Mesoporous carbon materials with ultra-thin pore walls and highly dispersed nickel nanoparticles. *European Journal of Inorganic Chemistry* **5** (2009), 605-612.
41. Zhang, M., Yan, G.J., Hou, Y.G., Wang, CH.: Mesoscale assembly of NiO nanosheets into spheres. *Journal of Solid State Chemistry* **182** (2009), 1206-1210.

**Hotový, I., Huran, J., Spiess, L., Liday, J., Sitter, H. and Haščík, Š.:** The influences of process parameters and annealing temperature on the physical properties of sputtered NiO thin films. *Vacuum* **69** (2003) 237-242.

1. Bruckner, W., Kaltofen, R., Thomas, J., Hecker M, Uhlemann M, Oswald S, Elefant D, Schneider CM: Stress development in sputtered NiO thin films during heat treatment, *Journal of Applied Physics*, **94** (2003) 4853-4858.
2. Yu-hua, X.: *Journal of Guangdong Non-Ferrous Metals* **15** (2005) 490.
3. Chen, H.L., Lu, Y.M., Hwang, W.S.: Characterization of sputtered NiO thin films. *Surface & Coatings Technology* **198** (2005), 138-142.

4. Chen, H.L., Lu, Y.M., Hwang, W.S.: Effect of film thickness on structural and electrical properties of sputter-deposited properties nickel oxide films. *Materials Transactions* **46** (2005), 872-879.
5. Lee, J. W., Park, I. H., Chung, C. W.: Electrical characterization of nickel oxide thin films deposited by reactive sputtering for memory applications, *Integrated Ferroelectrics* **74** (2005), 71-77.
6. Chen, H. L., Lu, Y. M., Wu, J. Y. et al.: Effects of substrate temperature and oxygen pressure on crystallographic orientations of sputtered nickel oxide films, *Material Transactions* **46** (2005), 2530-2535.
7. Chen, H.L., Lu, Y.M., Hwang, W.S.: Thickness dependence of electrical and optical properties of sputtered nickel oxide films, *Thin Solid Films* **498** (2006), 266-270.
8. Malandrino, G., Perdicaro, L. M. S., Condorelli, G., Fragala, I. L., Rossi, P., Dapporto, P.: Synthesis, characterization and application of Ni(tta)<sub>2</sub> tmeda to MOCVD of nickel oxide thin films, *Dalton Transactions* **8** (2006), 1101-1106.
9. Abbey, B., Lipp, J.D., Barber, Z.H.: Structure-film thickness relationship study of sputtered NiO/Ni bilayers using depth profiling and atomic force microscopy techniques, *Journal of Applied Physics* **99** (2006), 124914.
10. Huang, J.Z., Xu, Z., Li, H.L., Kang, G.H., Wang, W.J.: Influence of process parameters on electrochemical and physical properties of sputtered iron-doped nickel oxide thin films. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **16** (2006), 1301-1306.
11. Reguig, B.A., Khelil, A., Cattin, L., Morsli, M., Bernede, J.C.: Properties of NiO thin films deposited by intermittent spray pyrolysis process. *Applied Surface Science* **253** (2007), 4330-4334.
12. Godsi, E.F., Khayatiyan, S.S.: Preparation and determination of optical properties of NiO thin films deposited by DIP coating technique. *Surface Review and Letters* **14** (2007), 219-224.
13. Salah A. Makhlof: Electrical properties of NiO films obtained by high-temperature oxidation of nickel. *Thin Solid Films* **516** (2008), 3112-3116.
14. Hao-Long Chen and Yao-Sheng Yang: Effect of crystallographic orientations on electrical properties of sputter-deposited nickel oxide thin films. *Thin Solid Films* **516** (2008), 5590-5596.
15. Shyankay, J., Tzu-Hui Wu: Thin porous Ni-YSZ films as anodes for solid oxide fuel cell. *J. Phys. Chem. Solids* **69** (2008), 2804-2812.

**Hotový, I.,** Liday, J., Spiess, L., Sitter, H. and Vogrinčič, P.: Study of Annealed NiO Thin Films Sputtered on Unheated Substrate. *Jpn. J. App. Phys.* **42** (2003) L1178-L1181.

1. Abbey, B., Lipp, J.D., Barber, Z.H.: Structure-film thickness relationship study of sputtered NiO/Ni bilayers using depth profiling and atomic force microscopy techniques, *Journal of Applied Physics* **99** (2006), 124914.
2. Li, X., Tang, X.: Effects of sputtering parameters on optical constant of NiO<sub>x</sub> thin films. *Acta Photonica Sinica* **38** (2009), 302-305.

**Hotový, I.,** Huran, J. and Spiess, L.: Characterization of sputtered NiO films using XRD and AFM. *Journal of Materials Science* **39** (2004) 2609-2612.

1. Abbey, B., Lipp, J.D., Barber, Z.H.: Structure-film thickness relationship study of sputtered NiO/Ni bilayers using depth profiling and atomic force microscopy techniques, *Journal of Applied Physics* **99** (2006), 124914.

**Hotový, I.,** Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L., Řeháček, V.: Enhancement of H<sub>2</sub> sensing properties of NiO-based thin films with a Pt surface modification. *Sensors and Actuators B* **103** (2004), 300-311.

1. Hazra, S.K., Basu, S.: Pd/TiO<sub>x</sub>/Ti-Au (x<2) metal-active insulator-metal (MIM) hydrogen gas sensor at elevated temperatures, *Sensor Letters* **3** (2005), 179-182.

2. Agnoli, S., Barolo, A., Finetti, P., Sedona, F., Sambì, M., Granozzi, G.: Core and valence band photoemission study of highly strained ultrathin NiO films on Pd (100). *Journal of Physical Chemistry C* **111** (2007), 3736-3743.
3. Brilis, N., Foukaraki, Ch., Bourithis, E., Tsamakis, D., Giannoudakos, Kompitsas, M., Xenidou, T., Boudouvis, A.: Development of NiO-based thin film structures as efficient H<sub>2</sub> gas sensors operating at room temperatures. *Thin Solid Films* **515** (2007), 8484-8489.
4. Thuwachaowsoan, K., Chotpattananont, D., Sirivat, A., Rujiravanit, R., Schwank, J.W.: Electrical conductivity responses and interactions of poly(3-thiopheneacetic acid) / zeolites L, mordenite, beta and H<sub>2</sub>. *Materials Science and Engineering B* **140** (2007), 23-30.
5. Palacin, S., Gutierrez, A., Preda, I., Hernandez-Velez, M., Sanz, R., Jimenez, J.A., Soriano, L.: Core-level electronic properties of nanostructured NiO coatings. *Applied Surface Science* **254** (2007), 278-280.
6. Pandis, C., Brilis, N., Bourithis, E., et al.: Low-temperature hydrogen sensors based on Au nanoclusters and Schottky contacts on ZnO films deposited by pulsed laser deposition on Si and SiO<sub>2</sub> substrates. *IEEE Sensor Journal* **7** (2007), 448-454.
7. Stamaki, M., Tsamakis, D., Brilis, N., Fasaki, I., Giannoudakos, A., Kompitsas, M.: Hydrogen gas sensors based on PLD grown NiO thin film structures. *Physica Status Solidi A* **205** (2008), 2064-2068.
8. Wisitsoraat, A., Tuantranont, A., Comini, E., Sberveglieri, G., Wlodarski, W.: Characterization of n-type and p-type semiconductor gas sensors based on NiO<sub>x</sub> doped TiO<sub>2</sub> thin films, *Thin Solid Films* **517** (2009), 2775-2780.
9. Qureshi, A.H., Atindal, A., Mergen, Ayhan: Electrical and gas sensing properties of Li and Ti codoped NiO/PVDF thin film. *Sensors and Actuators B* **138** (2009), 71-75.
10. Luyo, C., Ionescu, R., Reyes, L.F., et al.: Gas sensing response of NiO nanoparticle films made by reactive gas deposition. *Sensors and Actuators B* **138** (2009), 14-20.
11. Han, NT, YJ., Wei, L.Q., Wang, C., Chen, Y.F.: NiO thin film fabricated by electrophoretic deposition and formaldehyde gas sensing property, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **9** (2009) 1346-1349.
12. Stamataki, M., Fasaki, I., Tsonos, G., Tsamakis, D., Kompitsas, M.: Annealing effects on the structural, electrical and H<sub>2</sub> sensing properties of transparent ZnO thin films, grown by pulsed laser deposition, *Thin Solid Films* (2009), doi:10.1016/j.tsf.2009.02.156.
13. Wei-Luen Jang, Yang-Ming Lub, Weng-Sing Hwang, Wei-Chien Chen: Electrical properties of Li-doped NiO films, *Journal of the European Ceramic Society* **30** (2010) 503-508.

**Hotový, I.,** Huran, J., Spiess, L., Romanus, H., Búc, D., Kosiba, R.: NiO-based nanostructured thin films with a Pt surface modification for gas detection. *Thin Solid Films* **515** (2006), 658-661.

1. Brilis, N., Foukaraki, Ch., Bourithis, E., Tsamakis, D., Giannoudakos, Kompitsas, M., Xenidou, T., Boudouvis, A.: Development of NiO-based thin film structures as efficient H<sub>2</sub> gas sensors operating at room temperatures. *Thin Solid Films* **515** (2007), 8484-8489.
2. Rumiche, F., Wang, H.H., Hu, W.S., Indacochea, J.E., Wang, M.L.: Anodized aluminum oxide (AAO) nanowell sensors for hydrogen detection, *Sensors and Actuators B* **134** (2008), 869-877.
3. Mahaleh, Y.,B.M., Sadrnezhaad, S.K., Hosseini, D.: NiO nanoparticles synthesis by chemical precipitation and effect of applied surfactant on distribution of particle size, *Journal of Nanomaterials* (2008), Art. No. 470595.
4. Qureshi, A.H., Atindal, A., Mergen, Ayhan: Electrical and gas sensing properties of Li and Ti codoped NiO/PVDF thin film. *Sensors and Actuators B* **138** (2009), 71-75.

Haščík, Š., Eliáš, P., šoltýs, J., Martaus, J., **Hotový, I.:** CCl<sub>4</sub>-based reactive ion etching of semi-insulating GaAs and InP. *Czechoslovak Journal of Physics* **56** (2006), B1169-B1173.

1. Venugopal, V., Ebrahimi, M., He, Z.H., Leung, K.T.: Dissociative adsorption and thermal evolution of carbon tetrachloride on Si (111) 7×7. *Surface Science* **602** (2008), 3000-3005.

Buc, D., Stuchlikova, L., Harmatha, L., **Hotový, I.**: Electrical characterization of 4H-SiC Schottky diodes with RuO<sub>2</sub> and RuWO<sub>x</sub> Schottky contacts, *J. Mater. Sci.: Mater Electron.* **19** (2008), 783-787.

1. Toumi, S., Ferhat-Hamida, A., Boussouar, L., Sellai, A., Ouennoughi, Z., Ryssel, H.: Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in tungsten/4H-SiC (000-1) Schottky diodes, *Microelectronic Engineering* **86** (2008), 303-309.

Liday, J., **Hotový, I.**, Sitter, H., Schmidegg, K., Vogrinčič, P., Bonnani, A., Breza, J., Ecke, G., Vavra, I.: Auger electron spectroscopy of Au/NiO<sub>x</sub> contacts on p-GaN annealed in N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> ambients. *Applied Surface Science* **253** (2007), 3174-3180.

1. Li, H., Shi, Y., Jiang, C.Z.: Key factors in the preparation of low resistance ohmic contacts to p-GaN. *Journal of Functional Materials* **39** (2008), 6-8.

**Hotový, I.**, Řeháček, V., Mika, F., Lalinský, T., Haščík, Š., Vanko, G., Držik, M.: Gallium arsenide suspended microheater for MEMS sensor arrays. *Microsystem Technologies* **14** (2008), 629-635.

1. Lee J, Spadaccini CM, Mukerjee EV, et al.: Differential scanning calorimeter based on suspended membrane single crystal silicon microhotplate, *Journal of Microelectromechanical Systems* **17** (2008), 1513-1525.

Haščík, Š., **Hotový, I.**, Lalinský, T., Vanko, G., Řeháček, V., Mozolová, Z.: Preparation of thin GaAs suspended membranes for gas microsensors using plasma etching. *Vacuum* **82** (2008), 236-239.

1. Park, Y.H., Kim, J.K., Lee, J.H., Joo, Y.W., Noh, H.S., Lee, J.W., Pearton, S.J.: N<sub>2</sub> effect on GaAs etching at 150 mTorr capacitively-coupled Cl<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> plasma, *Microelectronic Engineering* (2009), doi:10.1016/j.mee.2009.08.006.

## 2. Citácie prác v iných recenzovaných publikáciách

16

### b) v zahraničí

16

**Hotový, I.**, Búc, D., Brčka, J. and Srnánek, R.: Study of niobium nitride films produced by dc reactive magnetron sputtering. *Phys. Stat. Solidi (a)* **160** (1997), 97-104.

1. Klingenberg, M.L., Demaree, J.D., Hirvonen, J.K., Messier, R.: Ion energy/momentum effects during ion assisted growth of Nb<sub>x</sub>N<sub>y</sub>. *Materials Research Society Symposium – Proceeding* **750** (2002), 261-266.

**Hotový, I.**, Huran, J., Haščík, Š. and Lalinský, T.: Reactively sputtered NbN Schottky contacts on GaAs and their thermal stability. *Vacuum* **50**, (1998) 403-406.

1. Venger, E.F., Konakova, R.V., Korotcenkov, G.C., Milenin, V.V., Russu, E.V., Prokopenko, I.V.: *Mežfaznyje vzaimodeistvija i mehanizmy degradacii v strukturach metall-InP i metall-GaAs. Kyjev 1999, Nacionalnaja Akademija Nauk Ukrainy, ISBN 966-7700-03-8.*

Búc, D., **Hotový, I.**, Haščík, Š. and Červeň, I.: Reactive unbalanced magnetron sputtering of AlN thin films. *Vacuum* **50**, (1998) 121-123.

1. Cheng, C.C., Kao, K.S., Chen, Y.C.: Deposition of c-axis oriented AlN films by rf magnetron sputtering for surface acoustic wave. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* **4234** (2001), 328-337.

**Hotový, I.,** Huran, J., Búc, D. and Srnánek, R.: Thermal stability of NbN films deposited on GaAs substrates. *Vacuum* **50**, (1998) 45-48.

1. Piotrowska, A., Kaminska, E., Barcz, A., Golaszewska, K., Wresinska, H., Piotrowski, T.T., Dynowska, E., Jakiela, R.: Stable ohmic contacts on GaAs and GaN devices for high temperatures. *Materials Research Society Symposium – Proceeding* **743** (2002), 807-812.

**Hotový, I.,** Huran, J., Spiess, L., Haščík, Š. and Řeháček, V.: Preparation of nickel oxide thin films for gas sensors applications. *Sensors and Actuators B* **57**, (1999) 147-152.

1. Zhang, C., Zhan, J., Guo, X., Okido, M: Preparation of fibrous nickel oxide particles by the method of chemical precipitation and pyrolysis. *Yazawa International Symposium: Metallurgical and Materials Processing* **3** (2003), 417-428.

**Hotový, I.,** Huran, J., Spiess, L., Čapkovič, R. and Haščík, Š.: Preparation and characterization of NiO thin films for gas sensor applications. *Vacuum* **58**, (2000) 300-307.

1. Han, C.H., Han, S.D., Kim, J.D.: Thermoelectric hydrogen sensor using Li-doped NiO synthesized by molten salt method. *Digest of Technical Papers – International Conference on Solid State Sensors and Actuators and Microsystems* **2** (2005) 1911-1914.

**Hotový, I.,** Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L. and Řeháček, V.: The influences of the preparation parameters on NiO thin film properties for gas-sensing application. *Sensors and Actuators B* **78**, (2001) 126-132.

1. Paetzold, A.: Dissertation zur Erlangung des Dr. rer. nat. Kassel: 2002.
2. Han, C.H., Han, S.D., Kim, J.D.: Thermoelectric hydrogen sensor using Li-doped NiO synthesized by molten salt method. *Digest of Technical Papers – International Conference on Solid State Sensors and Actuators and Microsystems* **2** (2005) 1911-1914.

**Hotový, I.,** Řeháček, V., Siciliano, P., Capone, S. and Spiess, L.: Sensing characteristics of NiO thin films as NO<sub>2</sub> gas sensor. *Thin Solid Films* **418** (2002), 9-15.

1. Cantalini, C., Ferri, G., Guerrini, N.C., Santucci, S.: A low-voltage low-power current-mode gas sensor integrated interface. *Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM* (2004), 194-197.
2. Lee, C.Y., Chiang, C.M., Chou, P.C., Fu, L.M., Lin, C.H.: A novel microfabricated formaldehyde gas sensor with NiO thin film. *Proceedings of the ISA/IEEE 2005 Sensors for industry Conference* Article number 4027444 (2005), 1-5.
3. Shi, L., Hasegawa, Y., Katsube, T., Nakano, M., Nakamura, K.: Highly sensitive SnO<sub>2</sub>-based gas sensor for indoor air quality monitoring. *Digest of Technical Papers – International Conference on Solid State Sensors and Actuators and Microsystems* **2** (2005) 1203-1206.
4. Han, C.H., Han, S.D., Kim, J.D.: Thermoelectric hydrogen sensor using Li-doped NiO synthesized by molten salt method. *Digest of Technical Papers – International Conference on Solid State Sensors and Actuators and Microsystems* **2** (2005) 1911-1914.
5. Song, S., Placido, F.: An in-situ investigation of the surface oxidation of ultra-thin films of Ni and Hf. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* **7101** (2008), 710120.



6. Tsai, W.-C., Wang, S.-J., Tseng, C.-R., Ko, R.-M., Lin, J.-C.: Preparation of Ni/Zn and NiO/ZnO heterojunction nanowires and their optoelectrical characteristics, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* **7356** (2009), 73561D.
7. Tsai, W.-C., Wang, S.-J., Tseng, C.-R., Ko, R.-M., Lin, J.-C.: Preparation and optoelectronic properties of NiO/ZnO heterostructure nanowires, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* **7356** (2009), 73561F.

**Hotový, I.,** Huran, J., Siciliano, P., Capone, S., Spiess, L., Řeháček, V.: Enhancement of H<sub>2</sub> sensing properties of NiO-based thin films with a Pt surface modification. *Sensors and Actuators B* **103** (2004), 300-311.

1. Lei W, Jun D, Mao CH, et al.: Enhancement of hydrogen gas-sensing properties of SnO<sub>2</sub>-based thin film with Ni surface modification, *Conference Proceedings of the Seventh International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, **5** (2005), 531-535.

## **Summary**

The thesis comprises a set of works devoted to the preparation of thin films of metal nitrides and oxides by reactive magnetron sputtering and points at their applications in microelectronics, sensory and microsystem technology. The resolved scientific issues include the preparation of thin solid films and thorough investigation of the processes ongoing during preparation but also characterization of the prepared materials and correlation of their properties with the preparation conditions. The thesis integrates simulation and modelled solutions of the processes taking place during sputtering with experimentally measured and evaluated thin film properties, and afterwards the obtained results are implemented into more complex elements. It describes and approaches not only the research of basic microelectronic elements, such as Schottky contacts on GaAs and ohmic contacts on p-GaN, but also shows the implementation of thin gas sensing films into sensors and at the same time it follows the basic aspects of their miniaturization in MEMS devices and systems.

## **Zusammenfassung**

Die Dissertation umfasst eine Reihe wissenschaftlicher Arbeiten die sich mit der Herstellung der dünnen Schichten von Metall-Nitriden und Metall-Oxiden mittels Magnetronzerstäubung befassen und zeigt ihre Anwendung in Mikroelektronik, Sensorik und Mikrosystemtechnologie. Die wissenschaftlichen Probleme begreifen die Vorbereitung der dünnen Schichten, ausführliche Untersuchung der Prozesse die während der Herstellung ablaufen aber auch Charakterisierung der hergestellten Schichten und Korrelation ihrer Eigenschaften mit den Herstellungsbedingungen. Die Dissertation integriert simulierte und modellierte Lösungen der Prozesse die während der Deponierung ablaufen mit experimentell gemessenen Eigenschaften der dünnen Schichten und nachfolgend die erzielte Ergebnisse werden in vorgeschrittenen Bauelemente implementiert. Die Dissertation befasst sich nicht nur mit der Forschung von mikroelektronischer Bauelemente, wie zum Beispiel Schottky Kontakte auf GaAs und ohmische Kontakte auf p-GaN, aber sie zeigt auch die Implementation der Gas-sensing Schichten in Sensors. Gleichzeitig sie folgt ihre Miniaturisierung in MEMS Elemente und Systeme.