

Ing. Tomáš Vincze

# VÝVOJ TECHNOLOGIÍ ELEKTRONICKÝCH PRVKOV NA BÁZE KOVOVÝCH OXIDOV PRE SENZORICKÉ APLIKÁCIE

Študijný program: 104404 – Elektronika a fotonika

Študijný odbor: 2675 – Elektrotechnika

Autoreferát dizertačnej práce

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

Miesto a dátum: V Bratislave, August 2023

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

**Ing. Tomáš Vincze**

# **VÝVOJ TECHNOLOGIÍ ELEKTRONICKÝCH PRVKOV NA BÁZE KOVOVÝCH OXIDOV PRE SENZORICKÉ APLIKÁCIE**

**Študijný program: 104404 – Elektronika a fotonika**

**Študijný odbor: 2675 – Elektrotechnika**

**Autoreferát dizertačnej práce**

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

Miesto a dátum: V Bratislave, August 2023

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

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

Oponenti:

RNDr. Juraj Chlpík, PhD.  
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, Fakulta elektrotechniky a informatiky,  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Ilkovičova 3, 81219 Bratislava

Ing. Andrej Vincze, PhD.  
Centrum vedecko-technických informácií Slovenskej republiky,  
Lamačská cesta 8A, 811 04 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 31.8.2023 , o 9 hod. pred skúšobnou komisiou obhajoby dizertačných prác v zasadačke Ústavu Elektroniky a Fotoniky, Fakulty Elektrotechniky a Informatiky, Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave.

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

---

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

## Obsah

1	Úvod .....	5
2	Tézy dizertačnej práce .....	7
3	Prehľad problematiky .....	8
4	Dosiahnuté výsledky.....	10
4.1	Príprava a optimalizácia tenkých vrstiev a demonštrácia tranzistora na baze CuO..	10
4.2	Kontaktný odpor.....	14
4.3	Charakterizácia senzora.....	16
5	Zhrnutie výsledkov dizertačnej práce .....	19
6	Conclusion .....	20
7	Schlussfolgerung .....	22
8	Publikačná činnosť .....	25
9	Citačný ohlas uchádzača.....	27
10	Zoznam použitej literatúry .....	28

## 1 Úvod

V oblasti elektroniky sa stretávame s rôznymi organickými a anorganickými materiálmi, ktoré sa využívajú na výrobu elektronických prvkov. Túto oblasť po desaťročia dominuje kremík. Avšak postupne sa objavili nové materiáli napr. organické polovodiče, ktoré ponúkajú nové možnosti, kde anorganické prvky dosahuje svoje limity ako je flexibilita. Tieto materiály nachádzajú uplatnenie ako organické tenko-vrstvové tranzistory, organické LED ako aj v solárnych článkoch. Oxidy kovov sa dostávajú do povedomia ako skupina materiálov, ktoré sú kompatibilné a komplementárne k organickým a anorganickým materiálom. Slúžia ako prímesová látka na optimalizáciu vlastností prvkov, ako solárnych článkoch, organické LED, batérie, atď. Zároveň majú uplatnenie ako samostatný polovodič pre aktívne vrstvy tranzistorov. Aj napriek horším elektrickým vlastnostiam oproti bežne používanému kremíku, majú oxidy kovov postačujúce vlastnosti aby slúžili ako tranzistory v moderných flexibilných organických displejoch, kde je využitie kremíka energeticky a ekonomicky náročnejšie. Za túto výhodu vďaka hlavne kvôli spôsobom prípravy oxidových vrstiev, ako je napríklad sol-gel technológia. Sol-gel technológia predstavuje silný nástroj na prípravu kvalitných vrstiev, zároveň umožňuje jednoduchú modifikáciu parametrov technológie na dosiahnutie vybraných vlastností oxidu porozity, kryštalinita. Práve to ponúka ďalšie uplatnenie napr. ako plynový senzor, kde vysoká efektívna plocha vrstvy oxidu zvyšuje absorpciu snímaného plynu a tým zlepšuje citlivosť senzora.

V rámci práce sa zameriame na tri hlavné témy. V úvode práce sa spravil prehľad aktuálneho stavu problematiky oxidov kovov so zameraním sa na oxidy medi. Oxidy medi predstavujú perspektívny materiál pre elektroniku, pretože sa jedná o polovodiče s P-typom vodivosti a úzkou šírkou zakázaného pásma. Zastúpenie oxidov kovov s P-typom vodivosti je nesmierne zaujímavé, keďže aj medzi oxidmi kovov stále dominujú materiály s N-typom vodivosti. V práci ukážeme technológiu prípravy pol'om riadeného tranzistora na baze oxidu meďnatého pomocou sol-gel technológie. V rámci technológie prípravy si ukážeme optimalizáciu technológie za účelom zlepšenia elektrických parametrov tranzistorov. Pripravené vrstvy oxidov medi budú charakterizované viacerými komplementárnymi metódami, ako sú Röntgenova difrakcia, mikroskopia atomárnych síl, skenovací elektrónový mikroskop a samozrejme aj elektrické merania.

Ďalšou oblasťou záujmu tejto práce bol výber vhodného materiálu pre elektródy tranzistora. Do úvahy prichádza niekoľko kovov, vybraných na základe ich výstupnej práce. Bude vykonaná detailná analýza voltampérových charakteristík za účelom určenia kontaktného odporu tranzistorov s rôznymi materiálmi elektród. Redukcia kontaktného odporu je podobne ako modifikácia prekursora, spôsob optimalizácie návrhu tranzistora a technologického postupu prípravy za účelom zlepšenia elektrických parametrov tranzistora.

O mnohých oxidoch kovov je známe, že vykazujú citlivosť na plyny. Oxid meďnatý nie je výnimkou, to znamená, že sú uplatniteľné ako senzory plynov ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ). Jedná sa o toxické plyny, ktoré majú negatívny vplyv na životné prostredie a zdravie ľudí. Najväčšími producentmi týchto látok sú priemyselná výroba, námorná doprava, letecká doprava a cestná doprava. Súčasným trendom je monitorovanie kvality ovzdušia v zaľudnených, ale aj v priemyselných oblastiach, a to hlavne v záujme skvalitnenia komfortu života a návratu k ekologickej ceste života. Problém komerčných senzorov je vysoká pracovná teplota (zvyčajne 200 až 300°C), preto sa neustále hľadajú spôsoby zníženia pracovnej teploty a zároveň zachovania citlivosti a selektivity, odozvy, a reprodukovateľnosti senzora. Posledným cieľom práce je vyrobiť funkčný plynový senzor na báze oxidu meďnatého, s nízkou pracovnou teplotou a využiteľný na detekciu  $\text{NO}_x$  skupín.

Cieľom tejto dizertačnej práce je demonštrovať vývoj perspektívnej technológie prípravy a charakterizácie elektronických prvkov na báze oxidov kovov ako aj pochopeniu fyzikálnych dejov injekcie a transportu náboja.

## 2 Tézý dizertačnej práce

- 1) Pomocou sol-gel metódy pripravte a charakterizujte poľom riadený tranzistor s využitím oxidu kovu (napr. CuO) ako polovodiča. Porovnajte výsledky a optimalizujte technológiu za účelom zlepšenia elektrických vlastností.
- 2) Vykonajte určenie kontaktného odporu tranzistora s oxidom kovu (CuO) ako polovodičom a rôznymi kovmi elektród emitora a kolektora (zlato, striebro, hliník, nikel, a meď). Určite napäťové závislosti, vzájomne porovnajte a vysvetlite namerané závislosti.
- 3) Aplikujte tranzistor s polovodivým oxidom kovu (CuO) ako senzor plynu (NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, a iné). Vysvetlite získané výsledky senzorických vlastností tranzistora a porovnajte s dostupnými senzorickými prvkami.

### 3 Prehľad problematiky

Základným materiálom pre väčšinu prvkov v elektronike je kremík. Jedná sa o vysoko kvalitný polovodič, ktorý má za sebou desaťročia výskumu. Vďaka tomu dosahuje vysokú intrinzickú pohyblivosť, konkrétne približne  $10^3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  pre elektróny a  $10^2 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  pre diery pri izbovej teplote (300 K). Samozrejme, tieto hodnoty sa menia po dopácii. V elektronike sa však stretávame aj s ďalšími polovodičmi, ktoré majú podobnú alebo vyššiu pohyblivosť [1-4].

Oxidy kovov si získavajú pozornosť, jedná sa o širokú skupinu materiálov s jedinečnými vlastnosťami, pričom niektoré z nich majú žiaduce vlastnosti pre elektroniku. Tieto vlastnosti sú závislé od šírky zakázaného pásma energií alebo výstupnej práce daných oxidov. Na základe šírky zakázaného pásma energií môžeme tieto oxidy klasifikovať ako izolanty, polovodiče alebo vodiče [5,6].

Novým trendom v oblasti elektroniky je postupné nahradzovanie kremíka vo aplikáciách, ktoré nevyžadujú výkonnosť, ktorú kremík ponúka. Tento trend sa týka najmä riadiacej elektroniky moderných displejov, kde použitie amorfneho alebo polykryštalického kremíka je zbytočne predimenzované. Tenko-vrstvové tranzistory TFT (Thin-Film Transistor) na báze oxidov kovov predstavujú vhodnú alternatívu napriek horšej vodivosti oproti kremíkovým prvkom [7].

Oxidy kovov nie sú výrazne obmedzené spôsobom prípravy, pretože poznáme viacero metód depozície. Tie sa rozdeľujú do dvoch skupín z hľadiska technológie na takzvané mokré a vákuové technológie. Mokré technológie využívajú roztoky ako materiál, z ktorého na základe chemických reakcií vznikajú rôzne štruktúry oxidov kovov. Samotná vzniknutá štruktúra je ovplyvnená procesom výroby roztoku, ktorý je zložený z rozpúšťadla a zdroju oxidu kovu, tiež nazývaného prekursor. Pomocou vákuových technológií sa požadovaná vrstva deponuje vo vysokom alebo v nízkom vákuu. Vrstvu oxidu kovu s definovanou hrúbkou môžeme získať, buď priamo depozíciou daného materiálu, alebo depozíciou kovu a následnou úpravou vrstvy (oxidáciou), ktorá prebieha pri definovanej atmosfére a teplote. Z hľadiska priemyselnej výroby sú mokré technológie atraktívnejšie, pretože nie je natoľko limitovaný veľkosťou substrátu a dosahujeme adekvátnu spojitú homogénnu vrstvu, vhodnú na rôzne elektronické súčiastky a zároveň je to výrazne cenovo menej náročná technológia [8].

Súčasný prvkový základ založený na oxidoch prevažne používa materiály s vodivosťou typu P. Z toho dôvodu je výskum oxidov s P-typom vodivosti veľmi dôležitý z hľadiska ich uplatnenia v tranzistoroch. Majú však zásadný nedostatok v porovnaní s oxidmi s N-typom vodivosti, a to



nižšiu pohyblivosť o niekoľko rádov. Tranzistory s oxidom s N-tytom vodivosti sú v priemysle dlhšie využívané a prešli dlhým vývojom, čo im umožnilo dosiahnuť efektívnejšiu a ekonomickejšiu prevádzku. Naopak, tranzistory s oxidom s P-tytom vodivosti sú stále v experimentálnej fáze [9].

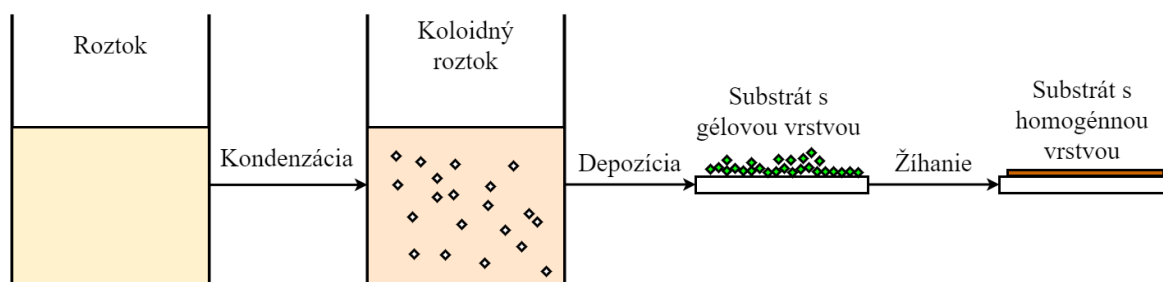
Citlivosť oxidov kovov na plyny je dobre zdokumentovaná, výskum je zameraný na ich optimalizáciu. Dôvodom citlivosti oxidu kovov na plyny je ich schopnosť interagovať s molekulami skúmaného plynu, čo vedie k zmene vodivosti materiálu. Z toho vyplývajú aj technické realizácie elektronického prvku (najčastejšie prevedenia sú tranzistor alebo rezistor [10].

## 4 Dosiiahnuté výsledky

### 4.1 Príprava a optimalizácia tenkých vrstiev a demonštrácia tranzistora na baze CuO

Príprava tenkých vrstiev našich prvkov sa dá rozdeliť na dve skupiny, sú to tzv. mokré a suché technológie. Pred rast polovodičovej vrstvy sa použila metóda sol-gel, jedná sa o známu metódu prípravy z roztoku a kontakty boli výhradne deponované vo vysokom vákuu. V nasledujúcich podkapitolách si konkrétnejšie priblížime dané depozície [8].

Sol-gel metóda patri medzi mokré technológie. Pri tejto metóde sa oxidy kovov vytvoria z kvapalnej fázy, kde depozícia na substrát sa robí z prekursorov, v našom prípade octany kovov [11]. Princíp sol-gel metódy od zamiešania prekursora až po nanosenie na substrát je naznačený na Obr. 4.1.1. [12, 13].



Obr. 4.1.1. Príprava oxidu kovu deponovaného z rozpúšťadla.

Pri sol-gel metóde je dôležité sústrediť sa na prípravu roztoku, ktorý ovplyvní vlastnosti polovodičového prvku. Východzí materiál, z ktorého sa pripraví roztok, je octan hydrát medi. Z tohto materiálu sa pripraví 3% roztok hmotnostného pomeru, rozpustný v organickom rozpúšťadle v 2-metoxyetanele alebo izopropylalkohole. Octan medi sa rozpúšťa o niečo horšie 2-metoxyetanele ako v izopropylalkohole, ale na rozdiel od neho sa vytvárajú homogénnejšie vrstvy. Jeho ďalšou výhodou je, že dokáže dehydratovať vodu v hydrogenizovanom octane medi  $\text{Cu}(\text{COOCH}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ . Monoetanolamín v roztoku nevyužívame ako rozpúšťadlo, zvyčajne sa pri sol-gel metóde pridáva ako stabilizátor s jedným z vyššie uvedených rozpúšťadiel. Jeho funkciou v roztoku je naviazať sa na voľné kationy medi  $\text{Cu}^{2+}$ , inak povedané  $\text{Cu}^{2+}$  sa obalí monoetanolamínom. V rámci hľadania optimálneho pomeru rozpúšťadiel v roztoku bol navrhnutý experiment, v rámci ktorého sme pripravili 9 roztokov s rôznymi pomermi dvoch vybraných rozpúšťadiel: izopropylalkohol a 2-metoxyetanol. Ich pomery boli nasledovné (1:0, 3:1, 2:1, 3:2, 1:1, 2:3, 1:2, 1:3, 0:1). Pripravený roztok nazývaný aj prekursor bol vystavený ultrazvukovému kúpeľu pri teplote  $60^\circ\text{C}$  po dobu 5 hodín, čím sa

dosiahlo rozpustenie častí octanu. Pred depozíciou na substráty sa prekursor ešte filtroval s 22  $\mu\text{m}$  filtrom, ktorý odfiltroval nerozpustené častice.

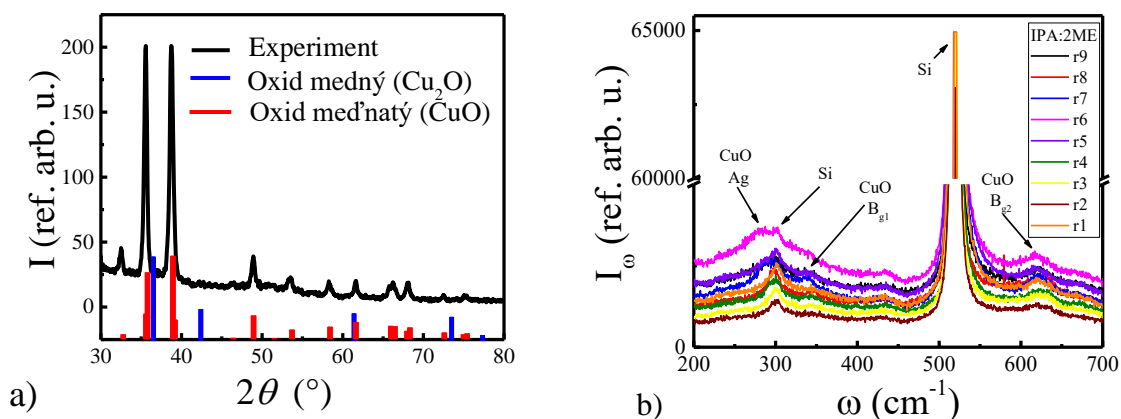
Zvolený substrát pre prípravu vrstvy bol vysoko dopovaný kremík ( $\text{Si } n^{++}$ ) ako hradlovú elektródu. Hradlové dielektrikum predstavoval termický oxid ( $\text{SiO}_2$ ) s permitivitou  $\sim 3,9$ , a aktívnu vrstvu v štruktúre predstavuje oxid medi.

Prekursor sa deponoval na substráty odstredením pri rýchlosti 3000 rpm po dobu 30 s. Odstredená vrstva bola sušená na piecke jednu hodinu pri teplote 160  $^{\circ}\text{C}$ , pri tomto procese sa odstránili obe reziduálne rozpúšťadlá 2–metoxyetanol a izopropylalkohol. Pri procese sušenia sa ešte nedosiahla teplota varu monoetanolamínu, čo znamená, že kationy  $\text{Cu}^{2+}$  sú stále zastabilizované a nedochádza k oxidácii medi a k naviazaniu na ióny  $\text{O}^{2-}$ . Následne sa vrstvy žihali v atmosfére pri teplote 500  $^{\circ}\text{C}$  po dobu jednej hodiny. Presiahla sa teplota varu monoetanolamínu, ktorý sa z vrstvy odparil a zanechal neviazané kationy  $\text{Cu}^{2+}$ . Tie znovu vytvorili nové väzby s iónmi  $\text{O}^{2-}$ , tento proces nazývame oxidácia, a dôjde k tvorbe vrstiev oxidu medi [12]. Nakoniec sa pomocou tieniacich masiek vytvarovali vrchné zlaté (Au) elektródy s hrúbkou 60 nm, pripravené tepelným naparovaním vo vysokom vákuu pri tlaku menšom ako  $10^{-5}$  Pa a s rýchlosťou 0,5  $\text{\AA}/\text{s}$ .

Elipsometria a interferencia pomocou bieleho svetla sú pri použití vhodného modelu vierohodné optické metódy určovania hrúbky vrstvy. Hrúbka vrstvy CuO pripravená podľa uvedeného postupu je  $\sim 20$  nm a komplexný index lomu je  $n_r = 1,58$  a  $k_i = 0$ . Hrúbka vrstvy  $d$  bola zmeraná aj pomocou elipsometrie kde sa rovnako uplatil Cauchy model. Touto metódou sme získali veľkosť hrúbky  $\sim 10,1$  nm. Následne hrúbka elektród bolo získaná pomocou profilometra.

Vyrobené vrstvy prešli viacerými analýzami na potvrdenie správnosti postupy prípravy CuO vrstiev pomocou sol-gel metódy. Nameraný difraktogram na Obr. 7.4.2. a) určuje polohy viditeľných maxím, ktoré boli použité pre vyhodnotenie zloženia vrstvy pomocou porovnania s hodnotami z databáz pre oxid meďnatý CuO (RRUFF ID: R120076.9) a oxid meďný  $\text{Cu}_2\text{O}$  (RRUFF ID: R050384.1). Z analýzy bola potvrdená prítomnosť CuO fázy, výskyt iných fáz bol zanedbateľný. Prítomnosť iných fáz oxidu medi môžeme očakávať vďaka nedokonalostiam výrobného procesu, v ktorom nemuselo dôjsť k rovnomernému žihaniu vrstvy. Z rámci tejto bola taktiež určená veľkosť zrn (poly kryštálov), ktorej priemerná hodnota je  $27 \pm 10$  nm.

Ďalšia analýza pomocou Ramanovej spektroskopie potvrdila viditeľné módy patriace oxidu meďnatému, sú  $A_g$ ,  $B_{g1}$ , a  $B_{g2}$  s pozíciou maxím 295, 343 a 617  $\text{cm}^{-1}$ . Uvedené módy, znázornené na Obr. 7.4.2.b) predstavujú vibrácie atómov kyslíka o zodpovedá monolitickej mriežke  $C_{2h}^6$ . Táto charakteristika kryštalickej štruktúry je porovnateľná s charakteristikami v ostatných vzorkách. Mierny zaznamenaný rozdiel v posune maxím sa dá priradiť rozdielom v jednotlivých roztokoch s rôznym pomerom rozpúšťadiel (kontaminácia reziduálnych organických rozpúšťadiel) a orientácie a polykryštálov na povrchu meranej vzorky [14, 15].

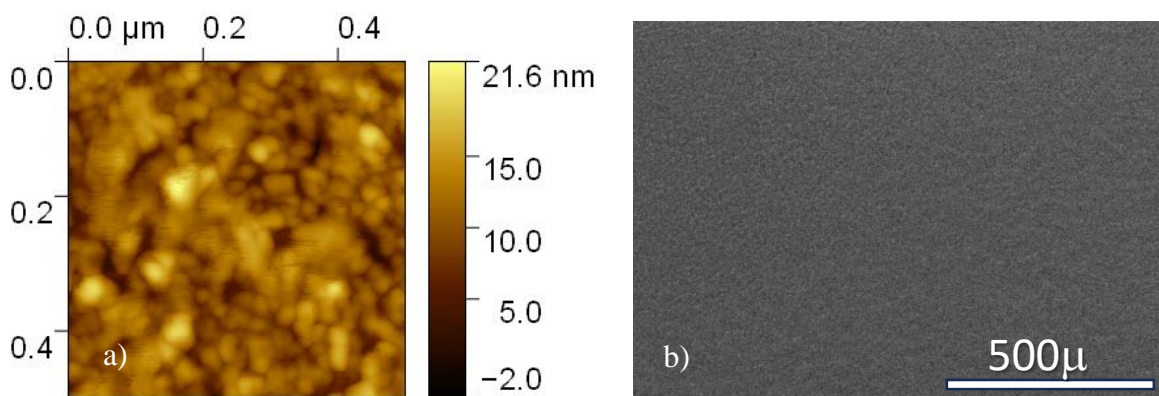


**Obr. 4.1.2. a)** Röntgenovská difrakcia vrstvy CuO a **b)** Ramanove spektrá vyrobených vrstiev pre roztoky pripravené pre rôzne pomery rozpúšťadiel r1-r9 (1:0, 3:1, 2:1, 3:2, 1:1, 2:3, 1:2, 1:3, 0:1).

V rámci štúdie CuO sme sa zamerali aj na absorpciu tohto materiálu. Meranie sa uskutočnilo na sklenených substrátoch s nanesenými vrstvami z rovnakých roztokov, ktoré boli použité pre prípravu tranzistorov. Absorpcia vrstiev sa nachádza vo viditeľnej časti optického spektra. Absorpčná hrana v Taucovom diagrame sa lineárne extrapoluje do nulovej absorpcie a dostaneme hodnotu šírky zakázaného pásma energií. Pre vyrobené vrstvy nepriameho polovodiča vyšla hodnota  $1,003 \pm 0,004$  eV, čo sa zhoduje s hodnotou uvádzanou v literatúrach pre oxid meďnatý. O ktorej je známe, že majú P-typ vodivosti, so šírkou zakázaného pásma energií  $\sim 1$  eV.

Podstatnou súčasťou optimalizácie je mať dobrú predstavu o povrchovej morfológii pripravených vrstiev, preto boli vykonané AFM merania (Obr. 4.1.3. a) pre roztok použitý v nasledujúcich elektrických meraniach). Bol potvrdený predpoklad, že povrch má homogénny polykryštalickej charakter, bez prítomnosti defektov, ktoré by narušili transport náboja. Predpokladaná priemerná hrúbka vrstvy oxidu meďnatého bola 15 nm s drsnosťou povrchu 3,9 nm. Štatistická analýza povrchov na vzorkách ukázala priemernú veľkosť zrn 17,39 nm so štandardnou odchýlkou 5,3 nm.

Ďalšia metóda, ktorá poskytla predstavu o morfológii povrchu vrstvy je SEM. Snímka získané na vrstvách s najlepšimi elektrickými vlastnosťami zobrazené na Obr. 4.1.3. b) Tieto snímky poskytujú detailný pohľad na povrch a objavujúce sa defekty. Zároveň sa jedná o tenkú vrstvu na úrovni  $\sim 13,61$  nm, získané z snímky prierezu meranej vzorky. Analýza veľkostí zŕn na povrchu ukázala priemernú veľkosť zrna  $13,10 \pm 0,24$  nm.

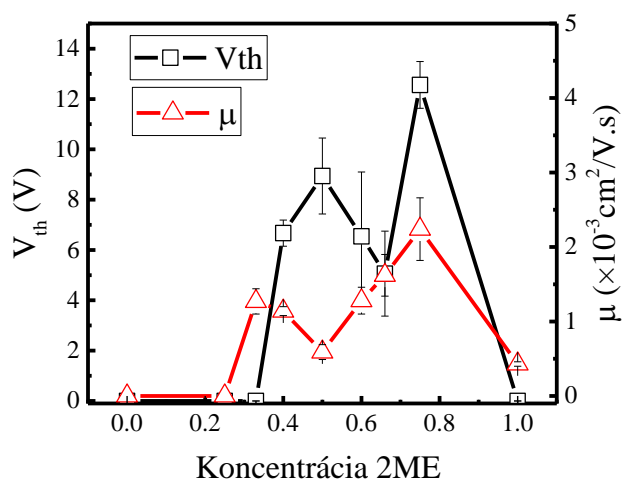


**Obr. 4.1.3.** a) Povrchová morfológia AFM a b) nasnímaný povrch elektrónovým mikroskopom CuO vrstvy pripravená z roztoku r6 v mierke 500 nm.

Vyrobené vrstvy sa analyzovali pomocou troch metód XRD, AFM, SEM, z ktorých získala povrchová morfológia. Z týchto analýz vieme, nezákladné rozloženia veľkostí zŕn získaných spätne určiť pravdepodobný model rastu. Z analýz vieme že sa jedná o náhodné usporiadanie polykryštálov rôznej veľkosti, čo naznačuje Volmer–Weberov model rastu vrstvy [16].

Po základných štrukturálnych a morfológických charakteristikách sa nakoniec zmerali aj elektrické parametre vyrobeného tenkovrtvového polom riadeného tranzistora na báze CuO. Z nameraných voltampérových charakteristík a vyhodnotených výsledkov je zrejmé, že nie každý pomer koncentrácií vyhovuje pre prípravu tranzistorov. Vyhovujúce roztoky mali vyšší obsah 2-metoxyetanolu. Znázornené na Obr. 4.4.4. sú vyhodnotené prahové napätia a pohyblivosti prvkov. Tranzistory s vyšším obsahom izopropylalkoholu nemajú vôbec alebo majú nižšiu pohyblivosť ako prvky pripravené vyšším obsah 2-metoxyetanolu.

Optimálny roztok na budúce experimenty bol vybraný na základe niekoľkých faktorov (i) prahové napätie, (ii) pohyblivosť voľných nosičov náboja, (iii) morfológii a (iv) kompozície. Z uvedeného vyplýva, že požiadavkám najviac vyhovuje roztok s pomerom rozpúšťadiel 2:3 (IPA:2ME), ktoré mali prahové napätie  $6,54 \pm 2,56$  V a pohyblivosť  $1,28 \pm 0,18 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{V.s}$ .

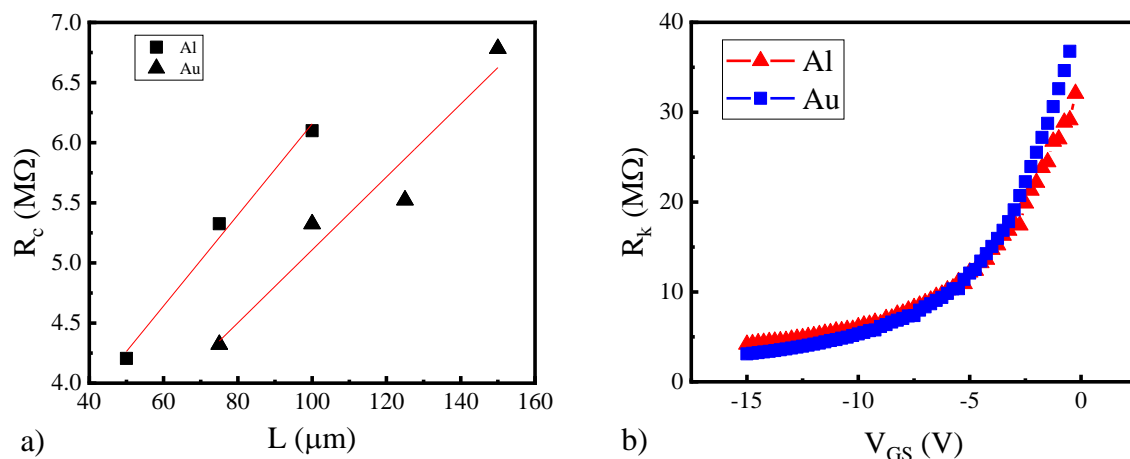


**Obr. 4.1.4.** Prahové napätia a pohyblivosti pripravených prvkov pre rôzne pomery rozpúšťadiel r1-r9 (1:0, 3:1, 2:1, 3:2, 1:1, 2:3, 1:2, 1:3, 0:1).

## 4.2 Kontaktný odpor

Nová séria experimentov sa zamerala na skúmanie vhodného kovu, ktorý bude slúžiť ako vrchné kontakty (drain-source) pre poľom riadený tranzistor. Polovodičové vrstvy boli pripravené z roztoku s pomerom rozpúšťadiel 2:3 (IPA:2ME). Do tejto série experimentov boli vybrané kovy na základe ich výstupných prác pre Au (5,10 eV), Ag (4,26 eV), Al (4,28 eV), Ni (5,15 eV) a Cu (4,65 eV). Poznanie hodnoty výstupnej práce je nevyhnutnou požiadavkou pri návrhu elektronického prvku. Využíva sa na prispôbenie kovu k Fermiho hladine polovodiča, v našom prípade CuO (5,30 eV) Vysoká bariéra na rozhraní kov/polovodič spôsobí blokovací kontakt, ktorý zabráni pohybu voľných nosičov náboja [17, 18].

Z nameraných prevodových a výstupných charakteristík tranzistora, boli vyhodnotené parametre tranzistora, analýza ktorých potvrdzuje tento fakt. Vzniknutá bariéra na rozhraní kov/polovodič medzi Ag, resp. Cu, a CuO je príliš vysoká a preto nemôže dôjsť transportu náboja. Naopak Au a Ni majú výstupnú prácu bližšie k CuO, ak znížime energetickú bariéru, dôjde transportu náboja. V tomto prípade bola dosiahnutá pohyblivosť porovnateľná s inými výsledkami z iných laboratórií. Avšak bola zistená i výnimka ako je vidieť v tranzistoroch s Al kontaktami. V tejto štruktúre sa dosiahla pohyblivosť  $\mu_{sat}$  a prahové napätie  $V_{th}$  porovnateľné s Ni kontaktami.



**Obr. 4.2.1. a)** Závislosť celkového kontaktného odporu od dĺžky kanála **b)** odpor kanála hradlového napätia  $V_{GS}$  tranzistorov na báze CuO s Au a Al kontaktmi.

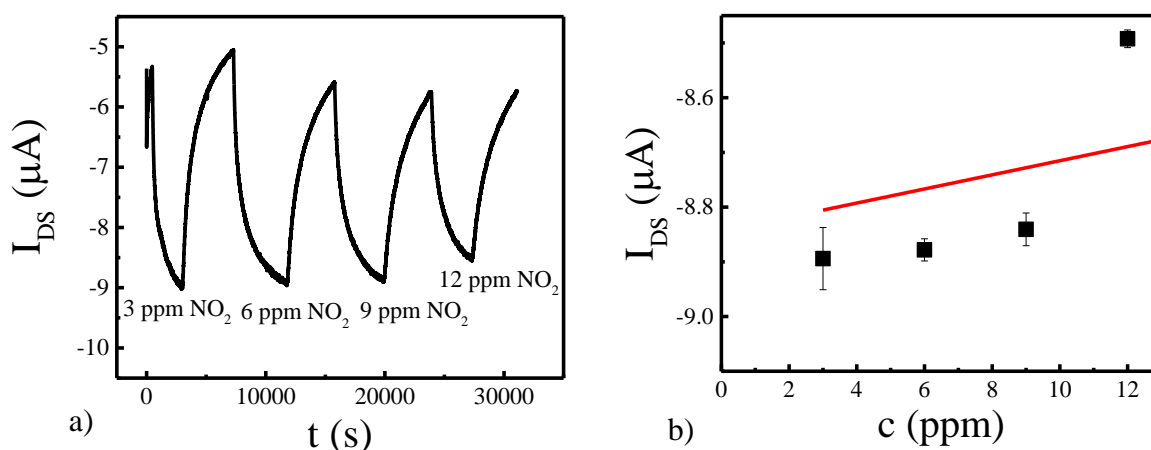
Dôvod funkčného tranzistora s vrchnými kontaktami s Al je pravdepodobne tenká vrstva  $Al_2O_3$ , ktorá sa vytvorila v procese depozície vo vysokom vákuu vďaka interakciám s kyslíkom v CuO vrstve. Z toho dôvodu sa na rozhraní vytvorí trojvrstvá  $Al/Al_2O_3/CuO$ , táto tenká vrstva oxidu upraví efektívnu hodnotu výstupnej práce. Literatúra a modely uvádzajú, že dôjde k posunu zo 4,28 eV pre hliník až na ~5eV [19].

Kontaktný odpor patrí k dôležitým parametrom organického poľom riadeného tranzistora. Vyhodnotenie tohto parametru vieme urobiť niekoľkými spôsobmi. Zvolený spôsob vyhodnotenia je metóda rozložených parametrov (TLM, z angl. Transmission Line Method). Predchádzajúca séria zhotovených tranzistorov nebola vhodná na vyhodnotenie kontaktného odporu. Z toho dôvodu sa vyrobila nová séria prvkov s použitím rovnakých kovov. Priemerný kontaktný odpor pre tranzistor s Au kontaktmi vyšiel  $2,08 \pm 0,64$  MΩ a pre Al kontakty  $2,37 \pm 0,31$  MΩ. Jedná sa o porovnateľný výsledok. Znamená to, že štandardne používané zlaté elektródy môžu byť nahradené hliníkom. Zároveň je to v súlade s predchádzajúcou analýzou porovnania vplyvu výstupných práca kovov (Au, Ag, Al, Ni, Cu), ktorá taktiež potvrdzuje funkčnosť prvku. Posledná vykonaná analýza sa zaoberala vplyvom hradlového napätia na veľkosť kontaktného odporu. Celkový kontaktný odpor sa zvyšuje pri napätíach  $V_{GS}$  rastúcich do kladných hodnôt (Obr. 7.6.4. b)). To je spôsobené zlou injekciou voľných nosičov náboja cez vrchné kontakty ( $V_{GS} > 0$ ), tranzistor je zatvorený. Tranzistor je otvorený ( $0 > V_{GS} \geq V_{th}$ ), vtedy dochádza k injekcii voľných nosičov cez vrchné kontakty, to znamená cez kanál tečie prúd  $I_{DS}$ . Zároveň sa nejedná o ohmický kontakt, pretože kontaktný odpor je závislý od napätia. Napäťová závislosť injekcia náboja má preto

pravdepodobne pôvod v Schottkyho jave alebo v tunelovaní náboja, ako sme si priblížili v teoretickej časti práce [6].

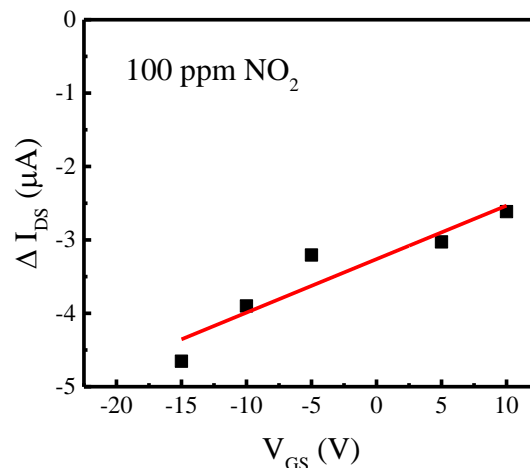
### 4.3 Charakterizácia senzora

Podľa predchádzajúcich výsledkov vyrobeného tranzistora na báze CuO a na základe dostupnej literatúry sme otestovali citlivosť prvku na plyn NO<sub>2</sub>. Meranie bolo realizované v kontrolovanom prostredí, ktoré nám umožnilo kontrolu nad koncentráciou snímaného plynu, koštantý výhrev prvku, zároveň sa kontrolovala teplota a vlhkosť v komore. Senzor plynu sa meral v tranzistorov prevedení. Meraný tranzistor mal 125 μm kanál a bol pripojený konštantné napätie  $V_{GS} = -20$  V a medzi kolektor a emitor napätie  $V_{DS} = -30$  V. Prvok bol neustále udržiavaný na teplote 50 °C počas celej dĺžky merania. Bola zmeraná prevodová a výstupná charakteristika tranzistora pri referenčnej koncentrácii NO<sub>2</sub> 0 ppm. Určené parametre prvku sú: prahové napätie  $V_{th} = 7,08$  V a pohyblivosť  $\mu = 1,23 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/Vs. Časová závislosť prúdu, zobrazená na Obr. 4.3.1. a), bola zmeraná pri koncentráciách NO<sub>2</sub> 3, 6, 9, 12 ppm. Kalibračná krivka prvku pre túto oblasť je lineárna s rastúcou tendenciou (Obr. 4.3.1. b). Citlivosť zmeraného prvku bola  $1,29 \pm 0,22$  μA/ppm. Citlivosť senzora je možné zvýšiť niekoľkými spôsobmi, napríklad úpravou kvality citlivej vrstvy alebo zmenou pracovnej teploty. Zvýšená teplota má vplyv aj na odozvu senzora na zmenu, ktorá podporuje chemickú reakciu plynu a vrstvy. Keďže zvýšená teplota podporuje absorpciu, zároveň to môže mať negatívny vplyv na desorpciu, kde nemusí dôjsť k okamžitej chemickej reakcii, pri ktorej sú roztrhnuté väzby medzi molekulami.



**Obr. 4.3.1. a)** Časová závislosť senzora **b)** kalibračná krivka **c)** zmena prúdu v závislosti od hradlového napätia  $V_{GS}$ , **d)** podiel výstupného prúdu  $I_{DS}$ , **e)** čas odozvy a **f)** zotavenie senzora závislého od hradlového napätia  $V_{GS}$





**Obr. 4.3.2.** Zmena prúdu v závislosti od hradlového napätia  $V_{GS}$ ,

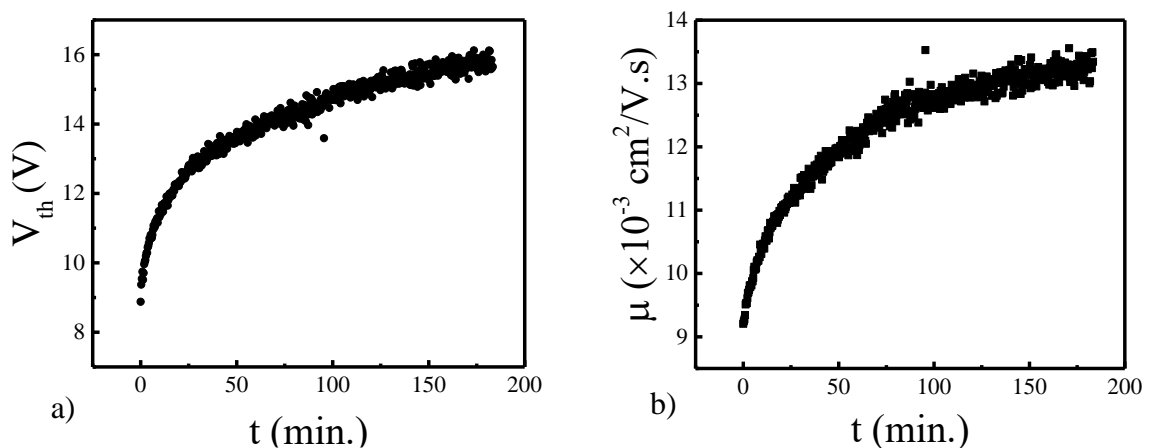
Ďalšou známou možnosťou zvýšenia citlivosti je modifikácia morfológie citlivej vrstvy senzora. Znova sa vychádza z fyzikálneho princípu prvku. Zmena morfológie povrchu znamená zmenu efektívnej plochy citlivej vrstvy. Taktiež môžeme zmeniť aj kompozíciu vrstvy pomocou prímiesovej látky, ktorá podobne ako použitý materiál je citlivá na plyn. Tým vieme zaručiť vyššiu vodivosť a citlivosť senzora.

Mi sme sa zamerali na zmenu hradlového napätia tá vychádza z vlastností tranzistora. Jedna z vlastností tranzistora je schopnosť zosilniť vstupný signál, čiže je možné ich použiť ako zosilňovače. Táto vlastnosť bola využitá práve pri štruktúre pre plynový senzor na priame zosilnenie prúdu  $I_{DS}$ . Skúmali sme možnosť zvýšiť citlivosť hradlového napätia  $V_{GS}$ , keďže veľkosť prúdu cez kanál je závislá od hradlového napätia podľa rovnice:

$$I_{DS(sat)} = \frac{\mu W C_g (V_{GS} - V_{th})^2}{2L} \quad (1)$$

Preto hodnoty  $V_{GS}$  boli zvolené v rozsahu prevodovej charakteristiky tranzistora pri zatvorenom, otvorenom kanáli a v blízkosti prahového napätia  $V_{th}$ . Na základe toho vieme určiť závislosť zmeny prúdu  $\Delta I_{DS}$ . Hodnoty  $\Delta I_{DS}$  lineárne klesali so zmenou napätia  $V_{GS}$  od -20 do 10 V (Obr. 4.3.2.), indikuje to stratu citlivosti prvku na konštantnú koncentráciu plynu. Závislosť na napätí  $V_{GS}$  sa prejavila aj na predlžujúcich časoch odozvy z 17 min na 170 min. a čase zotavenia z 68 min. na 91 min., s rastom napätia smerom k pozitívnym hodnotám. Súčasne došlo k zhoršeniu adsorpcie a desorpcie plynu z materiálu. To znamená, aby sme dosiahli dobrú citlivosť pre vyrobený senzor, hodnota napätia  $V_{GS}$  musí byť  $V_{GS} > V_{th}$ , keď je tranzistor otvorený a prvkom tečie najväčší prúd.

Na záver sme sa zamerali na zistenie stability prahového napätia  $V_{th}$  a pohyblivosti  $\mu$  v čase počas 600 meracích cyklov prevodovej charakteristiky pri konštantnej koncentrácii  $\text{NO}_2$  6 ppm. V čase 0 min. bola koncentrácia  $\text{NO}_2$  0 ppm. Vyhodnotených závislostí, ktoré vidíme na Obr. 4.3.3. Z výsledkov vyplýva, že prahové napätie  $V_{th}$  a pohyblivosť  $\mu$  sa s časom mierne menia. Zvýšenie pohyblivosti  $\mu$  zodpovedá rastu prúdu  $\Delta I_{DS}$  pri zmene koncentrácie, pričom pohyblivosť vypočítame podľa rovnice 1. Prahové napätie  $V_{th}$  a pohyblivosť  $\mu$  sa po čase stabilizujú v prípade senzora pri koncentrácii plynu 6 ppm. Posun prahového napätia do kladných hodnôt sa dá interpretovať ako pokles koncentrácie pascí. Nárast efektívnej pohyblivosti môže reprezentovať rýchlejší prenos náboja ako aj nárast počtu nosičov náboja ktoré sa podieľajú na vedení elektrického prúdu. Preto predpokladáme že posun prahového napätia a nárast efektívnej pohyblivosti súvisí so znížením počtu lokalizovaných stavov (nábojových pascí), ktoré spôsobovali nižšie výstupné prúdy. Mechanizmus interakcie plynu a CuO vrstvy spôsobujúci zánik lokalizovaných stavov zatiaľ nie je známy a musí byť predmetom ďalšieho štúdia.



**Obr. 4.3.3.** Časové závislosti **a)** prahového napätia  $V_{th}$  a **b)**  $\mu$  pohyblivosti senzora s 125  $\mu\text{m}$  kanálom pri koncentrácii 6 ppm.

## 5 Zhrnutie výsledkov dizertačnej práce

Hlavné ciele dosiahnuté v tejto dizertačnej práci môžeme zhrnúť nasledovne:

- boli získané nové poznatky o oxidoch kovov, ako aj o technológiách prípravy tenkých vrstiev,
- boli nadobudnuté nové poznatky o fungovaní organických polom riadených tranzistorov, ako aj o procese transporte náboja v oxidových vrstvách,
- boli predstavené metódy prípravy a charakterizácie tenkých vrstiev za účelom ich optimalizácie elektrických parametrov a kvality vrstvy,
- výskumné aktivity sa zameriavali na odladenie technológie nevyhnutnej výrobu kvalitných polom riadených tranzistorov,
- vykonané experimenty dokázali možnosť prípravy polom riadených tranzistorov pomocou sol-gel technológie, ako aj kľúčových parametrov ako sú prahové napätie, pohyblivosť voľných nosičov náboja, kontaktný odpor
- vykonané experimenty potvrdili možnosť optimalizácie elektrických parametrov pomocou modifikácie prekursora.
- výsledné porovnanie kontaktného odporu pre Au a Al vrchné elektródy potvrdil, že kontaktný odpor  $R_k$  je funkciou experimentálnych parametrov medzi, ktoré patrí aj typ kovu,
- boli vykonané experimenty na potvrdenie citlivosti polovodičovej CuO vrstvy v polom riadených tranzistorov na plyn NO<sub>2</sub>,
- namerané charakteristiky potvrdili citlivosť pripraveného senzora na plyn NO<sub>2</sub>, ako aj závislosť citlivosti senzora od pracovnej teploty a hradlového napätia.

## 6 Conclusion

Metal oxides represent an interesting alternative to commercially used semiconductors. Thanks to their inexpensive technology for the preparation of thin films and electronic components, they are gradually finding their way into applications such as control circuits for displays or sensors. Copper oxides have been known for their semiconductor properties for a decade, but in recent years interest in this material has grown thanks to a low-cost solution preparation technology, sol-gel technology. This thesis dealt with sol-gel technology for the preparation of copper oxide (CuO) and its application in an array-controlled thin-film transistor structure.

An analysis of the current state of the art showed that interest in copper oxides and their use for electronic applications is on the rise, also due to the low-cost preparation technology. Two types of copper oxides, CuO and Cu<sub>2</sub>O, are found in the available literature, with copper oxide (CuO) still a relatively understudied semiconductor.

In the first part of this dissertation, we describe the technological procedure for the preparation of a CuO transistor using sol-gel technology. The technological procedure was successfully mastered and the prepared elements exhibited an effective mobility of 0,034 cm<sup>2</sup>/V.s, a value comparable to the results for this material in the available literature. The technological procedure and the characterization of the material properties of the copper oxide semiconductor were the basis of a scientific publication (Vincze et al. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. (2021)).

After the successful preparation of the first copper oxide transistors, the dissertation focused on the optimization of the prepared transistors. Due to the fact that the injection of charge carriers as well as their transport through the transistor channel contributes to the quality of the prepared transistors, the optimization focused on both processes. In the case of charge transport, we sought to optimize the CuO layer preparation technology in order to increase the effective mobility of free charge carriers. By systematically studying the solvent mixture and element preparation, an optimal ratio was found that provided the highest effective mobilities. The time-consuming optimization process was also managed with a sufficient number of prepared elements to provide statistically relevant results. These results were also the subject of another scientific publication (Vincze et al. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. (2022)). To optimize the injection process, we focused on the metal/semiconductor interface, where the lack of matching between the Fermi levels of the metal and semiconductor

causes the formation of an energy barrier, which is interpreted as contact resistance. To evaluate the contact resistance, we chose a distributed parameter method using a series of elements with different channel lengths. At the same time, we tested different contact metals to find the optimal metal. For the elements we used the following metals: gold, silver, copper, aluminum and nickel. The choice of metals was based on the output work of the metals and the expected Fermi level of the semiconductor. The results of the study yielded the surprising finding that aluminum contacts achieve the same or lower contact resistance than standard gold contacts. This finding also has strong application potential as it significantly reduces the cost of the prepared elements. The results of this study were also included in a scientific publication (Micjan, Vincze, Weis. Japanese Journal of Applied Physics (2023)).

The conclusion of the thesis is devoted to the use of copper oxide transistors for sensing purposes. Metal oxides are known for their application in the detection of oxidizing or reducing gases. While standard oxides such as nickel oxides or titanium oxides are measured in a resistor structure and require high operating temperatures (200 to 300°C), the proposed approach using a CuO transistor could lead to improved sensing parameters due to signal amplification directly at the element. In other words, the application of copper oxide transistors is not just a modification of the active layer material used, but it is a qualitative shift due to the use of the transistor as a sensor. The results obtained on CuO transistors have demonstrated the possibility of detecting NO<sub>2</sub> gas from room temperature onwards, with high quality sensing properties already achieved at moderate heating (50°C). The observed sensing properties suggest that cuprous oxide-based transistors will be a very promising sensing element for gas sensors.

In conclusion, the dissertation addressed the technology of copper oxide layer preparation using sol-gel technology, successfully mastered the technology of copper oxide based transistor preparation and highlighted the possibilities of optimizing the elements while identifying the optimum ratio of solvents used in the sol-gel process and identifying aluminum as an alternative contact material instead of gold through a systematic study. The thesis applied the developed electronic elements for sensing applications and achieved sufficient sensing performance at less demanding operating temperatures than that of commonly used sensors using other oxides and resistor structure. Thus, the work brings new knowledge in the field of materials preparation technology for electronics, electronic element preparation technology, as well as how to use these elements for sensing applications.

## 7 Schlussfolgerung

Metalloxide stellen eine interessante Alternative zu den kommerziell genutzten Halbleitern dar. Dank ihrer kostengünstigen Technologie für die Herstellung dünner Schichten und elektronischer Bauteile finden sie allmählich Eingang in Anwendungen wie Steuerschaltungen für Displays oder Sensoren. Kupferoxide sind schon seit einem Jahrzehnt für ihre Halbleitereigenschaften bekannt, aber in den letzten Jahren ist das Interesse an diesem Material dank einer kostengünstigen Technologie zur Herstellung von Lösungen, der Sol-Gel-Technologie, gestiegen. Diese Arbeit befasste sich mit der Sol-Gel-Technologie zur Herstellung von Kupferoxid (CuO) und seiner Anwendung in einer arraygesteuerten Dünnschichttransistorstruktur.

Eine Analyse des aktuellen Stands der Technik hat gezeigt, dass das Interesse an Kupferoxiden und deren Verwendung für elektronische Anwendungen zunimmt, was auch auf die kostengünstigen Herstellungstechnologien zurückzuführen ist. Zwei Arten von Kupferoxiden, CuO und Cu<sub>2</sub>O, sind in der verfügbaren Literatur zu finden, wobei Kupferoxid (CuO) noch ein relativ wenig untersuchter Halbleiter ist.

Im ersten Teil dieser Dissertation beschreiben wir den technologischen Prozess der Herstellung von CuO-Transistoren mittels Sol-Gel-Technologie. Das technologische Verfahren wurde erfolgreich gemeistert und die hergestellten Elemente wiesen eine effektive Mobilität von 0,034 cm<sup>2</sup>/V.s auf, ein Wert, der mit den Ergebnissen für dieses Material in der verfügbaren Literatur vergleichbar ist. Das technologische Verfahren und die Charakterisierung der Materialeigenschaften des Kupferoxid-Halbleiters waren die Grundlage für eine wissenschaftliche Veröffentlichung (Vincze et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. (2021)).

Nach der erfolgreichen Herstellung der ersten Kupferoxid-Transistoren konzentrierte sich die Dissertation auf die Optimierung der hergestellten Transistoren. Da sowohl die Injektion von Ladungsträgern als auch ihr Transport durch den Transistorkanal zur Qualität der hergestellten Transistoren beitragen, konzentrierte sich die Optimierung auf beide Prozesse. Im Falle des Ladungstransports versuchten wir, die Technologie der CuO-Schichtpräparation zu optimieren, um die effektive Mobilität der freien Ladungsträger zu erhöhen. Durch systematische Untersuchungen der Lösungsmittelmischung und der Elementpräparation wurde ein optimales Verhältnis gefunden, das die höchsten effektiven Mobilitäten lieferte. Der zeitaufwändige Optimierungsprozess wurde auch mit einer ausreichenden Anzahl von

präparierten Elementen bewältigt, um statistisch relevante Ergebnisse zu liefern. Diese Ergebnisse waren auch Gegenstand einer weiteren wissenschaftlichen Veröffentlichung (Vincze et al. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. (2022)).

Um den Injektionsprozess zu optimieren, konzentrierten wir uns auf die Metall/Halbleiter-Grenzfläche, wo die fehlende Übereinstimmung zwischen den Fermi-Niveaus des Metalls und des Halbleiters die Bildung einer Energiebarriere verursacht, die als Kontaktwiderstand interpretiert wird. Zur Bewertung des Kontaktwiderstands wählten wir eine Methode mit verteilten Parametern unter Verwendung einer Reihe von Elementen mit unterschiedlichen Kanallängen. Gleichzeitig haben wir verschiedene Kontaktmetalle getestet, um das optimale Metall zu finden. Für die Elemente haben wir die folgenden Metalle verwendet: Gold, Silber, Kupfer, Aluminium und Nickel. Die Wahl der Metalle beruhte auf der Ausgangsarbeit der Metalle und dem erwarteten Fermi-Niveau des Halbleiters. Die Ergebnisse der Studie lieferten die überraschende Erkenntnis, dass Aluminiumkontakte den gleichen oder einen geringeren Kontaktwiderstand als Standard-Goldkontakte erreichen. Diese Erkenntnis hat auch ein großes Anwendungspotenzial, da sie die Kosten für die präparierten Elemente erheblich senkt. Die Ergebnisse dieser Studie wurden auch in eine wissenschaftliche Veröffentlichung aufgenommen (Micjan, Vincze, Weis. *Japanese Journal of Applied Physics* (2023)).

Der Abschluss der Arbeit ist der Verwendung von Kupferoxidtransistoren für Sensorzwecke gewidmet. Metalloxide sind bekannt für ihre Anwendung bei der Detektion von oxidierenden oder reduzierenden Gasen. Während Standardoxide wie Nickel- oder Titanoxide in einer Widerstandsstruktur gemessen werden und hohe Betriebstemperaturen (200 bis 300°C) erfordern, könnte der vorgeschlagene Ansatz unter Verwendung eines CuO-Transistors aufgrund der Signalverstärkung direkt am Element zu verbesserten Erfassungsparametern führen. Mit anderen Worten, der Einsatz von Kupferoxidtransistoren ist nicht nur eine Änderung des verwendeten aktiven Schichtmaterials, sondern eine qualitative Veränderung durch die Verwendung des Transistors als Sensor. Die mit CuO-Transistoren erzielten Ergebnisse haben gezeigt, dass der Nachweis von NO<sub>2</sub>-Gas ab Raumtemperatur möglich ist, wobei bereits bei mäßiger Erwärmung (50 °C) hochwertige Sensoreigenschaften erzielt werden. Die beobachteten Sensoreigenschaften lassen vermuten, dass Transistoren auf Kupferoxidbasis ein vielversprechendes Sensorelement für Gassensoren sein werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Dissertation mit der Technologie der Herstellung von Kupferoxidschichten mit Hilfe der Sol-Gel-Technologie befasste, die Technologie der Herstellung von Transistoren auf Kupferoxidbasis erfolgreich beherrschte und die Möglichkeiten zur Optimierung der Elemente aufzeigte, wobei das optimale Verhältnis der im Sol-Gel-Prozess verwendeten Lösungsmittel ermittelt und Aluminium als alternatives Kontaktmaterial anstelle von Gold durch eine systematische Studie identifiziert wurde. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die entwickelten elektronischen Elemente für Sensoranwendungen eingesetzt und eine ausreichende Sensorleistung bei weniger anspruchsvollen Betriebstemperaturen als bei den üblicherweise verwendeten Sensoren mit anderen Oxiden und Widerstandsstrukturen erzielt. Die Arbeit bringt somit neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Materialpräparationstechnologie für die Elektronik, der Präparationstechnologie für elektronische Elemente sowie der Verwendung dieser Elemente für Sensoranwendungen.



## 8 Publikačná činnosť

### ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch (4)

- [1] **VINCZE, Tomáš** [30%]; MIČJAN, Michal [30%]; PAVÚK, Milan [5%]; NOVÁK, Patrik [5%]; WEIS, Martin [30%]. Fabrication of cupric oxide-based transistors by sol-gel technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32. s. 6883--6889.  
Uložené v databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85100746551
- [2] **VINCZE, Tomáš** [50%]; MIČJAN, Michal [25%]; PAVÚK, Milan [5%]; WEIS, Martin [20%]. Fabrication of cupric oxide-based transistors by a sol-gel technique using a binary solvent mixture. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33. s. 7701--7707.  
Uložené v databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85124769638
- [3] **VINCZE, Tomáš** [25%]; MIČJAN, Michal [20%]; NEVŘELA, Juraj [10%]; DONOVAL, Martin [10%]; WEIS, Martin [35%]. Photoresponse dimensionality of organic field-effect transistor. In: *Materials*. 2021, s. 23.  
Uložené v databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85120818965
- [4] MIČJAN, Michal [40%]; **VINCZE, Tomáš** [30%]; WEIS, Martin [30%]. Reduction of solution-processed copper-oxide-based transistors' contact resistance using aluminium electrodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 62. s. 6.  
Uložené v databáze: SCOPUS

### AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách (2)

- [1] KUZMA, Anton [5%]; **VINCZE, Tomáš** [30%]; MIČJAN, Michal [30%]; NEVŘELA, Juraj [25%]; DONOVAL, Martin [5%]; WEIS, Martin [5%]. Dimensionality of photogenerated charges transport in the organic phototransistor. In: MCCULLOCH, Iain; JURCHESCU, Oana D. *Organic and Hybrid Field-Effect Transistors 21*. Bellingham: SPIE, 2022, ISBN 978-1-510-65406-8.  
Uložené v databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85140957341
- [2] **VINCZE, Tomáš** [25%]; MIČJAN, Michal [25%]; PAVÚK, Milan [25%]; WEIS, Martin [25%]. Optimisation of sol-gel copper oxide layers for field-effect transistors. In: *IRC 2022*. [s.l.]: WASET, 2022, s. 74--78.

### AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách (7)

- [1] **VINCZE, Tomáš** [5%]; NOVOTA, Miroslav [30%]; NOVÁK, Patrik [15%]; PAVÚK, Milan [15%]; WEIS, Martin [33%]. Využitie sol-gel technológie pre prípravu CuO tranzistorov. In: MICHALKA, Miroslav; VINCZE, Andrej. 21. Škola vákuovej techniky. Bratislava: Slovenská vákuová spoločnosť, 2019, s. 145--148. ISBN 978-80-99905-01-7.
- [2] KOVÁČ, Jaroslav [20%]; SZOBOLOVSZKÝ, Robert [20%]; FLOROVIC, Martin [20%]; KOVÁČ, Jaroslav; CHVÁLA, Aleš [10%]; **VINCZE, Tomáš** [10%]. Determination of on chip temperature distribution of devices under operation by using Raman microscopy. In: JANDURA, Daniel; ŠUŠLIK, Ľuboš; URBANCOVÁ, Petra; KOVÁČ, Jaroslav. *ADEPT 2019: 7th International conference on advances in*

electronic and photonic technologies. Štrbské Pleso, Slovakia. June 24-27, 2019. 1. vyd. Žilina : Vydavateľstvo EDIS, 2019, s. 289--292. ISBN 978-80-554-1568-0.

- [3] **VINCZE, Tomáš** [34%]; MIČJAN, Michal [33%]; WEIS, Martin [33%]. Fabrication of copper oxide thin-film transistor. In: KOVÁČ, Jaroslav; CHYMO, Filip; FEILER, Martin; JANDURA, Daniel. ADEPT 2020. Žilina: Vydavateľstvo EDIS, 2020, s. 74--77. ISBN 978-80-554-1735-6.
- [4] **VINCZE, Tomáš** [34%]; MIČJAN, Michal [33%]; WEIS, Martin [33%]. Copper oxide field-effect transistor fabricated by sol-gel method. In: IZSÁK, Tibor; VANKO, Gabriel. ASDAM 2020. Danvers: IEEE, 2020, s. 115--118. ISBN 978-1-7281-9776-0. Uložené v databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85104532385
- [5] **VINCZE, Tomáš** [25%]; MIČJAN, Michal [25%]; KOVÁČ, Jaroslav [25%]; WEIS, Martin [25%]. Impact of different solutions on electrical parameters of CuO transistors. In: KOZÁKOVÁ, Alena. ELITECH'21. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, ISBN 978-80-227-5098-1.
- [6] **VINCZE, Tomáš** [25%]; NEVŘELA, Juraj [25%]; MIČJAN, Michal [25%]; WEIS, Martin [25%]. Impact of gate voltage on the response time of CuPc and ZnPc photosensitive organic field-effect transistors. In: JANDURA, Daniel; MANIAKOVÁ, P.; LETTRICHOVÁ, Ivana; KOVÁČ, Jaroslav. ADEPT 2021. Žilina: Vydavateľstvo EDIS, 2021, s. 167--170. ISBN 978-80-554-1806-3.
- [7] CHYMO, Filip [55%]; MIKOLÁŠEK, Miroslav [9%]; **VINCZE, Tomáš** [18%]; REŽO, Vratislav [18%]. Preparation and analysis of Ni/NiO based MIS photoanodes. In: JANDURA, Daniel; MANIAKOVÁ, P.; LETTRICHOVÁ, Ivana; KOVÁČ, Jaroslav. ADEPT 2021. Žilina: Vydavateľstvo EDIS, 2021, s. 107--110. ISBN 978-80-554-1806-3.

## **BFA Abstrakty odborných prác zo zahraničných podujatí (konferencie...)**

**(1)**

- [1] **VINCZE, Tomáš** [25%]; MIČJAN, Michal [25%]; PAVÚK, Milan [25%]; WEIS, Martin [25%]. Impact of different solutions on the quality of copper oxide-based transistors prepared by sol-gel technique. In: SOLGEL 2022: The international Sol-Gel Conference. Lyon, France. July 24-29, 2022. Lyon : ISGS, 2022.

**Autor má 14 príspevkov z toho je 6 príspevkov v databáze SCOPUS**

## 9 Citačný ohlas uchádzača

**VINCZE, Tomáš; MIČJAN, Michal; PAVÚK, Milan; WEIS, Martin. Fabrication of cupric oxide-based transistors by a sol–gel technique using a binary solvent mixture. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33. s. 7701--7707.**

- [1] Alshammari, M., Alhassan, S., Alshammari, K., Alotaibi, T., Taha, T. A. M., Alshammari, A. H., & Ismael, A. (2023). Synthesis of CaCO<sub>3</sub>/Cu<sub>2</sub>O/GO Nanocomposite Catalysts for Hydrogen Production from NaBH<sub>4</sub> Methanolysis. *Catalysts*, 13(6), 1010.
- [2] Pavúk, M., & Migliorini, M. B. (2023, May). Uncertainty of height measurements in atomic force microscopy. In *American Institute of Physics Conference Series* (Vol. 2778, No. 1, p. 040022).
- [3] Ali, N., Hussain, S., Waqas, M., Faheem, M., Ahmad, N., Ali, A., ... & Schmidt-Mende, L. (2023). Charge transfer in copper oxide thin films deposited at different electrodeposition potential. *Physica B: Condensed Matter*, 659, 414881.
- [4] Stuchlikova, L., & Marek, J. (2022, October). Academy Phoenix: Will Universities Reborn in Industry 5.0 Era, or Will They Lie Down in Ashes?. In *2022 20th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)* (pp. 613-619). IEEE.

**VINCZE, Tomáš; MIČJAN, Michal; NEVŘELA, Juraj; DONOVAL, Martin; WEIS, Martin. Photoresponse dimensionality of organic field-effect transistor. In: *Materials*. 2021, s. 23.**

- [1] Ge, S., & Wu, J. (2022). The Analysis of WJ Distribution as an Extended Gaussian Function: Case Study. *Applied Sciences*, 12(15), 7773.
- [2] Liao, J., Wang, X., Danieli, Y., Houben, L., Rechav, K., Song, J., ... & Xu, J. (2023). Aligned Phthalocyanine Molecular Nanowires by Graphoepitaxial Self-Assembly and Their In Situ Integration into Photodetector Arrays. *Advanced materials technologies*, 2202179.
- [3] Song, J., Wang, X., Liao, J., Zhou, W., Song, J., Zhao, Z., ... & Xu, J. (2023). Horizontally-Oriented Growth of Organic Crystalline Nanowires on Polymer Films for In-Situ Flexible Photodetectors with Vis-NIR Response and High Bending Stability. *Advanced functional materials*, 33(15), 2213888.

**VINCZE, Tomáš; MIČJAN, Michal; PAVÚK, Milan; NOVÁK, Patrik; WEIS, Martin. Fabrication of cupric oxide-based transistors by sol–gel technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32. s. 6883--6889.**

- [1] Abdel-Galil, A., Moussa, N. L., & Yahia, I. S. (2022). Study on spray deposited Ni-doped CuO nanostructured thin films: microstructural and optical behavior. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(8), 4984-4999.

**Citácie: 8 citácií (z toho 6 citácií SCOPUS)**

## 10 Zoznam použitej literatúry

- [1] Magnanelli, T. J., & Heilweil, E. J. (2020). Carrier mobility of silicon by sub-bandgap time-resolved terahertz spectroscopy. *Optics express*, 28(5), 7221-7236.
- [2] Evangelista, I., & Janotti, A. (2020). Electron mobility in crystalline and amorphous metal-oxide semiconductors. *Bulletin of the American Physical Society*, 65.
- [3] Menichelli, M., Boscardin, M., Crivellari, M., Davis, J., Dunand, S., Fanò, L., & Wyrsh, N. (2020). Hydrogenated amorphous silicon detectors for particle detection, beam flux monitoring and dosimetry in high-dose radiation environment. *Journal of Instrumentation*, 15(04), C04005.
- [4] Martinez, J., & Piqueras, J. (1980). On the mobility of polycrystalline semiconductors. *Solid-State Electronics*, 23(4), 297-303.
- [5] Nunes, D., Pimentel, A., Santos, L., Barquinha, P., Pereira, L., Fortunato, E., & Martins, R. (2018). *Metal oxide nanostructures: synthesis, properties, and applications*. Elsevier.
- [6] Kao, K. C. (2004). *Dielectric phenomena in solids*. Elsevier.
- [7] Petti, L., Münzenrieder, N., Vogt, C., Faber, H., Büthe, L., Cantarella, G., ... & Tröster, G. (2016). Metal oxide semiconductor thin-film transistors for flexible electronics. *Applied Physics Reviews*, 3(2).
- [8] Filipič, G., & Cvelbar, U. (2012). Copper oxide nanowires: a review of growth. *Nanotechnology*, 23(19), 194001.
- [9] Ouyang, Z., Wang, W., Dai, M., Zhang, B., Gong, J., Li, M., ... & Sun, H. (2022). Research progress of p-type oxide thin-film transistors. *Materials*, 15(14), 4781.
- [10] Lim, S. H., Park, I. J., & Kwon, H. I. (2023). Effects of rapid thermal annealing temperature on NO<sub>2</sub> gas sensing properties of p-type mixed phase tin oxide thin films. *Ceramics International*, 49(5), 8478-8486.
- [11] Hench, L. L. (1990). *West J K. The Sol—gel Process*. *Chem Rev*, 1990, 90.
- [12] Nishio, K., & Tsuchiya, T. (2018). Sol-gel processing of thin films with metal salts. In *Handbook of Sol-Gel Science and Technology: Processing, Characterization and Applications* (pp. 133-154). Springer International Publishing.
- [13] Prasanna, S. S., Balaji, K., Pandey, S., & Rana, S. (2019). Metal oxide base nanomaterials and their polymer nanocomposites. In *Nanomaterials and Polymer Nanocomposites* (pp. 123-144). Elsevier.
- [14] Debbichi, L., Marco de Lucas, M. C., Pierson, J. F., & Kruger, P. (2012). Vibrational properties of CuO and Cu<sub>4</sub>O<sub>3</sub> from first-principles calculations, and Raman and infrared spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(18), 10232-10237.
- [15] Hagemann, H., Bill, H., Walker, E., & François, M. (1990). Raman spectra of single crystal CuO. *Solid state communications*, 73(6), 447-451.
- [16] Forgerini, F. L., & Marchiori, R. (2014). A brief review of mathematical models of thin film growth and surfaces: a possible route to avoid defects in stents. *Biomatter*, 4(1), e28871.
- [17] G.V. Samsonov. *The oxide handbook*. Springer Science & Business Media; 2013 Mar 8.
- [18] Michaelson, H. B. (1977). The work function of the elements and its periodicity. *Journal of applied physics*, 48(11), 4729-4733.
- [19] Cornette, P., Costa, D., & Marcus, P. (2020). Relation between surface composition and electronic properties of native oxide films on an aluminium-copper alloy studied by DFT. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(16), 161501