



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

TOPNÁ MEMS PLATFORMA PRO CHEMICKÉ SENZORY

MEMS MICROHOTPLATE PLATFORM FOR CHEMICAL SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Silvester Vančík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Prášek, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**
Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Silvester Vančík

ID: 161789

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Topná MEMS platforma pro chemické senzory

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií MEMS. Blíže prostudujte oblast MEMS vyhřívacích elementů pro chemické senzory. Na základě získaných znalostí modelujte a realizujte MEMS vyhřívací element s elektrodami pro kontaktování aktivní vrstvy senzoru. Vyrobenou platformu charakterizujte a určete její pracovní oblast. Dosažené výsledky vyhodnoťte a porovnejte s výsledky udávanými v literatuře.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 22.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jan Prášek, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá oblasťou návrhu a výroby mikroelektromechanickej vyhrievacej platformy pre chemické senzory plynov. V teoretickej časti sú popísané MEMS, senzory a výrobné procesy a technológie potrebné pre výrobu takejto platformy. Praktická časť obsahuje simulácie, návrh masiek kompletnej výroby od masiek až po samotnú platformu na čipe. V práci sa tiež nachádzajú výsledky charakterizácie vyrobenej vyhrievacej platformy v porovnaní so simuláciami. Výsledky sú taktiež porovnané s hodnotami z literatúry.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

MEMS, vyhrievacia platforma, fotolitografia, stres, tepelná vodivosť, oxid kremíku

ABSTRACT

This master's thesis deals with design and fabrication of MEMS microhotplate platform for chemical gas sensors. The theoretical part describes MEMS, sensors and processes and technologies needed for fabrication of micro hotplate. The practical part includes simulations, masks and step by step microhotplate fabrication. Fabricated heating membrane was characterized and compared to theoretical values from simulations and to similar devices presented in literature.

KEYWORDS

MEMS, microhotplate, photolithography, stress, thermal conductivity, silicon dioxide

VANČÍK, S. *Topná MEMS platforma pro chemické senzory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2017. 68 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jan Prášek Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému **Topná MEMS platforma pro chemické senzory** som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, obzvlášť som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 zákona č. 121/2000 Zb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Zb.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Janu Práškoví, Ph.D. a konzultantovi Bc. Jaroslavu Klemptovi za metodické a cielene orientované vedenie, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072 **Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)** operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Zoznam obrázkov	vii
Zoznam tabuliek	ix
Úvod	12
1 Mikroelektromechanické systémy	13
1.1 Popis MEMS.....	13
1.1.1 Štruktúry MEMS.....	13
1.2 Závesná membrána	14
1.3 Prenos tepla.....	15
1.3.1 Vedenie tepla (kondukcia)	16
1.3.2 Tepelné žiarenie (radiácia).....	17
2 SENZORY	18
2.1 Vlastnosti senzoru.....	18
2.2 Mikrosenzory	19
2.3 Materiál elektród polovodičových senzorov plynov	20
3 VÝROBNÉ PROCESY	21
3.1 Depozície chemickou reakciou	21
3.1.1 Chemická depozícia z pár (Chemical Vapor Deposition CVD)	21
3.1.2 Elektro-depozícia	22
3.1.3 Epitaxia	23
3.1.4 Tepelná oxidácia	23
3.2 Depozície fyzikálnou reakciou	24
3.2.1 Naparovanie	24
3.2.2 Magnetronové naprašovanie	24
3.2.3 Nanášanie polymérnych materiálov postrekom.....	26
3.2.4 Depozícia atómových vrstiev (ALD).....	26
3.3 Fotolitografia	27
3.3.1 Osvietenie, vyvolanie a stripovanie fotorezistu	28

3.4	Leptanie	29
3.4.1	Anizotropné a izotropné leptanie	29
3.4.2	Mokr� leptanie kremíku	30
3.4.3	Such� leptanie	31
4	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	33
4.1	Návrh truktr	33
4.2	Simulácie	34
4.3	Návrh technologického postupu výroby	39
4.4	Návrh masiek	41
4.4.1	Výroba masiek	45
4.5	Výber oxidu	46
4.6	Výroba vyhrievacej membrány	47
4.6.1	čistenie povrchu a nanesenie rezistu	47
4.6.2	Expozícia	48
4.6.3	Vyvolanie a istenie	48
4.6.4	Leptanie vyhrievacích štruktúr a leptanie elektród	48
4.6.5	Leptanie oxidu kremíku (SiO ₂)	50
4.6.6	Leptanie kremíku (Si)	51
4.6.7	Výroba interdigitálnej elektródy	52
4.7	Charakterizácia vyrobených vyhrievacích membrán	54
5	VYHODNOTENIE A ZÁVER	65
	LITERATÚRA	67

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1: Typické štruktúry realizované objemovým mikrobrábaním: a) uzatvorená membrána, b) mikronosník, c) membrána so seizmickou hmotou, d) mostík, e) závesná membrána, f) mikrokanálik, g) kryt. [2]	14
Obr. 2: SEM snímka senzoru plynov na závesnej ohrievacej platforme a jej vrstvomá štruktúra.[5]	15
Obr. 3: Schéma šírenia tepla v platforme, kde T_{amb} je počiatočná teplota membrán, $Q_{membrána}$ je teplo šíriace sa cez membránu. [6]	15
Obr. 4: Schéma senzoru. [8]	18
Obr. 5: Typický tvar elektród plynových senzorov na kremíkovom substráte.....	20
Obr. 6: Horizontálny LPCVD reaktor. [20].....	22
Obr. 7: Znázornenie procesu elektro-depozície. [21]	23
Obr. 8: Komora magnetronového naprašovania. [13][8].....	26
Obr. 9: Proces fotolitografie. [12].....	28
Obr. 10: Leptacie profily vytvorené (A) izotropným leptaním, (B) suchým anizotropným leptaním, (C) mokrým anizotropným leptaním. [12]	30
Obr. 11: Závesná vyhrievacia platforma v tvare “X“ (vľavo) a “L“ (vpravo).	33
Obr. 12: Geometria ohrievača špirála (vľavo) a meander (vpravo).....	34
Obr. 13: Nadväznosť simulácií.....	35
Obr. 14: Rozloženie teploty na membránach pri maximálnom zahriatí, teploty uvedené v K: a) plná neodleptaná membrána, b) uzavretá membrána, c) zavesená membrána so závesom X, d) zavesená membrána so závesom L.....	36
Obr. 15: Graf závislosti deformácie na čase pri teplote 800 K.....	38
Obr. 16: Simulácia deformácie závesných membrán pri teplote 800 K: a) zavesená membrána X s ohrievačom špirála, b) zavesená membrána X s ohrievačom meander, c) zavesená membrána L s ohrievačom špirála d) zavesená membrána L s ohrievačom meander	39
Obr. 17: 3D model sendvičovej štruktúry.....	41
Obr. 18: Maska na prívody ohrievača (jeden čip).	42
Obr. 19: Maska geometrie ohrievača.....	43
Obr. 20: Maska geometrie elektródy.	44
Obr. 21: a) odkrytie kontaktovacích plôch a doleptanie SiO ₂ , b) maska na leptanie	

závesnej membrány.	44
Obr. 22: Ukážka značiek na zosúladenie vrstiev generovaných skriptom zo softwaru KLayout.....	45
Obr. 23: Podleptané štruktúry testovaných oxidov kremíku a) ALD na PECVD, b) evaporátor, c) magnetron, d) ALD.	47
Obr. 24: Vyleptaná štruktúra ohrievacej platformy vrátane kontaktov.	49
Obr. 25: Meranie výšky nanesej platinovej vrstvy.	50
Obr. 26: Vyleptaná vrstva oxidu (veľké plochy v tvare písmena L).	51
Obr. 27: Podleptaná štruktúra s detailom na membránu.....	52
Obr. 28: SEM snímok nepodleptanej vyhrievacej platformy s interdigitálnou elektródou.	53
Obr. 29: SEM snímok podleptanej membrány s poškodenou titánovou elektródou.	54
Obr. 30: SEM snímka 3 μ m meandru na závese L (vľavo) a 4 μ m špirály na závese X (vpravo)	55
Obr. 31: I-V charakteristika špirály s hrúbkou cesty 4 μ m.....	56
Obr. 32: I-V charakteristika meandru s hrúbkou cesty 4 μ m.....	56
Obr. 33: I-V charakteristika špirály s hrúbkou cesty 3 μ m.....	57
Obr. 34: I-V charakteristika meandru s hrúbkou cesty 3 μ m.	57
Obr. 35: Graf TCR.....	59
Obr. 36: Graf závislosti teploty na dodanom výkone u meandrov s 4 μ m šírkou	60
Obr. 37: Graf závislosti teploty na dodanom výkone u špirál s 4 μ m šírkou	61
Obr. 38: Graf závislosti teploty na dodanom výkone u meandrov s 3 μ m šírkou	62
Obr. 39: Graf závislosti teploty na dodanom výkone u špirál s 3 μ m šírkou	63

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1: Anizotropné leptacie rýchlosti rôznych leptadiel.....	31
Tabuľka 2: Materiálové vlastnosti potrebné pre simuláciu. [22].....	35
Tabuľka 3: Výkon potrebný na zohriatie platformy na teplotu 800 K.	37
Tabuľka 4: Hodnoty deformácií v nanometroch v čase T	37
Tabuľka 5: Vybrané hodnoty meraného odporu pri zmene teploty špirály	58
Tabuľka 6: Vybrané hodnoty meraného odporu pri zmene teploty meandru	58

ÚVOD

V posledných rokoch sa trend v oblasti MEMS rozšíril. MEMS technológie sa začali využívať v najrôznejších odvetviach vedy a techniky. Či už sa jedná o statické mikrosystémy alebo o najrôznejšie pohyblivé časti v mikroskopickom i nanoskopickom meradle.

Cieľom tejto práce je bližšie sa zoznámiť s technológiou MEMS v oblasti vyhrievacích platforiem a s nimi spojenými plynovými senzormi. Vybrať a naštudovať vhodné technológie výroby, navrhnuť a odsimulovať štruktúru MEMS platforiem, navrhnuť masky potrebné na litografiu a vybrať vhodné materiály.

Teoretická časť práce sa zaoberá MEMS technológiami, senzormi, materiálmi, spôsobmi výroby ako sú nanášanie vrstiev rôznych materiálov, či už vodivých alebo nevodivých, spôsoby a možnosti využitia litografie, suchým a mokrým leptaním a leptadlami.

Experimentálna časť sa zaoberá návrhom a simuláciou štruktúr MEMS platforiem pomocou simulačného programu ANSYS. Ďalej je v experimentálnej časti zahrnutý návrh masiek na litografiu popis samotnej výroby týchto masiek. Ako ďalšie je popísaný krok po kroku spôsob výroby sendvičovej štruktúry až po vyleptanie závesnej membrány.

Poslednou časťou tejto práce je samotné testovanie výhrevných platforiem a ich elektrická charakterizácia. Výsledky sú spracované v tabuľkách a grafoch porovnané s teoretickými hodnotami získanými v simulácii a vyhodnotene vzhľadom k hodnotám dosiahnutých u podobných zariadení v literatúre.

1 MIKROELEKTROMECHANICKÉ SYSTÉMY

1.1 Popis MEMS

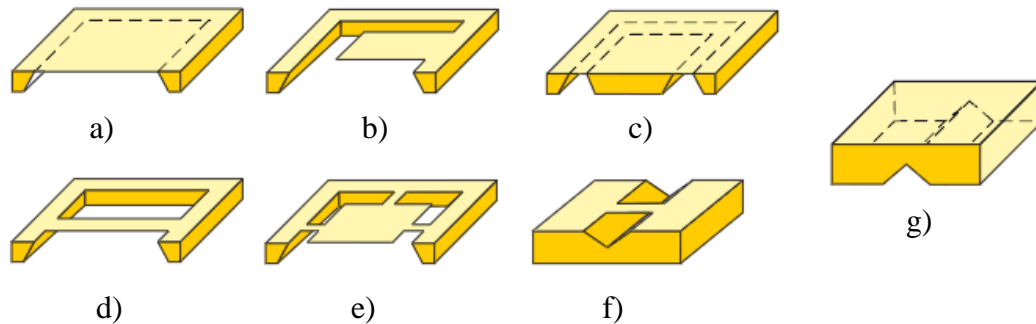
Skratka MEMS pochádza z anglického výrazu „Micro-Electro-Mechanical-System“ čo môžeme jednoducho preložiť ako mikro-elektro-mechanický systém. Tento systém môžeme definovať ako miniaturizovaný mechanický a elektromechanický prvok, ktorý je vyrobený pomocou techniky mikro-obrábania a doplnený o ďalšie elektronické prvky pre jeho riadenie, elektronické spracovanie signálu a iné. O mikro-systémoch sa začalo hovoriť v 90. rokoch 20. storočia ako o nastupujúcej kľúčovej technológii 21. storočia. Veľké úsilie bolo venované technickému vývoju a a novým prístupom, ktoré boli spojené s inžinierstvom pre vývoj nových aplikácií. Začali vznikať nové kvalitatívne odlišné systémy. Jednou z hlavných predností mikro-systémovej techniky je možnosť miniaturizácie zariadení. Na výrobu mikrosystémov sa využívajú materiály používané na výrobu integrovaných elektronických obvodov, ktoré však v tejto technológii vykazujú vlastnosti bežných materiálov, napríklad kremík v mikro-štruktúrach vykazuje vlastnosti oceli. Rozmery týchto štruktúr sa môžu pohybovať až pod veľkosťou jedného mikrónu po niekoľko milimetrov. Ďalej sa tieto štruktúry delia na jednoduché bez pohyblivých prvkov až na extrémne zložité elektromechanické systémy s niekoľkými pohyblivými prvkami, ktoré sú riadené integrovanou mikroelektronikou. Jedno z hlavných kritérií MEMS je existencia aspoň niektorého prvku, ktorý má určitú mechanickú funkčnosť bez ohľadu na to či sa môžu alebo nemôžu pohybovať. [1][2][4]

Zatiaľ čo funkčnými prvkami MEMS sú miniaturizované štruktúry, senzory, aktuátory a mikroelektronika. Mikrosenzory a mikro-aktuátory sú klasifikované prevodníky, zariadenia konvertujúce energie jednej formy na druhú, v prípade mikrosenzorov nameraný mechanický signál na signál elektrický. [1][3][15]

1.1.1 Štruktúry MEMS

Priemyselným a vedeckým inštitúciám sa darí vytvárať v posledných dvadsiatich rokoch vytvárať stále menšie a lepšie MEMS zariadenia. Každý MEMS je zložený s rôznych

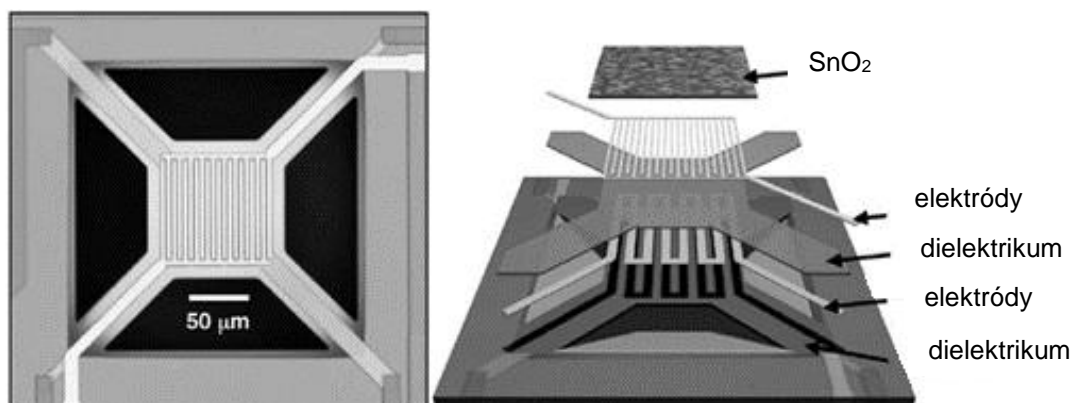
stavebných prvkov, tvorených mikrobrábaním, z ktorých niektoré sú uvedené na **Obr. 1**. Najpoužívanejšou štruktúrou pre výrobu senzorov plynu je závesná membrána kvôli odvodu tepla. [3]



Obr. 1: Typické štruktúry realizované objemovým mikrobrábaním: a) uzatvorená membrána, b) mikronosník, c) membrána so seizmickou hmotou, d) mostík, e) závesná membrána, f) mikrokanálik, g) kryt. [2]

1.2 Závesná membrána

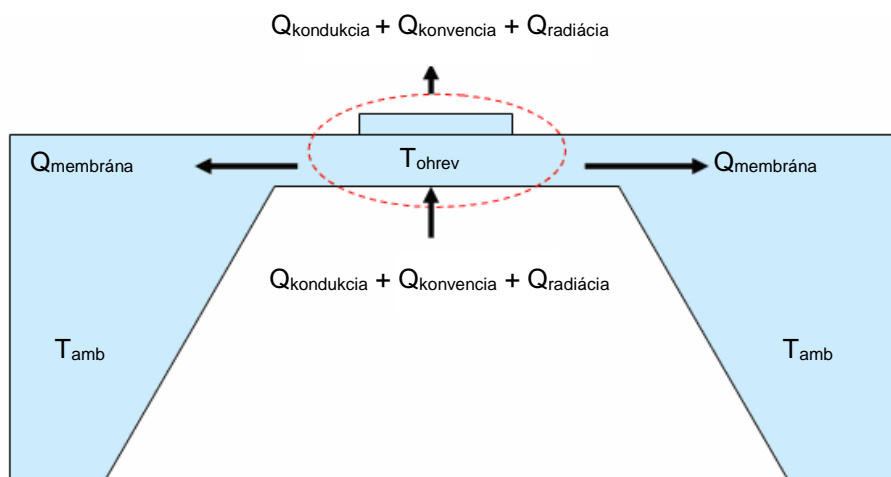
Na **Obr. 2** je znázornená hotová vytvorená závesná membrána a zároveň skladba jednotlivých vrstiev tak ako sú nanášané na kremíkový substrát. Na kremíkovej doske je vytvorená dielektrická vrstva oxidu kremičitého, na ktorú je nadeponovaná elektricky vodivá vrstva, v ktorej je selektívnym leptaním vytvorená štruktúra ohrievača. Táto vrstva je pokrytá ďalšou dielektrickou vrstvou vytvorenou za rovnakých podmienok ako prvá vrstva kvôli materiálovým stresom. Na túto vrstvu je ďalej nanosená vrstva kovu, v ktorej je selektívnym leptaním vytvorená elektróda senzoru plynu. [5]



Obr. 2: SEM snímka senzoru plynov na závesnej ohrievacej platforme a jej vrstvomá štruktúra.[5]

1.3 Prenos tepla

Prenos tepla je uskutočnený tromi spôsobmi: vedením, prúdením a žiarením. Vedenie tepla je typické a najviac zastúpené v pevných látkach a založené na molekulárnej difúzii spôsobenej teplotným gradientom. Šírenie tepla žiarením môžeme pozorovať v pevných látkach, kvapalinách aj plynoch. Na druhej strane k prúdeniu dochádza iba v tekutinách (kvapalinách a plynoch). Základné vzťahy pre vedenie tepla, prúdenie tepla a tepelné vyžarovanie vychádzajú s Fourierovho zákona, Newtonovho zákona chladnutia a Stefan-Boltzmanovho zákona. Šírenia tepla je znázornené na **Obr. 3**. [6][7]



Obr. 3: Schéma šírenia tepla v platforme, kde T_{amb} je počiatočná teplota membrán, $Q_{membrána}$ je teplo šíriace sa cez membránu. [6]

Celková tepelná strata môže byť vyjadrená rovnicou:

$$Q = G_m \lambda_m (T_h - T_o) + G_v (h_f + \lambda_v) (T_h - T_o) + G_{rad} \varepsilon \sigma (T_h^4 - T_o^4) + \Delta x, \quad (1.1)$$

kde Q je celková tepelná strata, λ_m a λ_v sú tepelné vodivosti membrány a vzduchu, T_h a T_o sú teplota ohrievania a teplota okolia, G_m , G_v a G_{rad} popisujú geometrické faktory systémov, ide o empirické hodnoty zahrňujúce geometrické informácie ovplyvňujúce straty, ε je emisivita, σ je Stefan-Boltzmanova konštanta a Δx ostatné šírenie tepla vo väčšine prípadov zanedbateľné. [6][7]

1.3.1 Vedenie tepla (kondukcia)

Ako už bolo spomenuté, k vedeniu tepla dochádza vďaka difúzii a kolízii mikroskopických častíc vďaka teplotnému gradientu. Difúzne častice (molekuly, elektróny a atómy) prenášajú kinetickú a potenciálnu energiu. Vedenie je možné len v pevných látkach, materiáloch alebo medzi dvoma objektami ktoré majú kontaktné plochy. Plocha steny A a hrúbka L , kde obe styčné plochy majú rôznu teplotu T_H a T_C , q je merný tepelný tok, definovaný ako tepelný tok Q cez plochu A za čas t . Fourierovho zákon ide potom popísať ako:

$$q = \frac{Q}{At} = G \frac{T_H - T_C}{L}, \quad (1.2)$$

kde G je tepelná konduktivita.

Tepelná konduktivita G ako transportná vlastnosť materiálu je faktorom medzi tepelným tokom Q a teplotného gradientu s ohľadom na vzdialenosť:

$$\frac{Q}{A} = -G \frac{dT}{dx}, \quad (1.3)$$

Tepelná kapacita je termodynamická vlastnosť substancie ako hustota ρ a špecifické teplo c . Tepelná kapacita H je tepelná energia, ktorá môže byť uložená v substancii a je daná vzťahom:

$$H = \frac{Q}{(T_i - T_f)}, \quad (1.4)$$

Kde Q je teplo dodané a T_i a T_f sú počiatková a konečná teplota. [6][7][16]

1.3.2 Tepelné žiarenie (radiácia)

Tepelné žiarenie nevyžaduje k svojmu princípu žiadne materiálové médium. Ide o klasickú mechaniku vlnového charakteru založenú na Maxwellových rovniciach. Náročnejšou úlohou bolo opísať tento efekt keďže sa predpokladalo, že sa svetlo správa iba ako vlna. Kvantová fyzika umožnila opis svetla ako časticu alebo ako vlnu.

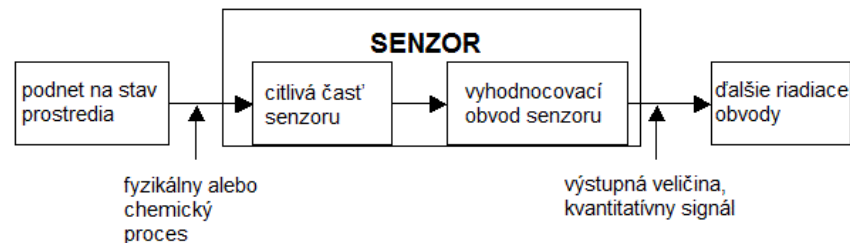
Tepelné žiarenie je vyžarované v dôsledku určitej teploty objektu. Povrch objektu môže buď vyžarovať alebo prijímať energiu. Vyžiarená energia cez elektromagnetické vlny P_{rad} je definovaná vzťahom:

$$P_{rad} = G_{rad}\sigma\varepsilon(T_h^4 - T_o^4), \quad (1.5)$$

kde T_h a T_o sú teplota ohrievania a teplota okolia, G_{rad} je plocha vyžarovania, ε je emisivita a σ je Stefan-Boltzmanova konštanta, $\sigma=5,67\times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴). [6][7][16]

2 SENZORY

Všeobecne je senzor definovaný ako zariadenie reagujúce na určitý podnet alebo stav prostredia pričom veľkosť podnetu prevádza na výstupnú veličinu. Z pohľadu elektroniky je senzor súčiastka, ktorá prevádza fyzikálne, chemické alebo biochemické veličiny na merateľné, najčastejšie elektrické veličiny. Reakciou môže byť fyzikálny alebo chemický proces meniaci určitý parameter jednoznačným spôsobom. Stav procesu sníma citlivá časť senzoru a získaný signál je ďalej spracovaný vyhodnocovacím obvodom senzoru. Výstupná informácia z vyhodnocovacieho obvodu je kvantitatívna. Obvykle ňou býva elektrický signál, ktorého veľkosť odpovedá veľkosti podnetu. Schéma senzoru je znázornená na **Obr. 4.** [8]



Obr. 4: Schéma senzoru. [8]

2.1 Vlastnosti senzoru

Vhodná voľba senzoru je pri dnešnej ponuke senzorov veľmi dôležitá. Pre konkrétnu aplikáciu stojí vždy konštruktér pred rozhodnutím, ktoré vychádza z požiadaviek kladených na daný typ senzoru. V praxi je potrebné voliť kompromis medzi požiadavkami vzhľadom k tomu, že mnohé z požiadaviek sú protichodné. Príkladom protichodných požiadaviek sú napríklad cena a presnosť. Všeobecné požiadavky na senzorové vlastnosti sú:

- vstupná a výstupná veličina musia byť na sebe jednoznačne závislé,
- čo najväčšia citlivosť senzoru,
- základné statické charakteristiky by mali mať vhodný priebeh,
- časová stálosť a presnosť,

- minimálna závislosť na nameraných okolitých vplyvoch,
- minimálne zaťažovanie meraného objektu,
- vysoká spoľahlivosť,
- nízka cena a náklady na prevádzku,
- jednoduchá obsluha a údržba,

Pre popis základných funkčných parametrov senzorov sa využívajú statické a dynamické charakteristiky.

2.2 Mikrosenzory

Mikrosenzory sú jednou s najrozšírenejších zariadení vyrábaných MEMS technológiou. Moderný senzor by mal obsahovať jednotku na autodiagnostiku, obmedzenie interferencie signálu, autokalibráciu a kompenzáciu parazitných javov. Tieto časti tvoria inteligentnú jednotku mikrosystému. Mikrosenzory je možné rozdeliť do rôznych kategórií podľa množstva kritérií. Tieto kritériá sú:

- a) vstupná veličina a výstupná veličina,
- b) dotykové a bezdotykové (styk senzoru s meraným prostredím),
- c) princíp prevodu (fyzikálne, chemické a biochemické). [8][10]

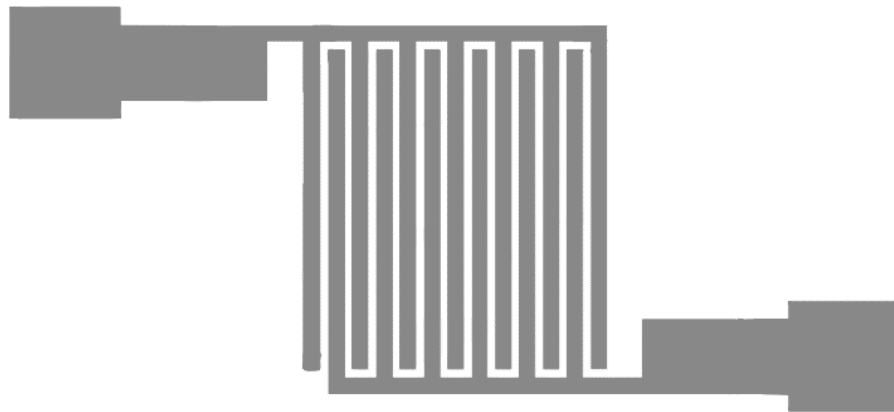
Chemické senzory sa využívajú na detekciu konkrétnych zlúčenín v našom prípade plynov. Tieto senzory majú jednoduchý princíp funkcie. Ide o využívanie základného prírodného javu, keďže väčšina kovov podlieha oxidácii pri dlhodobom vystavení atmosféry obsahujúcej kyslík. Na povrchu kovu sa vytvorí oxidačná vrstva, ktorá má za následok zmenu fyzikálnych vlastností materiálu. Príkladom je zmena vodivého materiálu na polovodič a naopak. Takto je následne možná detekcia konkrétnych plynov v prostredí. [8][10]

Chemorezistívne senzory na detekciu plynov založené na oxidoch kovov pracujú na podobnom princípe. Určité množstvo polovodivých oxidov kovov (napríklad SnO_2), po reakcii s absorbovaným kyslíkom z okolitej atmosféry na ich povrchu, menia svoje elektrické vlastnosti (odpor). K tomu, aby bolo tohto princípu možno využiť v praxi je za potreby dodať dodatočnú energiu vo forme tepla. Preto tieto senzory pracujú pri teplotách

približne 300-500 °C, aby došlo k oxidácii povrchu kovu v krátkom časovom intervale. [9][10]

2.3 Materiál elektród polovodičových senzorov plynov

Veľa vedcov už dlhú dobu študovalo vzťah medzi elektródou a snímaným materiálom rovnako ako dopad materiálu elektródy na jej chovanie. Typy elektród plynových polovodičových senzorov môžeme rozdeliť do troch skupín na „bulk“, hrubovrstvovú a tenkovrstvovú elektródu. Objemový typ sa pre polovodičový senzor plynu používa veľmi zriedka. Vplyv materiálu elektród bol študovaný hlavne porovnávaním rôznych materiálov najmä zlata (Au) a platiny (Pt). Štúdie [17][18] preukázali že zlatá elektróda má nižšiu stabilitu ako platinová elektróda. Z pohľadu teploty citlivosť na oxid uhoľnatý (CO) bola najvyššia v okolí 300°C pre Au elektródu a 450°C pre Pt elektródu. Kremíkový senzor s Au elektródou je citlivejší na snímanie CO zatiaľ čo Pt elektróda bola citlivejšia na H₂. Na **Obr. 5** je možné vidieť tvar elektródy plynového senzoru na polovodičovom substráte. [11]



Obr. 5: Typický tvar elektród plynových senzorov na kremíkovom substráte.

3 VÝROBNÉ PROCESY

Tenké vrstvy sa v praxi často používajú k úpravám povrchov materiálov za účelom vylepšenia ich vlastností. Príkladom je zvýšenie odolnosti materiálu pri mechanickom namáhaní. Tenké vrstvy sú aj základom vytvárania MEMS. V tejto práci budeme považovať za tenkú vrstvu, vrstvu ktorej hrúbka sa nachádza v rozmedzí od niekoľko nanometrov do jedného mikrometru. Tenká vrstva môže byť následne v ďalšom procese leptaná. Technológie vytvárania tenkých vrstiev je možné rozdeliť do dvoch skupín na depozíciu chemickou reakciou a depozíciu fyzikálnou reakciou. [1][4]

3.1 Depozície chemickou reakciou

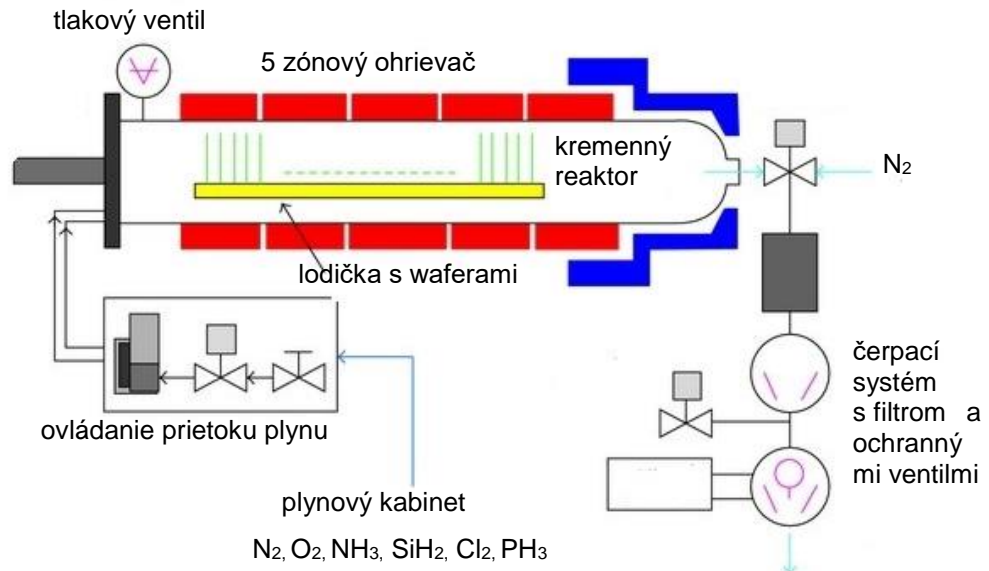
Tieto procesy využívajú tvorbu pevných materiálov priamo z chemickej reakcie v plynných alebo kvapalných zmesiach alebo reakciu s materiálom substrátu. Vytvorený materiál nie je obvykle jediným produktom vytvoreným touto reakciou. Vedľajšie produkty môžu zahŕňať plyny, kvapaliny a v niektorých prípadoch aj iné pevné látky. [1][4]

3.1.1 Chemická depozícia z pár (Chemical Vapor Deposition CVD)

V tomto procese je substrát umiestnený do reaktoru, do ktorého je dodávané určité množstvo plynov. Základným princípom procesu je, že medzi zdrojovými plynmi dochádza k chemickej reakcii, ktorej produktom je pevný materiál kondenzujúci na všetkých povrchoch vo vnútri reaktoru. [1][4]

Dva najdôležitejšie technologické procesy CVD v obore MEMS sú nízkotlakové chemické depozície z pár (Low Pressure Chemical Vapor Deposition – LPCVD) a plazmové nanášanie rozkladom pár (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition - PECVD). Pri využití procesu LPCVD sa vytvárajú vrstvy s veľmi vysokou rovnomernosťou hrúbky nanesej vrstvy a s veľmi dobrými vlastnosťami naneseného materiálu. Hlavným problémom tohto procesu je vysoká teplota nanášania (viac ako 600°C) a pomerne pomalá rýchlosť nanášania tejto vrstvy. Na druhej strane pri procese PECVD môžeme pracovať s nižšími teplotami (do 300°C), kvôli prídavnej energii dodanej molekulám plynu plazmou v reaktore. Kvalita takto nanesených vrstiev má však

tendenciu byť nižšia ako vrstvy nanosené pri vyšších teplotách. Na **Obr. 6** možno vidieť schému horizontálneho reaktoru, ktorý sa používa pri procese LPCVD. [1][4]



Obr. 6: Horizontálny LPCVD reaktor. [20]

CVD procesy sú ideálne pre použitie v prípade ak je potrebná tenká vrstva nanoseného materiálu s dobrým, rovnomerným pokrytím. Kvalita nanoseného materiálu sa líši v závislosti na procese a teplote. [1][4]

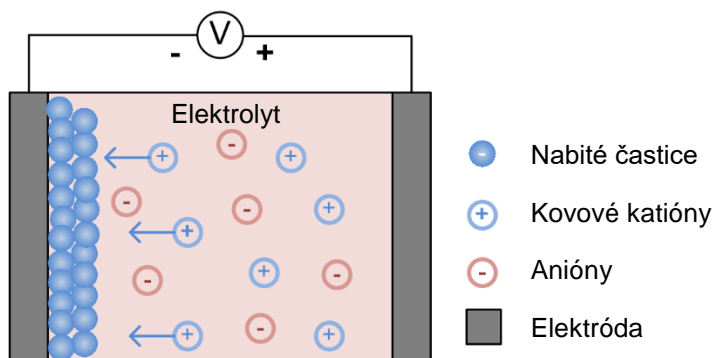
3.1.2 Elektro-depozícia

Tento proces sa tiež nazýva galvanické pokovanie a je možné ho použiť iba u elektricky vodivých materiálov. Existujú dve technológie pokovania. Jednou z nich je galvanické pokovanie a druhou elektrolytické pokovanie. Pri galvanickom pokovaní sa substrát vloží do kvapalného roztoku – elektrolytu. Ak je medzi plochu substrátu a elektródu v roztoku priložený potenciál prebieha chemická reakcia vytvárajúca na substráte vrstvu materiálu. Na povrchu elektródy sa tvoria plyny. [4][12]

Pri procese elektrolytického pokovania sa používa komplexnejší chemický roztok u ktorého sa depozícia spontánne vyskytuje na akomkoľvek povrchu, ktorý s roztokom vytvorí dostatočne veľký elektrochemický potenciál. Tento proces je žiadúci, pretože nie je potreba priskladania externého elektrického potenciálu. Na druhú stranu je v tomto

procesu problém kontrolovať hrúbku a jednotnosť nanesej vrstvy. [4][12][15]

Proces elektro-depozície je vhodný pre vytváranie povrchu kovov (zlato, meď, nikel) o hrúbke približne od jedného mikrometru až po stovky mikrometrov. Depozíciu je najlepšie riadiť použitím externého elektrického potenciálu (váz **Obr. 7**). [1][4][12][15]



Obr. 7: Znáznorenie procesu elektro-depozície. [21]

3.1.3 Epitaxia

Táto technológia je podobná technológii CVD ak je však substrátom polovodičový kryštál, je možné týmto procesom pokračovať rast vrstvy s rovnakou kryštalografickou orientáciou akú ma daný substrát. Ak sa použije povrch amorfného alebo polykryštalického substrátu, nanesená vrstva bude tiež amorfná alebo polykryštalická. Existuje niekoľko technológií pre vytvorenie podmienok vo vnútri reaktoru, ktoré sú potrebné pre podporu epitaxného rastu. Najdôležitejšou je epitaxia parnej fáze (Vapor Phase Epitaxy - VPE). V tomto procese sa do indukčne ohrievaného reaktoru, kde sa zahrieva substrát, zavádza množstvo plynov. Teplota substrátu v tomto procese musí byť aspoň 50 % teploty tavenia materiálu, ktorý má byť nanosený. Výhodou epitaxie je vysoká rýchlosť rastu materiálu, ktorá umožňuje tvorbu vrstiev s hrúbkou väčšou ako sto mikrometrov. Táto technológia sa používa pre výrobu kremíku na izolátore (SOI). [1][4][12]

3.1.4 Tepelná oxidácia

Jedna z najnákladnejších technológií. Ide o oxidáciu povrchu substrátu v atmosfére bohatej na kyslík pri teplotách 800 až 1100° C kvôli urýchleniu procesu. V tejto technológii sa spotrebováva časť substrátu na ktorom sa vrstva vytvára. Rast takejto

vrstvy je zapríčinený difúziou kyslíku do substrátu a vrstva rastie smerom nadol do hĺbky substrátu. S rastúcou vrstvou oxidu sa difúzia kyslíku stáva náročnejšou. Tento efekt vedie k parabolickému vzťahu medzi hrúbkou filmu a dobou oxidácie. Tento proces je obmedzený na materiály, ktoré sa môžu oxidovať a môžu tvoriť vrstvy len daného materiálu, do ktorého kyslík preniká za pomoci difúzie. Typickým využitím je tvorba SiO₂ (oxidu kremičitého) na kremíkovom substráte. [1][4][12]

3.2 Depozície fyzikálnou reakciou

Pre tento typ depozície je obvyklé, že nanosený materiál sa fyzicky presunie na substrát. Inak povedané neprebíha tu žiadna chemická reakcia, ktorá by formovala daný materiál na substráte. Toto nie úplne platí pre proces odlievania ale je oveľa jednoduchšie nahliadať na tento proces týmto spôsobom. [1][4][12]

3.2.1 Naparovanie

Pri naparovaní je substrát umiestnený vo vnútri vákuovej komory, v ktorej je taktiež umiestnený materiál, ktorý sa bude naparovať na substrát. Materiál sa potom zahreje na teplotu pri ktorej sa začne topiť a odparovať. Keďže celý systém je umiestnený vo vákuovej komore, odparené molekuly sa môžu voľne pohybovať a kondenzovať na substráte. Tento princíp funguje pre všetky typy vyparovania, mení sa iba zdroj energie. Poznáme dva najpoužívanejšie zdroje pre odparovanie a to odparovanie pomocou e-lúčov a odporové odparovanie, ktoré sa vzťahujú na spôsob ohrevu naparovaného materiálu. Pri e-lúčoch ide o lokálne zahriatie materiálu pomocou elektrónového zväzku a o jeho následné odparovanie. Pri odporovom ohreve je volfrámová lodička obsahujúca materiál, ktorý sa má napariť na substrát, ohrievaná priechodom vysokého elektrického prúdu. [1][4][7]

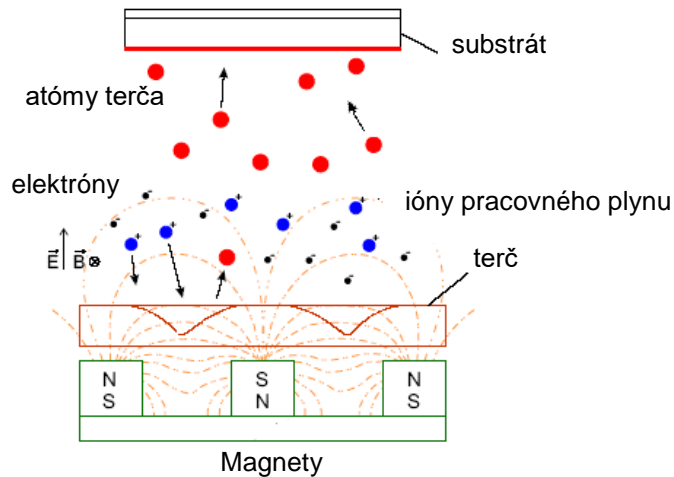
3.2.2 Magnetronové naprašovanie

Táto technológia vyžaduje oveľa nižšie teploty ako pri naparovaní. Substrát je umiestnený vo vákuovej komore spolu so zdrojom materiálu. Tento proces prebieha za prítomnosti inertného plynu (Argón). Plyn v komore je ionizovaný pomocou RF zdroja a vytvára sa tu tak plynná plazma. Ióny sú urýchľované smerom k povrchu materiálu, čo

spôsobí že sa atómy materiálu oddelia (odprášia) od povrchu a naprášia sa na povrch substrátu. [1][4][7][13]

Magnetronové naprašovanie je jednou z mnohých metód prípravy tenkých vrstiev pre priemyselné využitie. Ide o často vyhľadávanú technológiu, ktorá vďaka svojim vlastnostiam umožňuje nanášanie i vrstiev, ktoré sú inými technológiami nedosiahnuteľné. Magnetronovým naprašovaním je možné nanášať vrstvy na väčšie povrchy a rastúca vrstva si zachováva presný pomer zložiek, ktoré sú naprašované. Magnetronové naprašovanie využíva v celku jednoduchý princíp. Bombardovaním terčov energetickými časticami sa materiál terčov rozprašuje a následne deponuje v rastúcej tenkej vrstve. Táto technológia je najviac využívaná pri depozícii vrstiev ktoré obsahujú vodivý materiál (kov) a nie sú možné efektívne deponovať inými napríklad chemickými metódami nanášania vrstiev. Príkladom takéhoto materiálu môže byť napríklad nitrid titánu, ktorý má veľmi veľkú tvrdosť a používa sa vytvorenie povlaku pre vŕtacie, rezacie a obrábacie nástroje. Možnosť využitia je veľká či už v elektrotechnickom priemysle, strojárstve, ako optická vrstva a mnoho iných. [7]

System pre magnetronové naprašovanie sám o sebe sa skladá z jednoduchej vákuovej komory čerpanej na vysoké vákuum. Vo vnútri komory je osadený terč určitého materiálu a taktiež držiak substrátu. Konkrétne rozloženie a geometria sú závislé od samotnej konkrétnej komory. Samotný terč je zapojený ako katóda a je naň privedené napätie. Do komory je pridaný pracovný plyn. Najviac využívaný je argón. Pred terčom sa po priložení napätia zapáli v argóne tlejúci výboj (plazma). Výboj sa prejaví ako zdroj svetla. Ióny argónu bombardujú povrch terča, materiál sa odprašuje a deponuje sa na substrát. Pod materiálom terča je umiestnený silný magnet chladený vodou. Prídavné magnetické pole zefektívňuje ionizáciu argónu v plazme a vo svojom dôsledku zlepšuje proces naprašovania, viz **Obr. 8.** [7]



Obr. 8: Komora magnetronového naprašovania. [13][8]

Týmto spôsobom je možné rozprašovať aj nevodivé materiály. Príkladom sú rôzne typy keramik. Je však za potreby dodať striedavý vysokofrekvenčný signál, ktorý je schopný rýchle vybiť hromadiace sa elektrické pole. Ak je do komory k pracovnému plynu pripustený ešte reaktívny plyn, kyslík alebo dusík, pri vhodných podmienkach je možné nanášať vrstvy oxidov alebo nitridov daného kovu, nanášaného z terča. Ide o takzvané reaktívne magnetronové naprašovanie. Veľkým problémom je ale nájdenie a udržanie vhodných podmienok pre správny proces. [1][4][12][15]

3.2.3 Nanášanie polymérnych materiálov postrekom

V tomto spôsobe nanášania vrstvy materiálu sa materiál rozpustí v rozpúšťadle. Takto rozpustený materiál môže byť na substrát nanosený postrekom. Po odparení rozpúšťadla zostáva na substráte tenká vrstva materiálu. Táto metóda je veľmi výhodná pre polymérne materiály, ľahko rozpustné v organických rozpúšťadlách. Táto metóda je bežná pre nanášanie fotorezistu na substrátový materiál (fotolitografia). Takto nanosené vrstvy môžu mať hrúbku od monovrstvy molekúl až po desiatky mikrometrov. [1][4][12]

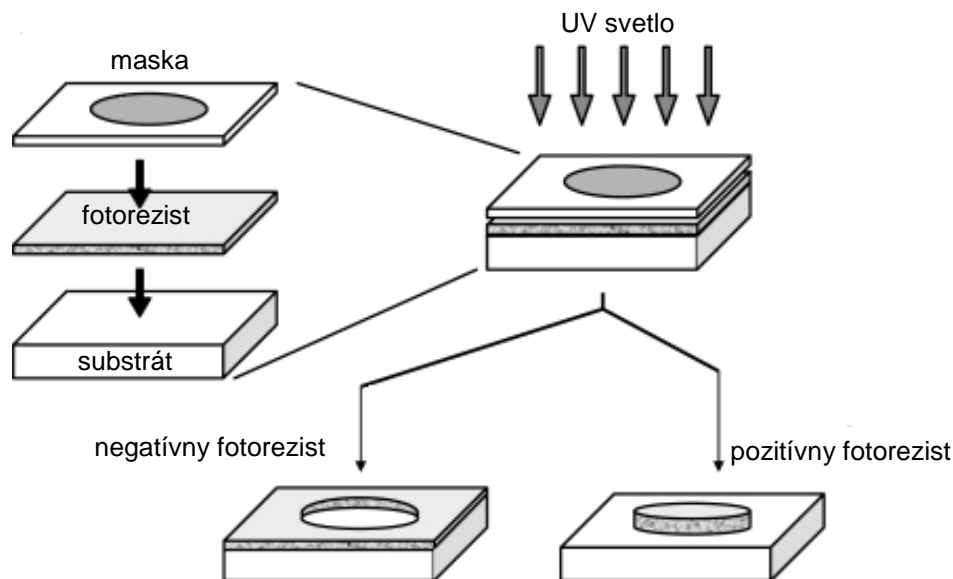
3.2.4 Depozícia atómových vrstiev (ALD)

Ide o povrchovo riadený proces nanášania vrstvy po vrstve, ktorý vedie k deponovaniu tenkých atómových vrstiev. Vrstvy sa vytvárajú v priebehu reakčných cyklov striedaním pulzujúcich prekurzorov a reaktantov a preplachom inertným plynom medzi každým impulzom. Každá atómová vrstva je tvorená týmto sekvenčným procesom

a je výsledkom povrchovo riadených reakcií. Napríklad impulzom kovového prekurzoru trimetylalumínia ($\text{Al}(\text{CH}_3)_3$), po ktorom nasleduje impulz kyslíkového reakčného činidla (para H_2O) vedie k vytvoreniu vrstvy oxidu hlinitého. Takéto budovanie atóm po atóme dáva možnosť veľmi presnej kontroly procesu. Vzhľadom k tomu, že tento proces je samo limitujúci vzniká vrstva s veľmi presnou hrúbkou a súladom aj na nerovných povrchoch. Týmto procesom je možné vytvoriť rôzne oxidy (SiO_2), nitrídy a iné zlúčeniny. Tento proces poskytuje výborné povrchové riadenie a je možné ním vyprodukovať veľmi tenké, homogénne vrstvy bez poruchy.

3.3 Fotolitografia

Fotolitografia je prenos vzoru do fotocitlivého materiálu selektívnou expozíciou zdrojom žiarenia napr. svetlom. Fotolitografia je jedna z najpoužívanejších mikrovýrobných techník používaná k vytvoreniu vzorov do materiálu. Fotolitografický proces sa skladá z niekoľkých krokov, pri ktorých sa povrch substrátu vytvorí požadovaný obrazec prostredníctvom expozície materiálu citlivého na ultrafialové (UV) svetlo. **Obr. 9** znázorňuje hlavné kroky prevedené vo fotolitografii. Maska s nepriehľadnými oblasťami s požadovanými obrazcami sa používa k selektívnemu osvetleniu citlivého materiálu. V závislosti na type použitého fotorezistu sa po expozícii UV žiarením väzby narušia a fotorezist sa stáva rozpustným (pozitívny fotorezist) alebo polymerizuje (negatívny fotorezist), čím vznikne príslušný obrazec. [1][12]



Obr. 9: Proces fotolitografie. [12]

Fotorezist je materiál, ktorý mení svoje vlastnosti (rozpustnosť) v určitej látke – rozpúšťadle po osvetlení napríklad UV žiarením. Tento materiál nezmení iba svoje vlastnosti ale aj štruktúru zmenou (vytvorením alebo porušením) väzieb. Môžeme ich rozdeliť na fotorezist pozitívny a negatívny. Pozitívny fotorezist po osvetlení svetlom naruší polymérne väzby a materiál sa stáva menej odolný voči rozpúšťadlám a iným vonkajším vplyvom. Negatívny fotorezist naopak po dopade svetla polymerizuje (vytvrdí sa) a stáva sa odolnejším voči rozpúšťadlám. Vyvolaním sa osvetlené časti u pozitívneho fotorezistu a neosvetlene u negatívneho odplavia. Správne nanosenie a vyvolanie fotorezistu je dôležitým krokom pri výrobe mikroštruktúr. Pozitívny fotorezist dokáže dosiahnuť väčšieho rozlíšenia a ostrejšieho obrazu. Nanášanie fotorezistu prebieha najčastejšie za pomoci spin-coateru a nanosený fotorezist máva typicky hrúbku od 0,5 do 2,0 μm . Hrúbka fotorezistu je závislá od jeho typu a od otáčok spin-coateru. [1][4][7][15]

3.3.1 Osvietenie, vyvolanie a stripovanie fotorezistu

Fotorezist sa vo väčšine prípadoch osvecuje svetlom s vlnovou dĺžkou 300 až 500 nm. Tento rozsah vlnovej dĺžky môžeme dostať jednoducho pomocou ortuťovej výbojky (310 až 440 nm). Ďalšie používané zdroje svetla sú UV a DUV (DeepUV). Vyvolanie po osvite je proces pri ktorom sa odstraňujú časti fotorezistu (osvetleného alebo neosvetleného v závislosti na type fotorezistu) a vytvára sa tak požadovaný motív.

Následne sa doska očistí a nasleduje oplach destilovanou vodou. Toto je veľmi dôležité pre zastavenie ďalšieho odstraňovania fotorezistu a odstránenie zvyškových častí fotorezistu. Posledným krokom spojený s fotorezistom je jeho následné odstránenie. Po vytvorení finálneho motívu krytého fotorezistom napríklad leptaním je potrebné daný fotorezist odstrániť obvykle pomocou organického rozpúšťadla, prípadne pomocou plazmi. [7][12][15]

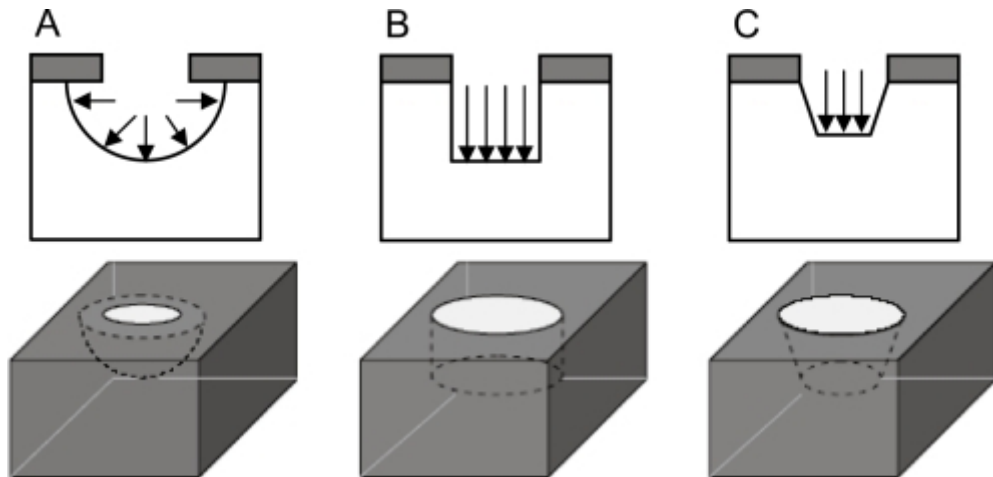
3.4 Leptanie

Aby bolo možné vytvoriť funkčnú štruktúru MEMS na substráte, je potreba niektoré vrstvy, ktoré boli nanosené na substrát alebo samotný substrát odleptať. Existujú dve triedy leptania a to mokré leptanie a suché leptanie. Leptacie procesy sú charakterizované tromi parametrami: [7][12][15]

- Leptacia rýchlosť – definovaná ako hrúbka materiálu, ktorý sa odleptá za jednotku času
- Selektivita leptania – určuje ako efektívne je odstraňovaný materiál, ktorý má byť leptaný bez toho aby leptal iný materiál alebo iné vrstvy na substráte, v priebehu leptacieho procesu
- Rýchlosť leptania v rôznych smeroch - anizotropné alebo izotropné

3.4.1 Anizotropné a izotropné leptanie

Anizotropné leptanie je leptanie, kedy sa materiál neleptá rovnomerne v rôznych smeroch materiálu. Problém s leptaním substrátu spočíva najmä v tom že izotropné procesy spôsobia podleptanie pod maskou do vzdialenosti hĺbky leptania. Anizotropné procesy umožňujú, aby sa leptanie zastavilo na určitých kryštalografických rovinách ale stále vedie k strate priestoru, pretože tieto otvory nikdy nemajú steny kolmé k povrchu. Leptanie a jeho priebeh znázorňuje **Obr. 10**. [12][15]



Obr. 10: Leptacie profily vytvorené (A) izotropným leptaním, (B) suchým anizotropným leptaním, (C) mokrým anizotropným leptaním. [12]

3.4.2 Mokré leptanie kremíku

Pri mokrom leptaní sa materiál rozpúšťa pomocou chemického roztoku. Táto technológia je najjednoduchšia technológia leptania, pretože je potrebná len nádoba s roztokom, ktorý daný materiál rozpustí. Obvykle je ešte požadovaná maska kvôli selektívnemu leptaniu materiálu do požadovaného motívu. Je potreba voliť materiál pre masku, ktorý sa nerozpustí v danom roztoku alebo sa rozpustí ale za oveľa dlhší čas ako materiál, ktorý sa má odleptávať. Táto technológia je jednoduchá a pri vhodnej kombinácii leptaného materiálu a masky, dokáže poskytnúť veľmi dobré výsledky. Jej funkčnosť je veľmi dobrá hlavne pri leptaní tenkých vrstiev na substráte ale môže byť tiež dobre použitá na leptanie samotného substrátu. [4][12][14][15]

Leptacia rýchlosť v závislosti od kryštalografickej orientácie je základnou črtou leptadiel anizotropného charakteru. Špecifickou je rovina $\langle 111 \rangle$, ktorá sa leptá oveľa menšou rýchlosťou ako iné roviny. To znamená že rýchlosť leptania je funkciou kryštalografickej orientácie kremíkového substrátu. Anizotropné leptanie je závislé od hustoty atómov v cm^3 , energie ktorá je potrebná na odstránenie atómu z mriežky a geometrických vplyvov. V tabuľke 1 môžeme vidieť rádovo rozdielnu rýchlosť leptania kremíku v kryštalografickej rovine $\langle 111 \rangle$ oproti rovinám $\langle 100 \rangle$ a $\langle 110 \rangle$. [1][4][12][15]

Tabuľka 1: Anizotropné leptacie rýchlosti rôznych leptadiel

Leptadlo	Teplota [°C]	Leptacia rýchlosť (µm/hod)		
		Si <100>	Si <110>	Si <111>
KOH:H ₂ O	80	84	126	0,21
KOH	75	25-42	39-66	0,5
EDP	110	51	57	1,25
NH ₄ OH	75	24	8	1

3.4.3 Suché leptanie

Objemové mikro-obrábanie za použitia suchého leptania je rovnako ako mokré leptanie atraktívna metóda. Na rozdiel od mokrého leptania má suché leptanie niekoľko výhod. Ide hlavne o menšie podleptanie a väčšiu anizotropnosť umožňujúca väčší pomer medzi hĺbkou a šírkou danej štruktúry. Pre získanie smerovosti leptania sa používajú tri leptacie technológie: iónové leptanie, vysokotlakové plazmové leptanie a leptanie reakčnými iónmi. [1][4][12][15]

Iónové leptanie je čisto fyzikálny proces používajúci urýchlené interné ióny napríklad Ar⁺. Tieto ióny narážajú kolmo na povrch a odstraňujú materiál substrátu pri zníženom tlaku 10⁻² – 10⁻¹ Pa. [1][4][12][15]

Ďalším spôsobom je leptanie pomocou reaktívnych iónov, z anglického „Reactive-Ion Etching“ (RIE). V RIE sa substrát umiestni do reaktoru do ktorého sa zavádza niekoľko plynov. Plazma v plynovej zmesi je vytvorená pomocou RF zdroja energie vďaka čomu sa molekuly plynu rozpadajú na ióny, ktoré sú urýchlené smerom k povrchu leptaného materiálu. Ióny reagujú s leptaným materiálom a vzniká plynný materiál. Táto časť sa nazýva chemická časť leptania reaktívnymi iónmi. Fyzikálna časť RIE podobná naprašovaniu keď urýchlené ióny s dostatočne veľkou energiou vyrážajú atómy leptaného materiálu bez chemickej reakcie. Problémom tohto procesu je správne vyváženie medzi chemickou a fyzikálnou časťou leptacieho procesu. Zmenou parametrov je možné pri tomto type leptania ovplyvňovať anizotropiu leptania pretože chemická časť je vysoko izotropná a fyzikálna časť zasa vysoko anizotropná. Rôznymi kombináciami môžeme

ovplyvňovať tvar bočných stien , ktoré môžu byť od guľatých až po vertikálne. [1][12]
[15]

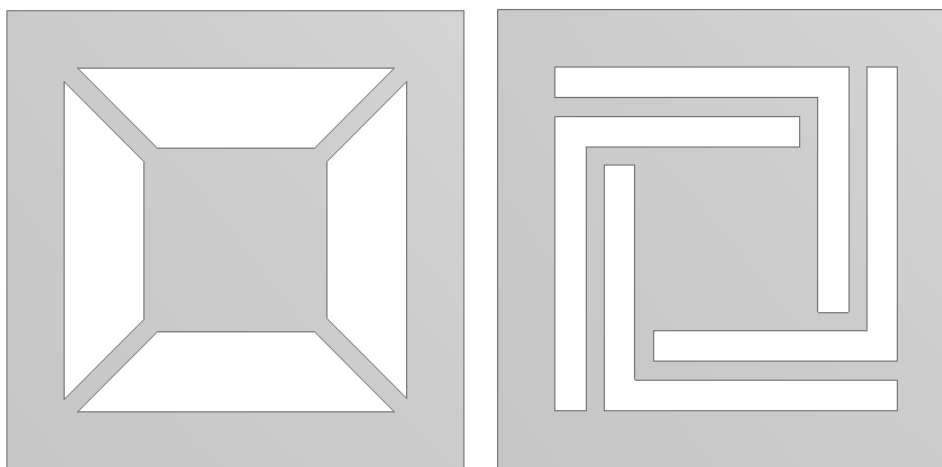
Zvláštnou podskupinou RIE je DRIE. Ide o hĺbkové (Deep) reaktívne iónové leptanie. V tomto procese je možné dosiahnuť hĺbky leptania až stoviek mikrometrov. Ide o striedanie dvoch kompozícií plynov v reaktore, kde prvá vytvorí polymérnu vrstvu a druhá túto vrstvu vyleptá. V tejto technológii je možné dosiahnuť pomer hĺbky k šírke leptaného otvoru až 50:1. Týmto procesom sa dá ľahko preleptať cez celú kremíkovú substrát a rýchlosť leptania je 3-4 krát väčšia ako pri mokrom leptaní. [4] [12][15]

4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Nadobudnuté znalosti mikrosystémov, výrobných technológií a materiálových vlastností boli ďalej využité v experimentálnej časti, kde bolo potrebné navrhnuť a odsimulovať rôzne typy závesných vyhrevných platforiem pre senzory plynov. Na základe modelov bolo treba vybrať vhodné štruktúry pre realizáciu, navrhnuť technologický postup výroby a príslušné masky.

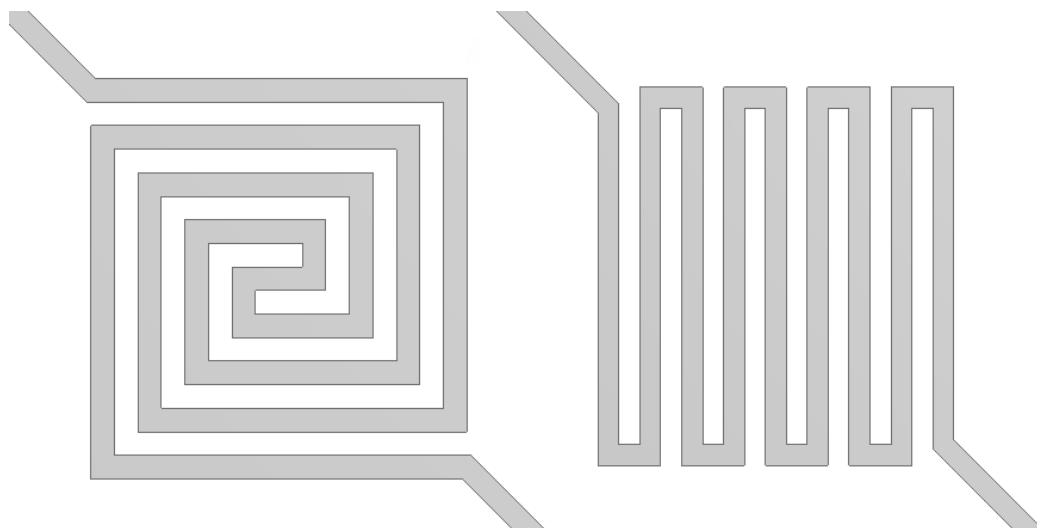
4.1 Návrh štruktúr

V prvom kroku bolo navrhnutých niekoľko typov závesných vyhrievacích platforiem s ktorých boli pre výrobu a simulácie vybrané dve, ktoré možno vidieť na **Obr. 11**. Veľkosť závesnej plochy je 80 μm a šírka nosníku 8 μm . Predpokladom bol najnižší stres v týchto dvoch typoch zavesenia. Veľkosť nosníkov bola volená pre čo najnižší odvod tepla do substrátu a tým pádom lepším zahriatím závesnej platformy.



Obr. 11: Závesná vyhrievacia platforma v tvare “X“ (vľavo) a “L“ (vpravo).

Ďalej boli navrhnuté typy ohrievacích geometrií z čoho boli vybrané práve dve geometrie a to meander a špirála, zobrazené na **Obr. 12**. Šírka vodivej cesty je v oboch prípadoch 4 μm . Taktiež boli tieto geometrie navrhnuté so šírkou vodivej cesty 3 μm pre porovnanie elektrickej spotreby a tepelného výkonu. Predpokladom bola vyššia prúdová hustota u tenšej vodivej cesty a tým pádom väčší tepelný výkon pri rovnakom priloženom elektrickom napätí.

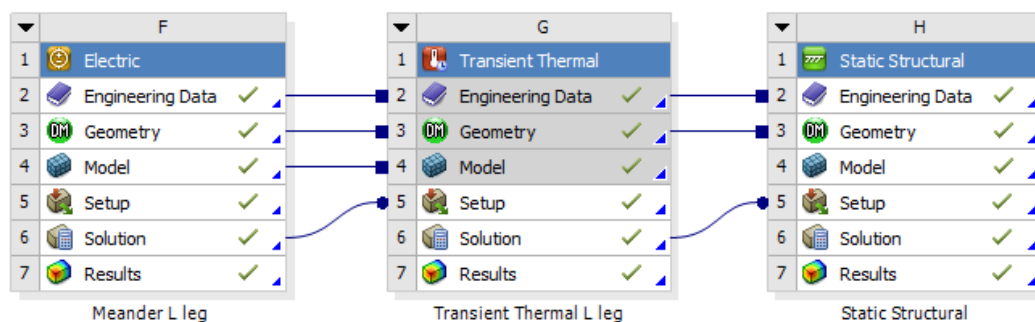


Obr. 12: Geometria ohrievača špirála (vľavo) a meander (vpravo).

4.2 Simulácie

Všetky simulácie boli zrealizované za pomoci softvéru ANSYS Workbench verzia 15.0. Pri simulácii bola poskladaná štruktúra kde na spodku bol základný materiál kremík s kryštalografickou štruktúrou 100. Na tejto vrstve bola vytvorená izolačná a nosná vrstva oxidu kremičitého (SiO_2) o hrúbke 200 nm, na ktorom bola vytvorená štruktúra ohrievacieho elementu s platiny (Pt) o hrúbke 100 nm, ktorá bola zakrytá ďalšou vrstvou oxidu kremičitého s hrúbkou 200 nm. Vrchná vrstva použitá v simulácii bola platinová interdigitálna elektróda pre depozíciu aktívnej vrstvy senzoru plynov.

Hodnoty nastavené pre dané materiály (Si, Pt, Ti) sú zaznamenané v tabuľke 2. Hodnoty titánu sú uvádzané z dôvodu, že by sa vyskytol problém s používaním platiny a bolo by potreba použiť ako vodivú vrstvu titán. Prvou simuláciou bola elektrická simulácia (Electric), v ktorej bol zisťovaný potrebný elektrický prúd na daný ohrievač aby bola dosiahnutá teplota 800 K. Tento krok prebiehal experimentálnou zmenou priloženého elektrického potenciálu po dobu kedy bola dosiahnutá teplota 800 ± 2 K. Výsledky z tejto simulácie boli použité na nastavenie vstupných parametrov teplotnej časovej analýzy (Transient Thermal). Hraničné steny substrátu mali teplotu nastavenú na teplotu okolia 300 K. Všetky simulácie prebiehali vo vákuu. Výsledky tejto analýzy boli znovu použité ako vstup do poslednej analýzy, ktorou bola deformačná analýza (Static Structural). Nadväznosť priebehu simulácií je znázornená na **Obr. 13**.



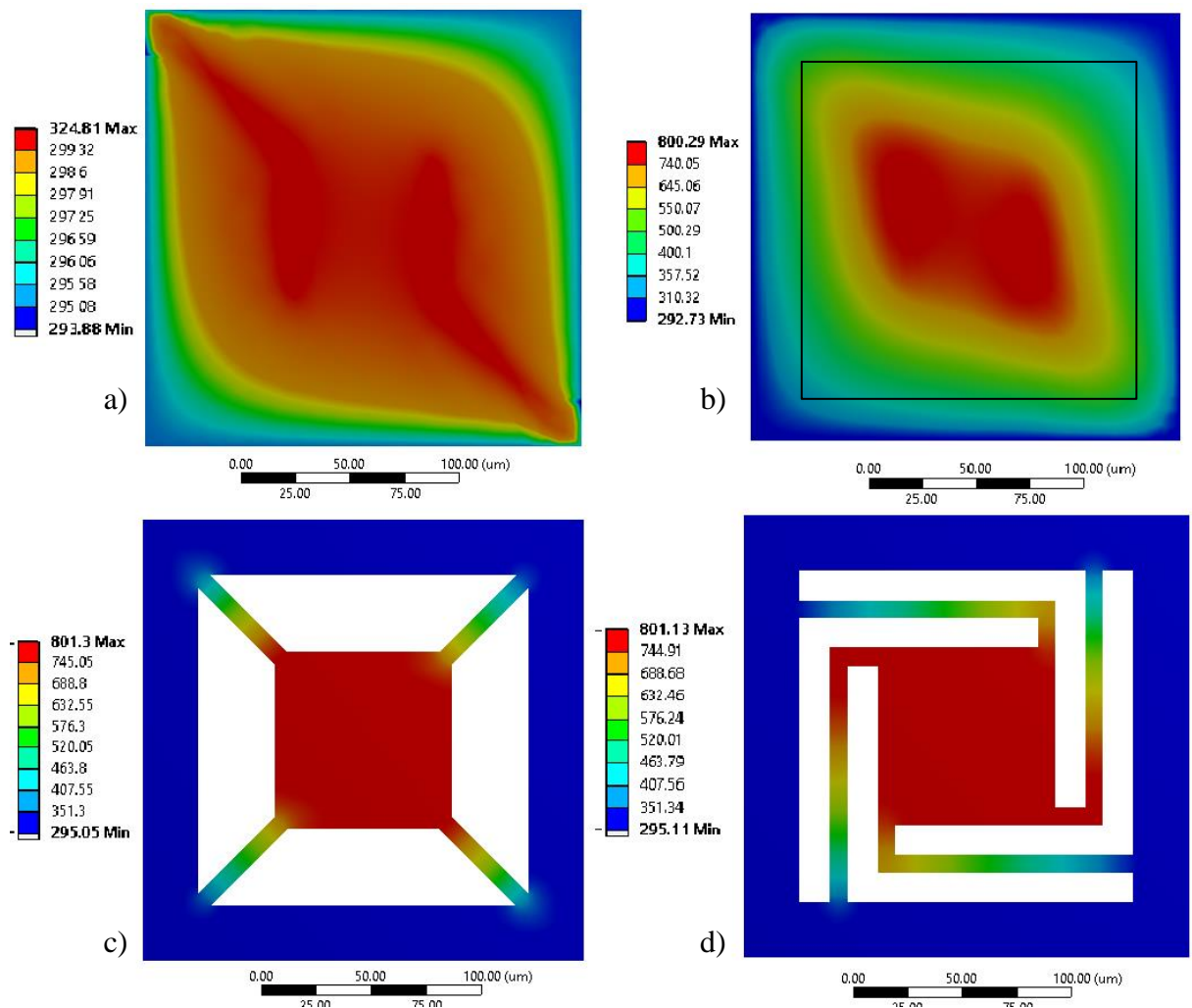
Obr. 13: Nadväznosť simulácií.

Tabuľka 2: Materiálové vlastnosti potrebné pre simuláciu. **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**

Materiál	Kremík (100)	PECVD SiO ₂	Platina Pt	Titán Ti
Vlastnosť materiálu				
Youngov modul [MPa]	1,30E+05	8,50E+04	1,63E+05	2,12E+05
Poissonova konštanta [-]	0,278	0,25	0,39	0,33
Hustota [kg/μm³]	2,33E-15	2,20E-15	2,14E-14	4,05E-15
Pnutie [MPa]	-	2,50E+02	5,06E+02	4,39E+02
Pevnosť v ťahu [MPa]	-	9,52E+03	1,38E+02	2,35E+02
Koeficient teplotnej rozťažnosti [1/K]	2,49E-06	5,60E-07	9,10E-06	9,50E-06
Tepelná konduktivita [W/μmK]	1,57E-04	1,10E-06	7,1E-05	2,19E-05
Špecifické teplo [J/kgK]	7,03E+02	1,00E+03	1,32E+02	5,28E+02
Elektrická konduktivita [pS/μm]	1,40E+09	7,00E-07	9,43E+12	1,60E+12
Dielektrická konštanta [-]	11,8	5,00	-	-

Pre porovnanie boli simulované podleptané závesné membrány v porovnaní s plnou, neleptanou a taktiež s uzavretou membránou (nevyleptaný oxid kremičitý a podleptaná štruktúra zo spodnej strany dosky). Simulácia plnej membrány potvrdila, že pri nepodleptaní membrány sa pri dodaní trojnásobného výkonu, potrebnému na ohriatie vyleptanej membrány na teplotu 800 K, nedosiahla teplota ani polovičnú hodnotu 400 K. Takáto membrána preto nie je vhodná pre danú aplikáciu. Druhá membrána síce dosiahla

teploty 800 K ale bola potreba dodania trojnásobného výkonu ako tomu bolo u zavesených membrán. Porovnané teploty a ich rozloženie sú znázornené na **Obr. 14**. Potrebné výkony pre ohrev membrán s rôznymi geometriami ohrievačov sú znázornené v **Tabuľka 3**, kde R je odpor vyhrievacieho elementu, P je výkon potrebný na dosiahnutie teploty T, a odpovedajúci prúd I a napätie U.



Obr. 14: Rozloženie teploty na membránach pri maximálnom zahriatí, teploty uvedené v K:
a) plná neodleptaná membrána, b) uzavretá membrána, c) zavesená membrána so závesom X,
d) zavesená membrána so závesom L.

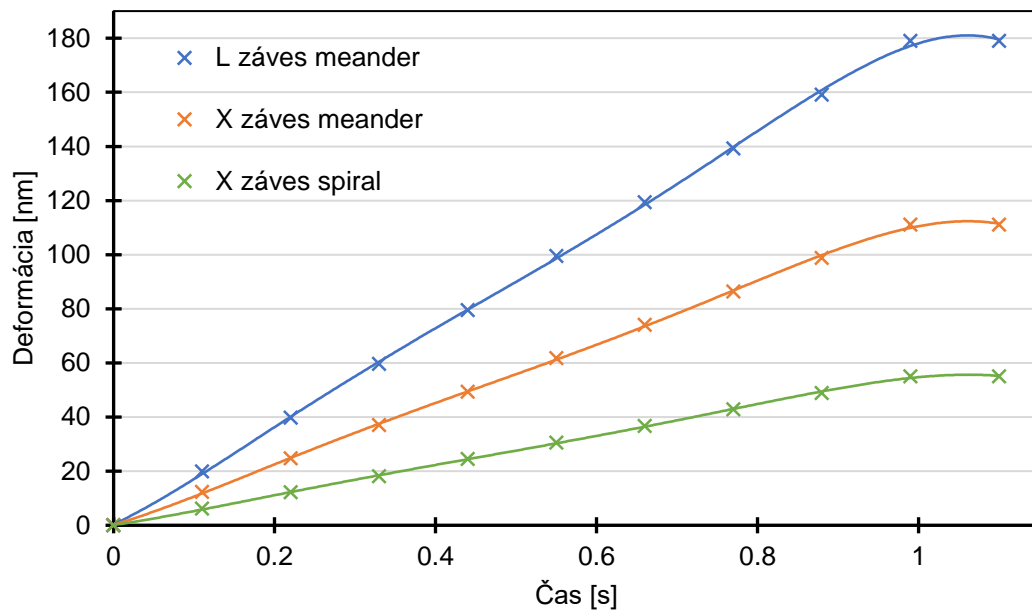
Tabuľka 3: Výkon potrebný na zohriatie platformy na teplotu 800 K.

	R [Ω]	P [mW]	U [V]	I [mA]	T [K]
meander L	271.36	1.33	0.60	2.21	801.00
meander X	228.96	2.46	0.75	3.28	799.00
špirála L	260.85	1.62	0.65	2.49	803.00
špirála X	220.48	4.09	0.95	4.31	800.00
meander na neodleptanej membráne	228.96	269.83	7.86	34.33	800.00

S rastúcou teplotou dochádza u použitých materiálov k ich deformácii. Pre vstupné hodnoty do štruktúrálnej analýzy boli použité výsledky teplotnej časovej simulácie. Výsledky boli zapísané do **Tabuľka 4** a spracované v grafe závislosti deformácie na čase pri teplote platformy 800 K (víc **Obr. 15**). Ako je vidieť v grafe závislosti deformácie na čase membrány dosiahli maximálnu deformáciu v dobe jednej sekundy a ďalej sa deformácia už nemenila

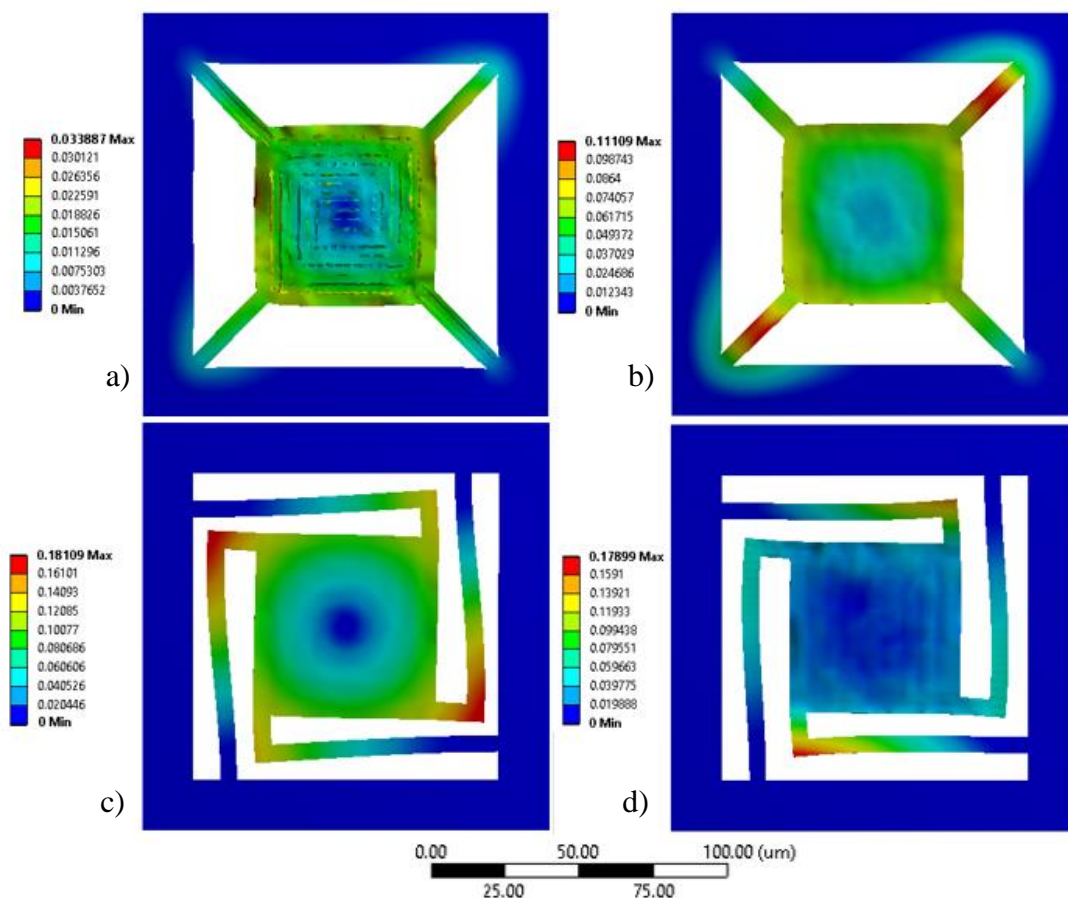
Tabuľka 4: Hodnoty deformácií v nanometroch v čase t.

	L záves, meander	X záves meander	X záves špirála
t [s]	Deformácia [nm]	Deformácia [nm]	Deformácia [nm]
0,00	0,00	0,00	0,00
0,11	19,89	12,34	6,11
0,22	39,78	24,69	12,23
0,33	59,66	37,03	18,31
0,44	79,55	49,37	24,46
0,55	99,44	61,72	30,57
0,66	119,33	74,06	36,68
0,77	139,21	86,40	42,80
0,88	159,10	98,74	48,91
0,99	178,99	111,09	55,03
1,10	178,99	111,09	55,03



Obr. 15: Graf závislosti deformácie na čase pri teplote 800 K.

Na **Obr. 16** je vidieť odsimulované deformácie závesných platformiem pri teplote 800 K. Je vidieť, že u platformiem v tvare “X” (**Obr. 16** b, c) deformácia postupuje až za platformu na druhú stranu u platforme s vývodmi v tvare “L“ dochádza k stočeniu vývodov. Pre lepšiu viditeľnosť má každý výsledok simulácie iné zväčšenie kvôli detailu na kritickú zónu, v ktorej je deformácia najväčšia.



Obr. 16: Simulácia deformácie závesných membrán pri teplote 800 K: a) zavesená membrána X s ohrievačom špirála, b) zavesená membrána X s ohrievačom meander, c) zavesená membrána L s ohrievačom špirála d) zavesená membrána L s ohrievačom meander

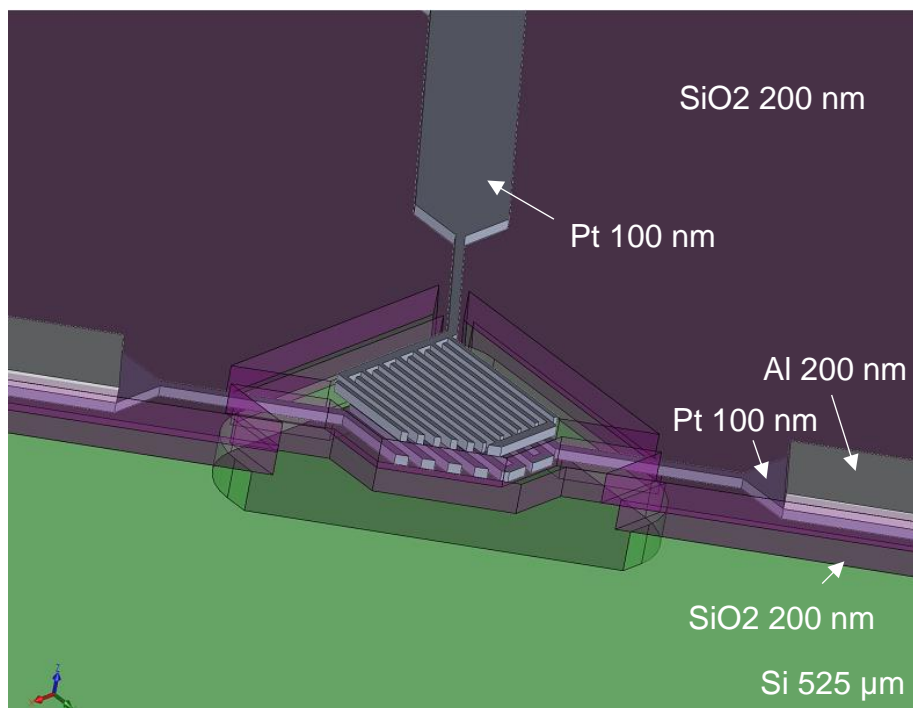
4.3 Návrh technologického postupu výroby

Návrh technologického postupu výroby sa obvykle odvíja od dostupných technológií. Výroba prebiehala v čistých priestoroch centrálnych laboratórií CEITEC Nano Stredoeurópskeho technologického inštitútu. Na základe dostupných technológií bol stanovený postup výroby v niekoľkých dôležitých krokoch:

1. PECVD SiO₂ (200 nm) – vytvorenie spodného PECVD oxidu na Si <100> waferi
2. Ti (10 nm) + Pt (100 nm) – nanosenie materiálu vyhrievacieho elementu magnetronovým naprašovaním

3. Litografia #1 – motív vyhrievacieho elementu
4. Suché leptanie (Cl_2) – vytvorenie motívu vyhrievacieho elementu
5. Stripovanie fotorezistu
6. Al (200 nm) – nanosenie materiálu vodivých ciest pomocou magnetronového naprašovania
7. Litografia #2 – motív vodivých ciest
8. Suché leptanie (Cl_2) – vytvorenie motívu vodivých ciest
9. Stripovanie fotorezistu
10. PECVD/magnetron/ALD SiO_2 (200 nm) – vytvorenie horného oxidu na vyhrievači
11. Pt (100 nm) – nanosenie materiálu interdigitálnej elektródy magnetronovým naprašovaním
12. Litografia #3 – motív interdigitálnej elektródy
13. Ion mill – vytvorenie motívu interdigitálnej elektródy
14. Stripovanie fotorezistu
15. Litografia #4 – motív závesnej membrány
16. SiO_2 leptanie (CHF_3) – otvorenie okien na podleptanie
17. Litografia #5 – doleptanie SiO_2 a odkrytie kontaktov
18. SiO_2 leptanie (CHF_3) – otvorenie kontaktov a doleptanie okien na podleptanie
19. XeF_2 – podleptanie štruktúry

Takto vytvorená sendvičová štruktúra je zobrazená na 3D modely v **Obr. 17**, vymodelovaná v programe SolidWorks 2014 (Student Edition). Hrúbka vrstiev je zväčšená oproti navrhovanej štruktúre pre lepšiu viditeľnosť.



Obr. 17: 3D model sendvičovej štruktúry.

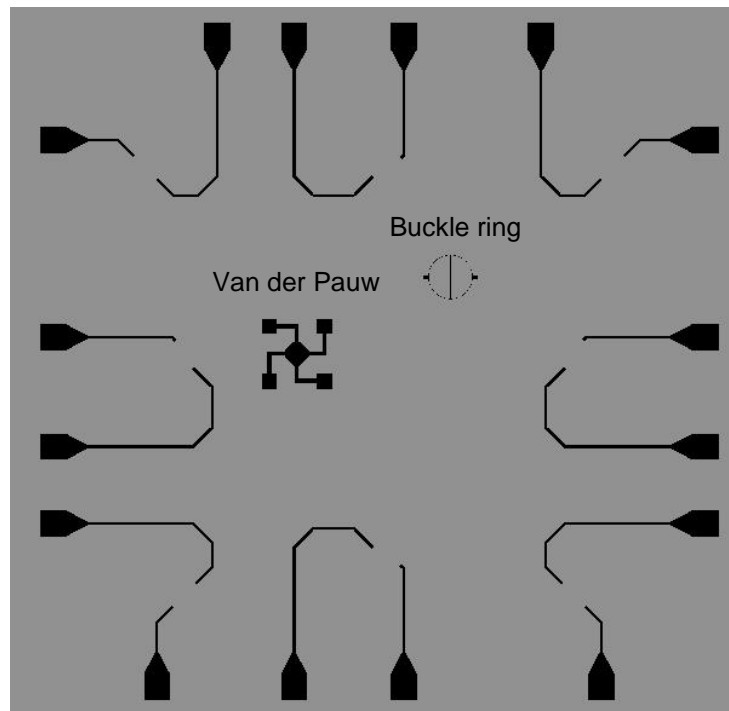
4.4 Návrh masiek

Masky potrebné na litografiu sú navrhované pomocou programu NIST CNST Nanolithography Toolbox Version 2013.10.01. (víz prílohy A 1-7) [19]. Pre vytvorenie celej sendvičovej štruktúry je potrebné vytvoriť 5 rôznych masiek:

- Maska na geometrie ohrievača (Litografia #1)
- Maska na posilnenie prívodov a kontaktov ohrievača (Litografia #2)
- Maska na geometrie elektródy (Litografia #3).
- Maska na leptanie závesnej membrány a odkrytie kontaktov (Litografia #4).
- Maska na doleptanie závesnej membrány (Litografia #5)

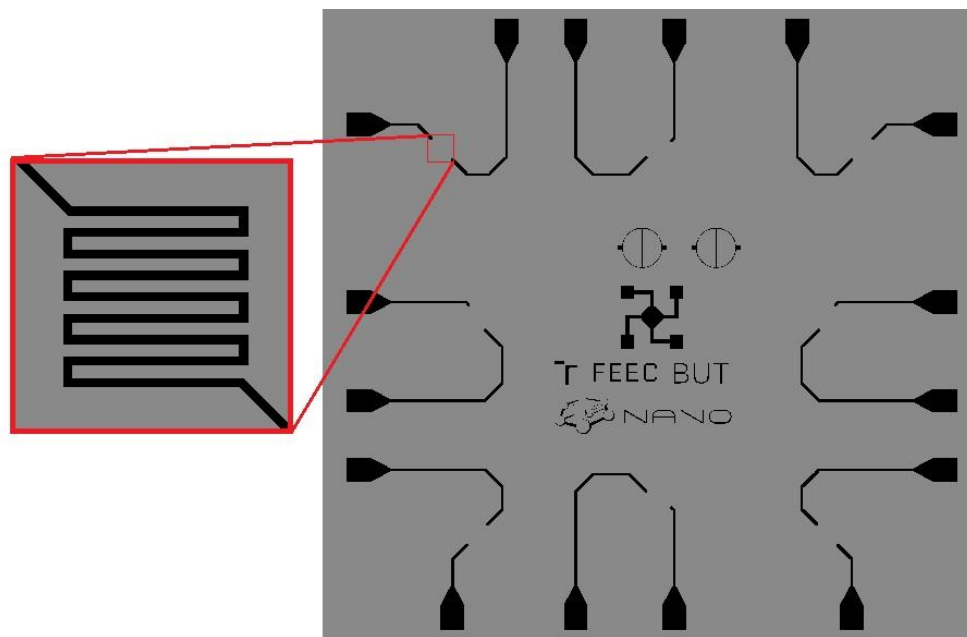
Vzhľadom k tomu, že je navrhnutých 8 rôznych kombinácií (2 rôzne závesné membrány, 2 rôzne geometrie ohrievača a 2 rôzne šírky geometrií ohrievača), je vytvorená štruktúra prívodov pre zosilnenie prípojných kontaktovacích plôch ohrievačov, ktorá je následne pootáčaná a osadená, tak aby boli kontaktovacie plochy vždy na okraji čipu viz **Obr. 18**. Veľkosť kontaktovacích plôch je $246 \times 246 \mu\text{m}$ a šírka vodivej cesty je $36 \mu\text{m}$. Na obrázku je taktiež vidno testovacie štruktúry Van der Pauw a Buckle ring na

overenie funkčnosti elektrickej vrstvy a zistenie stresu v danej vrstve.



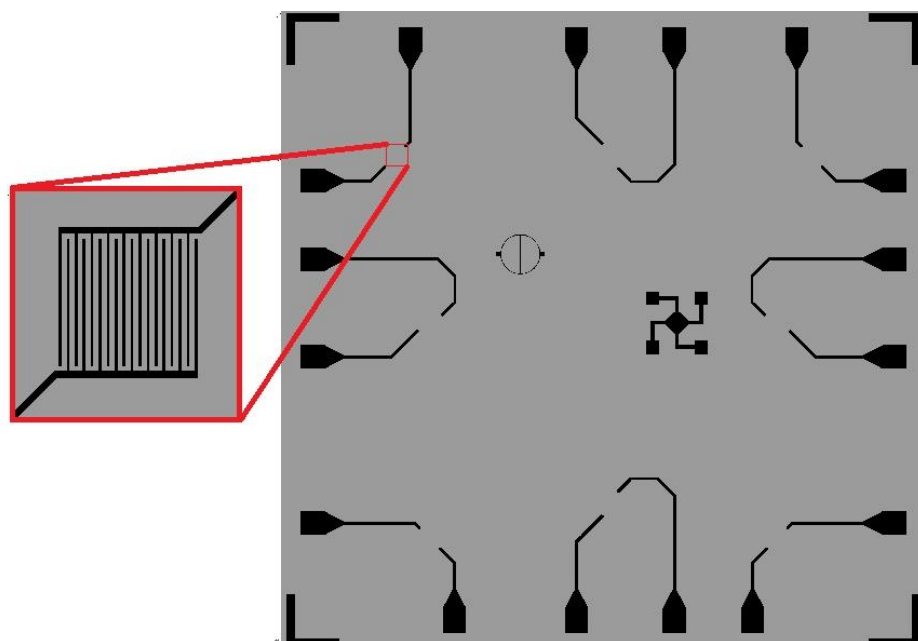
Obr. 18: Maska na prívody ohrievača (jeden čip).

Na **Obr. 19** je vidieť jeden čip (veľkosť čipu $6,5 \times 6,5$ mm) geometrií vyhrievacích elementov. Vzhľadom k veľkosti geometrií ku prívodom a kontaktom, nie je štruktúry ohrievačov vidieť bez zväčšenia. Veľkosť kontaktu je 250×250 μm , šírka prívodov 40 μm a šírka vyhrievacieho elementu 3 respektíve 4 μm . Akýkoľvek rozmer je možné pomocou skriptu kedykoľvek zmeniť a zmena sa uskutoční na celej maske. Ak by sa teda ukázalo že niektorá z geometrií je výrazne lepšia je možné všetky prerobiť na vhodnejšiu prepísaním jedného riadku.

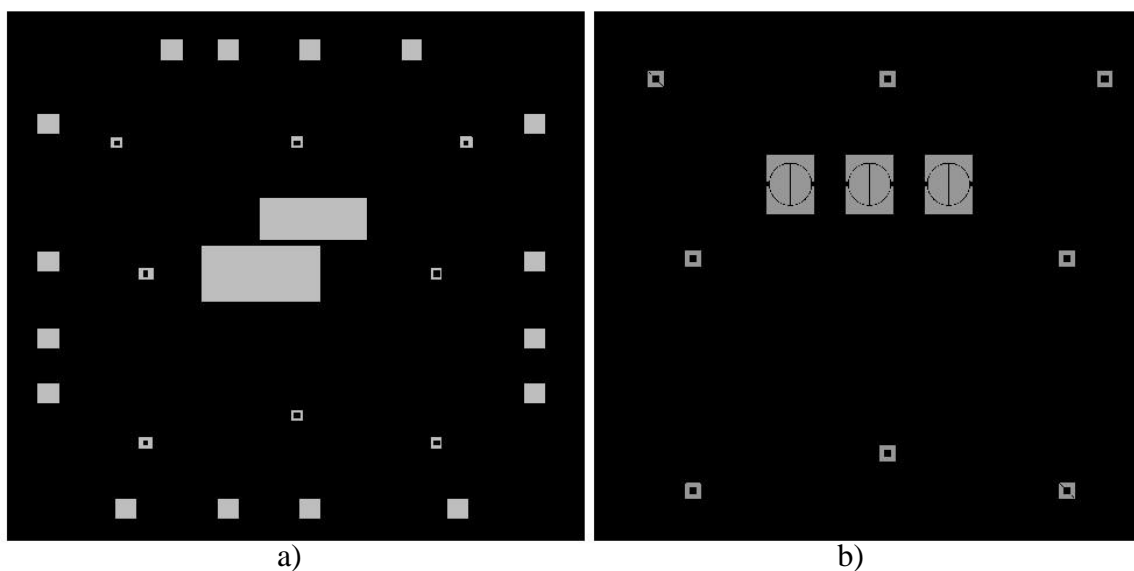


Obr. 19: Maska geometrie ohrievača.

Na **Obr. 20** je znázornený jeden čip masky na vytvorenie interdigitálnej elektródy na danom vyhrievacom elemente. Veľkosť kontaktu je taktiež $250 \times 250 \mu\text{m}$ prívodnej cesty $40 \mu\text{m}$ a šírka cesty interdigitálnej elektródy $2 \mu\text{m}$. V tejto vrstve sa nachádzajú taktiež značky na rozrezanie waferu na jednotlivé čipy a ďalšia testovacia štruktúra Van der Pauw a Buckle ring pre túto vrstvu.



Obr. 20: Maska geometrie elektródy.

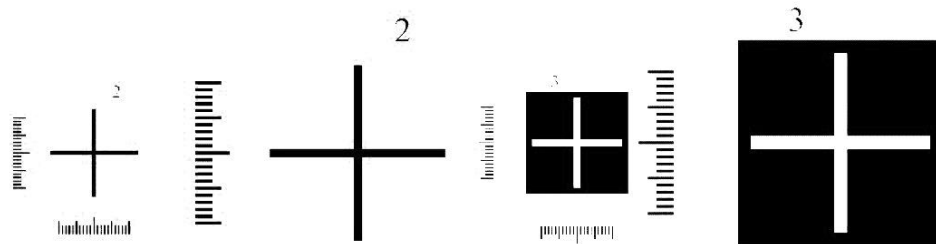


Obr. 21: a) odkrytie kontaktovacích plôch a doleptanie SiO_2 ,
 b) maska na leptanie závesnej membrány.

Posledné dve masky vtz **Obr. 21** a), b) sú potrebné na samotné leptanie SiO_2 a odleptanie kontaktov vzhľadom k tomu, že po odkrytí platinových kontaktov dochádza k leptaniu samotnej platiny je potrebné stanovenie parametrov leptania a zistiť čas

potrebný na odleptanie oxidu so zachovaním prípojných kontaktov.

Na zosúladenie jednotlivých vrstiev bola použitá skupina značiek **Obr. 22**. Boli vytvorené tri samostatné skupiny značiek, aby bolo možné robiť modifikácie vrstiev ako napríklad vynechanie prvej vrstvy na zosilnenie prívodov, vynechanie interdigitálnej vrstvy (testovanie samotného vyhrievača) alebo v prípade, že by bola daná značka rozostrená z dôvodu technologickej chyby.



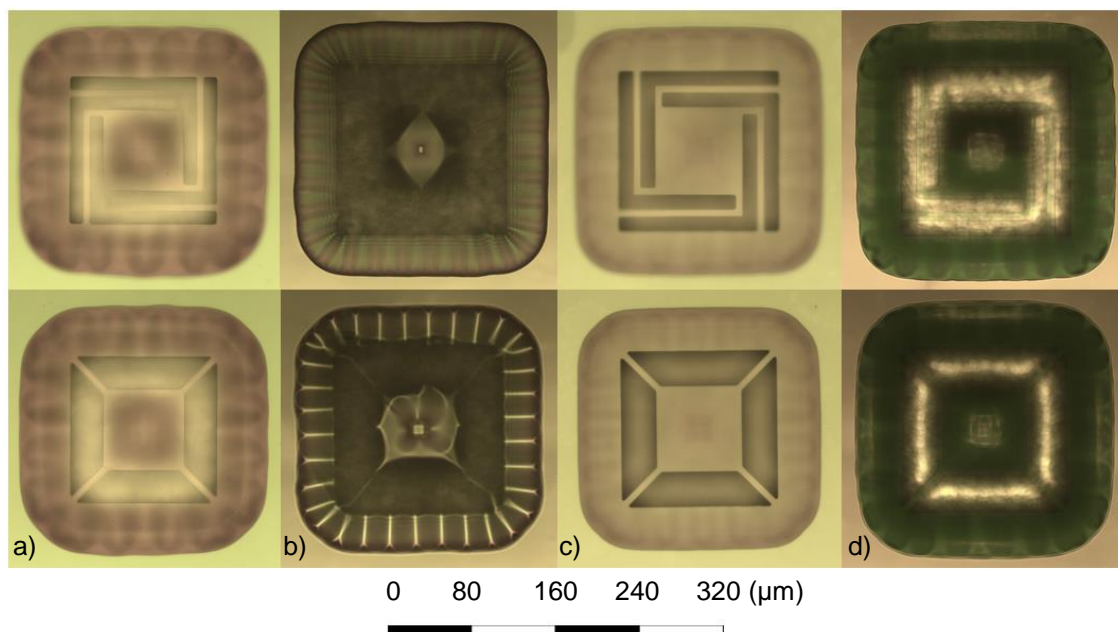
Obr. 22: Ukážka značiek na zosúladenie vrstiev generovaných skriptom zo softwaru KLayout.

4.4.1 Výroba masiek

Masky boli vyrobené na stroji UV Direct Write Laser system HEIDELBERG DWL 66-fs (DWL, Nemecko) na substrátoch od firmy ROSE (Nemecko) na SL-sklenom substráte o veľkosti $5 \times 5 \times 0,09''$. Rezist použitý na týchto maskách bol AZ-1500 s hrúbkou 530 nm. Typ chrómovej LRC (nízka odrazivosť) vrstvy s hrúbkou 1200 nm a odrazivosťou 12 %. Osvit masky pomocou DWL trval 12-16 hodín v závislosti na komplikovanosti danej vrstvy. Po osvite fotorezistu bola maska následne vyvolaná pomocou vývojky AZ 726 MIF po dobu 30 až 35 sekúnd. Nasledovala optická kontrola pod mikroskopom. Po úplnom vyvolaní fotorezistu bola následne odleptaná chrómová vrstva pomocou chrómoveho leptadla TechniEtch Cr01 po dobu jednej minúty. Nasledovala optická kontrola. V prípade, že chrómová vrstva ešte nebola odleptaná bola maska vrátená do chrómoveho leptadla na 10 sekúnd kým optická kontrola neukázala úplné odleptanie chrómovej vrstvy. Ďalším krokom bolo odstránenie (stripovanie) rezistu. Na túto operáciu bolo testovaných niekoľko chemikálií, napríklad N-Methyl-2 pyrrolidone. Najúčinnším sa však ukázalo striedanie reakcie acetónu a kyslíkovej plazmy. Po niekoľkých cykloch bol fotorezist odstripovaný a maska mohla byť použitá v procese fotolitografie.

4.5 Výber oxidu

Vzhľadom k nedostupnosti PECVD oxidu, ktorý má pre vybranú aplikáciu závesnej membrány najvhodnejšie vlastnosti (najnižší stres, pnutie ai.) bolo prvým krokom nájdenie najvhodnejšie náhrady izolačnej vrstvy. Konkrétne sa jednalo o oxid kremíku vytvoreného na kremíkovom waferu pomocou ALD, ALD na PECVD, magnetronu a evaporátoru. Tieto oxidy boli vytvorené a testované podleptaním pomocou XeF_2 . Výsledky boli vyhodnotené optickou kontrolou pomocou optického mikroskopu Zeiss Axio Imager A2 (ZEISS-A2) s pripojeným počítačovým rozhraním viz **Obr. 23**. Ako najhorší oxid pre aplikáciu závesnej membrány sa ukázal oxid kremíku vytvorený pomocou evaporátoru (**Obr. 23b**) a druhý najhorší ALD oxid (**Obr. 23d**). Závesné membrány z týchto oxidov sa zrútili kvôli stresu pôsobiacom v membráne a to dokonca pred tým, ako boli celé podleptané viz (**Obr. 23b**), d) (svetlé miesto na obrázku znázorňuje, že platforma nebola ešte celá podleptaná no napriek tomu sú už závesy spadnuté v odleptanej prehĺbenine). Na druhú stranu oxid vytvorený magnetronovým naprašovaním (**Obr. 23c**) ukazuje, že závesná membrána drží svoju formu aj keď je plne podleptaná. Taktiež sa ukázalo, že ak je ALD SiO_2 vytvorený na základovom PECVD SiO_2 , je táto štruktúra taktiež schopná vydržať podleptanie viz **Obr. 23 a**). Z tohto dôvodu boli pri výrobe mikrohotplaov použité práve dva oxidy, a to ako oxid vytvorený magnetronovým naprašovaním tak oxid vytvorený prostredníctvom ALD, oba však vytvorené na základovom PECVD oxide. Leptanie daných oxidov pomocou reaktívneho iónového leptania v CHF_3 malo rôzne leptacie časy v závislosti na hrúbke deponovaného oxidu a technológii ktorou bol daný oxid vytvorený (nie rovnako presná hrúbka oxidu v závislosti na procese depozície).



Obr. 23: Podleptané štruktúry testovaných oxidov kremíku a) ALD na PECVD, b) evaporátor, c) magnetron, d) ALD.

4.6 Výroba vyhrievacej membrány

Vyhrievacie platformy sú vyrábané na 4 palcových kremíkových waferoch typu n s kryštalografickou štruktúrou (100). Na povrchu waferu je vytvorený 200 nm hrubý PECVD oxid kremíku, na ktorom je pomocou magnetronového naprašovania vytvorená 10 nm hrubá vrstva titánu. Táto vrstva slúži ako adhézna vrstva pre 100 nm hrubú vrstvu platiny, ktorá je taktiež nanosená pomocou magnetronovej naprašovačky. Táto vrstva je využitá pre vytvorenie ohrievačov (špirál a meandrov) pomocou fotolitografie.

4.6.1 Čistenie povrchu a nanosenie rezistu

Fotolitografia pozostáva z niekoľkých krokov a bola robená na prístroji Lithographic wetbench for coating (SUSS-LabSpin 6). Základom správne nanesej hrúbky laku je čistota kremíkovej dosky a správna predpríprava povrchu. Povrch kremíkoveho waferu bol najprv ofúknutý vysokým tlakom dusíku a následne bol naň nanosený adhézny promotor HMDS. Na toto nanášanie je potreba špeciálneho hotplate s reakčnou komorou do ktorej sa najprv napúšťa promotor HDMS po dobu 5 sekúnd a následne prebieha reakcia po dobu 150 sekúnd. Tento proces sa opakuje dvakrát. Celý proces prebiehal pri

teplote 135 °C. Následne bola kremíková doska vychladená na teplotu približne 20 °C (minimálne 180 sekúnd) a bol na ňu nanosený 1,4 µm hrubý pozitívny fotorezist ARP3540 od firmy Allresist. Podmienky depozície spin coateru boli zrýchlenie 1000 otáčok za minútu a následná rýchlosť 4000 otáčok za minútu. Týmito parametrami bola dosiahnutá hrúbka nanoseného laku práve na hodnotu 1,4 µm. Ďalším krokom bol softbake ktorý prebiehal pri teplote 100 °C po dobu 60 sekúnd pri zníženom tlaku v dusíkovej atmosfére (N₂). Následne bol lak z okraju waferu ručne zmytý pomocou acetónu. Rovnakým spôsobom bol urobený každý ďalší krok nanášania fotorezistu.

4.6.2 Expozícia

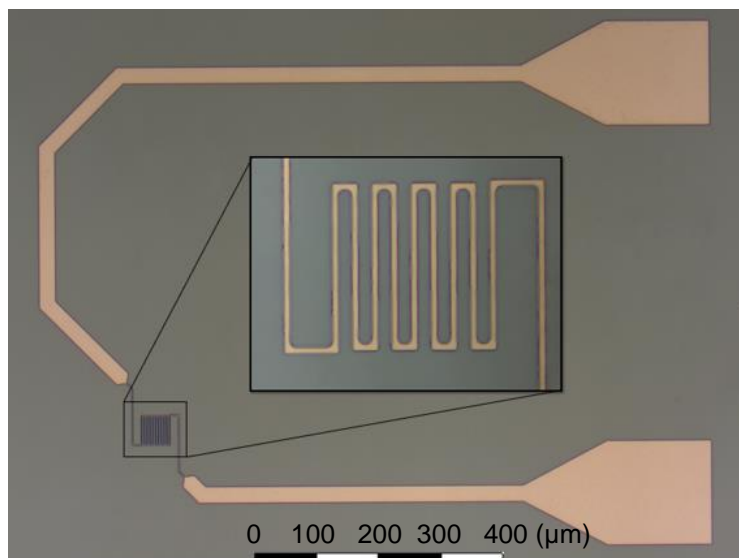
V ďalšom kroku bola vytvorená požadovaná štruktúra a pomocou konkrétnej masky bol wafer s naneseným lakom osvetlený pomocou prístroja Mask Aligner, SÜSS MicroTec MA8, s ortuťovou výbojkou. Bol použitý hard kontakt s medzerou 5 µm. Vlnová dĺžka výboju bola nastavená pomocou filtra na 365 nm a dávka 42 mJ/cm². Na zosúladienie vrstiev boli použité jemnejšie značky kvôli drobným štruktúram a presnejšiemu zosúladieniu jednotlivých vrstiev.

4.6.3 Vyvolanie a čistenie

V tomto výrobnom kroku bol fotorezist vyvolaný vo vývojke AR-300-47 nariadenej H₂O v hmotnostnom pomere 1:1. Vyvolávanie prebiehalo ponorením waferu do vývojky po dobu 26 sekúnd. Nasledoval oplach vo vode približne 60 sekúnd, sušenie waferu a kontrola vyvolania pomocou optického mikroskopu (ostré hrany). Ďalším krokom bolo očistenie zvyškov fotorezistu v kyslíkovej plazme pri 100% výkone, prietoku kyslíku 3 sccm a tlaku 0,05 mbar.

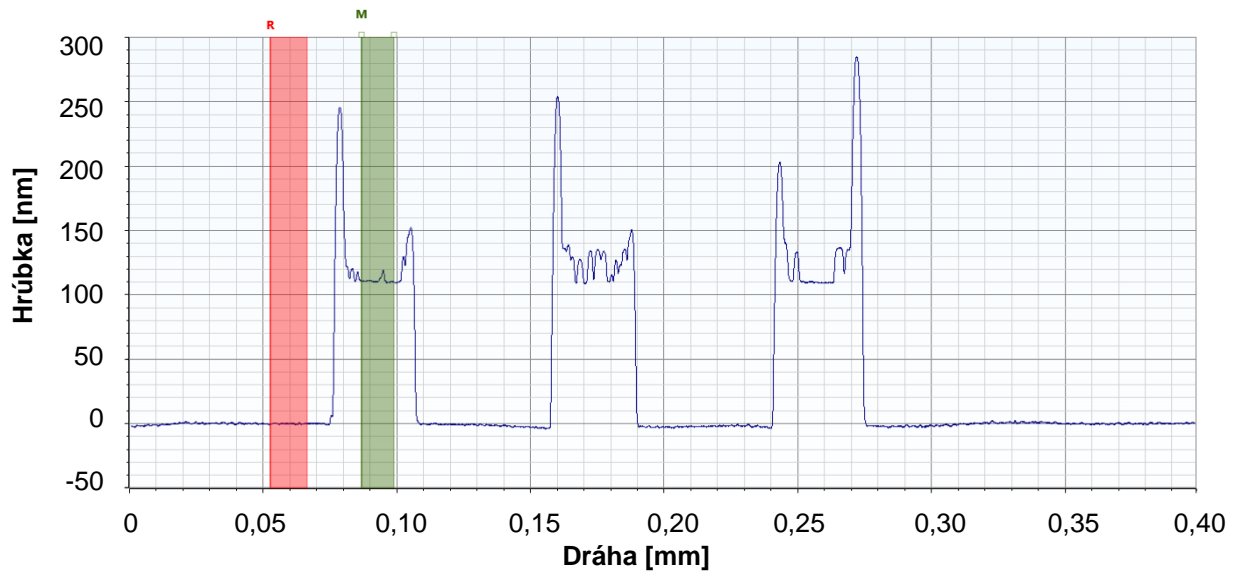
4.6.4 Leptanie vyhrievacích štruktúr a leptanie elektród

Leptanie prebehlo pomocou reaktívneho iónového leptania v Cl₂ na prístroji Plasma Technology PlasmaPro 100. Nastavenia parametrov leptania boli 20 sccm Cl₂ a výkon 600 W. Doba leptania tejto vrstvy o hrúbke ~110 až ~140 nm bola experimentálne stanovená na 17 minút. Na **Obr. 24** je znázornené vyhrievacie štruktúry vytvorené leptaním platiny.



Obr. 24: Vyleptaná štruktúra ohrievacej platformy vrátane kontaktov.

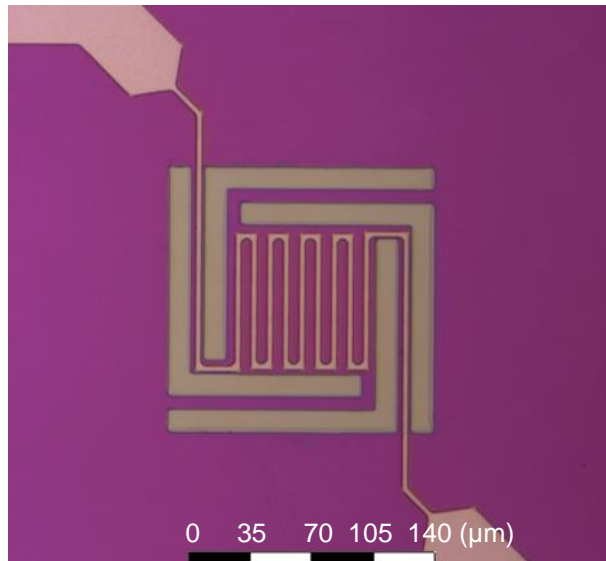
Hrúbka naprášenej vrstvy Ti/Pt (10/100) tvoriaci samotný vyhrievací element, bola meraná pomocou profilometru Bruker Dektak XT. Boli zmerané hrúbky nanesej platinovej vrstvy na štyroch rôznych miestach a to konkrétne na okraji waferu kde bola zmeraná výška platinovej vrstvy o hodnote $\sim 111,5$ nm. Ďalšia zmeraná výška platiny bola v štvrtine waferu kde bola nameraná výška vrstvy $\sim 121,9$ nm, v dvoch tretinách výška dosahovala $\sim 135,9$ nm. Taktiež bola zmeraná výška uprostred waferu kde dosahovala hodnoty $\sim 122,65$ nm. Je zjavné, že najväčší zmeraný rozdiel bol až 24,4 nm. Pri nanosení 100 nm vrstvy platiny to ale činí chybu 35,9 %. To spôsobí že štvorec platiny nebude mať odpor $1,06 \Omega$ (dopočítaný pomocou materiálových konštánt použitých v simuláciách) ale môže dosiahnuť až hodnoty $0,726 \Omega$. To je hlavným dôvodom prečo sa výsledky simulácií nezhodujú s nameranými hodnotami a taktiež prečo sú výsledky zmeraných ohrievačov prudko závislé na polohe na waferu. Vzhľadom k tomu, že výška vrstvy je nepriamo úmerná odporu štvorca nanesej platiny (čím hrubšia vrstva, tým menší odpor) bola experimentálne zistená hrúbka vrstvy. Meranie hrúbky platiny je zobrazené na **Obr. 25**. Na osi x je dráha ktorú urazil hrot a počas ktorej meral výšku povrchu, ktorá je vynesená na ose y. Meranie bolo uskutočnené na písmene E preto je v grafe vidieť trikrát za sebou profil nameranej výšky platiny.



Obr. 25: Meranie výšky nanesej platinovej vrstvy.

4.6.5 Leptanie oxidu kremíku (SiO_2)

Oxid kremíku bol leptaný pomocou reaktívneho iónového leptania za pomoci prístroja Oxford Instruments Plasma Technology PlasmaPro NGP 80. Toto leptanie bolo použité pre dva technologické kroky – leptanie samotného oxidu na otvorenie okien pre podleptanie membrány, druhým bolo vyleptanie oxidu na otvorenie kontaktov. V prvom procese bol zapálený plazmový výboj za pomoci prídavného argónu. Výhodou tejto časti procesu bolo rýchlejšie leptanie oxidu kremíku. Nastavené parametre boli 38 sccm Ar, 12 sccm CHF_3 tlak 30 mTorr a výkon 200 W. Toto leptanie prebiehalo po dobu 3 minút a 30 sekúnd. Na druhú stranu nevýhodou bolo zapekanie fotorezistu a v prípade preleptanie na platínový kontakt došlo taktiež k jeho odleptaniu. Tento problém bol vyriešený tak, že pri druhom procese leptania bol použitý kyslíkový plazmový výboj. Tento proces mal na rozdiel od procesu s argónom nižšiu leptačnú rýchlosť ale jeho hlavnou výhodou bola oveľa menšia leptačnú rýchlosť platiny a tým lepšia selektivita. Nastavené parametre boli 50 sccm CHF_3 , 5 sccm O_2 , tlak 55 mTorr a výkon 150 W. Toto leptanie prebiehalo po dobu 3 minút a 15 sekúnd. Testovanie leptačnej rýchlosti bolo uskutočnené na štvrtine waferu a bola stanovená na 3 minúty 30 sekúnd pre argónové leptanie + 3 minúty 15 sekúnd pre kyslíkové leptanie. Po týchto časoch bola oxid na otvorenie okien odstránený a kontakt bol odokrytý a neporušený.



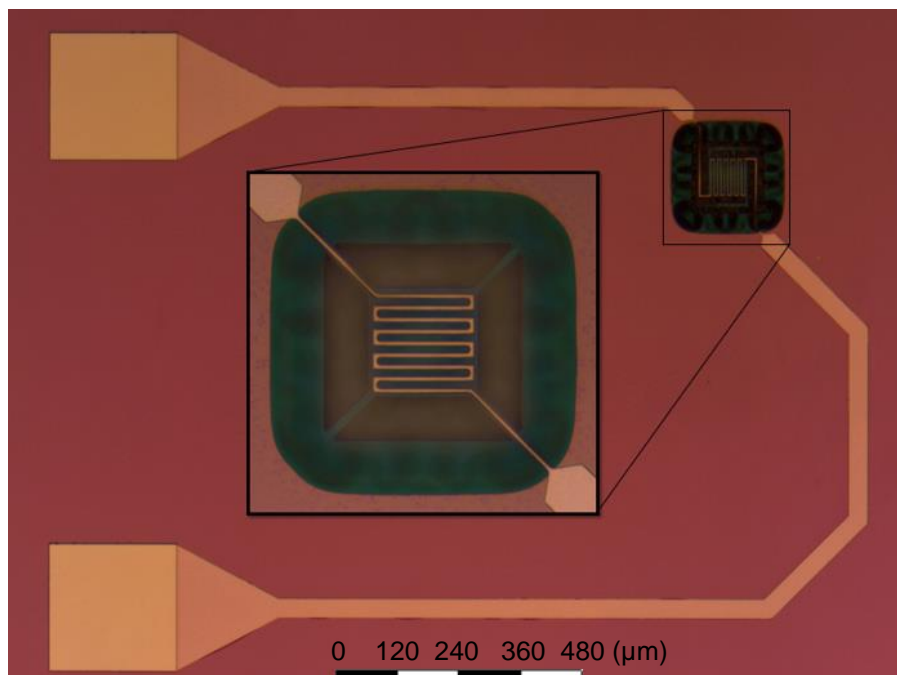
Obr. 26: Vyleptaná vrstva oxidu (veľké plochy v tvare písmena L).

4.6.6 Leptanie kremíku (Si)

Posledným krokom výroby bolo samotné podleptanie platformy leptaním kremíkoveho substrátu pomocou fluoridu xenónatého (XeF_2). Tento plyn sa využíva ako izotropné plynné leptadlo pri výrobe mikroelektronických mechanických systémov. Ide o pulzné leptanie v uzatvorenej komore za zníženého tlaku. Mechanizmus leptania spočíva v tom, že sa XeF_2 adsorbuje a disociuje na xenón (Xe) a fluór (F) na povrchu kremíku. Fluór je hlavnou látkou, ktorá sa podieľa na leptaní kremíku (Si). Túto reakciu môžeme popísať vzťahom [3]:



XeF_2 má relatívne vysokú rýchlosť a nevyžaduje iónové bombardovanie alebo iný externý zdroj energie na proces leptania. Doba potrebná na podleptanie platformy bola závislá od veľkosti leptaného vzorku, napríklad jedna štvrtina waferu potrebovala na úplné podleptanie šestnásť 50 sekundových leptacích cyklov, kdežto na jeden samotný čip stačilo približne 11 takýchto cyklov. Podleptanú platformu znázorňuje **Obr. 27**.

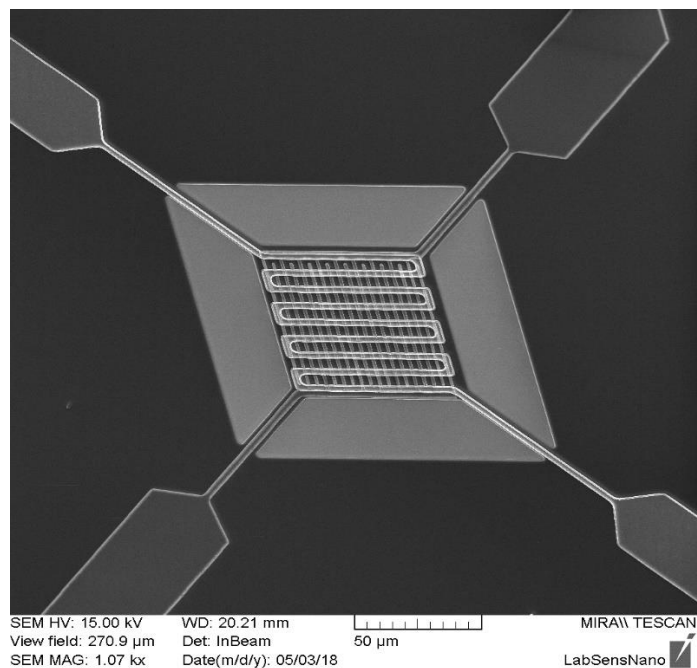


Obr. 27: Podleptaná štruktúra s detailom na membránu.

4.6.7 Výroba interdigitálnej elektródy

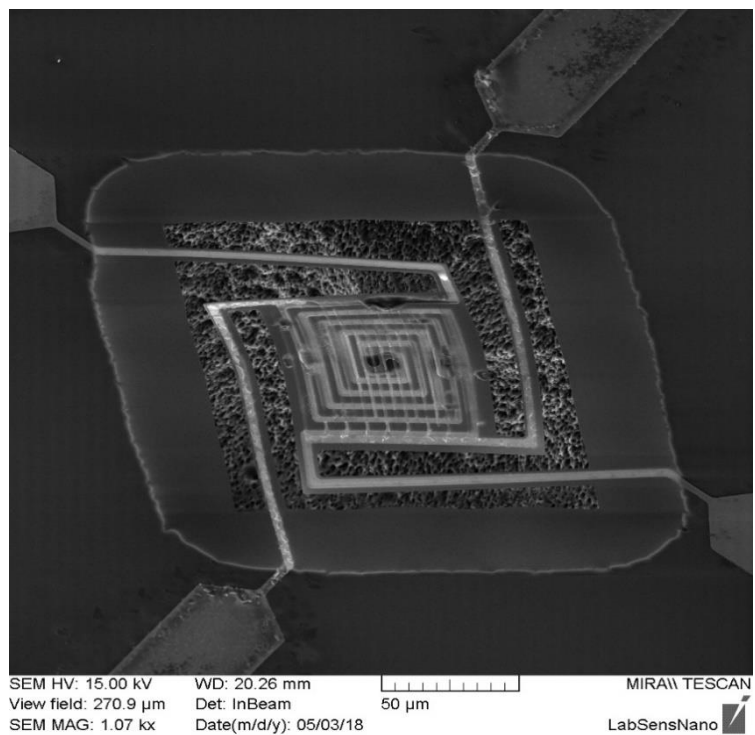
Posledným výrobným krokom bola výroba interdigitálnej elektródy na druhom krycom oxide (pred leptaním oxidu kremíku i samotného kremíku). Komplikáciou bola momentálna nedostupnosť materiálu platiny. Z tohto dôvodu bol pre vytvorenie interdigitálnej elektródy použitý naprášený titán.

Leptanie prebehlo pomocou reaktívneho iónového leptania s reaktívnym plynom chlórom na prístroji PlasmaPro 100. Takto vyleptaná elektróda s odleptaným oxidom kremíku a odstráneným fotorezistom je znázornená na **Obr. 28**.



Obr. 28: SEM snímok nepodleptanej vyhrievacej platformy s interdigitálnou elektródou.

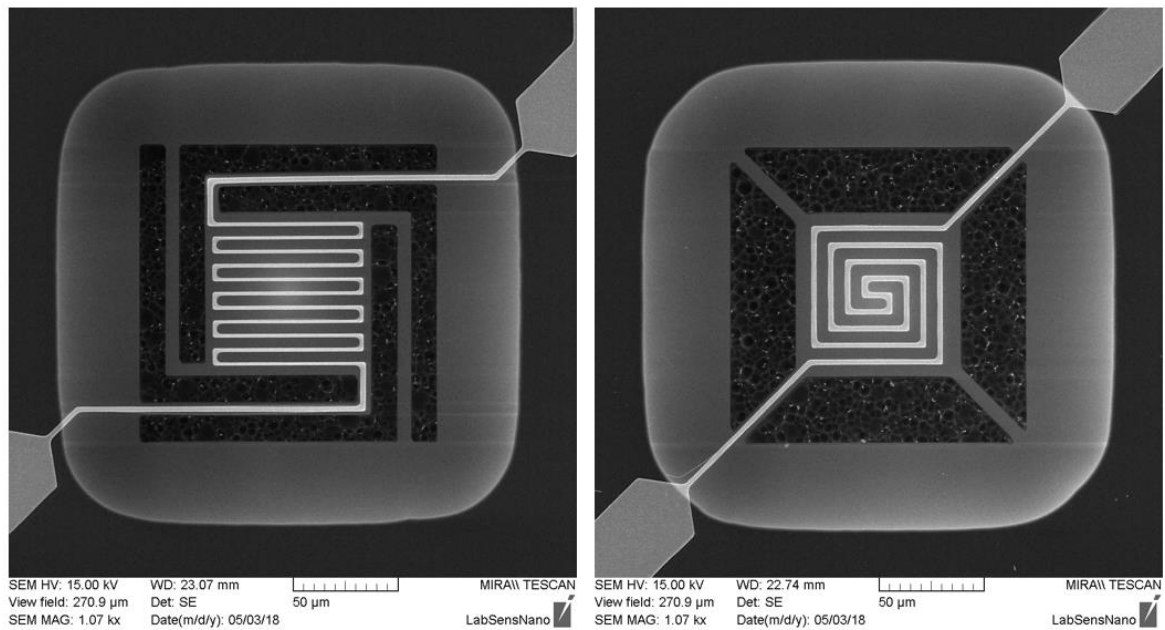
Ako sa ukázalo XeF_2 , ktoré bolo používané na leptanie kremíku leptalo zároveň aj titánovú elektródu ako ukazuje SEM snímka na **Obr. 29**. Leptanie titánu je najlepšie vidieť na prívodoch elektródy ktoré sú zjavne poškodené a taktiež na membráne možno vidieť škrvny po leptaní titánu. Možným riešením by bolo ponechanie fotorezistu ako krycej vrstvy titánu, ktorý by však nebolo možné odstrániť po zapečení pri procese leptania kremíku z podleptanej membrány bez jej poškodenia.



Obr. 29: SEM snímok podleptanej membrány s poškodenou titánovou elektródou.

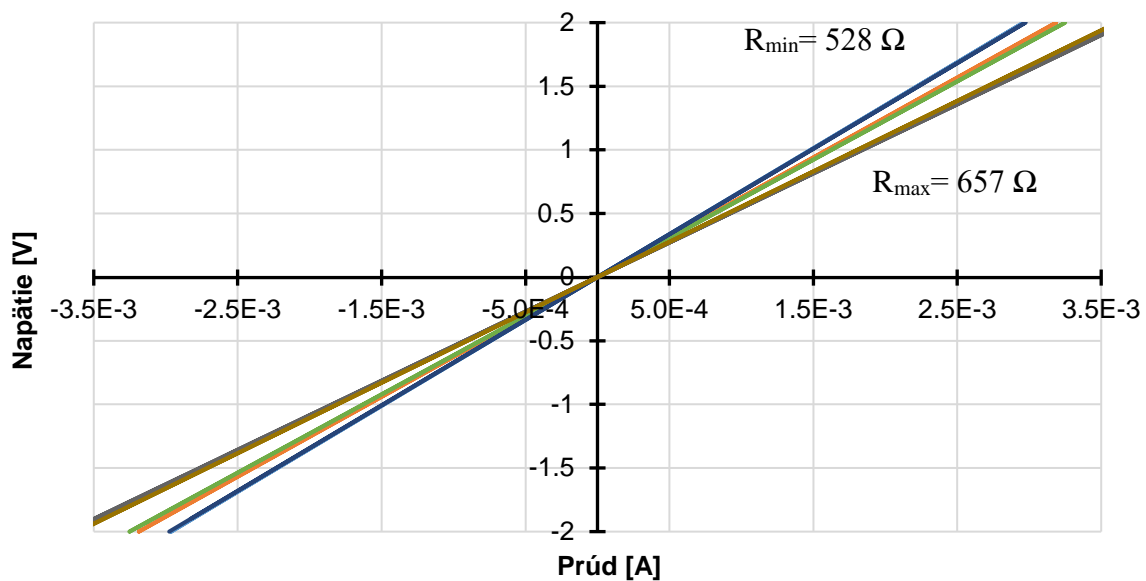
4.7 Charakterizácia vyrobených vyhrievacích membrán

Vyrobené membrány bez interdigitálnej štruktúry sú zobrazené na SEM snímke na **Obr. 30**. Na obrázku je znázornená tenká i hrubá vyhrievacia štruktúra, špirála i meander a záves X aj záves L.

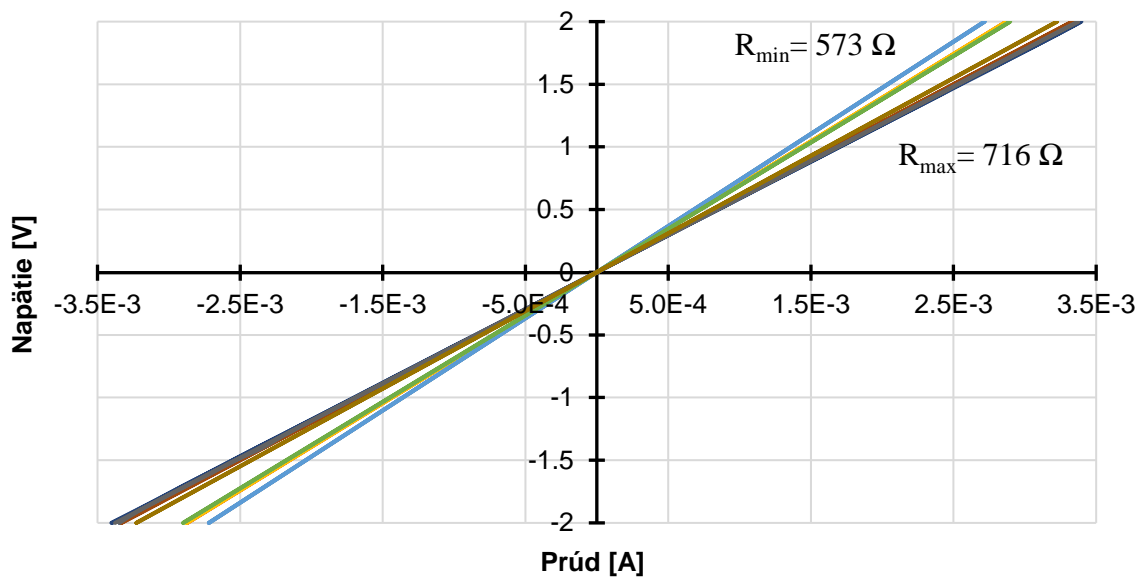


Obr. 30: SEM snímka 3 μ m meandru na závесе L (vľavo) a 4 μ m špirály na závесе X (vpravo)

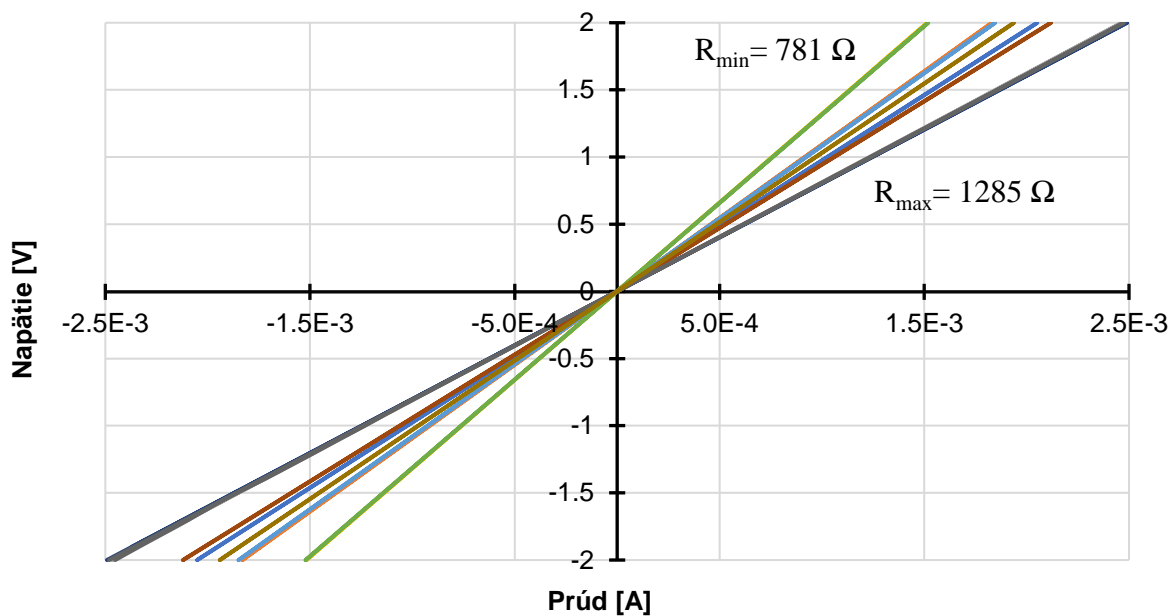
Prvým funkčným elektrickým testom bola I-V charakteristika meraná prístrojom Keithley 4200 SCM pripojeného ku vzorke pomocou 4-sondovej kontaktovacej stanice Cascade Microtech MPS 150. Z grafických závislostí uvedených na **Obr. 31** a **Obr. 32** je vidieť, že odpory širších vyhrievacích štruktúr (4 μ m) majú rozptyl hodnôt odporov pre špirálu od $\sim 528 \Omega$ až po $\sim 657 \Omega$, najväčšia ΔR bola teda rovná $\sim 129 \Omega$. U 4 μ m meandru boli hodnoty zmeraných odporov v rozmedzí od $\sim 573 \Omega$ po hodnotu $\sim 716 \Omega$, takže najväčšia ΔR v tomto prípade bola $\sim 143 \Omega$. Na **Obr. 33** a **Obr. 34** sú vyobrazené I-V charakteristiky 3 μ m hrubých vyhrievacích geometrií. Na týchto charakteristikách je vidieť, že v prípade užších geometrií je rozdiel odporov väčší a to konkrétne u 3 μ m širokej špirály hodnoty odporov od $\sim 781 \Omega$ po hodnotu $\sim 1285 \Omega$, a teda ΔR je rovné $\sim 504 \Omega$. U meandru bola najnižšia hodnotu odporu $\sim 846 \Omega$ a najvyššia hodnota $\sim 1230 \Omega$ z toho potom vyplýva, že hodnota ΔR je $\sim 384 \Omega$. Tento rozptyl hodnôt bol spôsobený rozdielnou výškou nanesej platinovej vrstvy, litografickou chybou a pnutím v membráne, kvôli nie príliš vhodnému, použitému oxidu.



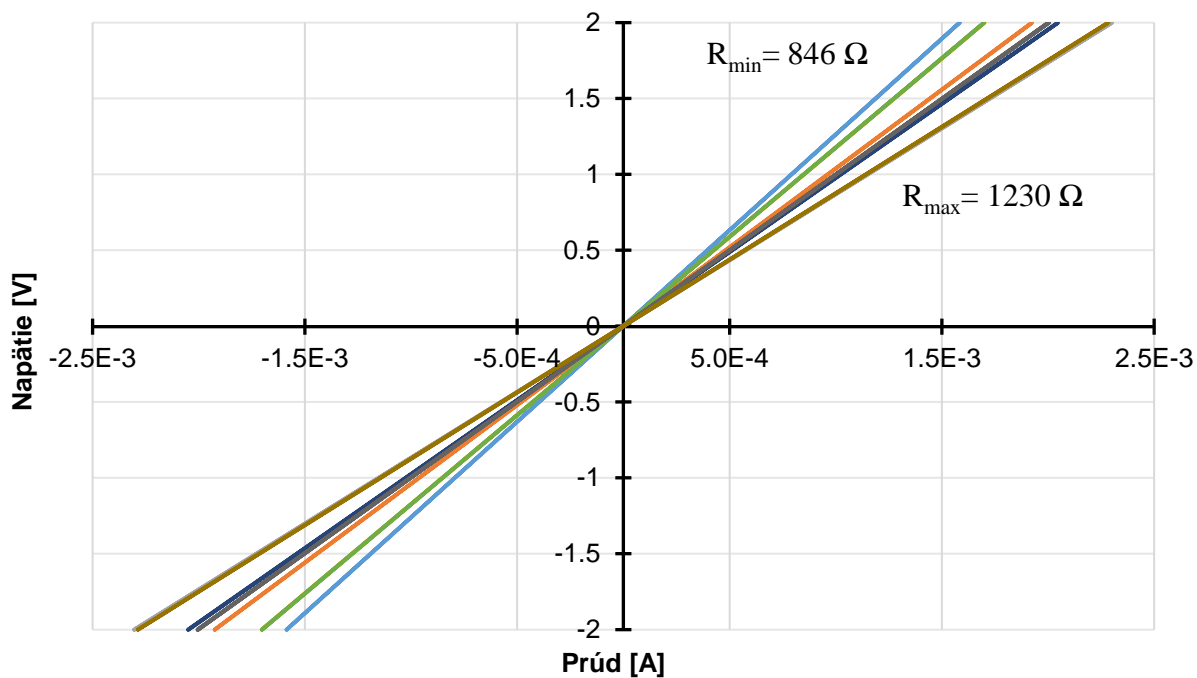
Obr. 31: I-V charakteristika špirály s hrúbkou cesty 4 μm.



Obr. 32: I-V charakteristika meandru s hrúbkou cesty 4 μm.



Obr. 33: I-V charakteristika špirály s hrúbkou cesty 3 μm



Obr. 34: I-V charakteristika meandru s hrúbkou cesty 3 μm.

Ďalším krokom bolo zistenie teplotného koeficientu odporu (TCR). Štruktúra bola v prvom kroku ochladená na 20 °C kde bola stanovená jej referenčná hodnota odporu

4 μm širokého meandru $R = \sim 727,21 \Omega$, a špirály $R = \sim 630,77 \Omega$. Následne bola štruktúra zahrievaná a bola meraná hodnota odporu pri danej teplote. Teplota bola zvyšovaná po kroku $+5 \text{ }^\circ\text{C}$. Namerané hodnoty boli spracované do tabuľky a grafu a bola stanovená hodnota TCR pre platínu použitú na výrobu ohrievacej štruktúry. Uvedené tabuľky sú zjednodušené pre hodnoty od 50 po 300 $^\circ\text{C}$ po kroku 50 $^\circ\text{C}$ viz **Tabuľka 5** a **Tabuľka 6**.

Tabuľka 5: Vybrané hodnoty meraného odporu pri zmene teploty špirály

Špirála 4 μm				
Teplota [$^\circ\text{C}$]	Odpor [Ω]	ΔT [$^\circ\text{C}$]	R/R0	α [$1/^\circ\text{C}$]
25,050	630,77	-	-	-
50,07	662,45	30,070	0,911	0,002007
100,05	724,27	80,050	0,996	0,001976
150,05	786,4	130,050	1,081	0,001974
200,08	852,78	180,080	1,173	0,002011
250,05	915,08	230,050	1,258	0,002003
300,03	969,51	280,030	1,333	0,001953

Tabuľka 6: Vybrané hodnoty meraného odporu pri zmene teploty meandru

Meander 4 μm				
Teplota [$^\circ\text{C}$]	Odpor [Ω]	ΔT [$^\circ\text{C}$]	R/R0	α [$1/^\circ\text{C}$]
25,050	734.330	-	-	-
50,06	771,33	30,060	1,061	0,002015
100,05	845,05	80,050	1,62	0,00201
150,05	912,55	130,050	1,255	0,001942
200,04	976,39	180,040	1,343	0,001884
250	1039,5	230,000	1,429	0,001847
300	1110,5	280,000	1,527	0,001863

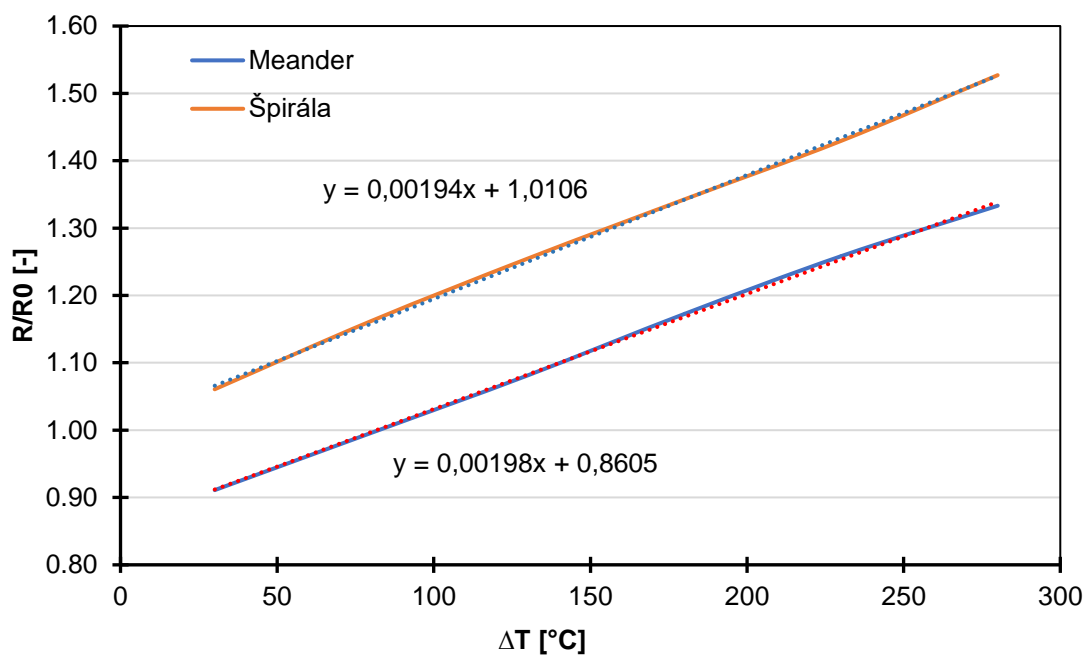
Z nameraných zmien odporu v závislosti na teplote bola pomocou nasledujúceho vzťahu spočítaná hodnota teplotného koeficientu odporu:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{R}{R_{ref}} - 1\right)}{T - T_{ref}}, \quad (1.7)$$

kde R je hodnota odporu pri teplote T , R_{ref} je referenčná hodnota odporu pri teplote $T_{ref} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, α je teplotný koeficient odporu vodiča, T je teplota vodiča a T_{ref} je referenčná

teplota.

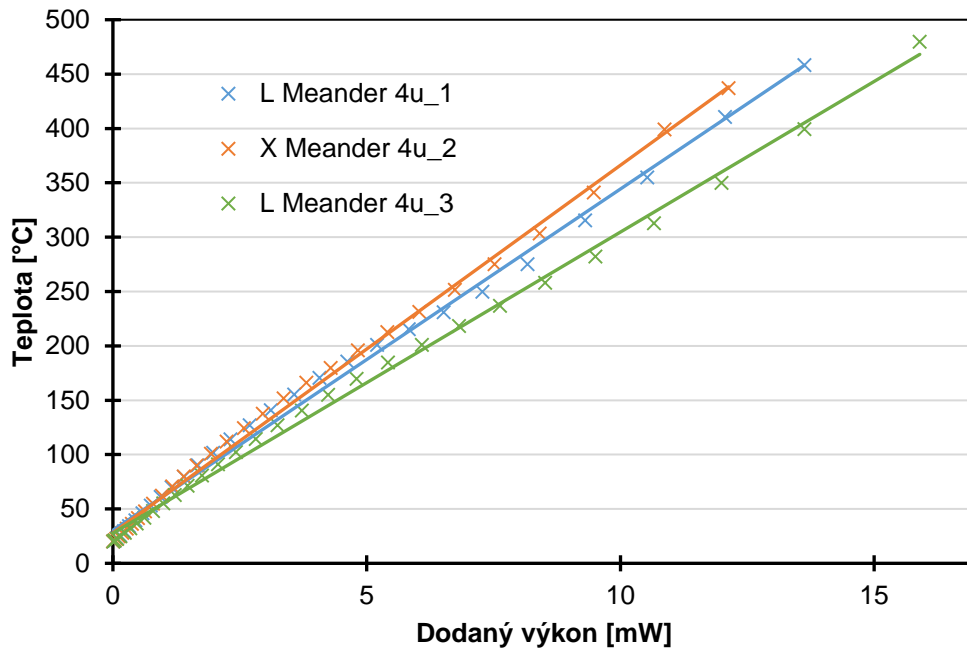
Z nameraných hodnôt bol zostrojený graf závislosti zmeny teploty a pomeru odporov pri referenčnej teplote a pri zvýšenej teplote viz **Obr. 35**. Z grafu bola stanovená hodnota α . Pre meander bola stanovená hodnota $\alpha = 0,00198 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ a pre špirálu hodnota $\alpha = 0,0194 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Keďže boli hodnoty stanovené na 1940 ppm pre meander a 1980 ppm pre špirálu, v ďalšom teste ohrevu membrány prechodom elektrického prúdu bola preto teplota vyhrievacieho elementu stanovená pomocou hodnoty 1960 ppm pre všetky geometrie.



Obr. 35: Graf TCR.

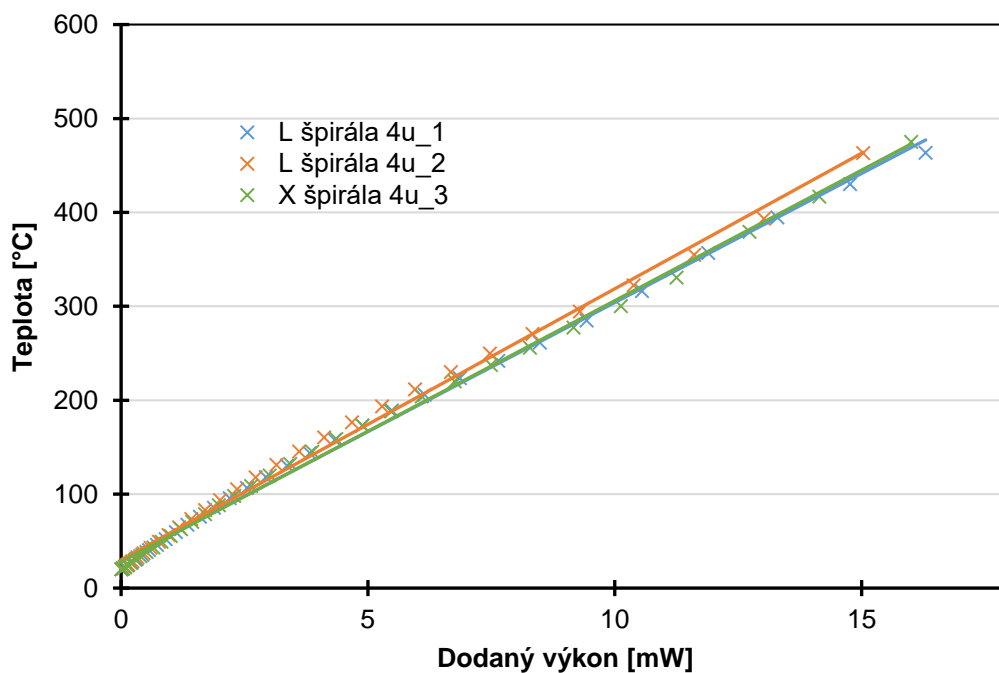
Pri ďalšej charakterizácii bol zisťovaný výkon potrebný pre dosiahnutie požadovanej teploty pomocou zvyšovania pretekajúceho elektrického prúdu. Prúd bol nastavený od 0 do najvyššej možnej stabilnej hodnoty ~ 3 mA pre širšie a ~ 2 mA pre tenšie geometrie. Táto hodnota bola prudko závislá na konkrétnej geometrii ohrievača a na konkrétnom mieste na waferu, kvôli neúplne rovnomernej hrúbke nanosenej platínovej vrstvy. Na **Obr. 36** môžeme vidieť tri rôzne meandre, všetky však s šírkou cesty $4 \mu\text{m}$. Líšia sa ako spôsobom zavesenia membrány tak polohou na waferu (rozdielna hrúbka materiálu spôsobí rozdielny odpor na štvorec). Meander zavesený na L platforme s hrúbkou cesty $4 \mu\text{m}$ sa podarilo stabilne vyhriať na teplotu $\sim 458 \text{ } ^\circ\text{C}$, pri pretekajúcom elektrickom prúde

~2,9 mA. Meander zavesený na X platforme bol pri prúde ~3 mA vyhriaty na ~436 °C a meander na membráne L bol pri pretekajúcom prúde ~3 mA vyhriatý na teplotu ~479 °C. Z porovnania dvoch rovnakých membrán vyplýva, že sa začína ukazovať chyba spôsobená rozdielnou hrúbkou nanosenej platinovej vrstvy.



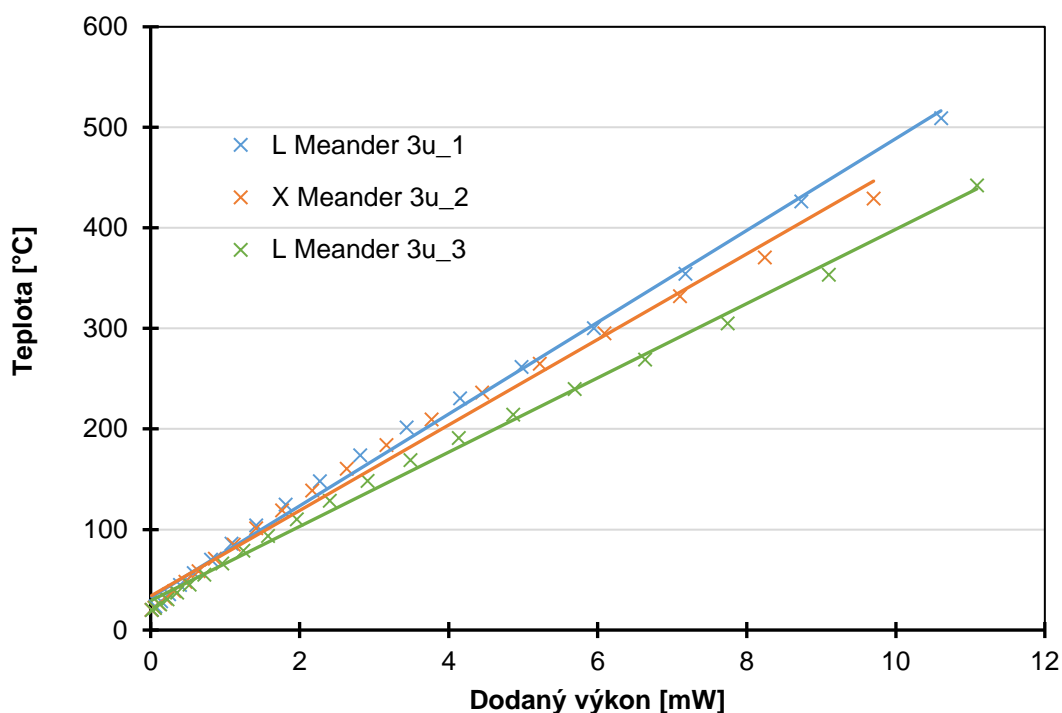
Obr. 36: Graf závislosti teploty na dodanom výkone u meandrov s 4 µm šírkou

Ďalšou testovanou štruktúrou bola špirála s šírkou cesty 4 µm. Všetky štruktúry boli testované rovnakým spôsobom ako predchádzajúce. Na **Obr. 37** je zobrazený graf závislosti dosiahnutej teploty na dodanom výkone pre špirálové vyhrievacie membrány. Prvá špirála na závese L bola pri prúde ~3,2 mA vyhriata na teplotu ~463 °C. Druhá špirála na závese L bola pri prúde ~3 mA vyhriata na teplotu ~463 °C a špirála na závese X bola pri prúde ~3,3 mA zohriata na teplotu ~475 °C. Pre porovnanie boli zmerané špirály v blízkom okolí aby bol eliminovaný vplyv rozdielnej hrúbky platinovej vrstvy. Je zjavné, že takto zvolené štruktúry majú charakteristiky takmer rovnaký priebeh.



Obr. 37: Graf závislosti teploty na dodanom výkone u špirál s 4 μm šírkou

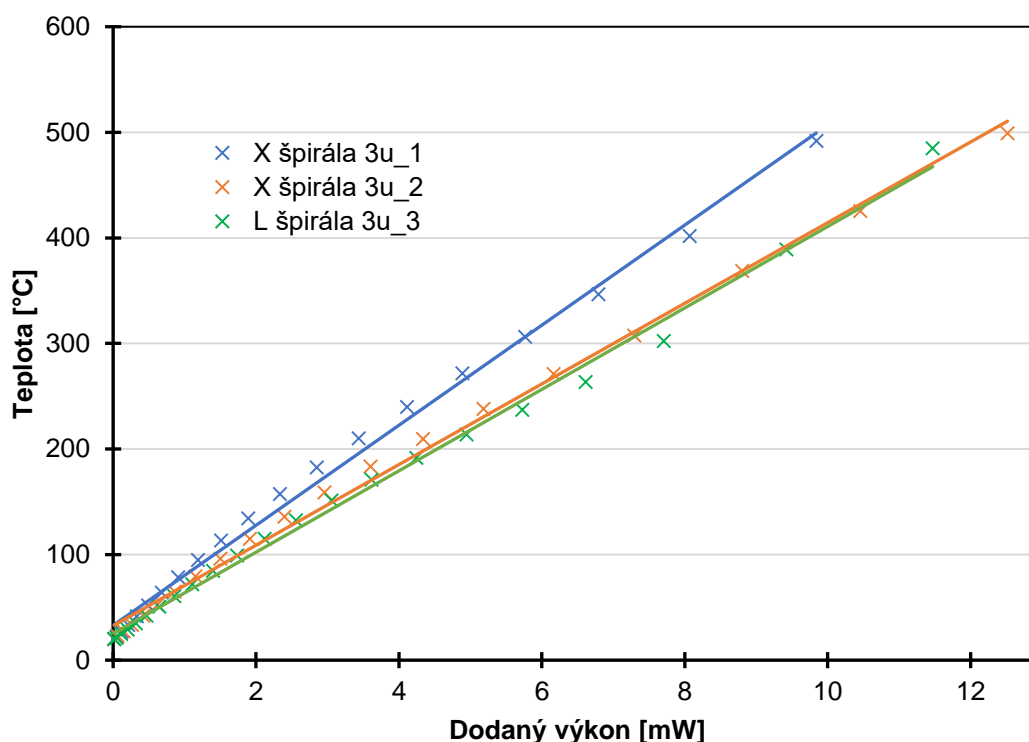
Ďalšou testovanou štruktúrou bol meander s hrúbkou cesty 3 μm . Na **Obr. 38** je zobrazený graf závislosti teploty na dodanom výkone pre dané meandre. Prvý meander na závese L bol pri prúde ~1,9 mA vyhriaty na teplotu ~509 °C. Druhý meander na závese X bol pri prúde ~2,1 mA vyhriaty na teplotu ~429 °C a tretí meander na závese L bol pri prúde ~2,1 mA vyhriaty na teplotu ~442 °C.



Obr. 38: Graf závislosti teploty na dodanom výkone u meandrov s 3 μm šírkou

Ďalšou testovanou štruktúrou bola špirála s hrúbkou cesty 3 μm . Na **Obr. 39** je zobrazený graf závislosti teploty na dodanom výkone pre dané špirály. Prvá špirála na závese X bola pri prúde ~2 mA vyhriata na teplotu ~492 °C. Druhá špirála na závese X bola pri prúde ~2 mA vyhriata na teplotu ~499 °C a tretia špirála na závese L bola pri prúde ~2,2 mA vyhriata na teplotu ~485 °C.

Z grafov na **Obr. 38** a **39** je zrejmé, že užšia štruktúra potrebuje dodať menší prúd a tým pádom menší výkon aby bola vyhriata na rovnakú teplotu ako štruktúra širšia. Nevýhodou tu ale je menší prúdový rozsah a tým citlivejšie nastavenie teploty. U tejto štruktúry navyše došlo k veľmi rýchlemu poškodeniu ohrievača pri preťažení vysokým výkonom. Takáto štruktúra zhorela v čase v jednotkách sekúnd. Vzhľadom k tomu, že tenšia štruktúra pozostáva z väčšieho počtu štvorcov o 33% ako je tomu u hrubšej štruktúry, je tu chyba nanosennej platinovej vrstvy väčšia ako u hrubšej geometrie. Vzhľadom k tomu že u nanosennej hrúbky cesty vyhrievacieho elementu došlo k chybe, sú všetky chybové aspekty spočítané a u tenšej geometrie je táto chyba reálneho odporu oproti spočítanému v niektorých prípadoch až 50 % čo taktiež možno vidieť z grafu.



Obr. 39: Graf závislosti teploty na dodanom výkone u špirál s 3 μm šírkou

Simuláciami bolo zistené, že na vyhriatie jednotlivých závesných membrán s rôznymi typmi vyhrievacích geometrií bolo treba dodať rozdielne výkony. Ukázalo sa, že potrebný výkon je závislý na spôsobe zavesenia membrány z dôvodu dĺžky prívodov a tým pádom mali vyhrievacie geometrie na tejto platforme väčší odpor a bolo treba dodať menší výkon ~1,33 mW pre meander a ~1,62 mW pre špirálu. U závesu typu X bolo treba dodať väčšie výkony ~2,46 mW pre meander a ~4,09 mW pre špirálu. Reálne zmerané hodnoty s odsimulovanými veľmi nekorešponujú aj keď vo väčšine prípadov stačilo závesom typu L dodať menší výkon aj pri testovaní membrán. Špirále s šírkou cesty 3 μm bolo treba dodať výkon na najvyššiu stabilnú teplotu ~460 °C ~11,85 mW na membráne X a ~11,26 mW na závese L. Meandru so šírkou stopy 3 μm bolo na vyhriatie na teplotu ~440 °C dodať výkon ~9,21 mW na závese L a ~10,08 mW na závese X. na vyhriatie 4 μm širokej špirály na teplotu ~460 °C bolo treba dodať ~15,12 mW na závese X a ~14,98 mW na závese L. Poslednou vyhrievacou geometriou bol meander so šírkou stopy 4 μm, ktorému bolo treba na zahriatie na teplotu ~460 °C dodať výkon ~13,63 mW pre L záves a ~13,11 mW pre X záves. Až na posledný prípad majú zmerané charakteristiky podobnosť so simuláciami v závislosti spotreby na typu zavesenia

membrány. Z nameraných údajov vyplýva že membrány sa dajú stabilne zahriať až na teplotu 440 °C s šírkou stopy 3 μm a 460 °C s šírkou stopy 4 μm .

Vo väčšine literatúr a článkoch sa píše o vyhrievacej membráne na kremíkovom substráte s veľmi dobrou účinnosťou, ak dokážeme dosiahnuť teplotu 400 °C pri dodávanom výkone v desiatkach mW [6]. V článkoch sa uvádza dodávaný výkon ~50 mW a dosiahnutá teplota ~400 °C. Z toho možno usúdiť, že napriek veľkému množstvu odchýlok pri výrobe vyhrievacej membrány sa podarilo dosiahnuť výsledkov popísaných v literatúre.

5 VYHODNOTENIE A ZÁVER

Táto práca sa zaoberá oblasťou návrhu a výroby mikroeletromechanickej vyhrievacej platformy vo forme závesnej membrány pre chemické senzory plynov. V teoretickej časti je postupne rozobraná technológia výroby mikroeletromechanickej štruktúry pomocou rôznych techník. Ide najmä o závesné membrány pre senzory plynov.

V rámci praktickej časti je riešený návrh závesné vyhrievacej platformy pre senzory plynov vrátane geometrií závesných nosníkov membrán a tvarov ohrievačov. Pomocou počítačovej simulácie bol zisťovaný potrebný výkon na vyhriatie ohrievača a platformy na 800 K, ktorý sa ukázal byť závislý na type vyhrievacieho elementu a na spôsobe zavesenia danej membrány. Taktiež bola odsimulovaná deformácia membrán pri teplote 800 K. Výsledky boli spracované graficky zo simulačného programu a taktiež do tabuliek a grafu. V ďalšom kroku bol navrhnutý postup výroby týchto štruktúr v súlade s možnosťami a dostupným vybavením laboratórií. Posledným krokom bolo navrhnutie a vytvorenie masiek, potrebných na proces fotolitografie a samotné vytvorenie štruktúr.

V rámci diplomovej práce je následne popísaná samotná výroba závesných ohrievacích membrán pre senzory plynov na kremíkových waferoch a ich následné testovanie a vyhodnotenie. V tejto časti je popísaný výber vhodného oxidu pre vytvorenie daných závesných membrán. Najvhodnejším oxidom pre túto aplikáciu je nízko stresový PECVD oxid, avšak výroba konkrétne tohto oxidu nebola v našich podmienkach možná, preto bolo treba nájsť najvhodnejší oxid vytvorený pomocou dostupných technológií. Ako najvhodnejšia možnosť sa ukázal oxid vytvorený pomocou magnetronového naprašovaia s veľmi nízkou rýchlosťou depozície 0,01 nm/s. Ďalej sú popísané spôsoby depozície vrstiev, postup výroby masiek, parametre lakovania substrátov, použité chemikálie, parametre a časy potrebné na vyleptanie ako elektrických tak mechanických systémov. Celý proces je popísaný tak aby bolo možné ho celý kedykoľvek zreprodukovať. Pri depozícii interdigitálnych elektród došlo ku komplikácii z dôvodu aktuálnej nemožnosti použiť predpokladaný materiál platinu. Z tohto dôvodu bol za materiál elektród zvolený titán. Ako sa však v nasledujúcom kroku ukázalo táto voľba nebola vhodná pretože pri poslednom kroku podleptávania membrán došlo k reakciu leptacieho plynu XeF_2 a Ti. Tým bola v tomto procese čiastočne odleptaná aj vrstva interdigitálnej elektródy. Možnosťou bolo ponechať fotorezist na titánovej vrstve ale

odstránenie zapečeného fotorezistu z podleptanej závesnej membrány bez jej poškodenia sa ukázalo ako nemožné.

Vyrobené vyhrievacie membrány boli elektricky a termálne otestované. V prvom kroku bola zistená funkcia vyhrievacej geometrie, overenie linearity I-V charakteristiky ohrievačov. Ďalej bola stanovená hodnota TCR postupným zahrievaním membrány až na teplotu 300 °C a zisťovaním hodnoty odporu v priebehu zahrievania. Hodnota TCR bola stanovená na 1940 ppm pre meander a 1980 ppm pre špirálu. V ďalšom teste ohrevu membrány prechodom elektrického prúdu bola preto aktuálna teplota stanovená pomocou priemerne hodnoty 1960 ppm pre všetky geometrie. Membrány sa podarilo stabilne zahriať až na teploty veľmi blízke, v niektorých prípadoch až presahujúce, 500 °C už po dodaní výkonu ~10 mW pre tenšie štruktúry a ~14 mW pre širšie štruktúry. Po prekročení tejto teploty dochádzalo k deštrukcii štruktúry. Bezpečná dlhodobá pracovná oblasť tak bola stanovená v rozmedzí od 20 do 460 °C.

Navrhované zlepšenia a skutočnosti, ktorými sa malo v budúcej výrobe predísť sú nepoužívať náhradu za PECVD oxid. Tento oxid je najdôležitejšou súčasťou závesnej membrány a jeho absencia vedie k významnej deformácii membrány aj bez jej ohrevu. Zlepšením by v tomto ohľade taktiež mohlo byť žihanie vytvoreného oxidu. Ďalším zlepšením by mohlo byť zoptimalizovanie výrobného procesu. Použitie platinovej interdigitálnej elektródy je tiež nutnosťou.

LITERATÚRA

- [1] *Memsnet* [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.memsnet.org.html>.
- [2] HUSÁK, Miroslav. MEMS a mikrosystémové technologie., 5.
- [3] *Objemové mikrotvarovanie kremíka* [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: http://ec.elf.stuba.sk/kme/buxus/docs/predmety/MST/mst_6._prednaska.pdf.
- [4] HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Praha: Academia, 2008. Gerstner. ISBN 978-80-200-1478-8.
- [5] CHO, B.K. Engineering approaches to improvement of conductometric gas sensor parameters., 26.
- [6] LAI, Jianjun. *Fabrication of a MEMS Micro-hotplate.*, 11. DOI: 10.1088/1742-6596/276/1/012098.
- [7] SVATOŠ, Vojtěch. *NÁVRH A SIMULACE ČIPU MIKROBOLOMETRU V MEMS TECHNOLOGII*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické. Vedoucí práce Doc. Ing. JAROMÍR HUBÁLEK, Ph.D.
- [8] VANČÍK, Silvester. *Charakterizace pracovních elektrod elektrochemických senzorů modifikovaných uhlíkovými nanomateriály*. Brno, 2016. Bakalárska práca. Vysoké Učení Technické. Vedoucí práce Prášek Jan, Ph.D.
- [9] SEMANCIK, S., R.E. CAVICCHI, M.C. WHEELER, J.E. TIFFANY, G.E. POIRIER, R.M. WALTON, J.S. SUEHLE a B. PANCHAPAKESAN. *Microhotplate platforms for chemical sensor research.*, 13.
- [10] BRIAND, D., A. KRAUSS, B. VAN DER SCHOT, U. WEIMAR, N. BARSAN, W. GOOPEL a N.F. ROOIJ. *Design and fabrication of high-temperature micro-hotplates for drop-coated gas sensors.*, 11.
- [11] OBERLÄNDER, Jan, Zaid B. JILDEH, Patrick KIRCHNER, et al. *Study of Interdigitated Electrode Arrays Using Experiments and Finite Element Models for the Evaluation of Sterilization Processes.*, 13. DOI: 10.3390/s151026115.
- [12] *Micro- and nanofabrication methods in nanotechnological medical and pharmaceutical devices.* [online]. 2006 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: https://openi.nlm.nih.gov/detailedresult.php?img=PMC2676643_ijn-1-483f3&query=&req=4&npos=-1.

- [13] Magnetronové naprašování. *Chempoint* [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/magnetronove-naprasovani>.
- [14] PAL, Prem, Miguel A GOSALVEZ, Kazuo SATO, H. HIDA a Yan XING. Anisotropic etching on Si {1 1 0}: experiment and simulation for the formation of microstructures with convex corners., 13.
- [15] HUSÁK, Miroslav. *Užití MEMS v průmyslu* [online]., 5 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38277.pdf>.
- [16] BAKAR, Mohamad a Muhamad MISKAM. *Effect of heater geometry on the high temperature distribution on a MEMS microhotplate.*, 6.
- [17] Capone S., Siciliano P., Quaranta F., Rella R., Epifani M., Vasanelli L. Moisture influence of geometry effect of Au and Pt electrodes on CO sensing response of SnO₂ microsensors based on sol-gel thin film. *Sens. Actuators B Chem.* 2001; 77:503–511. doi: 10.1016/S0925-4005(01)00754-7.
- [18] LEE, Sung Pil. *Electrodes for Semiconductor Gas Sensors.*, 11. DOI: 10.3390/s17040683.
- [19] BALRAM, Krishna C., Daron A. WESTLY, Marcelo DAVANÇO, et al. *The Nanolithography Toolbox* [online]., 12 [cit. 2017-12-12]. DOI: 10.6028/jres.121.024. Dostupné z: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/121/jres.121.024.pdf>
- [20] *Lnf-wiki* [online]. Michigan [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/File:L.jpg>.
- [21] SANTOS, L., J. P. NETO, A. CRESPO, P. BAIÃO, P. BARQUINHA, L. PEREIRA, R. MARTINS a E. FORTUNATO. *Electrodeposition of WO₃ Nanoparticles for Sensing Applications* [online]. [cit. 2017-12-12]. DOI: 10.5772/61216. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/electroplating-of-nanostructures/electrodeposition-of-wo3-nanoparticles-for-sensing-applications>.
- [22] Material Properties: 6.777J/2.751J Material Properties Database [online]. [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://www.mit.edu/~6.777/matprops/matprops.htm>.