



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

MIKROELEKTROMECHANICKÉ PROPOJE NA KŘEMÍKOVÉM SUBSTRÁTU

MICROELECTROMECHANICAL THROUGH-SILICON VIAS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radovan Dulák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Prášek, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Radovan Dulák

ID: 230468

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Mikroelektromechanické propoje na křemíkovém substrátu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou vytváření elektrických propojů na křemíkovém čipu. Prostudujte možnosti vytvoření mikropropojů pomocí technik pro realizaci mikroelektromechanických systémů. Na základě získaných informací navrhnete možné způsoby realizace MEMS mikropropojů na čipu. Pomocí Vámi dostupných technik mikroobrábění křemíku ověřte možnosti realizace navržených mikropropojů. Připravené struktury charakterizujte opticky pomocí optického a rastrovacího elektronového mikroskopu a elektricky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 1.6.2023

Vedoucí práce: Ing. Jan Prášek, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Skrz kremíkové prepoje sú kľúčovou technológiou umožňujúcou 3D integráciu systémov, a teda vytváranie kompaktných zariadení. Tieto vertikálne mikroštruktúry prepájajú viac vrstiev medzi sebou, a sú tiež využívané v integrovaných obvodoch a MEMS zariadeniach. Bakalárska práca sa zameriava na možnosť prípravy mikroprepojov mokrým anizotropným leptaním a suchým anizotropným leptaním využitím procesu hĺbkového reaktívneho iónového leptania (DRIE) pre využitie v MEMS. V práci sú uvedené kroky prípravy, leptania, pokovovania a galvanického vyplňania týchto štruktúr. Pomocou snímok z optického a rastrovacieho elektrónového mikroskopu (SEM), boli vyhotovené a vyhodnotené experimentálne testy a následná optimalizácia, pre vytvorenie dier s minimálnou veľkosťou približne 1 μm využitím mokrého leptacieho procesu a 16 μm suchým leptacím procesom. Najvyšší dosiahnutý pomer hĺbky k šírke na waferi bol 15:1. Okrem toho boli vytvorené diery pokovované a galvanicky vyplnené vodivým materiálom, ktoré sa elektricky otestovali a odmerali.

Kľúčové slová

Skrz kremíkové mikroprepoje, TSV, MEMS, mokré a suché anizotropné leptanie, roztok TMAH, RIE, DRIE, Bosch proces, deponovanie vodivých vrstiev, galvanické pokovovanie.

Abstract

Through-hole silicon vias are key technology enabling 3D system integration and thus creating compact devices. These vertical microstructures interconnect multiple layers and are also used in integrated circuits and MEMS devices. This bachelor's thesis focuses on the possibility of preparing these microjunctions by wet anisotropic etching and dry anisotropic etching using the deep reactive ion etching (DRIE) process for use in MEMS. The work shows preparation, etching, plating and galvanic filling of these structures. Using optical and scanning electron microscope (SEM) images, experimental tests and subsequent optimization were performed and evaluated to create a hole with a minimum size of approximately 1 μm using a wet etching process and 16 μm by a dry etching process. The highest achieved aspect ratio on a wafer was 15:1. In addition, the created holes were plated, galvanically filled with conductive material and electrically tested and measured.

Keywords

Through-hole silicon vias, TSV, MEMS, wet and dry anisotropic etching, TMAH solution, RIE, DRIE, Bosch process, deposition of conductive layers, galvanic filling.

Bibliografická citácia

DULÁK, Radovan. Mikroelektromechanické prepoje na kremíkovom substráte [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-06-01]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152258>. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedúci práce Ing. Jan Prášek, PhD.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta: *Radovan Dulák*

VUT ID študenta: *230468*

Typ práce: *Bakalárska práca*

Akademický rok: *2022/23*

Téma záverečnej práce: *Mikroelektromechanické prepoje na kremíkovom substráte*

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a 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 záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, predovšetkým som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Zb.

V Brne dňa: 1. júna 2023

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Janovi Práškov, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

Ďalej sa chcem poďakovať Ing. Petrovi Feckovi za čas, odbornú pomoc a rady v priebehu vypracovávaní bakalárskej práce.

Chcem sa tiež poďakovať mojim rodičom za podporu v priebehu vypracovávaní práce aj počas celej doby môjho štúdia.

V Brne dňa: 1. júna 2023

podpis autora



Experimentálna časť tejto práce bola vytvorená za podpory výskumnej infraštruktúry CzechNanoLab (ID LM2023051, MŠMT, 2023–2026), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.



MINISTRY OF EDUCATION
YOUTH AND SPORTS



European Union
European Regional
Development Fund
Investing in your future

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	10
ZOZNAM TABULIEK	12
ÚVOD	13
1. SKRZ KREMÍKOVÉ MIKROPREPOJE	14
1.1 DEFINÍCIA A PROCESY SPOJENÉ S TOUTO PROBLEMATIKOU	14
1.2 SÚČASNÝ STAV A SPÔSOBY VÝROBY PREPOJOV	18
2. KREMÍK A JEHO VLASTNOSTI	21
2.1 ŠTRUKTÚRA KREMÍKA	21
2.2 MILLEROVE INDEXY A UHLY MEDZI ROVINAMI	22
2.3 VÝROBA KREMÍKA A VLASTNOSTI DOSIEK	23
3. LITOGRAFIA A EXPOZÍCIA FOTOREZISTOV	25
3.1 SPIN COATING	25
4. LEPTANIE	27
4.1 MOKRÉ LEPTANIE	27
4.2 SUCHÉ LEPTANIE	28
4.3 IZOTROPNÉ LEPTANIE	29
4.4 ANIZOTROPNÉ LEPTANIE	30
5. ANIZOTROPNÉ MOKRÉ LEPTANIE	31
5.1 VYTVÁRANIE ŠTRUKTÚR ANIZOTROPNÝM MOKRÝM LEPTANÍM SI	31
5.2 VYTVÁRANIE DIER ANIZOTROPNÝM MOKRÝM LEPTANÍM	34
5.3 PROCES LEPTANIA SI	35
6. HĽBKOVÉ REAKTÍVNE IÓNOVÉ LEPTANIE	37
6.1 TECHNOLOGICKÉ A FYZIKÁLNE PROCESY PRI DRIE	37
6.1.1 Bosch proces	37
7. TENKÉ VODIVÉ VRSTVY, POKOVOVANIE	39
7.1 FYZIKÁLNA METÓDA DEPOZÍCIE	39
7.1.1 Technika systému tepelného (odporového) odparovania	39
7.1.2 DC (jednosmerné) naprašovanie	40
7.1.3 Odparovanie elektrónovým lúčom	40
7.1.4 Magnetronové naprašovanie	41
7.2 CHEMICKÁ METÓDA DEPOZÍCIE	42
7.2.1 Galvanické pokovovanie	42
8. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	44
8.1 POSTUP PRÍPRAVY MOTÍVU	45
8.2 PRÍPRAVA SUBSTRÁTU PRE ANIZOTROPNÉ LEPTANIE	45
8.3 NANESENIE REZISTU METÓDOU SPIN COATING	45
8.4 EXPOZÍCIA A VYVOLANIE FOTOREZISTU POMOCOU LASEROVEJ LITOGRAFIE	46

8.5	LEPTANIE SiO ₂ v BHF	48
8.6	MOKRÉ ANIZOTROPNÉ LEPTANIE Si v ROZTOKU TMAH	49
8.6.1	<i>Meranie rýchlosti leptania Si v roztoku TMAH</i>	<i>50</i>
8.6.2	<i>Zariadenie pre leptanie</i>	<i>51</i>
8.6.3	<i>Výsledky merania a leptania v 25% roztoku TMAH</i>	<i>52</i>
8.6.4	<i>Test reprodukovateľnosti veľkosti diery</i>	<i>56</i>
8.6.5	<i>Zhrnutie nameraných výsledkov mokrého leptania</i>	<i>58</i>
8.6.6	<i>Naparenie kovu na vytvorené diery</i>	<i>58</i>
8.6.7	<i>Snímky SEM vytvorených diery z mokrého leptania</i>	<i>59</i>
8.7	PRÍPRAVA SUBSTRÁTU PRE TESTY SUCHÉHO LEPTANIA	59
8.7.1	<i>Testovanie suchého leptania</i>	<i>61</i>
8.7.2	<i>Optimalizácia leptacieho procesu (výkon zdroja CCP)</i>	<i>63</i>
8.7.3	<i>Zmena prvého leptacieho procesu do fáz</i>	<i>65</i>
8.7.4	<i>Postupy a príprava wafera pre leptanie a pokovovanie</i>	<i>68</i>
8.7.5	<i>Zhrnutie nameraných výsledkov suchého leptania</i>	<i>72</i>
8.8	GALVANICKÁ VÝPLŇ OTVOROV Z MOKRÉHO/SUCHÉHO LEPTANIA	72
8.9	ELEKTRICKÉ TESTY VYTVORENÝCH MIKROPREPOJOV	75
9.	ZÁVER	77
	LITERATÚRA	79
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	86

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.1: Procesy via-first, via-middle a via-last s prepojami skrz kremík [4].	14
Obrázok 1.2: Možný výrobný proces pri realizácii kremíkových prepojev pomocou suchého DRIE leptania [5].	16
Obrázok 1.3: Vytvorený prekožený prepój kremíkového substrátu spoločnosťou Teledyne Micralyne [7].	18
Obrázok 1.4: Postup procesu výroby skrz kremíkových prepojev využitím BCB [10].	19
Obrázok 1.5: Výrobný proces skrz kremíkových prepojev použitím mikrodrôtov magnetickou montážou [13].	20
Obrázok 2.1: Jednotková bunka a konfigurácia tejto bunky [17].	21
Obrázok 2.2: Jednotková bunka kremíka, germánia a uhlíka – plošne centovaná [19].	22
Obrázok 2.3: Kryštalografické roviny a ich Millerove indexy [21].	23
Obrázok 2.4: Ilustrácia výroby kremíkových doštičiek Czochralského metódou [25].	24
Obrázok 2.5: Štandardné orientácie plátov pre rozdielne dopované substráty [28].	24
Obrázok 3.1: Postup krokov prípravy pre proces optickej litografie [32].	25
Obrázok 4.1: Proces mokrého leptania [36].	28
Obrázok 4.2: Proces suchého leptania reaktívnymi iónmi [37].	29
Obrázok 4.3: Rozdiel anizotropného a izotropného leptania [38].	29
Obrázok 5.1: Závislosť selektivity leptania v smere $\langle 100 \rangle$ s vrstvou SiO_2 na koncentrácii roztoku TMAH pri rôznych teplotách [26].	31
Obrázok 5.2: Závislosť rýchlosti leptania na koncentrácii roztoku TMAH pri rôznych teplotách [26].	32
Obrázok 5.3: Rez otvorom vytvorený anizotropným leptaním v substráte [42].	33
Obrázok 5.4: Nesprávne zarovnanie expozície s orientáciou substrátu.	34
Obrázok 5.5: Štruktúrny vzorec hydroxidu tetramethylamoniaku (TMAH) [47].	36
Obrázok 6.1: Bosch postup: a) vzorka s maskou, b) prvý leptací krok, c) depozičný krok, d) druhý leptací krok [54].	38
Obrázok 6.2: Vrúbkovanie na stenách dier spôsobené cyklovaným leptaním [55].	38
Obrázok 7.1: Schéma tepelného (odporového) evaporačného systému s držiakom na substrát na rotačnom planetárnom systéme [58].	40
Obrázok 7.2: Schematický jav odparovania elektrónovým lúčom [61].	41
Obrázok 7.3: Schematický diagram DC magnetronového naprášovania [63].	42
Obrázok 7.4: Schéma galvanického pokovovania [65].	43
Obrázok 8.1: Grafická schéma postupu prípravy mikroprepojev na kremíkovom substráte anizotropným mokrým leptaním.	44
Obrázok 8.2: Návrh motívu masky pre leptanie dier prepojev rozličnej veľkosti so zarovnávacími značkami.	47
Obrázok 8.3: Pripravené narezané, osvietené a vyvolané vzorky s rezistom.	47
Obrázok 8.4: Leptanie SiO_2 ponorom vzorky do roztoku BHF.	48
Obrázok 8.5: Rozmery otvoru v maske po expozícii a vyvolaní rezistu.	49
Obrázok 8.6: Vyleptaný otvor v substráte po 2 hodinách v 5% roztoku TMAH, pri teplote 90°C .	50
Obrázok 8.7: Časová závislosť hĺbky vyleptaného otvoru v 5% roztoku TMAH.	51
Obrázok 8.8: Zariadenie pre leptanie substrátov s výhrevom roztoku a miešaním.	52
Obrázok 8.9: Držiak pre leptanie vzoriek v PTFE nádobe.	52
Obrázok 8.10: Snímky vyleptaných otvorov po 60 minútových intervaloch.	53
Obrázok 8.11: Časová závislosť leptania Si na nameranej hĺbke otvoru v 25% roztoku TMAH pri 90°C ($T = 92^\circ\text{C}$, pri $t = 240$).	54

Obrázok 8.12: Časová závislosť podleptávania SiO ₂ vzdialenosti leptaných smerov v 25% roztoku TMAH pri 90 °C.	55
Obrázok 8.13: Snímka preleptaného otvoru po leptaní v čase $t = 378$ min s SiO ₂ membránou.....	56
Obrázok 8.14: Závislosť vyleptanej veľkosti otvoru na spodnej strane na počiatočnom návrhu na vrchnej strane substrátu ($T = 91,6$ °C; $t = 495$ min).	57
Obrázok 8.15: Pohľad na preleptanú dieru mokrým anizotropným leptaním (vľavo) zdola a (vpravo) zhora; (leptaná pyramídová časť je zdola).	58
Obrázok 8.16: Pokovované prepoje vrstvou titanu, medi a zlata.	58
Obrázok 8.17: Snímky SEM pokovovaných prepojov vyleptané anizotropne s vodivými vrstvami titanu, medi a zlata.	59
Obrázok 8.18: Predpripravená fotomaska použitá pri exponovaní.	60
Obrázok 8.19: Vyvolaný motív vo fotoreziste na waferi skrz masku.	60
Obrázok 8.20: Nalámané vzorky pripraveného wafera s fotorezistom.	61
Obrázok 8.21: Závislosť hĺbky vyleptaného otvoru na počte cyklov použitím prvotného nastaveného procesu.	62
Obrázok 8.22: Závislosť rýchlosti leptania otvoru na vyleptanej hĺbke.	63
Obrázok 8.23: SEM snímka leptu 16 μm dier s počtom 465 cyklov.	63
Obrázok 8.24: Leptané otvory použitím druhého procesu s rozdielom leptania približne 9,5 μm po 100 cykloch (300 cyklov vľavo, 400 cyklov vpravo).	64
Obrázok 8.25: Závislosť vyleptanej hĺbky na počte cyklov leptania procesom DRIE.	65
Obrázok 8.26: Závislosť hĺbky vyleptaného otvoru na počte cyklov leptania procesom DRIE v troch fázach menením výkonu CCP.	66
Obrázok 8.27: Výsledné preleptanie vzorky s hrúbkou 250 μm po 900 cykloch fázovaného procesu.	67
Obrázok 8.28: Zväčšenie otvoru v dôsledku podleptávania motívu (+4 μm z pôvodnej veľkosti 16 μm).	67
Obrázok 8.29: Vrúbkovanie bočných stien otvoru zapríčinené cyklovaným leptaním.	68
Obrázok 8.30: Grafická schéma postupu prípravy mikroprepojov na kremíkovom substráte suchým anizotropným leptaním.	69
Obrázok 8.31: Vrstva SiO ₂ na spodnej strane preleptaného substrátu a rozšírenie otvoru v dôsledku „notching efektu“.	70
Obrázok 8.32: Notching efekt spôsobený leptaním bočných stien odražaním iónov od vrstvy SiO ₂ 70	70
Obrázok 8.33: Snímok SEM preleptaného mikrootvoru o veľkosti 16 μm skrz 250 μm substrát.	71
Obrázok 8.34: Snímka SEM nadeponovanej vrstvy medi pre zárodok galvanickej výplne.	71
Obrázok 8.35: Elektrochemická depozičná stanica pre vytváranie vodivých vrstiev a výplní.	72
Obrázok 8.36: Proces nanášania vodivej vrstvy na vzorkách z mokrého leptania po časovom intervale (vľavo 0 s; stred 500 s; vpravo 2000 s, pri prúde 2 mA).	73
Obrázok 8.37: Nanesená vodivá vrstva a výplň anodizačnou hlavnicou v otvoroch vytvorenými procesom mokrého leptania.	73
Obrázok 8.38: SEM snímka lomu galvanicky pokoveného mikroprepoja vytvoreného mokrým leptaním (neideálny lom).	74
Obrázok 8.39: Snímka z optického mikroskopu vyplňaných dier, leptané suchým procesom DRIE po čase 126 minút vrchná strana a 50 minút spodná strana.	74
Obrázok 8.40: SEM snímka profilu z testu galvanicky pokoveného mikroprepoja z oboch strán vytvoreného suchým leptaním (neideálny lom).	75
Obrázok 8.41: Voltampérová charakteristika mikroprepoja vytvoreného mokrým leptaním.	76
Obrázok 8.42: Voltampérová charakteristika mikroprepoja vytvoreného suchým leptaním.	76

ZOZNAM TABULIEK

2.1	Vypočítané uhly medzi rovinami kubickej kryštalickej sústavy [24].	23
8.1	Parametre kremíkovej doštičky použitej pri mokrom leptaní.	45
8.2	Namerané hodnoty hĺbky otvorov po 60 minútových intervaloch	53
8.3	Vypočítané hodnoty hĺbky z nameraných hodnôt otvorov po 60 minútových intervaloch.	54
8.4	Vypočítané hodnoty dĺžky a rýchlosti leptaných smerov z nameraných hodnôt otvorov po 60 minútových intervaloch.	55
8.5	Súhrn nameraných a vypočítaných hodnôt rýchlosti leptania Si v rôznych smeroch pri teplote 91,6 °C.	58
8.6	Nastavené prvotné parametre pre proces DRIE, pri teplote 3 °C.	61
8.7	Namerané hodnoty hĺbky otvorov po nastavenom kroku cyklov.	62
8.8	Nastavené parametre v komore procesu DRIE pre prvú skúšku optimalizácie procesu, pri teplote 3 °C.	64
8.9	Nastavené parametre v komore procesu DRIE leptaním v troch fázach, menením výkonu zdroja CCP, pri teplote 3 °C.	66
8.10	Parametre leptania SiO ₂ v procese fluorového RIE.	69
8.11	Súhrn vypočítaných hodnôt leptacích rýchlostí pri procese suchého anizotropného leptania (Proces DRIE pri teplote 3 °C).	72

ÚVOD

V posledných rokoch sa veľkosť polovodičových zariadení dostáva k svojim limitám litografie a celkovej 3D integrácie, ktorá je kľúčovou technológiou budúcnosti mikrovýroby a miniaturizácii čipových súčiastok so zvýšenou výkonnosťou a citlivosťou snímačov. K riešeniu tohto problému prispieva návrh zhust'ovania zariadení do seba využitím skrz kremíkových mikroprepojov, ktoré umožňujú prepojenie mnohých vrstiev a zariadení priamo v 3D puzdre jednotlivého čipu. Toho sa obvykle dosahuje vytváraním prepojov pomocou suchého anizotropného leptania a výplňou dotovaným polykremíkom, ako vodivý prepoj namiesto kovového materiálu. Najväčšie využitie tohto spôsobu prepojenia má medzi integrovanými obvody alebo čipmi a mikroelektromechanickými zariadeniami (MEMS), ktoré predstavujú rôzne senzory, ovládače a mechanické komponenty o veľkosti niekoľko mikrometrov až milimetrov. Hlavným zameraním bakalárskej práce je výroba týchto mikroštruktúr využitím iných jednoduchších spôsobov, pri nedostupnosti niektorých technológií.

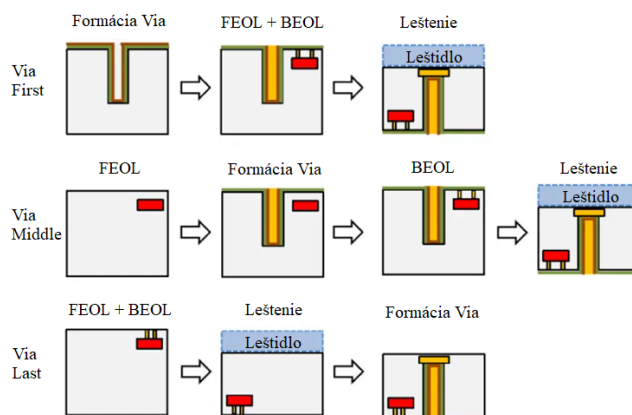
V prvej časti práce sú uvedené teoretické poznatky o skrz kremíkových mikroprepojoch, možnosti realizácie rôznymi spôsobmi leptania, a taktiež aj v akej forme a akým procesom sú v dnešnej dobe vyrábané. Ďalšia časť sa zaoberá štruktúrou kremíka, základnou kryštalografickou orientáciou a procesom výroby kremíkových substrátov. Kapitola 3 popisuje proces expozície substrátu podľa navrhnutého vzoru a vyvolanie masky. Časť teórie v kapitole 4 popisuje leptanie a jeho typy. Hlavnou časťou teórie je kapitola 5 a 6, v ktorých je popísané využitie jednoduchšieho procesu mokrého anizotropného leptania, vytvorenie procesu výroby prepojov malých rozmerov s vysokou hustotou integrácie a rovnako aj suché anizotropné leptanie, pri ktorom je možné dosiahnuť štruktúry veľmi malých rozmerov. Kapitola 7 predstavuje problematiku a spôsoby vytvárania vodivých vrstiev. V kapitole 8 sú zahrnuté celkové procesy výroby masiek na substráte a využitie SiO₂ vrstvy ako masku, pre mokré anizotropné leptanie a proces suchého leptania a jeho optimalizácia. V priebehu kapitoly sú uvedené namerané parametre procesu leptania a graficky spracované výsledky práce, ktoré boli dosiahnuté. Na vytvorených štruktúrach sa skúmali možnosti pokovovania, ktoré je v prvotnej časti potrebné urobiť naparením vodivého materiálu priamo na vyleptané otvory. Výplň galvanickým pokovovaním je popísaná na konci experimentálnej časti práce pre mechanickú stabilitu a vytvorenie elektrického prepojenia a vlastností.

1. SKRZ KREMÍKOVÉ MIKROPREPOJE

1.1 Definícia a procesy spojené s touto problematikou

Skrz kremíkové mikroprepoje (TSV – Through-hole Silicon Vias) sú štruktúry, ktoré elektricky prepojujú dve strany kremíkových doštičiek. Proces fabrikácie kremíkových prepojov môže byť rozdelený do troch krokov, a to: leptanie kremíka, oxidácia a vyplňovanie prepojov vodivým materiálom. V závislosti na špecifickú implementáciu, môže byť nanosená aj bariérová vrstva, typicky z tenkej vrstvy titanu, ešte pred vodivou výplňou prepojov v kremíkovom substráte. V závislosti od integračnej schémy sa tieto prepoje pohybujú o veľkosti od 5 mikrónov do niekoľkých desiatok mikrónov. Proces výroby integrovaných obvodov je štandardizovaný a je všeobecne rozdelený do dvoch špecifických fáz výroby: Front-End-Of-Line (FEOL), kde sa definujú tranzistorové zariadenia a Back-End-Of-Line (BEOL), kde sa definujú elektrické vodivé pripojenia. Proces vytvárania prepojov je bežne identifikovaný v závislosti na tom, kedy sa realizuje s ohľadom na dve hlavné procesné fázy. [1, 1]

Kremíkové prepoje sú primárnou substrátovou prepojovacou technológiou, ktorá sa používa na zabezpečenie elektrických spojení cez medzikus, substrát, aktívnu vrstvu a naskladané čipy v 2,5D/3D puzdrách. Tieto prepoje poskytujú rovnakú funkčnosť vertikálneho prepojenia ako v doskách plošných spojov, ale metodológia návrhu je úplne odlišná a musí byť navrhnutá na základe jej miesta vo výrobnom procese. V súčasnosti moderné integrované obvody používajú jediný typ kremíkových prepojov kvôli náročnosti v procesoch nanášania používaných na vytvorenie prepojenia popri naskladaných čipoch. Aj keď implementácia nie je príliš flexibilná, kremíkové prepoje umožnili škálovanie v 2,5D puzdrách a naskladali integrované obvody na postupne menšie puzdrá. Obrázok 1.1 schematicky ukazuje prierez kremíkového prepoja implementovaného v troch možných spôsoboch. Na týchto obrázkoch prepoj vytvára dlhé vertikálne spojenie skrz substrát a prípadne do viacerých vrstiev. [3]

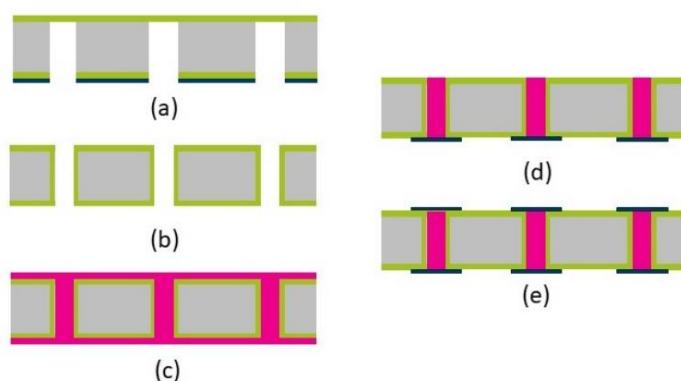


Obrázok 1.1: Procesy via-first, via-middle a via-last s prepojmi skrz kremík [4].

Kremíkové prepoje v 3D integrovaných obvodoch môžu byť navrhnuté a spracované v troch možných metódach:

- **Via-first:** Najprv sa vytvorí prepój pred umiestnením komponentov alebo spojovacích blokov na vrch spoja. V prepóji sa naniesie kovová vrstva a štruktúra sa tým uzavrie. Substrát sa zbrúsi a pokovuje sa druhá strana na vytvorenie spoja do iných vrstiev. Hlavným problémom tohto spôsobu je kompatibilita štruktúr s vysokoteplotnými procesmi, ktoré sú bežne používané pri fabrikácii tranzistorov, až do 1000°C. [1, 3]
- **Middle-via:** Prepoje sa pri tomto spôsobe vytvoria až po umiestnení integrovaných obvodov alebo iných mikroelektromechanických štruktúr (MEMS), teda sú vytvorené medzi začiatočným a koncovým procesom výroby (FEOL a BEOL procesmi). Slepé, zapustené alebo prepoje skrz substrát môžu byť použité v tomto procese.
- **Via-last:** Z názvu je jasné, že prepoje sa vytvárajú až ako posledné, po naskladaní čipov, nazývané aj zadný kremíkový prepój. Vytvárajú sa dlhé prepoje skrz substrát spolu s puzdrom. Tento proces nevlýva na pokovovanie a nevyžaduje si odhalenie priechodov pri brúsení substrátu. [1, 3]

Možná implementácia TSV procesu je zobrazená na obrázku 1.1. Prvý krok (a) je leptanie prepójov, čo je typicky realizované pomocou suchého anizotropného leptania cez Deep Reactive Ion Etching (DRIE) a následná pasivácia (b). Rýchlosť leptania je veľmi citlivá na pomer strán otvoru. Po leptaní sa využíva elektrochemické nanášanie medi na vytvorenie zárodočnej vrstvy a štruktúra je vytvorená galvanickým pokovovaním (c). Pomer strán priamo obmedzuje minimálnu veľkosť prepója pre danú hrúbku kremíkoveho substrátu. S vývojom procesov vo výrobe a využívanie DRIE Bosch procesu fluoridom sírovým (SF₆), je možné vytvoriť 500 μm hlboké diery pri pomere strán s hodnotou 80 a kruhové prepoje s pomerom strán väčším ako 20. S takouto technikou procesu je možné vytvoriť prepoje skrz substrát s minimálnou veľkosťou 6 μm a kruhové prepoje s priemerom 25 μm v 500 μm hrubej kremíkovej doštičke. Pri aplikáciách, ktoré vyžadujú menšie veľkosti prepójov, je potrebné použiť tenšie doštičky alebo proces s vytvorením slepých prepójov, ktoré sú potom otvorené na druhej strane doštičky brúsením (d) a nakoniec na naniesú vodivé kovové vrstvy pre kontakty (e). [1, 3]



Obrázok 1.2: Možný výrobný proces pri realizácii kremíkových prepojov pomocou suchého DRIE leptania [5].

Pre integrovanie skrz kremíkových prepojov vo výrobe MEMS zariadení je potrebné porozumieť základným kľúčovým výrobným krokom TSV. Prepoje musia byť elektricky izolované, aby sa predišlo elektrickým skratom do objemu kremíkovej doštičky. Je nutné aby dielektrická vrstva bola nanosená na steny vytvorených prepojov, a teda je aj nutné aby bol implementovaný konformný proces. Rast kremíkovej oxidovej vrstvy cez mokrá alebo suchú oxidáciu je bežným riešením pre kremíkové doštičky, ktoré by mohli zvládnuť proces pri vysokej teplote, napríklad využitím via-first procesu. Vo veľa aplikáciách by teplota takéhoto procesu mohla byť problémová, a nízkotepelné riešenia, ktoré sa bežne používajú, sú pri technikách fyzikálnej a chemickej depozície (PVD – Physical Vapor Deposition a CVD – Chemical Vapor Deposition). Tieto depozičné nástroje musia byť optimalizované, aby sa predišlo akejkoľvek nežiadúcej akumulácii dielektrického materiálu, ktorý by mohol vytvoriť problémy v následnom procese vyplňovania prepojov. Možným riešením je použitie depozície atómovej vrstvy (ALD), ktorá garantuje vytvorenie uniformnej a konformnej vrstvy so širokým rozsahom použitia možných materiálov. Avšak, nevýhodou je extrémne nízka depozičná rýchlosť. [1]

Podobné výrobné kroky sú neskôr použité pri výplni vodivými materiálmi. Hlavnou výzvou pri výplni, je dosiahnutie výplne bez vzduchovej medzery alebo takzvaného „voidu“. Neuniformná depozícia by mohla vytvoriť nekompletnú výplň, ktorá by drasticky zvýšila rezistivitu spoja, a teda by zvýšila spotrebu energie a teplotu zariadenia. Najbežnejšie používané techniky sú polysilikónové výplne založené na CVD technikách a galvanické pokovovanie. Polysilikónová vrstva deponovaná na vyplnenie prepoja musí byť nadopovaná pre zníženie rezistivity a typ dopantu musí byť prispôbené zariadeniu, aby sa získal vhodný ohmický kontakt, a aby sa zabránilo nežiadúcim PN prechodom. [1]

Lepšie vyhotovenie z hľadiska rezistivity sa získava kovovou výplňou TSV. Najviac využívaný kov je meď, kvôli kompatibilite s technológiou galvanického pokovovania. Tento spôsob použitia spočíva najprv v depozícii vodivej uniformnej zárodkovej vrstvy, ktorá je následne použitá v procese galvanického pokovovania ako elektróda. Existujú tri spôsoby ako vyplniť prepoje, a to konformným rastom vrstvy, rastom zospodu nahor

a kombinácia týchto dvoch spôsobov. Rýchlosť depozície je definovaná hustotou prúdu počas depozície. Špecifická topografia kremíkovej doštičky a neideálnych podmienok by mohla vyvolať neuniformný rast kovovej vrstvy. Aditíva, ktoré pomáhajú vylepšiť elektrónovú mobilitu v roztoku, boli vytvorené na zlepšenie a akcelerovanie vyplňania kovovej vrstvy, hlavne pre slepé prepoje. Avšak, proces pokovovania meďou je dlhý a vyžaduje nastavenie parametrov, ktoré by mohli mať vplyv na cenu procesu. Rozličná implementácia využíva CVD a wolfrám namiesto galvanického pokovovania meďou. Wolfrám má oproti medi nižšiu vodivosť a má podobnú teplotnú rozťažnosť ako kremík, čo zvyšuje spoľahlivosť TSV. [1]

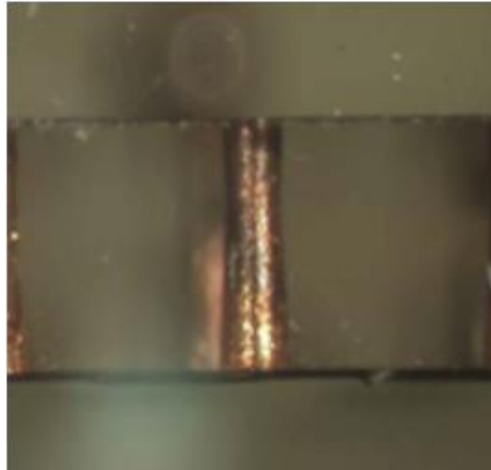
Ako už bolo spomínané, TSV by mohli byť skrz celý kremíkový plát, ale taktiež by mohli byť realizované ako nekompletné vyleptanie, tzv. slepé diery. Existujú dva dôvody na implementáciu slepej TSV, za prvé, požiadavky z hľadiska pomeru strán a hustoty aplikácie sú veľmi vysoké alebo prepoje v kremíku musia byť elektricky prepojené na špecifickú vrstvu, už predtým vytvorenú, t.j. via-last. Chemicko-mechanickým leštením je následne kremíková doštička stenčovaná pre odhalenie vytvorených slepých prepojov a vytvorenie elektrického kontaktu. [1]

Každý prepoj vytvára elektrické aj mechanické neideálnosti, čo by mohlo ovplyvniť činnosť zariadenia. Požiadavky na prepoje sa môžu celkom líšiť, čo závisí na konkrétnej aplikácii. Pamäť a logické obvody, vyžadujú vo všeobecnosti, vysoký počet prepojov s jemným rozstupom a vysokou šírkou pásma. Zatiaľ čo požiadavky pre MEMS senzor závisia na špecifickom implementovanom transdukčnom mechanizme, ale sú vo všeobecnosti menej striktné z hľadiska elektrickej výkonnosti. Pre väčšinu senzorových dizajnov existujú dva parametre, ktoré majú významný vplyv na výkon: sériový odpor, ktorý je rozdelený na dva (R_{TSV}) a parazitná kapacita voči zemi (C_{par}). Odpor je definovaný dizajnom prepoja, t.j. plochou a dĺžkou prepoja a rezistivita vodivého materiálu. Parazitná kapacita závisí na ploche okolo prepoja, hrúbke izolačného materiálu a dielektrickej konštante súvisiacej s konkrétnym materiálom, typicky SiO_2 . Výsledný ekvivalentný obvod predstavuje dolný filter, ktorého medzná frekvencia závisí na oboch hodnotách. [1]

Boli skúmané rôzne spôsoby ako vylepšiť funkčnosť prepojov. Sériový odpor by mohol byť vylepšený použitím materiálu s vyššou vodivosťou. Súčasná realizácia vysoko výkonných prepojov využíva galvanické pokovovanie meďou, ktorá má extrémne dobrú vodivosť. Práve preto bola väčšina úsilia zameraná na zníženie parazitnej kapacity, ktorá je priamo spojená s geometriou a materiálovými vlastnosťami izolačnej vrstvy. Oxidačná vrstva má určité pnutie, ktoré limituje maximálnu hrúbku vrstvy. Bežné riešenie, využívané taktiež v magnetickej montáži mikrodrôtov, používa polymérny materiál benzocyclobuténu (BCB), používaný taktiež na spojenie drôtov v mieste. [1]

1.2 Súčasný stav a spôsoby výroby prepojení

Spoločnosť ako Teledyne Micralyne Inc. (Kanada), vytvára elektrické spojenie medzi vrstvami leptaním diery prepojení, selektívnou vrstvou izoláciou a výplňou vodivým polysilikónom alebo kovom ako je zlato, striebro a meď. Vytvorená štruktúra obsahuje hlboko vyleptané kremíkové diery, izolačné alebo uzemňovacie prepoje, polysilikónovú alebo kovovú výplň a možnosť integrácie naskladaných Silicon On Insulator (SOI) doštičiek. Na obrázku 1.3 je zobrazený kremíkový prepoj touto spoločnosťou. [6]



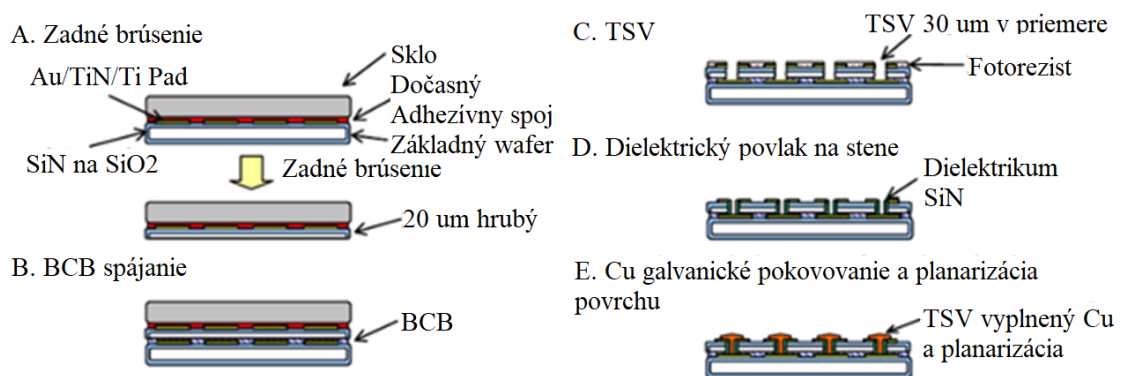
Obrázok 1.3: Vytvorený prekovený prepoj kremíkoveho substrátu spoločnosťou Teledyne Micralyne [7].

Ďalšie spoločnosti ako Alchimer Ltd. (Francúzsko), demonštrovala niekoľko rôznych elektroštepných procesov elektroštep pre použitie v prepojiach. Prvotným krokom je polymerizácia 4-vinylpyridínových monomérov prítomných vo vodnom roztoku. Výsledný polymér vytvára kovalentnú väzbu, ktorá vytvorí konformný povlak s vynikajúcou priľnavosťou. Predbežné testy ukazujú, že polymér sám o sebe je sľubná difúzna bariéra. Samostatná difúzna bariéra sa môže naniesť aj na polymér. Elektroštepna medená zárodková vrstva, vytvára základ pre medenú výplň, ktorá môže byť nanosená aj konvenčným elektrochemickým nanášaním. Ako vodný proces je elektroštepnie vo svojej podstate konformný. Spoločnosť Alchimer preukázala úspešné vyplnenie TSV s pomermi strán až 30:1. Proces je tiež vo svojej podstate lacnejší ako suché integračné schémy založené na PVD. Úspory sú do značnej miery spôsobené zníženými nákladmi na vybavenie. [1]

Pre ďalší príklad, Okmetic vytvára TSV metódou via-first, leptaním obojstranne leštených kremíkových (DSP) doštičiek a potom použitím termálnej oxidačnej izolácie a výplne prepoja/diery polysilikónom dopovaný bórom ako prepojovacím materiálom. Prepoje sú tak integrované do substrátu a výrobcovia zariadení ich len musia odhaliť spätným brúsením alebo inou metódou. Doštičky DSP s prepojmi je tiež možné kombinovať s doštičkami silicon on insulator (SOI) a dajú sa spájať aj bežne používanými

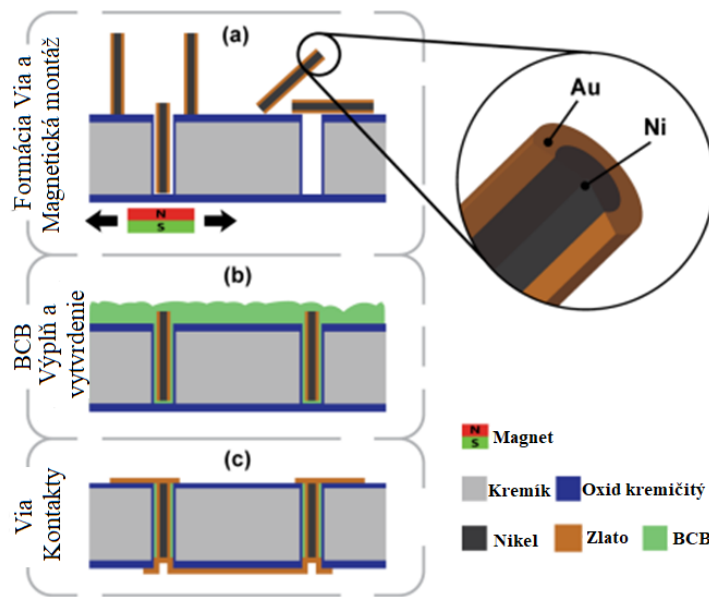
metódami, a to anodicky alebo pokovovaním. Prepoje vytvorené takýmto spôsobom sú kompatibilné s vysokoteplotnými procesmi a ich čistota splne spĺňa výrobné štandardy CMOS. [8]

Vytvorená bola taktiež výrobná technológia substrátu na substrát (WOW – wafer on a wafer) s mikroeletromechanickými štruktúrami (MEMS), kde je substrát naskladaný na základnú kremíkovú doštičku adhéznou vrstvou benzocyklobuténu (BCB, CYCLOTENETM). Naskladané Si doštičky na základnej doštičke sa stenčia brúsením na hrúbku 20 μm , aby sa znížil pomer strán TSV. Opakovanie rovnakých procesov vedie k 3D integrácii s vysokou hustotou. Technológia trojrozmerného prepojenia bola vyvinutá najmä pre polovodičové súčiastky, no táto technológia je veľmi dôležitá aj pre produkty MEMS. Elektrické prepojenie medzi zariadeniami MEMS a ich balením často vedie k zväčšeniu veľkosti čipu. Preto metóda skladania s BCB na úrovni veľkosti doštičiek a prepojenie pomocou TSV s výplňou medi Cu spĺňa požiadavky na produkty MEMS a ponúka flexibilný spôsob balenia s procesnou kompatibilitou MEMS. Proces tejto výroby je uvedený na obrázku 1.4. Vrstva BCB slúži aj ako dielektrická vrstva medzi horným a spodným substrátom. Priechody sa vytvorili pomocou hlbokým reaktívnym iónovým leptaním (DRIE). [9]



Obrázok 1.4: Postup procesu výroby skrz kremíkových prepojov využitím BCB [10].

Ďalší spôsob vytvárania kremíkových prepojov s vysokým pomerom strán, je uvedený na obrázku 1.5. Pomocou magnetickej montáže v kroku (a), výplň polymérom benzocyklobuténom (BCB) a vytvrdzovanie v kroku (b), leštenie substrátu a tvorenie prepojových kontaktov v kroku (c). S touto technológiou boli demonštrované prepoje s dĺžkou až 465 μm , s vysokým pomerom strán o veľkosti 24:1. V práci boli charakterizované aj vysokofrekvenčné parametre použitím magnetickej montáže niklovými drôtmí, ktoré sú nanesené vrstvou zlata. Tento postup eliminuje potrebu komplikovaného procesu pokovovania alebo brúsenie kremíkových doštičiek, čo má za následok rýchlejší a efektívnejší výrobný proces. [11] Rovnaký proces s podobným postupom bol použitý aj v publikácii [12].



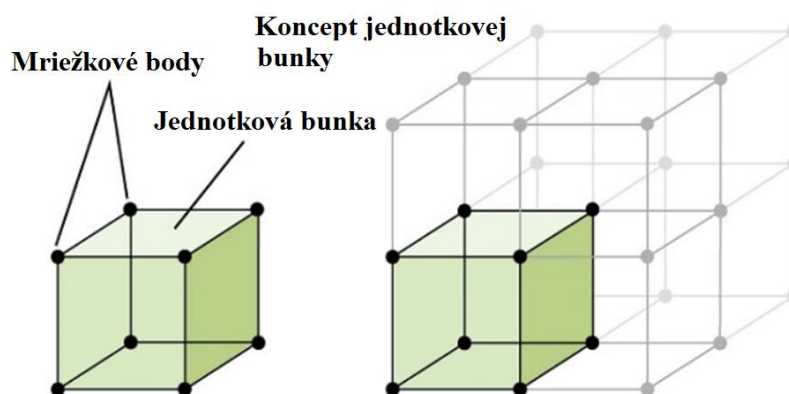
Obrázok 1.5: Výrobný proces skrz kremíkových prepojov použitím mikrodrôtov magnetickou montážou [13].

Publikácie [14, 15] sa zaoberajú vytváraním TSV pomocou DRIE, depozície izolačnej vrstvy, vytvorenie zárodkovej vrstvy pre pokovovanie. Na celkové vodivé prepojenie používajú dielektrickú alebo bariérovú vrstvu nitridu kremičitého Si_3N_4 , použitím chemickej depozície parou s použitím plazmy alebo vrstvu nitridu tantalu TaN, deponovanú reaktívnym naprašovaním. Pre bariéru je možné použiť aj platínu Pt, kde sa na túto vrstvu deponuje vodivá vrstva medi Cu.

2. KREMÍK A JEHO VLASTNOSTI

2.1 Štruktúra kremíka

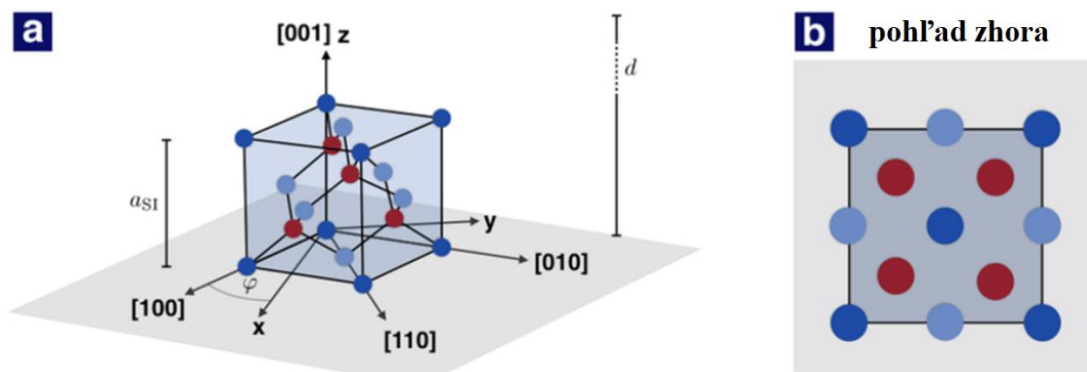
Hmota bez pravidelného usporiadania atómov sa nazýva amorfná alebo nekryštalická. Hmota zložená z atómov usporiadaných do jednotného definitívneho vzoru s opakujúcou sa štruktúrou (jednotnej bunky) sa nazýva kryštál. V jednom kryštáli sú všetky bunkové jednotky identické a orientované rovnakým spôsobom, a teda tieto parametre sú fixné. Opačné strany jednotkovej bunky sú paralelné. Okraj jednotnej bunky spája ekvivalentné body a výsledná štruktúra vytvára mriežku (Obrázok 2.1). [16]



Obrázok 2.1: Jednotková bunka a konfigurácia tejto bunky [17].

Mriežka je opakovaním jednotkových buniek a pri pohľade z rôznych uhlov je vidieť rôzne geometrie alebo vzory. Pre jednotkové bunky existuje niekoľko rôznych konfigurácií. Základná bunka pre kremík (Si), germánium (Ge) a uhlík (C) je znázornená na obrázku 2.2, čo je diamantová kubická štruktúra. Diamantovú mriežku možno vnímať ako pár pretínajúcich sa plošne centrovaných kubických mriežok, v ktorej atómy zaberajú všetky rohy a stredy strán kockovej elementárnej bunky s dĺžkou hrany 5,43 Å. Uhol medzi dvoma väzobnými atómami kremíku je $109,5^\circ$ a vzdialenosť medzi centrami dvoch väzaných atómov je 2,35 Å. Táto základná bunka sa môže rôznymi spôsobmi kombinovať s inými bunkami. Keďže atómy kryštálu do seba opakovane zapadajú a sú spolu držané silnými elektrickými väzbami medzi nimi, kryštály sú zvyčajne veľmi silné. [16, 18]

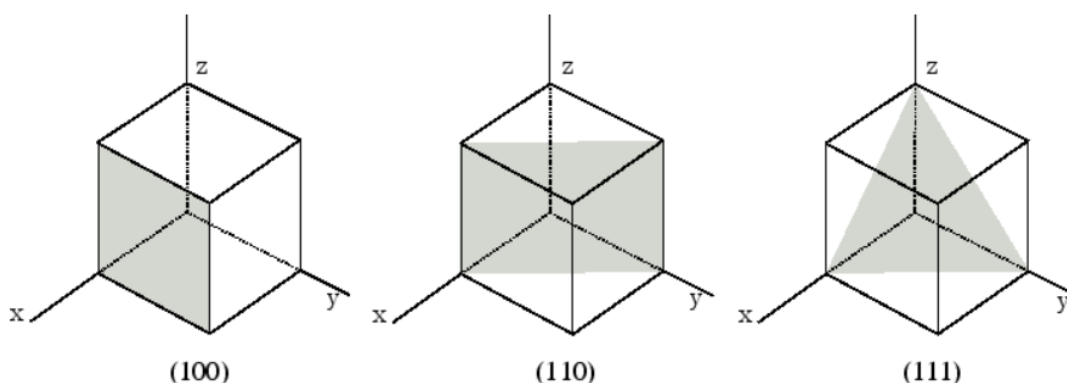
Orientácia kryštálu kremíka označuje, ktorá kryštalová rovina je odhalená na povrchu kremíkoveho plátu. Povrchové vlastnosti kremíkoveho monokryštalického plátu sa líšia v závislosti od orientácie mriežky vzhľadom na povrch kremíkoveho plátu. Otvplyvňuje to vlastnosti, počet atómov na povrchu, vodivosť a reakčný potenciál. Závisí od toho napríklad aj schopnosť leptania kryštálu kremíka v hydroxide draselnom (KOH) alebo hydroxide tetramethylamoniaku (TMAH). Kryštál kremíka má aj iné ohybové vlastnosti v závislosti od orientácie na aplikované napätie. [16]



Obrázok 2.2: Jednotková bunka kremíka, germánia a uhlíka – plošne centrovaná [19].

2.2 Millerove indexy a uhly medzi rovinami

Millerove indexy sú skupiny troch čísel, ktoré označujú orientáciu roviny alebo súbor rovnobežných rovín atómov v kryštáli. Ak je každý atóm v kryštáli reprezentovaný bodom a tieto body sú spojené čiarami, výsledná mriežka môže byť rozdelená na niekoľko identických blokov alebo jednotkových buniek. Pretínajúce sa hrany jednej zo základných buniek definujú množinu kryštalografických osí a Millerove indexy sú určené priesečníkom roviny s týmito osami. Vypočítajú sa recipročné hodnoty týchto priesečníkov a zlomky sa odstránia, čím sa získajú tri Millerove indexy (hkl) . Napríklad rovina rovnobežná s dvoma osami pretínajúca tretiu osu v dĺžke rovnajúcej sa jednej hrane jednotkovej bunky má Millerove indexy (100) , (010) alebo (001) , v závislosti od rezu osi. Rovina pretínajúca všetky tri osi v dĺžkach rovnajúcich sa okrajom jednotkovej bunky má Millerove indexy (111) . V hexagonálnom systéme, ktorý má štyri kryštalografické osi, sa používa podobná schéma štyroch Bravais-Millerových indexov. Zápis $[hkl]$ s hranatými zátvorkami označuje smer na báze mriežkových vektorov. Označenie všetkých rovín, ktoré sú symetriou kryštálu sa označuje $\{hkl\}$ a je ekvivalentné (hkl) . Podobne zápis $\langle hkl \rangle$ označuje všetky smery, ktoré sú symetriou ekvivalentné $[hkl]$. V kubických kryštálových systémoch sú Millerove indexy roviny rovnaké ako v smere kolmom na rovinu. [18, 20]



Obrázok 2.3: Kryštalografické roviny a ich Millerove indexy [21].

Millerove indexy predstavujú normálový vektor, ktorým vieme vypočítať uhol medzi dvoma zvolenými rovinami. Pre kubické kryštály za použitia vektorov \vec{u} a \vec{v} platí vzťah:

$$\cos\varphi = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}||\vec{v}|} \quad (2.1)$$

kde $\vec{u} \cdot \vec{v}$ je skalárny súčin vektorov a $|\vec{u}| = \sqrt{\vec{u} \cdot \vec{u}}$ je veľkosť vektora. [22] Vypočítané uhly medzi kryštalografickými rovinami sú uvedené v tabuľke 2.1.

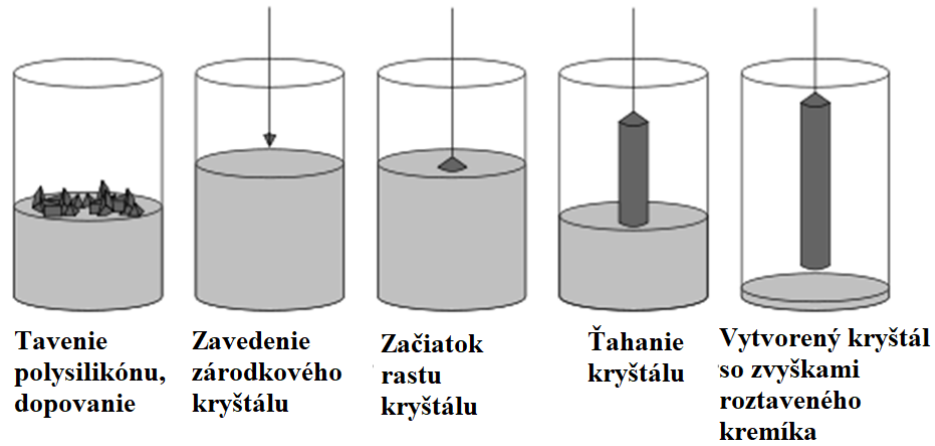
Tabuľka 2.1 Vypočítané uhly medzi rovinami kubickej kryštalografickej sústavy [23].

Uhol φ	(100)	(110)	(010)	(001)	(101)
(100)	0	45,0	90,0	90,0	45,0
(011)	90,0	60,0	45,0	45,0	60,0
(111)	54,7	35,3	54,7	54,7	35,3
(211)	35,2	30,0	65,9	65,9	30,0
(311)	25,2	31,4	72,4	72,4	31,4
(511)	15,8	35,2	78,9	78,9	35,2
(711)	11,4	37,6	81,9	81,9	37,6

2.3 Výroba kremíka a vlastnosti dosiek

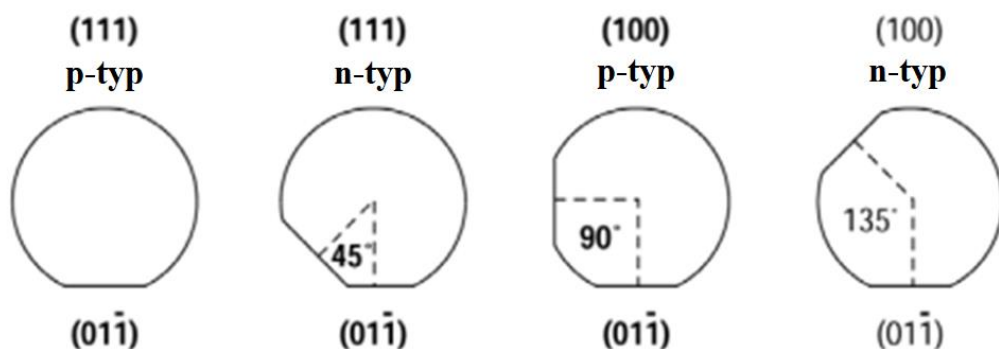
Kremíkové pláty sa vytvárajú z monokryštalického kremíku, ktorý sa vyrába použitím Czochralského metódy, kde je použitý grafitový kotol a vysoko čistá kremenná nádoba, do ktorej sa vložia polykryštály kremíka s dopantom a s ťahacím zariadením kryštálov. Roztavia sa pri teplote 1420 °C a úpravou obsahu dopujúcich látok je možné získať doštičky s rôznymi typmi vodivosti a rezistivity. Po stabilizácii teploty sa do nich pomaly vloží tyč so zárodkom kryštálu a otáčaním a ťahaním tyče nahor konštantnou rýchlosťou rastie jeden celý kryštál (Obrázok 2.4). Na začiatku kryštálu sa vytvorí zúženie, aby sa odstránili dislokácie vytvorené v priebehu rastu kryštálu. Po tomto procese sa rýchlosť

ťahania a teplota upraví tak, aby sa zväčšil priemer monokryštálu na cieľovú hodnotu a dĺžku pri rovnakom priemere. Nakoniec sa monokryštalický ingot zakončí chvostom a hotový kryštál sa po ochladení vyberie. [24]



Obrázok 2.4: Ilustrácia výroby kremíkových doštičiek Czochralského metódou [25].

Vonkajší obvod ingotu je brúsený na jednotný priemer a následne sa nareže na vhodnú dĺžku a tenké plátky kruhového tvaru. Po úpravách brúsením, lapovaním, leptaním a leštením sa vytvoria plátky o hrúbke približne 100-500 μm , čo závisí na veľkosti priemeru. Na vytvorených keramických substrátoch môže byť aj vytvorená vrstva oxidu kremičitého podľa potrieb a použitia. Orientácia doštičiek sa vytvára vložением zárodka s potrebnou orientáciou a množstvom prímiesí pri dotovanom kremíku do taveniny. Orientácia výsledných doštičiek sa vyznačuje hlavnou a primárnou fasetou, čo je zárez na okrajoch. Toto značenie je možné vidieť na obrázku 2.5 a nezobrazuje skutočnú veľkosť. [24, 26, 27]



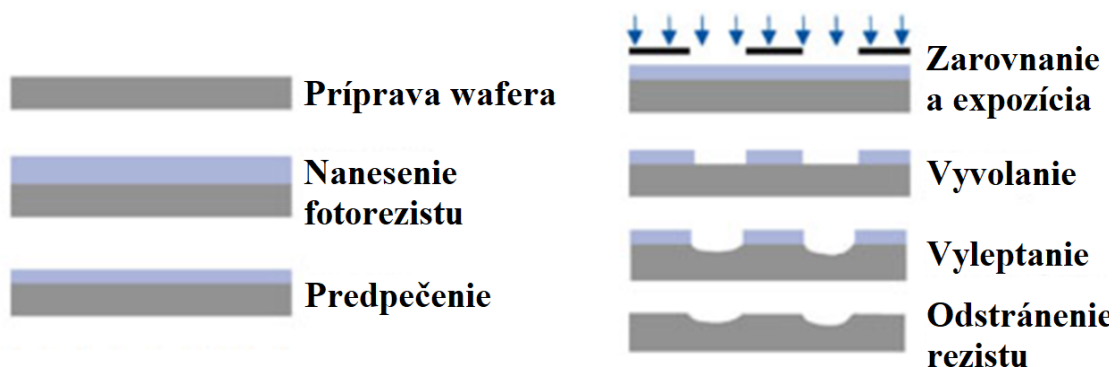
Obrázok 2.5: Štandardné orientácie plátov pre rozdielne dopované substráty [28].

3. LITOGRAFIA A EXPOZÍCIA FOTOREZISTOV

Litografia sa používa na transformačný prenos vzorov z fotomasky na povrch kremíkového substrátu. Informácia vzorov je zaznamenaná na vrstve fotorezistu, ktorý je nanesený na vrchnej strane doštičky. Po všetkých procesoch vznikne mikrorepoj o veľkosti niekoľko mikrometrov na spodnej strane. Vzor je definovaný maskou, ktorá sa buď odstráni alebo zostane po vyvinutí v závislosti od toho, či je typ rezistu pozitívny alebo negatívny. [29]

Techniky fotolitografie aplikované na nanolitografiu sú veľmi podobné konvenčnej litografii na výrobu obrazov a tlač. Fotolitografia sa bežne používa na výrobu počítačových čipov. Fotorezist mení svoje fyzikálne vlastnosti, keď je vystavený svetlu, často ultrafialovému alebo inému zdroju svetla ako röntgenové žiarenie. Použitím masky na selektívne vystavenie rezistu svetlu tak začnú exponované plochy tvrdnúť v prípade negatívneho rezistu alebo rozbíjať štruktúru v prípade použitia pozitívneho rezistu. Mäkké oblasti sú potom chemicky odleptané. Tento proces umožňuje súčasne vytvoriť stovky čipov na jeden kremíkový plát. Fotolitografiu možno použiť na vytváranie prvkov s veľkosťou až 50 nm. [29, 30]

Všeobecný postup krokov pre typický proces optickej litografie je nasledovný: príprava substrátu, spin coating, predpečenie, zarovnanie a expozícia, vyvolanie. Odstránenie rezistu je poslednou operáciou v litografickom procese po prenesení rezistového vzoru na substrát pri leptaní alebo iónovej implantácii. [31]



Obrázok 3.1: Postup krokov prípravy pre proces optickej litografie [32].

3.1 Spin coating

Vo všeobecnosti, spin coating zahŕňa aplikáciu tenkej vrstvy rovnomerne po celej ploche substrátu nalieváním roztoku požadovaného materiálu v rozpúšťadle počas toho ako sa otáča. Kvapalina sa naniesie na rotujúci substrát, aby vytvorila tenký film pevného materiálu, ako je polymér. Rotácia substrátu vo vysokej rýchlosti, zvyčajne viac ako 600 rpm, spôsobí že odstredivá sila spojená s povrchovým napätím roztoku, vytvorí

rovnomerný povlak. Počas toho ako sa točí, roztok sa vyparuje a zanecháva rovnomerne požadovaný materiál na substráte. Hrúbka výslednej vrstvy je ovplyvnená množstvom parametrov. Pri spracovaní rezistu sa kladie dôraz hlavne na rýchlosť rotácie a viskozitou roztoku. Dynamické nanášanie sa používa pri aplikácii roztoku na roztočený substrát a pred roztočením sa nazýva statické nanášanie roztoku. [33]

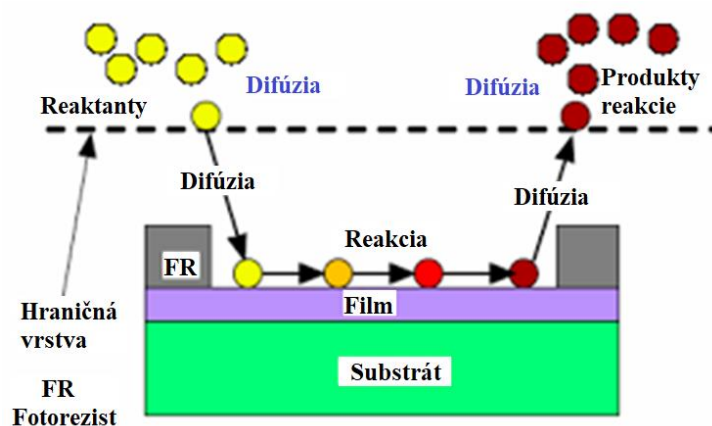
Po vyvolaní rezistu na substráte, môže vzniknutý vzor slúžiť ako ochranná leptacia maska a môže slúžiť aj ako maska pre deponovanie kovovej vrstvy, čo je spôsob aditívneho vytvárania štruktúr metódou lift-off. Deponovaná vrstva pokryje exponované miesta a aj okolitý rezist. Následne je rezist odstránený organickým rozpúšťadlom a odplaví sa s ním aj nanosená kovová vrstva rezistu. Deponovaná vrstva kovu zostáva iba na exponovanej časti rezistu na substráte, čo vytvorí kovové štruktúry.

4. LEPTANIE

Leptanie je proces používaný pri mikrovýrobe, ktorý pozostáva z odstránenia jednej alebo viacerých vrstiev materiálu z povrchu doštičky. Je to kritický a mimoriadne dôležitý krok pri výrobe mikroelektronických komponentov, pretože každý plátok môže prejsť mnohými krokmi leptania. Pri mnohých krokoch leptania je časť plátka chránená pred leptacím činidlom takzvaným maskovacím materiálom, ktorý je odolný voči leptaniu. V niektorých prípadoch je maskovacím materiálom fotorezist, ktorý bol modelovaný fotolitografiou. Iné situácie vyžadujú odolnejšiu masku, ako je nitrid kremičitý. Ak sa leptanie vykonáva na vytvorenie dutiny v materiáli, hĺbka dutiny môže byť kontrolovaná okrem iného modulovaním doby leptania a rýchlosti leptania. Leptanie však zvyčajne vyžaduje odstránenie celej vrchnej vrstvy viacvrstvovej štruktúry bez poškodenia podkladových alebo maskovacích vrstiev. Schopnosť leptacieho systému odstrániť celú vrchnú vrstvu týmto spôsobom, závisí od pomeru rýchlostí leptania v dvoch materiáloch, čo znamená selektivita. Dva základné typy leptacích činidiel, sú v kvapalnej a plazmovej forme. [34]

4.1 Mokrú leptanie

Mokrú leptanie je najzákladnejším procesom, ktorý chemicky odstraňuje látky pomocou kvapalného reaktantu (Obrázok 4.1). Môže to byť chemikália, ktorá rozpúšťa leptaciu látku alebo chemická zmes, ktorá najskôr oxiduje tkaninu a potom rozpúšťa oxid. Chemické leptanie sa vykonáva ponorením vzorky do nádoby s leptacím roztokom. Čiastočne chránený substrát sa ponorí do roztoku, ktorý následne chemicky naleptá povrch exponovaného substrátu. Zvyčajne je to silnejšia kyselina, ako je kyselina fluorovodíková pre oxid kremičitý, ktorá je jediná schopná s ním interagovať. Mokrú leptanie sa často používa kvôli svojej selektivite. Mnohé mokré lepty sú vysoko selektívne, pokiaľ ide o materiály, s ktorými pracujú. S vysokou selektivitou je možné použiť tenšie masky a schopnosť náhle zastaviť leptanie na vrstve pod leptanou vrstvou. Keďže sa maska často používa na selektívne leptanie materiálu, vyžaduje si to použitie masky, ktorá sa nerozpúšťa alebo aspoň leptá oveľa pomalšie ako látka, ktorá sa leptá. Mokrú leptadlá sú zvyčajne izotropné, čo má za následok veľké vychýlenie pri leptaní hrubých filmov. Niektoré monokryštalové materiály, ako je kremík, podliehajú anizotropnému leptaniu v určitých chemikáliách. Pri mokrom leptaní sa tiež vyžaduje likvidácia obrovského množstva toxického priemyselného odpadu, čo je značnou nevýhodou. [35]

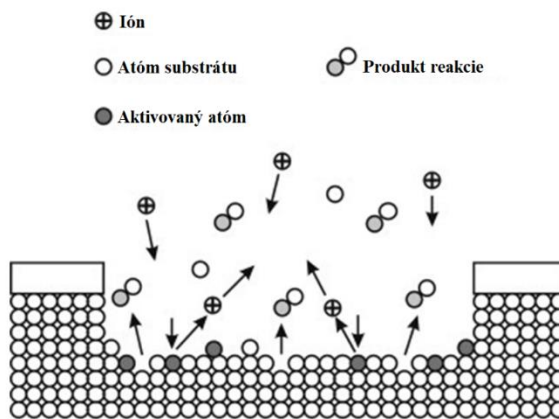


Obrázok 4.1: Proces mokrého leptania [36].

4.2 Suché leptanie

V procese plazmového leptania, tiež známeho ako suché leptanie, sa na odstránenie materiálu zo substrátu používa plazma alebo leptacie plyny. Suché leptanie vytvára plynné produkty, ktoré musia difundovať do objemového plynu a byť vytlačené vákuovým systémom. Existujú tri typy suchého leptania: chemické reakcie (pomocou plazmy alebo reaktívnych plynov), fyzikálne odstraňovanie (zvyčajne prenosom hybnosti) a kombinácia chemických reakcií a fyzikálneho odstraňovania. Mokré leptanie je na druhej strane iba chemický proces. [34]

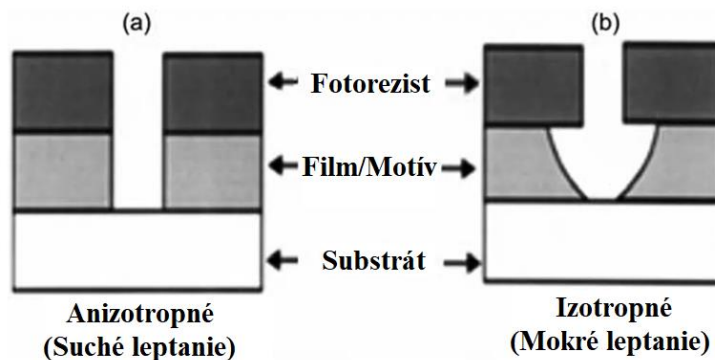
Pri určovaní aký typ leptania použiť, je však nevyhnutné zväžiť dve vlastnosti leptania, a to izotropia, anizotropia a selektivita. Selektivita popisuje relatívne rýchlosti leptania medzi maskou (používanou na vytváranie vzorov) a rýchlosťou leptania daného materiálu. Selektivita väčšiny tekutých a plynných chemických leptaní je vysoká, ale vo všeobecnosti sú izotropné, čo sťažuje riadenie rýchlosti leptania. Plazmové leptanie je určitým spôsobom riadené a môže byť prispôbené tak, aby bolo anizotropné, ale dosiahnutie dobrej selektivity je zvyčajne náročnejšie. Proces suchého leptania je znázornený na obrázku 4.2. Pri reaktívnom iónovom leptaní (RIE) je možné presne upraviť charakteristiky leptania ako profil, rýchlosť, selektivitu, rovnomernosť a reprodukovateľnosť. V zmesi plynov sa pomocou vysokofrekvenčného zdroja energie vytvorí plazma, ktorá rozbije molekuly plynu na ióny, ktoré sú hnané smerom k povrchu leptanej látky kde reagujú a vytvárajú nový plynný materiál. [35]



Obrázok 4.2: Proces suchého leptania reaktívnymi iónmi [37].

4.3 Izotropné leptanie

Pri izotropnom leptaní je rýchlosť leptania konštantná vo všetkých smeroch. To znamená, že vlastnosti materiálu sú nezávislé od smeru. Výrobné zariadenia používajú dva rôzne postupy leptania v rámci primárnych kategórií mokrého a suchého leptania. Jedným z nich je izotropné leptanie. Izotropné leptanie je chemický postup, ktorý odstraňuje materiál zo substrátu pomocou leptacieho roztoku, ktorý sa vo veľkej miere používa v polovodičoch. Leptadlá sú často kvapalné, plynné alebo na báze plazmy, zatiaľ čo kvapalné leptadlá, ako je pufrovaná kyselina fluorovodíková (BHF), sa najčastejšie používajú na leptanie oxidu kremíka. Na rozdiel od izotropného leptania, anizotropné leptanie využíva rôzne množstvá leptania a reaguje v špecifických smeroch (Obrázok 4.3). Izotropné leptanie leptá v substráte v niekoľkých smeroch v substráte. V dôsledku akejkoľvek horizontálnej zložky smeru leptania môže dôjsť k podleptaniu častí vzoru a významným zmenám vlastností zariadenia. Pri izotropnom leptaní sa používajú metódy mokrého chemického a suchého leptania. Izotropné leptanie môže byť nevyhnutné alebo žiaduce z procesných dôvodov. [35]



Obrázok 4.3: Rozdiel anizotropného a izotropného leptania [38].

4.4 Anizotropné leptanie

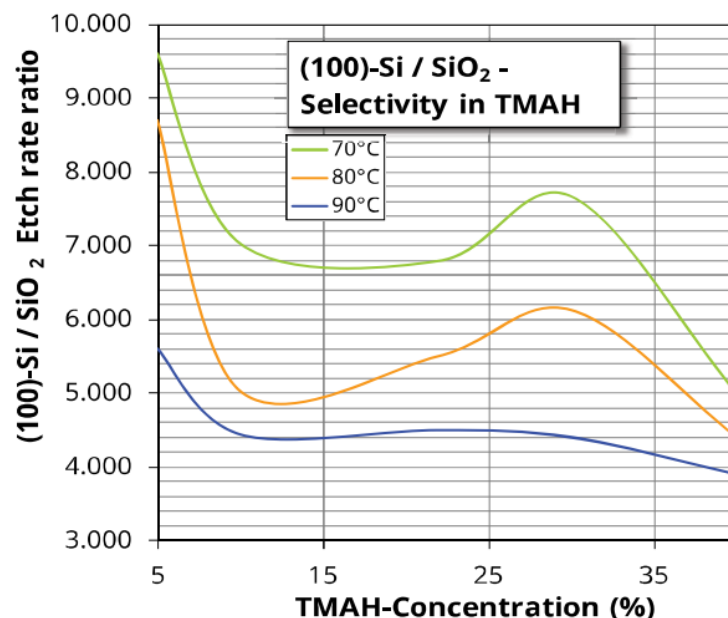
Anizotropné leptanie v kvapaline prebieha v rôznych smeroch rôznymi rýchlosťami, čo závisí na použitom roztoku a podmienkach leptania. V prípade použitia napríklad roztoku hydroxidu draselného (KOH), ktorého leptací proces je dobre zdokumentovaný, sa využíva pomer leptania medzi kryštálovými rovinami v kremíkovej mriežke. Leptanie bočných stien je definované rovinou $\langle 111 \rangle$ a rovina $\langle 100 \rangle$ je leptaná pri uhle približne $54,7^\circ$ vzhľadom k rovine $\langle 111 \rangle$. Vzhľadom na povahu tohto leptania je potrebné zvážiť návrh masky a aj správne zarovnanie počas litografie. Vzorkovanie a leptanie iných orientácii kremíkových substrátov (hlavne $\langle 110 \rangle$ a $\langle 111 \rangle$) môže byť výhodné pri výrobe voľne stojacích štruktúr. [39, 40]

Rýchlosti chemických reakcií môžu byť rozdielne na rôznych kryštálových rovinách. KOH je bežné leptadlo pre Si a rýchlosť reakcie na rovinách $\{100\}$ je oveľa rýchlejšia ako na rovinách $\{111\}$. Preto štvorcové leptanie otvorov na povrchu (100) Si sa môže stať inverznou pyramídou v určitom bode po leptaní KOH. Pri leptaní v roztoku KOH/TMAH je rýchlosť leptania na rovine $\langle 110 \rangle$ o niečo vyššia ako na rovine $\langle 100 \rangle$ a obe sú skoro viac ako 400-krát rýchlejšie ako na rovine $\langle 111 \rangle$. [39]

5. ANIZOTROPNÉ MOKRÉ LEPTANIE

5.1 Vytváranie štruktúr anizotropným mokrým leptaním Si

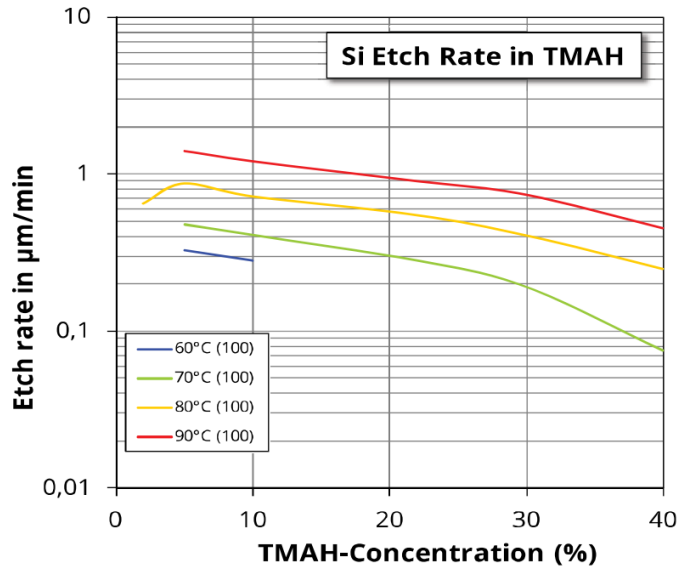
Možná rýchlosť leptania SiO_2 je zobrazená na obrázku 5.1, pri koncentrácii 25% roztoku TMAH a teplotou leptania 90°C , kde je táto hodnota o 4500-krát nižšia ako leptanie Si v smere (100). Následne možno vrstvu SiO_2 použiť ako masku v procese anizotropného leptania po dlhú dobu. Rýchlosť leptania vrstvy SiO_2 sa zvyšuje so zvýšenou leptacou teplotou, ale mierne klesá pri koncentráciách TMAH s viac ako 5 % hmotnostných. So znižujúcou sa koncentráciou TMAH sa zvyšuje aj drsnosť povrchu. Leptaný povrch je veľmi hladký pri vysokých koncentráciách, ale pri nízkych koncentráciách vzniká hrboľatý povrch. [26, 41]



Obrázok 5.1: Závislosť selektivity leptania v smere $\langle 100 \rangle$ s vrstvou SiO_2 na koncentrácii roztoku TMAH pri rôznych teplotách [26].

V článku [43] boli skúmané podrobné charakteristiky hydroxidu tetramethylamoniaku (TMAH, $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$) s rôznymi koncentraciami od 5 do 40 % hmotnostných a teplotami od 60 do 90°C . Rýchlosť leptania kryštálových rovín (100) a (110) klesá so zvyšujúcou sa koncentráciou. Leptané (100) roviny sú pokryté pyramídovými kopčekmi pod 15 % hmotnostných, ale nad 22 % hmotnostných sa vytvárajú veľmi hladké povrchy. Rýchlosť leptania pre rovinu (100) je $1,0 \mu\text{m}/\text{min}$ a $1,4 \mu\text{m}/\text{min}$ pre rovinu (110) pri 90°C , pri použití 22 % hmotnostných roztoku. Pomer rýchlosti leptania (111)/(100) je v rozsahu od 0,02 do 0,08. Rýchlosť leptania tepelne oxidovaného SiO_2 je takmer o štyri rády nižšia ako rýchlosť pre roviny (100) a (110).

Použitím koncentrácie 25% roztoku TMAH pri 90 °C je teoretická hodnota rýchlosti leptania približne 0,85 μm/min čo je zobrazené na obrázku 5.2, pri ktorej je možné vyleptať 51 μm za jednu hodinu. V praxi by to znamenalo vyleptanie otvorov v maske na kremíkovom substráte o hrúbke 250 μm za minimálne 5 hodín stáleho leptania, pri dodržaní podmienok 90 °C a nemalej koncentrácie vplyvom vyparovania. [26]



Obrázok 5.2: Závislosť rýchlosti leptania na koncentrácii roztoku TMAH pri rôznych teplotách [26].

Predchádzajúce štúdie [26, 43], skúmali správanie leptania kremíkových kryštálov vrátane troch hlavných kryštálov orientácie (100), (110) a (111). Vyleptané medzery na rovine (100) kremíkovej vrstvy ohraničené zbíhajúcou sa s rovinou (111) zvierajú uhol 54,74° s rovinou (100). Ako je znázornené na obrázku 5.3, minimálna šírka medzery po leptaní (x_0) sa odhaduje pomocou nasledujúceho vzťahu:

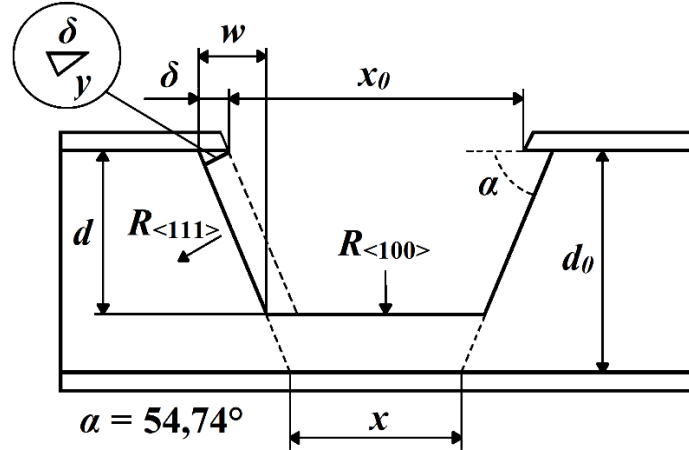
$$x = x_0 - d\sqrt{2}, \quad (5.1)$$

kde d je hrúbka vrstvy kremíkoveho zariadenia v SOI doštičke, x_0 je veľkosť medzery v nano-oxidovej maske, δ označuje variáciu medzi otvorom masky a priesečníkom rovín (111), vyleptané s maskou v dôsledku podleptania a je priamo úmerná času leptania t . Po stanovení rýchlostí leptania rovín (100) a (111), x_0 možno definovať na získanie požadovanej šírky medzery po leptaní (Obrázok 5.3). [41]

Hĺbku vyleptaného otvoru môžeme okrem merania určiť na základe poznatku uhlu leptania kryštalografických rovín kremíka. Pokiaľ poznáme šírku šikmej steny vyleptaného otvoru w , môžeme určiť hĺbku vyleptaného otvoru d , na obrázku 5.3 je znázornený princíp merania a výpočtu.

Hĺbku otvoru d je možné vypočítať zo vzťahu:

$$d = w\sqrt{2}. \quad (5.2)$$



Obrázok 5.3: Rez otvorom vytvorený anizotropným leptaním v substráte [42].

Z obrázku 5.3 je možné určiť aj šírku w použitím vzťahu:

$$w = \frac{(x_0 + 2\delta - x)}{2}. \quad (5.3)$$

Keďže je rýchlosť leptania v smere $\langle 111 \rangle$ výrazne nižšia ako v smere $\langle 100 \rangle$ a nie je nulová, je potrebné ju vziať do úvahy pri dlhšom čase leptania. Preto dochádza aj k podleptaniu masky alebo otvorov v maske ako je zobrazené na obrázku 5.3. Dané parametre je potrebné pridať do vzťahu pre veľkosť vyleptaného otvoru x v závislosti na navrhutej veľkosti otvoru x_0 s upravením výrazu (5.1):

$$x = x_0 - d\sqrt{2} + 2\delta, \quad (5.4)$$

kde δ je veľkosť podleptania a z geometrie vyleptaného otvoru vieme určiť δ pomocou vzťahu:

$$\delta = \frac{R_{\langle 111 \rangle}^S t}{\sin \alpha}, \quad (5.5)$$

kde $R_{\langle 111 \rangle}$ je rýchlosť leptania v smere $\langle 111 \rangle$. Dosadením rovnice (5.5) do (5.4) dostaneme vzťah:

$$x = x_0 - d\sqrt{2} + 2 \frac{R_{\langle 111 \rangle}^S t}{\sin \alpha}. \quad [41] \quad (5.6)$$

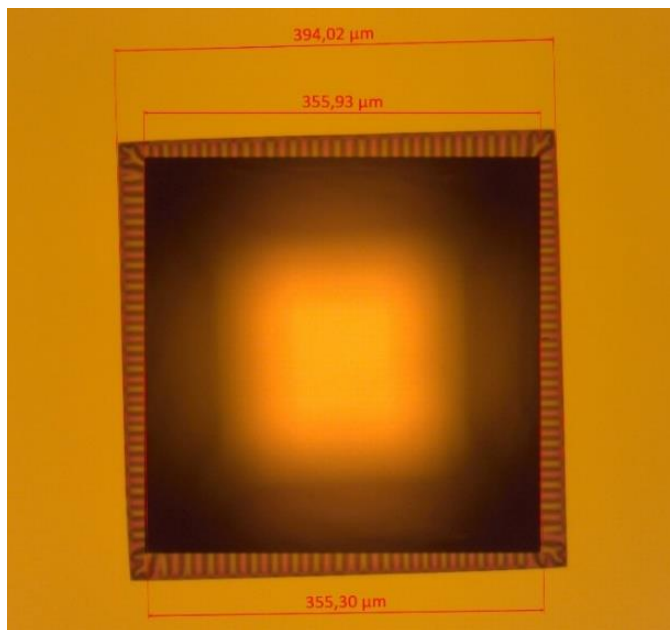
Pomocou tohto vzťahu dokážeme vypočítať šírku otvoru v maske x_0 pri požadovanej veľkosti šírky otvoru x a danej hĺbke d , kde vieme vypočítať aj čas leptania, pri známych parametroch leptania v určitej koncentrácii a teplote roztoku. Čas leptania môžeme eliminovať použitím vzťahu $R_{\langle 100 \rangle}^{Si} = d/t$, kde $R_{\langle 100 \rangle}^{Si}$ udáva rýchlosť leptania v smere $\langle 100 \rangle$. Pri zjednodušení vzťahu vznikne časť $\sqrt{2}/\sin\alpha$ a dosadením uhla $54,74^\circ$ sa dosiahne hodnota $\sqrt{3}$, a tak sa upraví vzťah na:

$$x = x_0 - d\sqrt{2} \left(1 - \sqrt{3} \frac{R_{\langle 111 \rangle}^{Si}}{R_{\langle 100 \rangle}^{Si}} \right). [41] \quad (5.7)$$

Je možné vidieť, že podleptanie masky je nepriamo úmerné rýchlosti leptania v smeroch $\langle 100 \rangle$ a $\langle 111 \rangle$, teda selektívite leptania.

5.2 Vytváranie dier anizotropným mokrým leptaním

Pri vytváraní štruktúr treba myslieť na orientáciu použitých kremíkových doštičiek, keďže rýchlosti mokrého anizotropného leptania rovín sú rôzne. Rovina (100) je leptaná najrýchlejšie, preto treba brať ohľad aj na orientáciu použitej masky priamo na fotoreziste, ktorý nám chráni časti, kde substrát leptaný nie je. Nesprávny návrh a orientácia masky spôsobí nesprávne vyleptanie danej štruktúry alebo diery, ktorá vytvorí pootočenie leptu v smere orientácie leptania rovín. Príklad takéhoto nesprávneho zarovnania masky so vzormi pre vytvorenie dier spolu s kremíkovým substrátom je uvedený na obrázku 5.4.



Obrázok 5.4: Nesprávne zarovnanie expozície s orientáciou substrátu.

Uvedený príklad pootočenia leptu diery vzhľadom k maske je len mierny s uhlom $\pm 1,5^\circ$. Z tohto teda vieme, že zarovnanie leptania rovín je nezávislé na orientácii otvorov v maske. Kvôli tomu dochádza aj k väčšiemu podleptaniu masky, ako v prípade zarovnania masky s orientáciou substrátu. Výsledný lept sa o niečo zväčší a výpočet vzniknutého otvoru na spodnej strane substrátu je závislý na šírke otvoru pod uhlom, ktorý je zhodný s orientáciou doštičky. Pri malých uhloch (viď obrázok 5.4) sa otvor v lepšom prípade nezväčší o veľa, kde je rozdiel zjavný s rozdielom okolo $0,6 \mu\text{m}$. Pri použití otvoru iného tvaru ako je štvorec dôjde k vyleptaniu štvorcovej diery, v dôsledku rôznych rýchlostí leptania rovín.

Hĺbka otvoru d je závislá na čase leptania a rýchlosti leptania v smere orientácie, v tomto prípade v smere roviny $\langle 100 \rangle$. Z predošlých informácií teda vieme, že veľkosť membrány x na spodnej strane substrátu je závislá na veľkosti pôvodného návrhu počiatočného otvoru v maske x_0 a rýchlosti leptania v smere $\langle 111 \rangle$, a tú vieme určiť zo vzťahu:

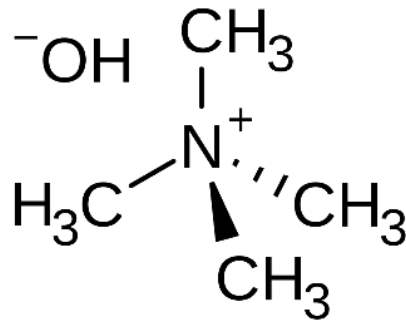
$$x = x_0 - d_0\sqrt{2} + \sqrt{6}R_{\langle 111 \rangle}^{\text{Si}}t, \quad (5.8)$$

kde d_0 je hrúbka kremíkovej dosky a celkový vzťah je upravený z (5.6). Pri návrhu malého otvoru v maske dôjde k nepreleptaniu sa otvoru skrz substrát, ale iba čiastočná diera v substráte, keďže pri pretnutí sa rovín dôjde k zastaveniu leptania a vzniknuté otvory sú v tvare „pyramídy“. Teda použitím dostatočne veľkého otvoru pri návrhu masky dôjde k preleptaniu skrz celý substrát a vieme, že existuje minimálna veľkosť otvoru v maske $x_{0,\text{min}}$, potrebná k preleptaniu skrz celý substrát. Avšak na spodnej strane zostane vrstva SiO_2 ako membrána, keďže pri použitom roztoku ako je TMAH je rýchlosť leptania SiO_2 pomalá oproti leptaniu Si. Hodnotu minimálneho otvoru vieme určiť zo vzťahu:

$$x_{0,\text{min}} = d_0\sqrt{2} - \sqrt{6}R_{\langle 111 \rangle}^{\text{Si}}t. [41] \quad (5.9)$$

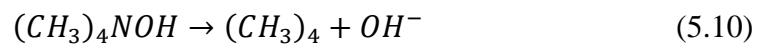
5.3 Proces leptania Si

Mnoho leptadiel ako napríklad KOH, ethyléndiamín pyrokatechol (EDP), TMAH, sa používajú pri anizotropnom leptaní kremíka. Medzi týmito silikónovými anizotropnými leptadlami je roztok TMAH viac zaužívaný, pretože je relatívne netoxický v porovnaní s EDP, ktorý je stále používaný a je kompatibilný s CMOS technológiami, pretože nemá problémy s kontamináciou K^+ iónmi, ktoré sa často vyskytujú v leptadle KOH. Roztok TMAH, príp. označovaný ako TMAOH, je kvartérna amoniaková zlúčenina, ktorá je používaná pri výrobe mikroelektronických komponentov. Štruktúrny vzorec pre roztok TMAH je uvedený na obrázku 5.5. Okrem leptania sa roztok TMAH používa taktiež ako vývojka pre vyvolávanie rezistov v litografii. Molekulový vzorec pre tento roztok je $\text{N}(\text{CH}_3)_4\text{OH}^-$ a bežne sa vyrába ako vodný roztok v metanole alebo v propylénglykole. [44, 45, 46]

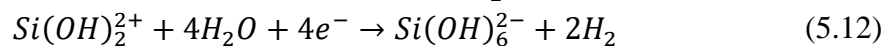
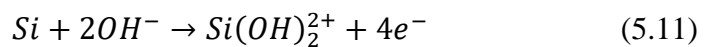


Obrázok 5.5: Štruktúrny vzorec hydroxidu tetramethylamoniaku (TMAH) [47].

Leptanie kremíka v roztoku TMAH možno rozdeliť do troch krokov:



V tomto prvom kroku reakcie (5.10) vznikajú štiepením molekuly TMAH anióny hydroxidu, ktoré potom reagujú s atómami kremíka na povrchu substrátu za vzniku kremičitanových katiónov (5.11). [44, 48]



V priebehu oxidácie kremíku prebieha aj vznik ďalších aniónov hydroxidu viažuce sa na kremičitanové katióny vznikajúce pri kroku (5.11) a redukcia vodíka, ktorý sa nachádza vo vode. To znamená, že pre proces leptania si vyžaduje prítomnosť vody, ktorej koncentrácia v roztoku ovplyvňuje rýchlosť leptania. Z procesu oxidácie kremíka vzniká kyselina kremičitá a plynný vodík ako vedľajší produkt. [44, 48]

6. HĽBKOVÉ REAKTÍVNE IÓNOVÉ LEPTANIE

Hĺbkové reaktívne iónové leptanie (DRIE) kremíka je nadstavba RIE, ktorý je vysoko anizotropný leptací proces, používaný na vytvorenie hlbokých dier so strmými stenami v kremíkových substrátoch, typicky s vysokým pomerom strán. Tento proces je vysoko selektívny, s vysokou rýchlosťou leptania a kontrolovateľnejší v celom priebehu procesu. [49, 50]

6.1 Technologické a fyzikálne procesy pri DRIE

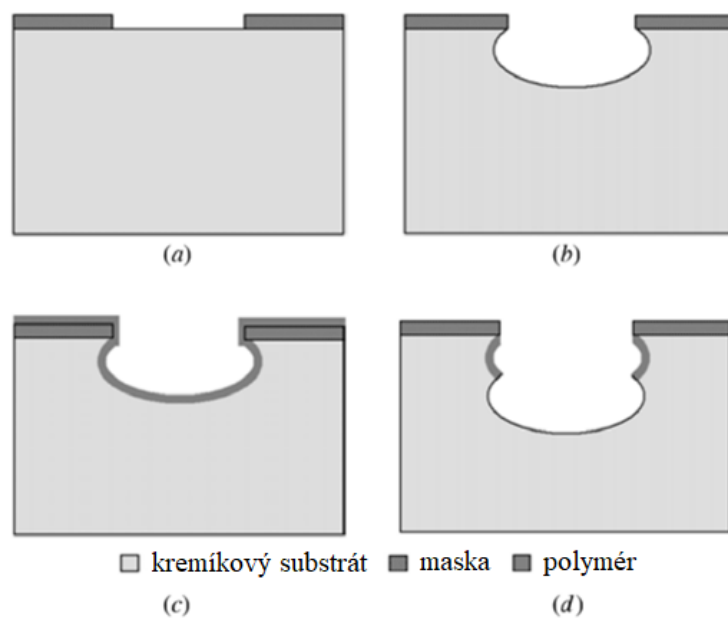
Typické dva procesy používané na vytvorenie hlbokých leptov pri fabrikácii MEMS sú Bosch proces a kryogénny proces. Počas rokov sa tieto technológie dokázali výrazne vylepšiť, ale základné aspekty zostávajú rovnaké. Pri Bosch procese je možné dosiahnuť vysokých leptacích rýchlostí, selektivitu a anizotropiu. Kryogénny proces je používaný na dosiahnutie rovnejších stien a na nano-leptanie. Využíva sa aj mix oboch procesov. [49]

6.1.1 Bosch proces

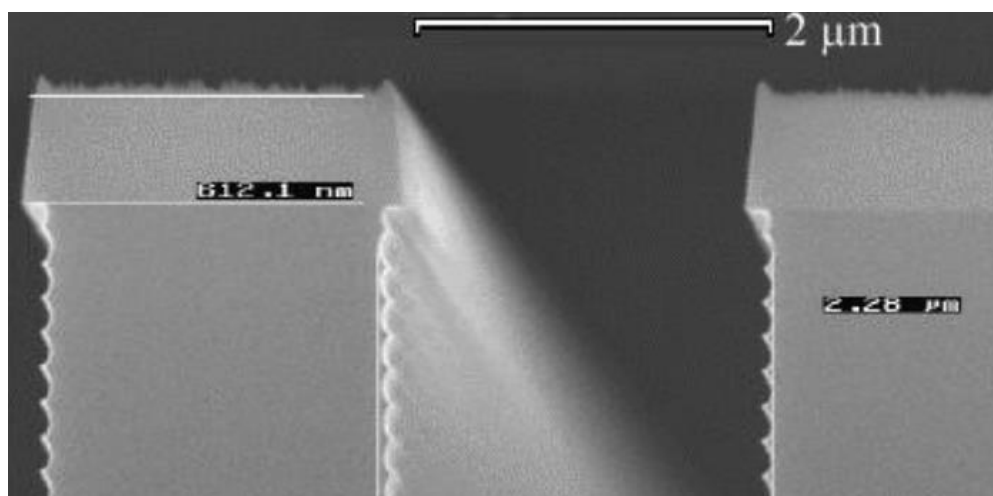
Tento proces bol vyvinutý a patentovaný nemeckou firmou Robert Bosch GmbH. Bosch proces je vysoko anizotropný suchý leptací proces pre vytváranie kremíkových mikroštruktúr. Táto metóda je iteratívna a založená na používaní pasivačnej vrstvy, ktorá v spojení s jednosmerným napätím DC, má za príčinu anizotropiu v leptacom procese. V prípade tohto procesu sa v prvom kroku steny pokryjú polymérom C_4F_8 (oktafluorecyklobutan), ktorý ochraňuje substrát pred stálym procesom chemického leptania a zabráňuje nekontrolovanému leptaniu. [50, 51] V ďalšom kroku je potrebné otvoriť polymérnu vrstvu, ktorá je rovnobežná s plochou substrátu bombardáciou, použitím SF_6 plazmy a začne sa leptací proces. Leptanie plazmou SF_6 je však izotropné a vytvorí podleptanú štruktúru. Keďže tieto ióny nemajú zvislú trajektóriu, začnú narážať na pasivačnú vrstvu na stenách a pomaly ju odleptávajú. Film je na dne kompletne odleptaný a fluór začne reagovať.

Energia potrebná k odstráneniu pasivačnej vrstvy je malá a selektivita je vysoká, pre fotorezist $\geq 200:1$ a pre $SiO_2 \geq 800:1$. [52] Proces depozície pasivačnej vrstvy a leptania je zobrazený na obrázku 6.1. Jednotlivé kroky trvajú pár sekúnd a dlhšie časy spôsobujú väčšie vrúbkovanie na stenách.

Leptacie kroky je nutné separovať v cykloch aby nedošlo k reakcii medzi spomenutými plynmi a zastaveniu polymerizačnej reakcie. Cykly depozície pasivačnej vrstvy a leptania sú následne opakované a vzniká vrúbkovanie (scalloping) na stenách diery (viď obrázok 6.2). Medzi jednotlivými krokmi v cykloch nie je potrebné prečerpávať celú komoru, keďže sa ióny nenachádzajú v oblasti plazmy a teda trvanie krokov sa dá znížiť. [53]



Obrázok 6.1: Bosch postup: a) vzorka s maskou, b) prvý leptací krok, c) depozičný krok, d) druhý leptací krok [54].



Obrázok 6.2: Vrúbkovanie na stenách dier spôsobené cyklovaným leptaním [55].

7. TENKÉ VODIVÉ VRSTVY, POKOVOVANIE

Nanášanie tenkých vodivých vrstiev je unikátny výrobný proces bežne používaný pri výrobe polovodičov, biosenzorov a iných špecializovaných aplikácií. Proces zahŕňa dôkladné nanášanie tenkého kovového filmového povlaku na substrát za účelom získania špecifických vlastností materiálu. Špeciálne vytvorené tenkovrstvové povlaky sa používajú napríklad v oblasti optiky a zobrazovania na úpravu optických vlastností skla. V pokročilejších biomedicínskych a polovodičových aplikáciách sa nanášanie tenkých vrstiev používa na vytvorenie špecifických molekulárnych vlastností vo vodivom materiáli. Všeobecne sú procesy nanášania tenkých vrstiev klasifikované do dvoch zastrešujúcich kategórií na základe použitých špecializovaných výrobných metód. [56]

Metódy nanášania tenkých vrstiev sa dajú rozdeliť do dvoch základných skupín:

- 1) Fyzikálna metóda depozície
- 2) Chemická metóda depozície

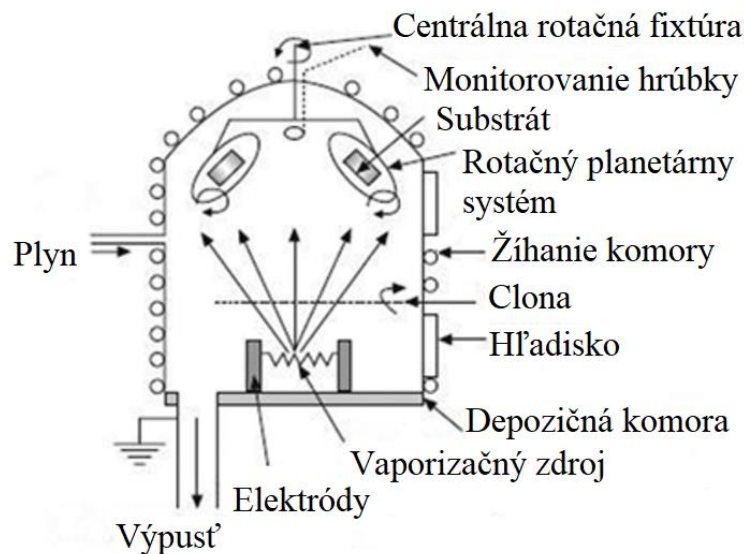
7.1 Fyzikálna metóda depozície

Evaporačné metódy sú považované za bežnú metódu depozície materiálov vo forme tenkých vrstiev. Všeobecný mechanizmus týchto metód je dosiahnutý menením fáze materiálov z formy tuhej do plynnej a premenenie zase naspäť do tuhej fáze na určenom substráte. Táto metóda je vykonávaná vo vákuu alebo kontrolovaných atmosférických podmienkach. [57]

7.1.1 Technika systému tepelného (odporového) odparovania

Technika vákuového odparovania je najľahšia technika používaná na pripravovanie amorfných tenkých vrstiev, najmä chalkogenidových filmov ako sú CdSSe, MnS, Ge-Te-Ga, atď. Chalkogenidové materiály môžu byť použité pre pamäťovo-prepínacie aplikácie, materiály s fázovou zmenou a solárne aplikácie. [57]

Technika je silne závislá na dvoch parametroch: tepelne odparený materiál a aplikácia potenciálu na substrát pod médiom alebo vyšším vákuom od 10^{-5} do 10^{-9} mbar. Schematický diagram pre tepelné odparovanie je zobrazený na obrázku 7.1. [57]



Obrázok 7.1: Schéma tepelného (odporového) evaporačného systému s držiakom na substrát na rotačnom planetárnom systéme [58].

7.1.2 DC (jednosmerné) naprašovanie

Naprašovanie jednosmerným prúdom je technika, ktorá využíva molekuly ionizovaného plynu na odparovanie molekúl z terča do plazmy. Vákuová komora obsahuje vysoko čistý inertný plyn ako napríklad argón, ktorý sa nabíja pri vystavení pulznému jednosmernému prúdu. Materiál kovového terča pôsobí ako katóda, zatiaľ čo substrát pôsobí ako anóda. Systémom prechádza jednosmerný prúd, ktorý spôsobí ionizáciu plynného argónu a výsledkom je silná kolízia iónov so záporne nabitým kovom z terča. Kladne nabitý substrát priťahuje negatívne nabitú plazmu, ktorá kondenzuje na povrchu substrátu a vytvára tenký filmový povlak neutrálneho zdroja. [59]

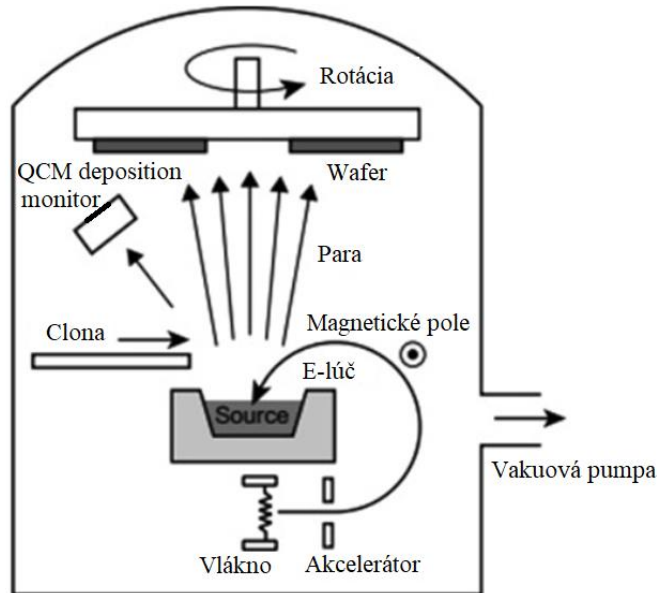
Zatiaľ čo DC naprašovanie je bežný proces pre vodivé materiály, nefunguje tak dobre pre dielektrické materiály na terči. Atómy sa z terča môžu nabiť a následne vytvárajú iskrenie. Narušujú elektrónovú hustotu, a to má za následok nerovnomernú rýchlosť depozície. Akumulácia kladných iónov môže spôsobiť porušenie rozprašovacej dráhy a proces je nutné resetovať. [59]

7.1.3 Odparovanie elektrónovým lúčom

Tento typ odparovania je ďalšou metódou fyzikálne depozície, pri ktorej sa intenzívny lúč elektrónov generuje z vlákna a je vedený cez elektrické aj magnetické pole, aby zasiahol cieľ a odparil ho vo vákuu, ako je znázornené na obrázku 7.2. Tenké vrstvy pripravené odparovaním elektrónovým lúčom sú dobrej kvality a čistoty. [57]

Rozžeravené vlákno spôsobuje termoemisiu elektrónov, ktorá môže po akcelerácii zaistiť dostatočnú energiu pre odparenie hocikakého materiálu. Použitím emisie o veľkosti 1 A, akcelerovanou skrz napätie 10 kV, je v bežnom prípade pri dopade do

systemu dodávaný výkon 10 kW. Aby sa zabránilo roztaveniu vlákna, z vychádzajúcich výparov, je vlákno umiestnené mimo dohľad odparovaného materiálu a elektrónový lúč je ohýbaný magnetickým poľom smerom k materiálu. [60]

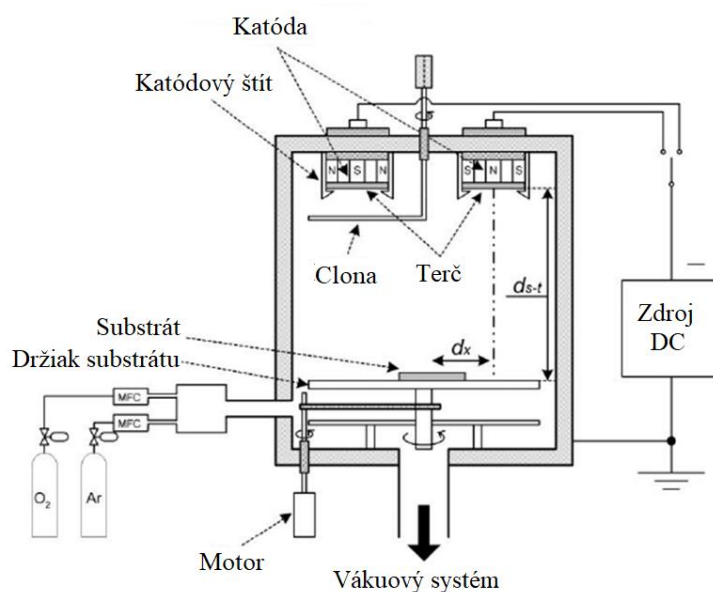


Obrázok 7.2: Schematický jav odparovania elektrónovým lúčom [61].

7.1.4 Magnetronové naprašovanie

Magnetronové naprašovanie je technológia nanášania zahŕňajúca plynnú plazmu, ktorá je generovaná v uzavretom priestore, kde sa nachádza materiál na nanášanie. Povrch terča je erodovaný vysoko energetickými iónmi v plazme a následne sa deponujú na substrát. Komora sa najskôr evakuuje do vákua a následne v nej prúdi rozprašovací plyn, ktorý obsahuje plazmu a reguluje sa celkový tlak, zvyčajne v rozsahu miliTorr. [62]

Medzi katódu, ktorá je bežne za terčom a anódu, ktorá je pripojená ku komore sa aplikuje vysoké napätie, ktoré urýchľuje elektróny preč od katódy, čo spôsobuje kolízie s blízkymi atómami rozprašovacieho plynu (viď obrázok 7.3). Pozitívne atómy plynu sú tak urýchľované smerom ku katóde a vznikajú zrážky na povrchu terča. Vzniknuté zrážky spôsobia vyvrhnutie atómov z terča k povrchu substrátu. Pre zvýšenie zrážok sa používajú plyny s vysokou molekulovou hmotnosťou ako argón alebo xenón. Na reaktívny proces naprašovania sa môžu do komory privádzať plyny ako kyslík alebo dusík. Výhodou tohto procesu je nanášanie bez ohľadu na teplotu tavenia, prispôbenie a umiestnenie zdrojov kdekoľvek v komore na základe požiadaviek substrátu a povlaku. Vrstvu zliatin a zlúčenín je tiež možné nanášať pri zachovaní podobného zloženia zdrojového materiálu. [62]



Obrázok 7.3: Schematický diagram DC magnetronového naprášovania [63].

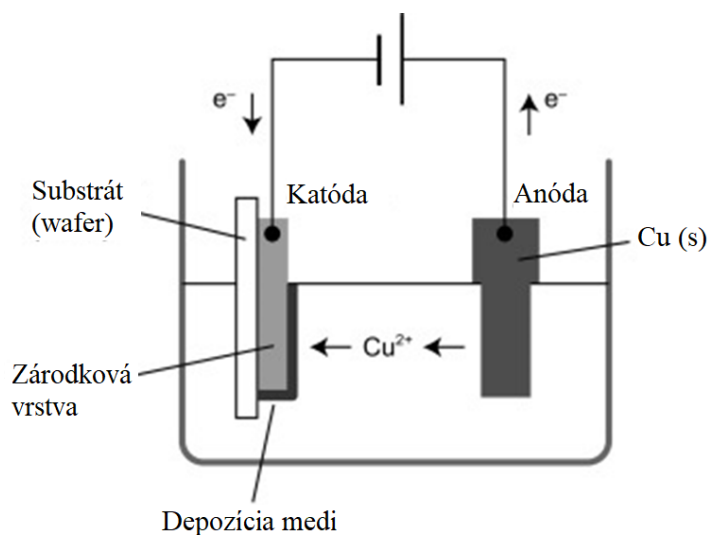
7.2 Chemická metóda depozície

Hoci výroba tenkých vrstiev fyzikálnymi metódami, ako bolo opísané vyššie, poskytuje dobrú kvalitu a funkčné vlastnosti, je veľmi drahá a vyžaduje si veľké množstvo materiálu. Techniky chemického nanášania sú používané pri výrobe kvalitných tenkých filmov s nízkymi ekonomickými nákladmi a väčšina z nich nevyžaduje drahé vybavenie. Chemická depozícia silne závisí od chemického zloženia roztokov, hodnoty pH a viskozity. Najbežnejšia chemická depozícia, bola získaná využitím metódy sol-gel, depozíciou v chemickom kúpeli, elektrodepozíciou, chemickou depozíciou v parách (CVD) a technikou rozprašovacej pyrolýzy. [57]

7.2.1 Galvanické pokovovanie

Galvanické pokovovanie je elektrolytické nanášanie vrstvy kovu na vodivý povrch. Riadená elektrolyza prenáša požadovaný kovový povlak z anódy (zdrojový materiál) na katódu (nanášaný predmet), (vid' obrázok 7.4). Anóda a katóda sú umiestnené v elektrolytickom chemickom kúpeli a vystavené nepretržitému elektrickému náboju. Elektrické pripojenie spôsobuje, že sa anióny presúvajú na anódu a katióny sa prenášajú na katódu, pričom pokrývajú alebo pokovujú požadovanú časť rovnomernou kovovou vrstvou. Galvanické pokovovanie používa podkladový materiál, často lacnejší a zapuzdruje predmet do tenkého kovového obalu, ako je nikel alebo meď. Vyvinuté bolo aj autokatalytické pred-pokovovanie, ktoré vytvára ultratenké vodivé rozhranie, umožňujúce pokovovanie rôznych kovov – najmä zliatin medi a niklu – na plastové diely. Galvanické pokovovanie a elektroformovanie sa robí pomocou elektrolytického

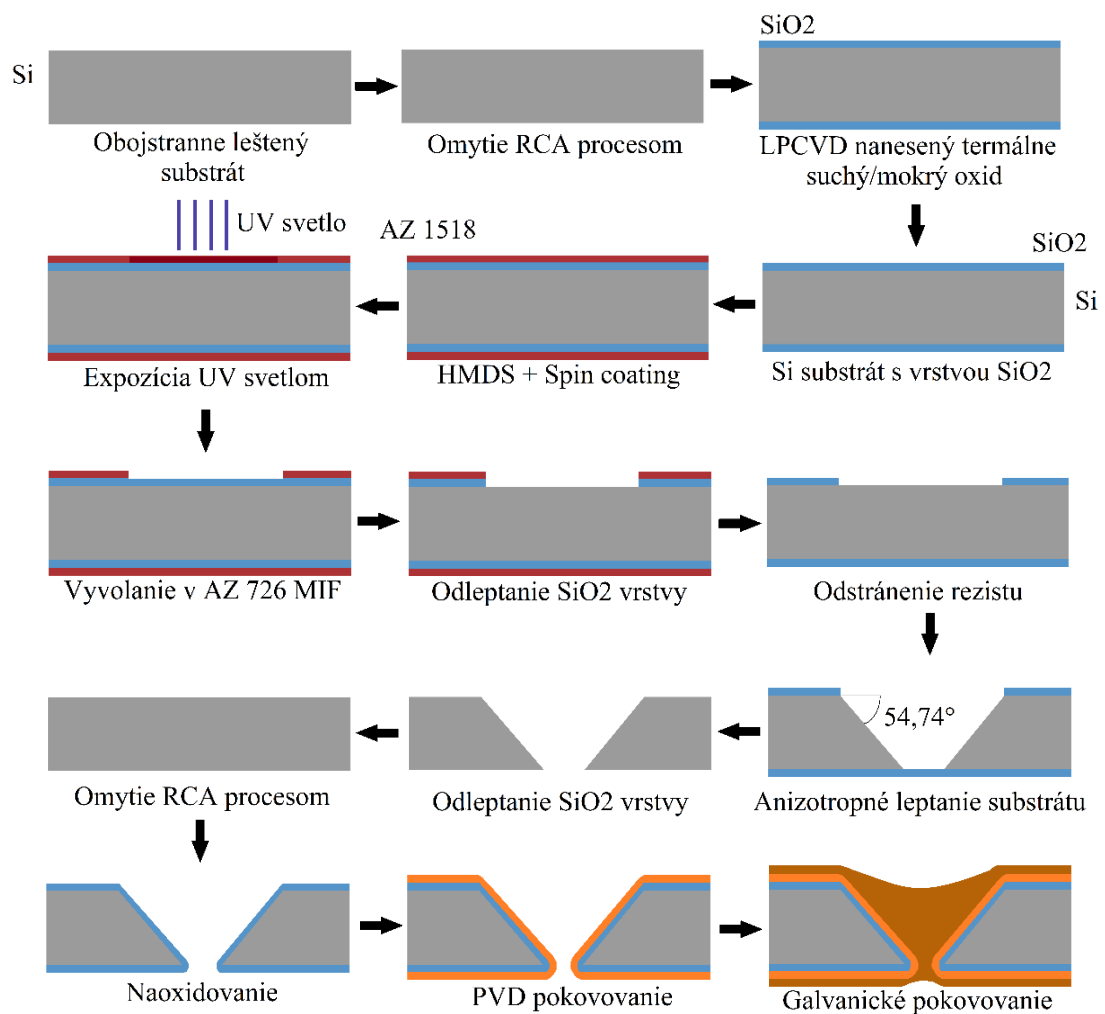
nanášania. Rozdiel je v tom, že pri elektroformovaní sa používa forma, ktorá sa odstráni po vytvorení dielu a tiež sa používa na vytvorenie pevných kovových kusov, zatiaľ čo galvanické pokovovanie sa používa na pokrytie existujúcej časti do kovu. [64]



Obrázok 7.4: Schéma galvanického pokovovania [65].

8. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

V tejto časti je uvedený postup vytvárania mikroelektromechanických prepojev na kremíkovom substráte pomocou anizotropného leptania. Metódy prípravy a ich princípy sú popísané v predošlých kapitolách. Uvedené sú tu aj experimentálne výsledky s podmienkami a parametrami v použitých krokoch pri vytváraní prepojev. K lepšiemu porozumeniu a stanoveniu vhodnej veľkosti prepojev, boli urobené testy leptania v roztoku TMAH s použitím koncentrácie 5 % a 25 %. Na obrázku 8.1 je zobrazený postup výroby mikroprepoja v kremíkovom substráte. Pokračovaním experimentálnej časti je aj suché anizotropné leptanie uvedené v časti 8.7.



Obrázok 8.1: Grafická schéma postupu prípravy mikroprepojev na kremíkovom substráte anizotropným mokrým leptaním.

8.1 Postup prípravy motívu

Pripravený kremíkový substrát s hrúbkou 250 μm a obojstranne vytvorenou a naleštenou oxidovou vrstvou SiO_2 , bol ošetrovaný v základnej vrstve hexametyldisilazánu (HMDS). Následne bola nanosená vrstva fotocitlivého rezistu metódou spin coating a pomocou laserovej litografie, boli vytvorené požadované vzory. Osvietená kremíková doštička, bola vyvolaná v kvapalnej vývojke, ktorá na vyvolaných miestach odplaví rezist. Celkový postup je popísaný v nasledujúcich častiach práce.

8.2 Príprava substrátu pre anizotropné leptanie

Na vytvorenie vzoriek boli použité obojstranne leštené kremíkové doštičky od výrobcu Siebert Wafer GmbH (Nemecko), s parametrami uvedené v tabuľke 8.1. Dosky boli očistené RCA procesom [66], ktorý slúži na odstránenie organických a iónových zvyškov na povrchu a použitím chemickej depozície pár pri nízkom tlaku (LPCVD), bol nanosený termálny suchý oxid [67], o hrúbke približne 200 nm a s orientáciou roviny (100), ktorá je vhodná pre leptanie v roztokoch TMAH alebo KOH. Substrát bol následne ošetrovaný vrstvou HMDS a následne bola nanosená vrstva fotorezistu metódou spin coating.

Tabuľka 8.1 Parametre kremíkovej doštičky použitej pri mokrom leptaní.

Výroba	priemer	hrúbka	typ/dopant	orientácia	rezistivita
CZ	(100 \pm 0,3) mm	(250 \pm 20) μm	P/B	<100> \pm 0,5°	(5-10) Ωcm

8.3 Nanosenie rezistu metódou spin coating

Prvým krokom pri nanášaní fotorezistu je nanosenie adhézneho promotéru HMDS, ktorý vytvára silnú väzbu s molekulami OH na povrchu kremíka a metylovými skupinami, ktoré zanecháva na povrchu po nanosení, čo pomáha pri vytváraní silnej adhézie s fotorezistom. [68]

Po depozícii adhézneho promotéru pri 110 °C, pomocou SÜSS wet bench, boli kremíkové doštičky vložené do zariadenia spin coating. Fotocitlivý rezist AZ® 1518, bol zvolený kvôli väčšej hrúbke, pri rýchlosti otáčok 4000 rpm, čo vytvorilo vrstvu veľkú 1,8 μm . Rezist bol nanosený na obe strany, kvôli vytvoreniu ochrannej vrstvy proti leptaniu v pufrovanej kyseline fluorovodíkovej (BHF – buffered HF). Fotorezist bol nanosený prístrojom SÜSS-RCD8 (SÜSS MicroTec SE, Nemecko).

Fotorezisty série AZ® 1500 sú kompatibilné so všetkými bežnými vývojkami a odstraňovačmi rezistov. Závislosť hrúbky vrstiev série AZ® 1500 na rýchlosti rotácie je uvedený v katalógovom liste. [68]

Pre dokonalé vysušenie a zatvrdnutie vrstvy, bol substrát zahriaty na teplotu 100 °C po dobu 90 s. Na vytvorenie masky z oxidu bolo potrebné naniest' rezist na substrát z oboch strán, aby sa zabránilo leptaniu oxidu z druhej strany, keďže bol proces leptania

oxidu kremičitého v roztoku BHF vykonaný ponorom. Nanesenie rezistu z druhej strany prebiehalo rovnakým spôsobom ako bolo uvedené vyššie.

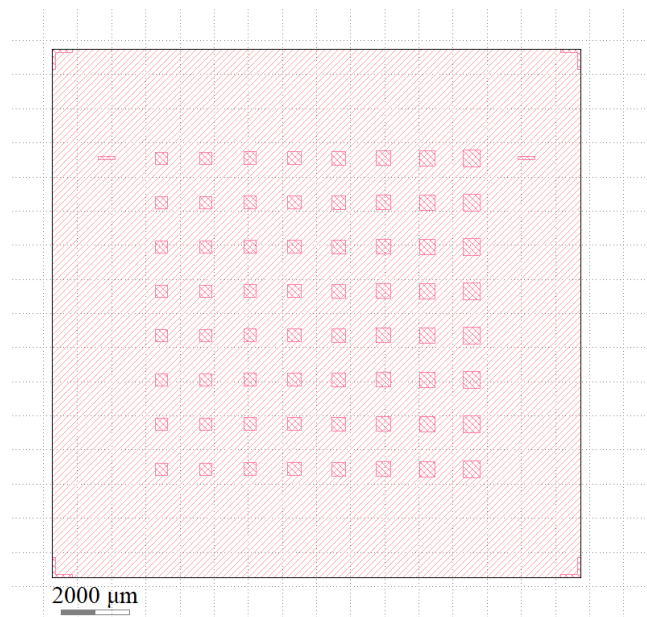
8.4 Expozícia a vyvolanie fotorezistu pomocou laserovej litografie

Ďalším krokom po nanesení rezistu je vytvorenie požadovaných otvorov pomocou laserovej litografie. Pred samotným osvietením fotocitlivého rezistu bol substrát ručne naryhovaný perom s diamantovým hrotom pomocou pravítka s ryskou, ktoré bolo zarovnané podľa fasety substrátu udávajúcou orientáciu a typ kremíka (vid' Obrázok 2.5). Následne sa naryhovaný substrát o určitej veľkosti navrhnutých okien v maske nalámal na menšie vzorky pre leptanie a lepšiu manipuláciu. Potrebné miesta a otvory pre osvietenie boli navrhnuté a realizované v programe Klayout Editor, ktorý je priamo určený na vytváranie masiek pre mikroštruktúry a litografiu. Keďže proces ručného návrhu a spracovania je zdĺhavý a pri zmene rôznych parametrov ako sú veľkosti masiek, otvorov v nej, umiestnenie značiek a centrovanie pre zariadenie laserovej litografie na substrát, bol tento proces uľahčený a urýchlený použitím skriptovacieho nástroja CNST Nanolithography Toolbox od inštitútu štandardov a technológii NIST (NIST). Navrhnutá maska pre vytvorenie prepojov je uvedená na obrázku 8.2, kde je možné vidieť rôzne veľkosti otvorov v maske pre testovanie procesu anizotropného mokrého leptania. Narezané vzorky boli následne vložené do zariadenia laserovej litografie pomocou spomenutého zariadenia UV Direct Write Laser systému, model DWL 66fs (Heidelberg Instruments GmbH, Nemecko).

Toto zariadenie vpisuje navrhnuté motívy priamo na substrát, takže žiadna fotomaska nie je potrebná. Fotomaska môže byť vyrobená týmto prístrojom a následne použitá pre za zariadenie mask aligner, ktoré bolo použité v prípade suchého leptania. Vpisovanie sa vykonáva expozíciou fotosenzitívnej vrstvy na povrchu substrátu s použitím UV diódového lasera s vlnovou dĺžkou 405 nm. Na konci laser prechádza cez zapisovaciu hlavicu s fokálnou dĺžkou 4 mm, čo udáva rozlíšenie prístroja na 1 μm a je schopný vkresľovať štruktúry na hocijaký plochý substrát. Celý systém je umiestnený v boxe s laminárnym prúdením vzduchu, ktorý zabezpečuje konštantné podmienky prostredia rozhodujúce pre expozíciu. Ďalším hlavným parametrom tohto zariadenia je adresovacia mriežka o veľkosti 50 nm, kde jeho zarovnávaciu presnosť je 250 nm. [70]

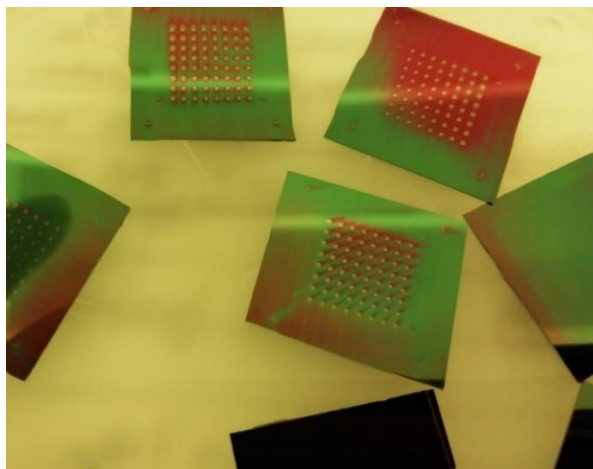
Veľkosť otvorov motívu bola určená zo vzťahu (5.1) v závislosti na požadovanej veľkosti otvoru na spodnej strane po vyleptaní, bez uvažovania rýchlosti podleptávania v smere $\langle 111 \rangle$ a celkovému času leptania, čo bol prvý experiment tejto práce. Po získaní výsledkov parametrov rýchlosti leptania, podleptávania v smere $\langle 111 \rangle$ a celkového času leptania, je možné použiť vzťah (5.8), pri ktorom dosiahneme požadované veľkosti mikroprepojov. Najmenšia navrhnutá veľkosť otvoru podľa vzťahu (5.1) pre vznik otvoru po leptaní o veľkosti 0 μm , t.j. pretnutie rovín leptaním na hornej strane plochy

kremíkoveho substrátu, bola o rozmeroch 353,55x353,55 μm , čo sa pre parametre zariadenia UV laserovej litografie zaokrúhlilo nadol na rozmery 353x353 μm .



Obrázok 8.2: Návrh motívu masky pre leptanie dier prepojov rozličnej veľkosti so zarovnávacími značkami.

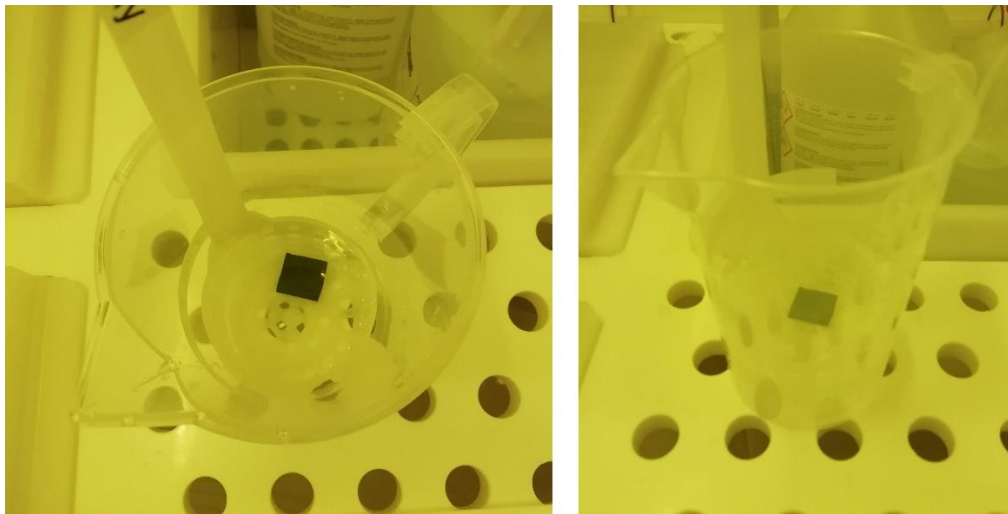
Po osvietení motívu, boli vzorky vyvolané ponorením do kvapalnej vývojky AZ® 726 MIF po dobu približne 90 sekúnd s miernym pohybom pre výmenu roztoku na daných miestach na vzorku. Je dôležité, aby bola litograficky vytváraná maska pre otvory orientovaná súhlasne s kremíkovou doštičkou, teda so smerom $\langle 100 \rangle$, ako je spomenuté v časti 5.1 a tiež zobrazené na obrázku 5.4, kde je možné vidieť zmenu uhlu leptania voči vytvorenej maske otvoru. Narezané vzorky s osvieteným a vyvolaným rezistom je možné vidieť na obrázku 8.3.



Obrázok 8.3: Pripravené narezané, osvietené a vyvolané vzorky s rezistom.

8.5 Leptanie SiO₂ v BHF

Po osvietení masky a vyvolaní rezistu je nutné odstrániť vrstvu SiO₂, keďže nie je možné leptať vrstvu SiO₂ spolu s čistým kremíkom Si použitím roztoku TMAH. Vrstva bola odstránená vložением substrátu do roztoku pufrovanej kyseliny fluorovodíkovej (BHF), kde pufrom je 12,5 % fluorid amónny (NH₄F) s pomerom kyseliny a pufru HF:NH₄F (1:7), ktorá selektívne vyleptá len odhalené miesta masky. Leptanie SiO₂ prebiehalo pri pokojovej teplote po dobu 3 minút (Obrázok 8.4) s rýchlosťou leptania približne 80 nm/min [71].



Obrázok 8.4: Leptanie SiO₂ ponorom vzorky do roztoku BHF.

Hrúbka oxidu kremičitého SiO₂ na substráte bola nameraná s hodnotou 190 nm, pomocou spektroskopickkej reflektometrie prístrojom NanoCalc 2000 (Ocean Optics, Inc., Čína), použitím zdroja svetla halogénovej žiarovky. V takomto prípade by doba leptania mala stačiť približne 2 minúty a 30 sekúnd. Pufrы v kyselinách sa používajú pre lepšie stále a kontrolované leptanie [26]. Po procesoch litografie a vyvolaní masky boli z dôvodu bočného podleptania fotorezistu namerané väčšie veľkosti hrán otvorov, v priemere celkovo o 1,5 μm oproti pôvodnému návrhu (vid' časť 8.4). Zväčšenie otvoru je možné vidieť na obrázku 8.5.

Následne bola rezistová maska odstránená ponorom, kde sa dajú použiť organické rozpúšťadla ako je etanol a následne bol celý substrát očistený isopropanolom (IPA), ktorý bol následne vysušený prúdom dusíka. Celkové zväčšenie otvoru aj po litografii, vyvolaní rezistu, vyleptaní SiO₂ vrstvy a odstránení zvyškového rezistu, činilo 2 μm, ktoré vytvorilo dieru na spodku substrátu s veľkosťou 355x355 μm, kde $x_0 = 355 \mu\text{m}$. Takto pripravené substráty, boli ponorené do vody (môže byť aj IPA, ale odparuje sa viac), aby nedošlo k rastu vrstvy natívneho oxidu pred ďalším výrobným procesom.



Obrázok 8.5: Rozmery otvoru v maske po expozícii a vyvolaní rezistu.

8.6 Mokrý anizotropný leptanie Si v roztoku TMAH

Vytvorený motív masky v SiO_2 vrstve, slúži ako ochrana leptania častí mimo vytvorených otvorov, keďže roztok TMAH leptá vrstvu SiO_2 veľmi pomaly. Za určitú dlhú dobu by došlo k preleptaniu sa skrz vrstvu SiO_2 , ale táto doba je dostatočne nízka na to, aby sa kremíkový substrát preleptal skrz až k spodnej vrstve SiO_2 , ktorá slúži dočasne ako membrána pre pokovovanie. Najprv boli vykonané len dva pokusy leptania vzoriek v 5% vodnom roztoku TMAH pri teplote $90\text{ }^\circ\text{C}$, za stáleho miešania, po hodinových intervaloch vytiahnutím z nahriateho roztoku, na ktorých boli testované vlastnosti a rýchlosť leptania v tejto koncentrácii, ktoré boli následne odmerané na optickom mikroskope, čo je možné vidieť na (Obrázok 8.6). Experiment však ukázal, že použitie nízkej koncentrácie roztoku TMAH spôsobuje vytváranie rôznych hrboľatých štruktúr počas leptania a nerovnomernosti, ktoré spôsobujú nedokonalé meranie hĺbky otvorov a taktiež vytvárajú defekty pri celkovom prelepte (viď časť 8.6). V procese leptania pri nízkych koncentráciách môže dôjsť k nekontrolovateľnému podleptaniu šikmej steny vyleptaného otvoru.



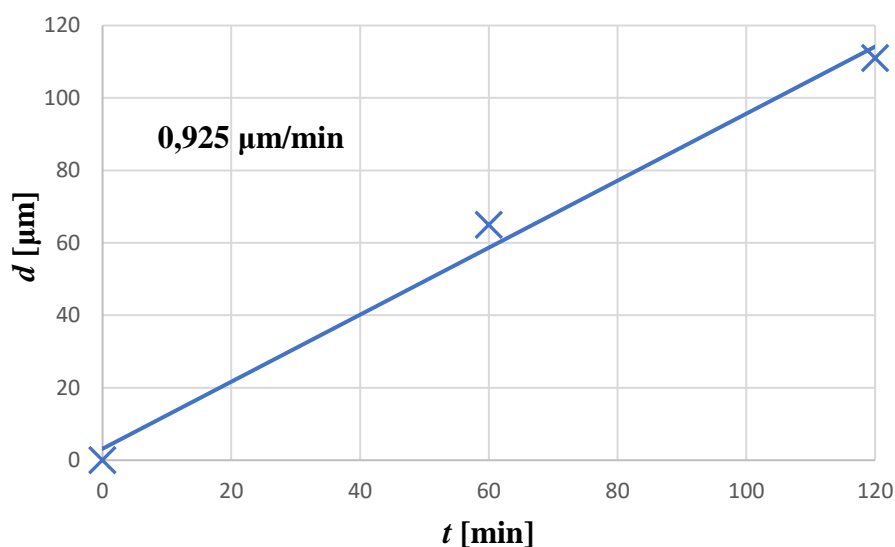
Obrázok 8.6: Vyleptaný otvor v substráte po 2 hodinách v 5% roztoku TMAH, pri teplote 90°C.

K celkovému vymiznutiu hrbolčekov počas leptania dochádza už pri koncentrácii 22 % [44], takže bola zvolená koncentrácia 25% roztoku TMAH aj kvôli dostupnosti tohto roztoku pri takejto koncentrácii a nepotrebnosti riedenia, pri ktorej nevzniká podleptanie voči rovinám {111}. Táto koncentrácia má tiež vysokú selektivitu voči SiO₂ maske.

8.6.1 Meranie rýchlosti leptania Si v roztoku TMAH

Hlavným zameraním práce bolo zistenie vlastností leptania v roztoku TMAH pri rôznych koncentráciách, a to rýchlosti leptania a času potrebného pre vyleptanie otvoru skrz substrát a závislosti a selektivity leptania rovín.

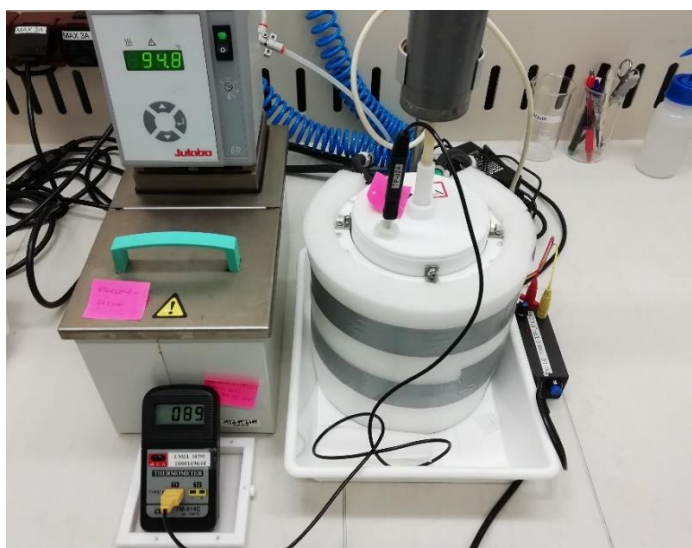
Aj keď je selektivita leptania 5% roztoku TMAH voči rovinám {111} vyššia ako pri 25% roztoku, bolo od tejto koncentrácie upustené kvôli nerovnosti povrchu a väčším defektom spôsobené nekontrolovateľným podleptávaním šikmej steny (viď obrázok 8.6) [26]. Hĺbka vyleptaných otvorov bola nameraná pomocou zariadenia Mechanického profilometra Dektak XT (Bruker Corporation, USA). Z týchto vzoriek bola určená rýchlosť leptania v závislosti hĺbky vyleptaného otvoru od času, ktorá je zobrazená na obrázku 8.7, kde táto hodnota obsahuje chyby merania kvôli zvolenému počtu vzoriek. Pokles rýchlosti leptania v bode merania po dvoch hodinách mohlo byť spôsobené otváraním nádoby, pri vyberaní vzoriek z leptacieho roztoku.



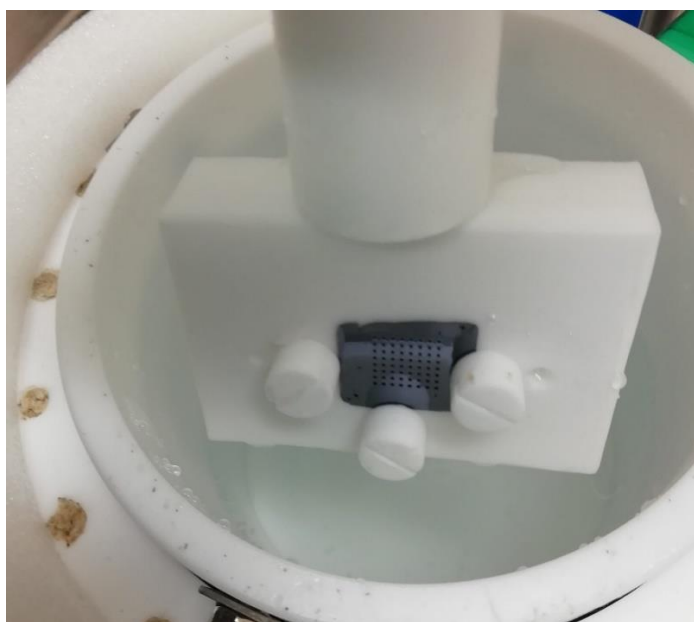
Obrázok 8.7: Časová závislosť hĺbky vyleptaného otvoru v 5% roztoku TMAH.

8.6.2 Zariadenie pre leptanie

Vyparovanie vody z roztoku nebolo brané z veľkej časti do úvahy, keďže proces leptania prebiehal v uzatvorenej a utesnenej polytetrafluórethylénovej (PTFE – Teflon) nádobe. Celé zariadenie je zobrazené na obrázku 8.8, v čase priebehu vyhrievania, ktoré pozostáva z vyhrievacieho prístroja, kde sa nachádza roztok ethylén glykol. Roztok cirkuluje okolo PTFE nádoby, ktorý nahrieval roztok kyseliny TMAH na teplotu 90 °C. Meranie teploty v nádobe PTFE bolo realizované pomocou termometra LUTRON, model TM-914C, s termočlánkom typu K. Vzorky sa následne vložili do držiaka (viď obrázok 8.9), ktoré sa pri procese leptania točili upevnením elektrického motorčeka gumovou bužirkou na držiak nádoby. Elektrický motorček bol napájaný DC-DC step-up meničom, ktorým je možné meniť aj rýchlosť otáčok.



Obrázok 8.8: Zariadenie pre leptanie substrátov s výhrevom roztoku a miešaním.



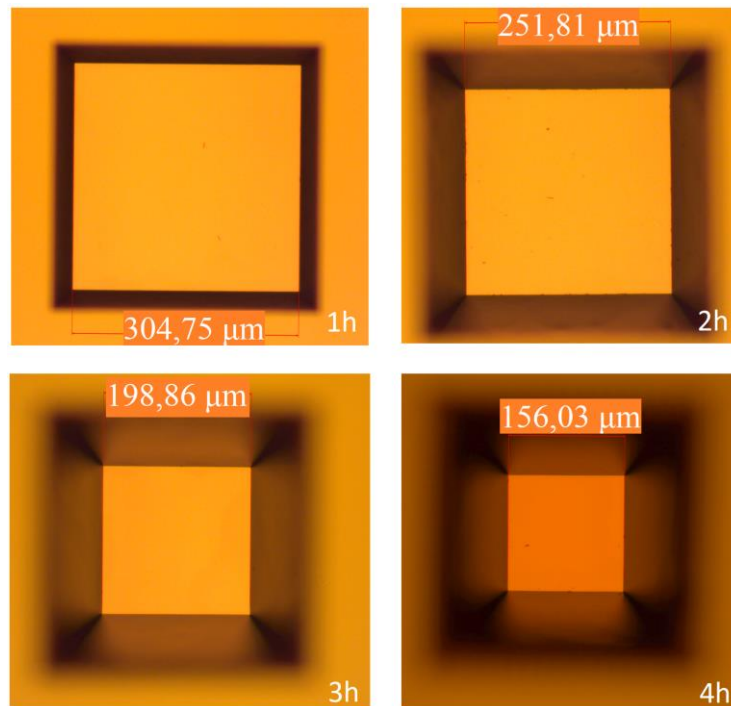
Obrázok 8.9: Držiak pre leptanie vzoriek v PTFE nádobe.

Ďalšie primárne testy sa realizovali už v spomínanom 25% roztoku TMAH. Tento nový roztok nebolo potrebné riediť, keďže boli využité nádoby, v ktorých sa tento roztok nachádza a sú dodávané a dostupné práve v týchto koncentráciách.

8.6.3 Výsledky merania a leptania v 25% roztoku TMAH

Podobným spôsobom leptania vzoriek v 5% roztoku TMAH, bolo realizované aj leptanie šiestich vzoriek v 25% roztoku TMAH za stáleho miešania a ohreve na teplotu 90 °C. Vzorky sa následne vyberali pre meranie po hodinových intervaloch leptania. Prvé namerané údaje boli realizované na štyroch vzorkách so štyrmi nameranými časovými

intervalmi. Pre doplnenie údajov boli vykonané dva ďalšie testy leptania, ktoré prebiehali pri teplotách 91 až 93 °C, kvôli nesprávne nastavenej teplote výhrevu roztoku TMAH. Pre chybné údaje piateho a šiesteho vzorku boli vybrané len štyri leptacie vzorky, ktoré je možné vidieť na obrázku 8.10. Z nameraných údajov uvedených v tabuľke 8.2 je možné vidieť väčšiu nameranú hĺbku leptania d v čase $t = 300$ min. Táto hodnota bola ovplyvnená leptaním pri rozdielnej teplote ako pri predošlých vzorkách.

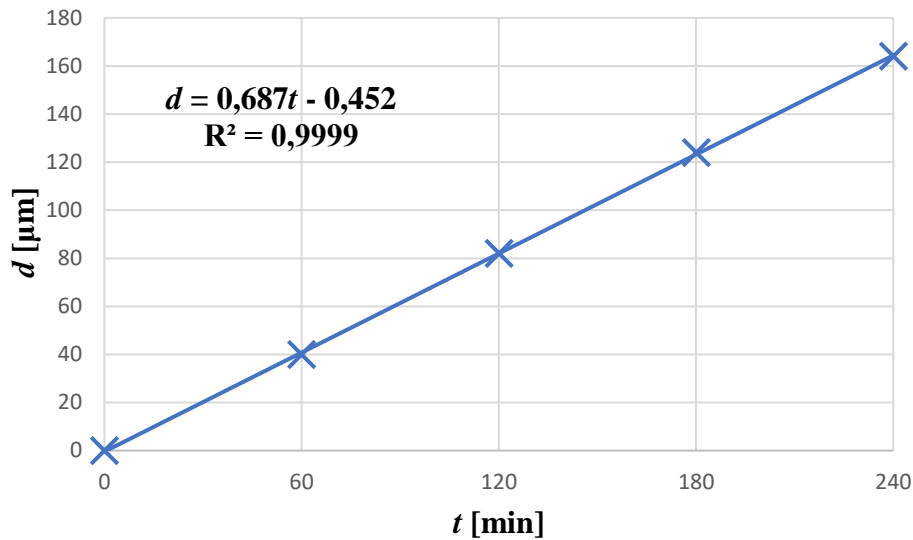


Obrázok 8.10: Snímky vyleptaných otvorov po 60 minútových intervaloch.

Tabuľka 8.2 Namerané hodnoty hĺbky otvorov po 60 minútových intervaloch

	Vzorka (i)	0	1	2	3	4	5
Čas leptania	t [min]	0	60	120	180	240	300
Hĺbka leptu	d [μm]	0,2	40,1	82,2	124,2	164,3	214,1
Hĺbka leptu bez oxidu	$d - d_{\text{SiO}_2}$ [μm]	0,0	39,9	82,0	124,0	164,1	213,9
Krokové lepty	$d_{i+1} - d_i$ [μm]	0,0	39,9	42,2	41,9	40,1	49,8
Rýchlosť leptania po korkoch	$(d_{i+1} - d_i)/60$ [$\mu\text{m}/\text{min}$]	0,0	0,66	0,70	0,70	0,67	0,83

Nameraná závislosť hĺbky na čase, je zobrazená na obrázku 8.11, kde je možné určiť aj rýchlosť leptania Si preložením priamkou, z ktorej smernica udáva práve túto rýchlosť leptania Si v 25% roztoku TMAH.



Obrázok 8.11: Časová závislosť leptania Si na nameranej hĺbke otvoru v 25% roztoku TMAH pri 90 °C ($T = 92$ °C, pri $t = 240$).

Rýchlosť leptania pri týchto parametroch teda vychádza:

$$R_{<100>}^{Si} = (687 \pm 8) \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (8.1)$$

Z nameraných hodnôt boli vypočítané aj rýchlosti leptania v smere $\langle 111 \rangle$. Ako bolo zmienené v podkapitole (8.5), že pri leptaní SiO_2 sa celková veľkosť počiatočného otvoru zväčší na $x_0 = 355 \mu\text{m}$. Pre výpočet rýchlosti leptania v tomto smere, boli namerané potrebné údaje, ako veľkosť vyleptaného otvoru na vrchu substrátu a veľkosť otvoru s podleptaním masky SiO_2 , uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 8.3 Vypočítané hodnoty hĺbky z nameraných hodnôt otvorov po 60 minútových intervaloch.

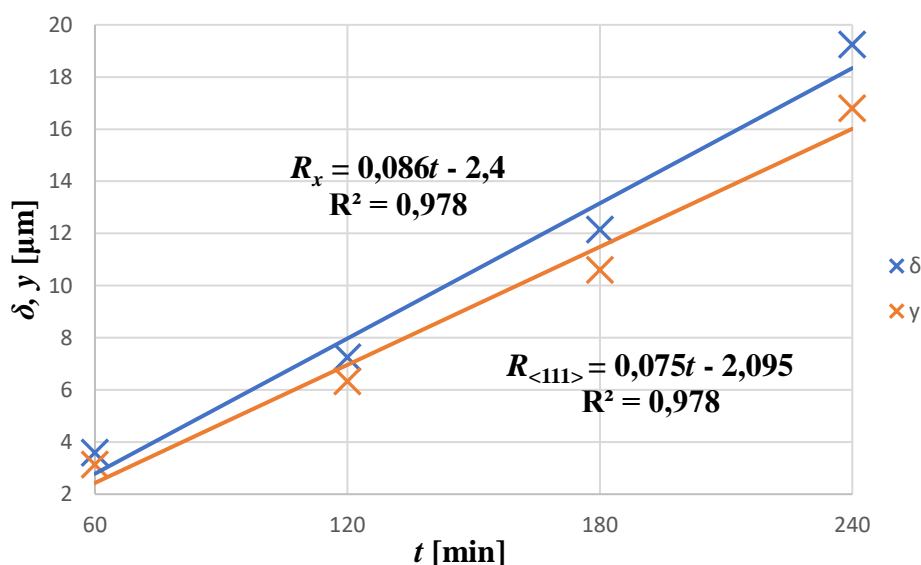
Čas leptania	t [min]	0	60	120	180	240
Veľkosť s podleptaním	$x_0 + 2\delta$ [μm]	355,0	362,2	369,5	379,3	393,5
Veľkosť v diere	x [μm]	355,0	304,8	251,8	198,9	156,0
Šírka šikmej steny	w [μm]	0,0	28,7	58,9	90,2	118,7
Vypočítaná hĺbka	d_{vyp} [μm]	0,0	40,6	83,2	127,6	167,9

Použitím vzorca (5.3), sa dá určiť šírku šikmej steny w a pre príklad môžeme vypočítať približnú hĺbku vyleptanej diery d , použitím vzorca (5.2), kde pre údaje z

tabuľky 8.3 vyjde pre čas $t = 240$ min, hĺbka $d_{vyp} = 167,9$ μm . Táto hodnota sa líši od nameranej hodnoty v tabuľke 8.2 skoro o 4 μm , čo mohlo byť spôsobené chybou merania odčítavaním hodnôt veľkosti otvorov na optickom mikroskope a aj zaokrúhľovaním výpočtov. Namerané a vypočítané boli aj hodnoty rýchlosti leptania v smere $\langle 111 \rangle$, t.j. $R_{\langle 111 \rangle}$, vypočítané z dĺžky y (viď obrázok 5.3) a rýchlosť podleptávania SiO_2 v smere x , t.j. R_x , z dĺžky δ , pre jednotlivé časové intervaly, znázornené v tabuľke 8.4. Celková priemerná rýchlosť leptania v týchto smeroch je zobrazená na obrázku 8.12, kde táto rýchlosť je určená z priemeru vypočítaných hodnôt uvedených v tabuľke 8.3.

Tabuľka 8.4 Vypočítané hodnoty dĺžky a rýchlosti leptaných smerov z nameraných hodnôt otvorov po 60 minútových intervaloch.

t [min]	0	60	120	180	240
δ [μm]	0,00	3,60	7,25	12,15	19,25
R_x [$\mu\text{m}/\text{min}$]	0,00	0,06	0,06	0,07	0,08
y [μm]	0,00	3,14	6,33	10,61	16,81
$R_{\langle 111 \rangle}$ [$\mu\text{m}/\text{min}$]	0,00	0,05	0,05	0,06	0,07



Obrázok 8.12: Časová závislosť podleptávania SiO_2 vzdialenosti leptaných smerov v 25% roztoku TMAH pri 90 °C.

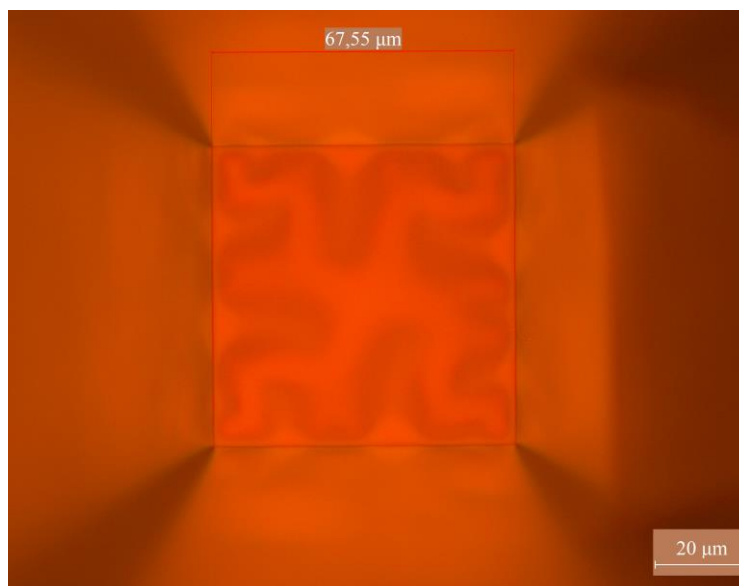
Parametre δ a y sú uvedené na obrázku 5.3. Priemerná rýchlosť leptania v smere x je uvedená vo vzorci (8.3) a rýchlosť leptania v smere $\langle 111 \rangle$ je:

$$R_x^{\text{Si}} = (86 \pm 12) \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (8.2)$$

$$R_{\langle 111 \rangle}^{\text{Si}} = (75 \pm 9) \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (8.3)$$

Z týchto rýchlostí môžeme overiť veľkosť vyleptanej diery na spodnej strane kremíkoveho substrátu, kde hrúbka substrátu $d_0 = \pm 250,0$ μm . Celkový čas leptania Si,

podľa parametrov uvedených vyššie, by mala byť $t = d_0/R_{<100>}^{Si} = 363,9$ min. Podľa vzorca (5.8), by teda mala veľkosť otvoru na spodnej strane vyjsť $x = 68,3$ μm . Tento výpočet si môžeme overiť z obrázka 8.13, kde je celkový čas leptania $t = 378$ min.

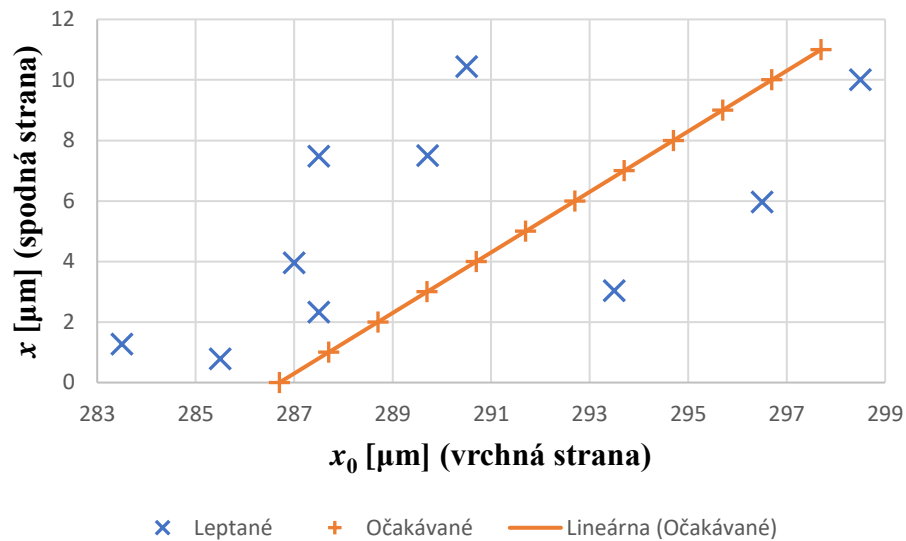


Obrázok 8.13: Snímka preleptaného otvoru po leptaní v čase $t = 378$ min s SiO_2 membránou.

8.6.4 Test reprodukovateľnosti veľkosti dier

Rôzne návrhy spôsobov vytvárania mikroprepojov zahŕňajú aj overovanie reprodukovateľnosti leptacieho procesu. V tomto prípade išlo o overenie veľkosti otvorov leptaním vzoriek v uzatvorenej nádobe, aby sa predišlo vyparovaniu vody počas leptania. Počas testovania nebolo uvažované so znižovaním koncentrácie roztoku pri leptaní kremíka a vyparovaním vody, pri vyberaní vzoriek z roztoku a následná zmena parametrov leptania. Uvedené hodnoty veľkosti otvorov, na spodnej strane substrátu na počiatočnom návrhu je možné vidieť na obrázku 8.14, ktoré vychádzali z predošlých hodnôt testov leptania, vopred uvedené na obrázku 8.11. Zo závislosti je možné vidieť, že sa veľkosti otvorov od seba líšia a nedosiahli sa očakávané výsledky aj so zvýšeným časom leptania rovnakého motívu, čo bolo spôsobené práve zanedbaním meniacej sa koncentrácie pri vyššie uvedených prípadoch.

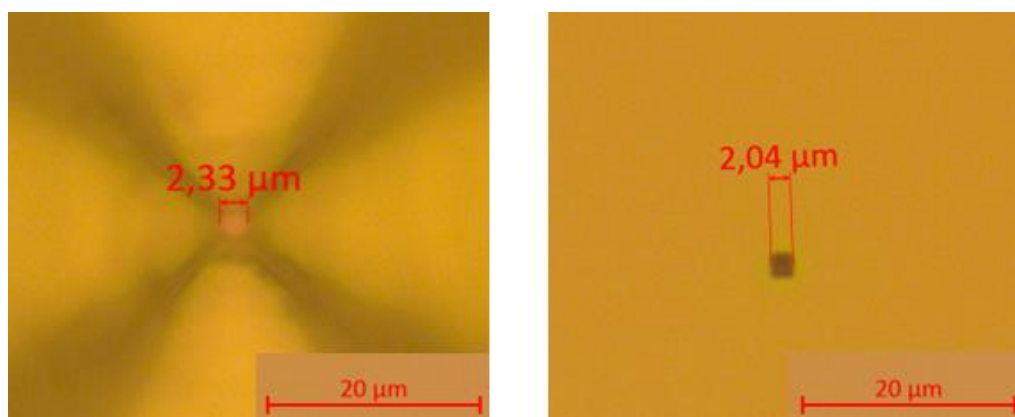
Pre vytvorenie optimálnych podmienok na získanie presnejších výsledkov, by bolo nutné leptací roztok vždy doplniť o množstvo vyparenej vody, počas merania pH roztoku alebo roztok vždy po každom cykle leptania vymeniť za nový. Takýto proces je veľmi zdĺhavý a dosiahnuté výsledky veľkosti otvorov v použití mikroštruktúr nepredstavujú značnú výhodu. Dosiahnutie rovnakej koncentrácie roztoku pri každom cykle leptania meraním jeho pH, si vyžaduje prispôbenie zariadenia o ďalšie prístroje a spôsob merania, ktoré by bolo náročné na čas, priestor a dostupnosť.



Obrázok 8.14: Závislosť vyleptanej veľkosti otvoru na spodnej strane na počiatocnom návrhu na vrchnej strane substrátu ($T = 91,6$ °C; $t = 495$ min).

Napriek nepodarenému reprodukovaniu rovnakých veľkostí dier mokrým anizotropným leptaním, boli vytvorené otvory na spodnej strane substrátu o veľkosti $0,8 - 10$ μm . Na obrázku 8.15 je možné vidieť vyleptaný otvor na spodnej strane o veľkosti $2,3$ μm s SiO_2 membránou, ktorej meraná veľkosť je ovplyvnená optikou skrz časť substrátu a presnejšie odmeraná veľkosť $2,04$ μm zo spodnej strany substrátu na rovnej ploche. Vytvorený otvor je z pôvodného návrhu 284 μm s rozšírením na 286 μm , ktoré je uvedené v časti 8.6.3. Vyleptaný substrát bol následne omytý, odstránil sa oxid v roztoku BHF a prešiel procesom RCA čistenia, ktorý dodatočne očistí substrát od rôznych častíc a zvyškov, pre prípravu na oxidáciu a pokovovanie. Oxidačná vrstva bola nanosená termálnym procesom s hrúbkou oxidu približne 300 nm. Vodivá vrstva potrebná pre galvanické pokovovanie, ktoré je určené aj na výplň vytvorených dier, bola nanosená na Evaporátore elektrónovým zväzkom (BESTEC). Nanosený bol titan s hrúbkou 5 nm a 200 nm medi. Vyhotovené vzorky boli následne vyplnené kovom galvanicky a nasnímané na elektrónovom mikroskope.

Výsledná požadovaná veľkosť dier na spodnej strane substrátu v rozmedzí $1 - 10$ μm , je v dôsledku nízkej dosiahnutej selektivity malá, keďže veľkosť otvoru na vrchnej strane dosahuje minimálnych veľkostí až 330 μm . Selektivitu je možné zvýšiť a optimalizovať leptanie otestovaním pri pridaní roztoku Tritonu X-100 [72]. Experimentálna časť obsahuje aj spôsob suchého leptania, ktoré je síce drahšie a náročnejšie, ale dosahuje vysoké pomery strán a požadované malé veľkosti dier, uvedené nižšie.



Obrázok 8.15: Pohľad na preleptanú dieru mokrým anizotropným leptaním (vľavo) zdola a (vpravo) zhora; (leptaná pyramídová časť je zdola).

8.6.5 Zhrnutie nameraných výsledkov mokrého leptania

Tabuľka 8.5 slúži ako súhrn dosiahnutých výsledkov meraní rýchlosti leptania rovín v rôznych smeroch anizotropným leptaním kremíka pomocou 25% roztoku TMAH.

Tabuľka 8.5 Súhrn nameraných a vypočítaných hodnôt rýchlosti leptania Si v rôznych smeroch pri teplote 91,6 °C.

Roztok	$R_{\langle 100 \rangle}^{Si}$ [$nm \cdot min^{-1}$]	R_x^{Si} [$nm \cdot min^{-1}$]	$R_{\langle 111 \rangle}^{Si}$ [$nm \cdot min^{-1}$]
25% TMAH	(687 ± 8)	(86 ± 12)	(75 ± 9)

8.6.6 Naparenie kovu na vytvorené diery

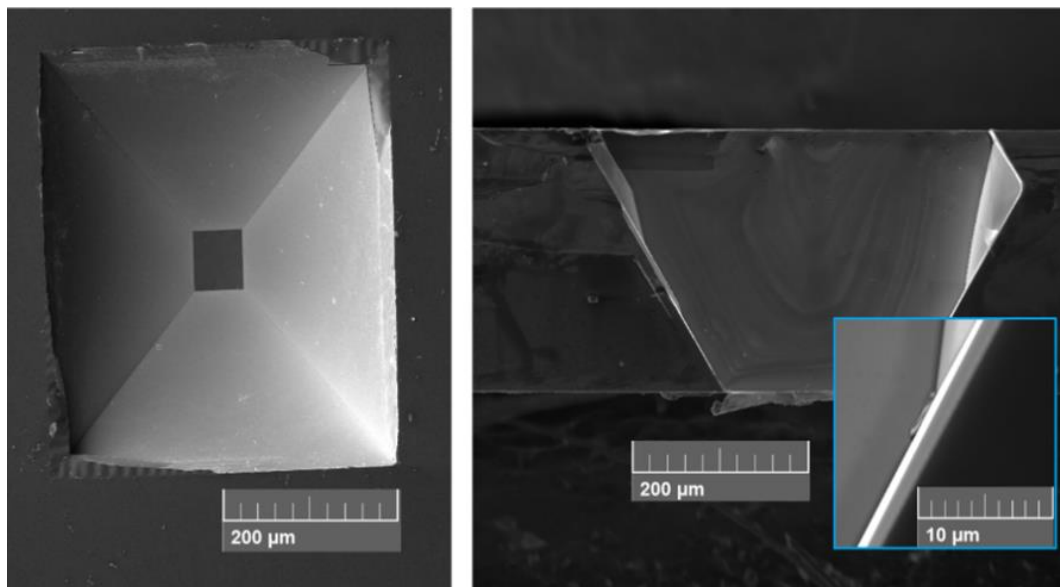
Medzi konečné procesy patrí aj pokovovanie otvorov pomocou Evaporátora elektrónovým zväzkom (BESTEC). Prvá vzorka bola nanosená vrstvou Ti/Cu/Au o hrúbke 5/300/20 nm, kde Ti slúži ako adhézna vrstva a Au ako ochrana proti oxidácii. Vytvorené pokovované diery sú zobrazené na obrázku 8.16.



Obrázok 8.16: Pokovované prepoje vrstvou titanu, medi a zlata.

8.6.7 Snímky SEM vytvorených dier z mokrého leptania

Prípravené vzorky pokovovaných otvorov v kremíkovom substráte anizotropným leptaním v 25% roztoku TMAH, spolu s pokovovaním otvorov a SiO₂ membrány na spodnej strane substrátu po leptaní o veľkostiach približne 55,4 μm a 67,6 μm zobrazené na obrázku 8.17.



Obrázok 8.17: Snímky SEM pokovovaných prepojov vyleptané anizotropne s vodivými vrstvami titanu, medi a zlata.

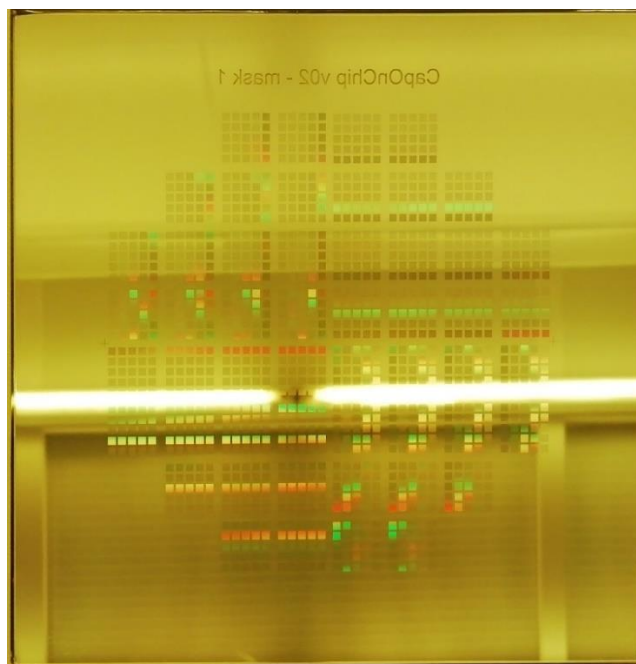
8.7 Príprava substrátu pre testy suchého leptania

Podobne ako pri časti 8.2, bol pripravený obojstranne leštený wafer a očistený RCA procesom s rovnakými parametrami s rozdielom v hrúbke oxidu, s veľkosťou 500 nm a parametrami rovnakými ako je uvedené v tabuľke 8.1. Väčšia hrúbka oxidu je zvolená ako stop vrstva, na ktorú sa po leptacích krokoch nanesie vodivá vrstva.

Následne bola nanesená vrstva HMDS ako v časti 8.1 a v tomto prípade bol nanesený fotorezist 12XT-20PL-10 na spodnú stranu, metódou spin coating (viď časť 8.3), ktorý je odolnejší voči suchému leptaniu a často používaný pri DRIE leptaní. Rezist bol nanesený pri rýchlosti otáčok 4000 rpm s výslednou hrúbkou 8,2 μm [73]. Hrubšia vrstva rezistu bola zvolená ako rezerva, aby sa predišlo preleptaniu rezistu v dlhších leptacích procesoch a následnému leptaniu substrátu mimo motívu.

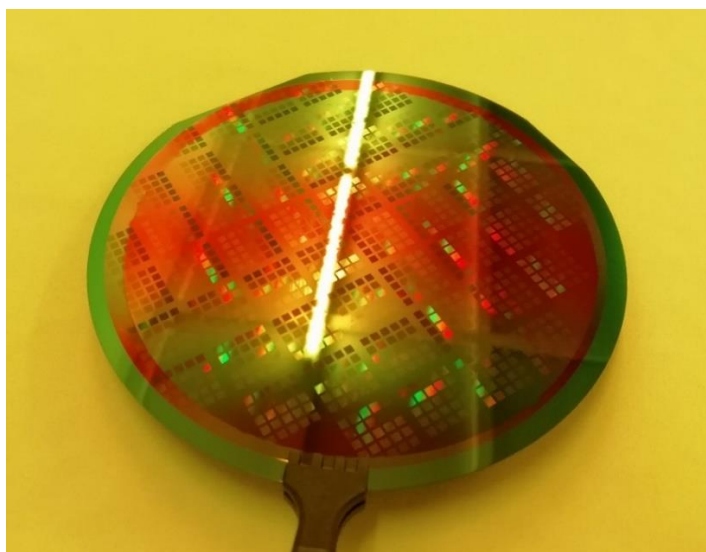
Pre vysušenie a zatvrdnutie vrstvy, bol substrát prevedený procesom Soft-bake, čím bol zahriaty na teplotu 110 °C po dobu 120 s. Po tomto procese sa následne na rezist vyvolal motív z predpripravenej kremennej fotomasky, s pozitívnym motívom v tenkej vrstve chrómu (viď obrázok 8.18), v ktorej sa nachádzajú plochy otvorov s veľkosťami 2, 4, 8 a 16 μm oddelené od seba rovnakou vzdialenosťou. Fotorezist bol cez masku

exponovaný UV žiarením o vlnovej dĺžke 365 nm (i-line), s dávkou 140 mJ/cm² po dobu 6,4 sekúnd, na zariadení SÜSS-MA8/BA8 Gen3 (SÜSS MicroTec SE, Nemecko).



Obrázok 8.18: Predpripravená fotomaska použitá pri exponovaní.

Fotorezist si vyžaduje aj proces Post-expose-bake, ktorý nasleduje po nasvietení, nahriatím na teplotu 90 °C po dobu 60 s, pre správny obraz vo fotoreziste. Motív sa vyvolal rovnako ako pri príprave vzoriek na mokré anizotropné leptanie v roztoku AZ 726MIF na 120 sekúnd. Výsledný motív vo fotoreziste na celom substráte je možné vidieť na obrázku 8.19.



Obrázok 8.19: Vyvolaný motív vo fotoreziste na waferi skrz masku.

8.7.1 Testovanie suchého leptania

Suché leptanie je prevedené Bosch DRIE procesom na zariadení PlasmaPro 100 Cobra® (Oxford Instruments, UK). Keďže sa preleptáva skrz celý substrát, je potrebné vedieť aj približnú dobu trvania procesu. Z použitého wafera bola pomocou fluorinového RIE odstránená oxidová vrstva, pre skrátenie medzi-procesov, ktorá nie je potrebná pre test procesu DRIE. Získavanie údajov z tohto leptania bolo prevedené vo forme leptania menších vzoriek, ktoré je možné následne lámať/rezať cez leptané otvory a hĺbku odmerať na optickom alebo elektrónovom mikroskope. K meraniu leptaných štruktúr bol použitý rastrovací elektrónový mikroskop (SEM) Tescan Lyra 3 (Tescan, ČR).

Substrát s vytvoreným motívom bol nalámaný na menšie vzorky (viď obrázok 8.20), ktoré boli postupne leptané v rôznych časových intervaloch. Pri suchom leptaní je proces vykonávaný v cykloch, kde jednotlivý cyklus zahŕňa depozíciu ochrannej pasivačnej vrstvy, použitím C_4F_8 , preniknutie cez spodnú ochrannú vrstvu a leptanie použitím SF_6 .



Obrázok 8.20: Nalámané vzorky pripraveného wafera s fotorezistom.

K dosiahnutiu malých veľkostí otvorov s bežne používanou najmenšou hrúbkou substrátu $250\ \mu\text{m}$, je potrebné brať do úvahy aj maximálne pracovné hodnoty zariadenia. Z nastudovaných zdrojov [74] boli na začiatok zvolené určité parametre procesu, ktoré boli následne testované a optimalizované (viď tabuľka 8.6). Výkon ICP (Induktívne viazaná plazma) bol stanovený z nastudovanej literatúry a ďalej nebol menený.

Tabuľka 8.6 Nastavené prvotné parametre pre proces DRIE, pri teplote $3\ ^\circ\text{C}$.

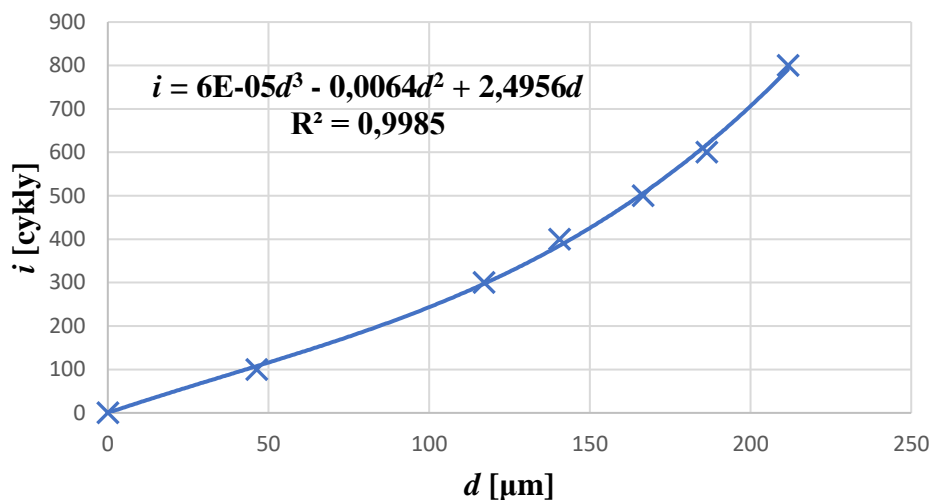
Proces 1	t [s]	p [mTorr]	P_{ICP} [W]	P_{CCP} [W]	Q_{SF_6} [sccm]	$Q_{\text{C}_4\text{F}_8}$ [sccm]
Pasivácia	2	35	1500	5	5	180
Depasivácia	2,5	30	1300	15	200	5
Leptanie	2,5	40	1300	0	200	5

Pripravené vzorky boli leptané v určitých cykloch aby sa zistila približná rýchlosť leptania a aj dopad veľkostí malých dier na spomaľovanie leptacieho procesu. Závislosť

bola určená z počtu cyklov leptania na vyleptanej hĺbke otvorov, zobrazená na obrázku 8.21, z ktorej je možné určiť približný počet cyklov vyleptania diery pre určitú hrúbku substrátu. Hodnoty meraných vzoriek sú uvedené v tabuľke 8.7.

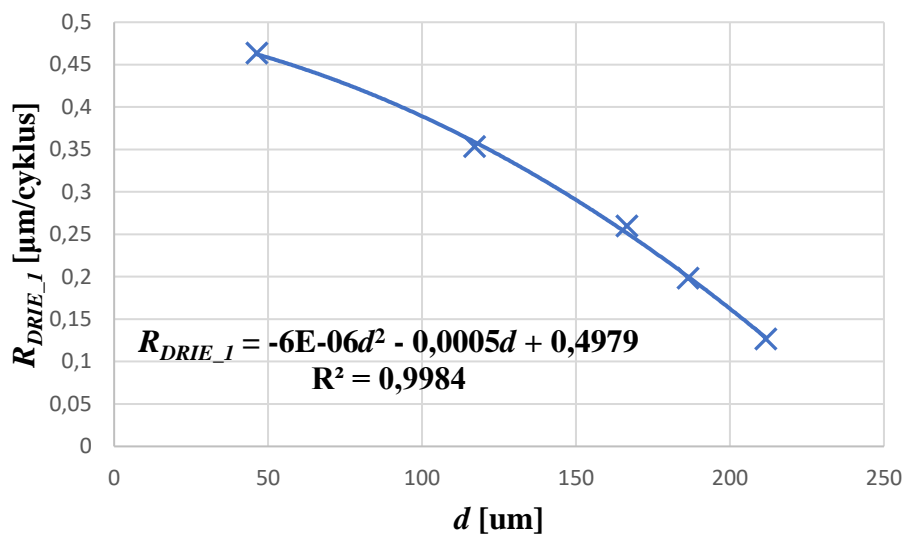
Tabuľka 8.7 Namerané hodnoty hĺbky otvorov po nastavenom kroku cyklov.

Vzorka (<i>i</i>)	0	1	2	3	4	5	6
cyklus	0	100	300	400	500	600	800
Hĺbka <i>d</i> [μm]	0,00	46,35	117,02	140,52	166,50	186,32	211,61

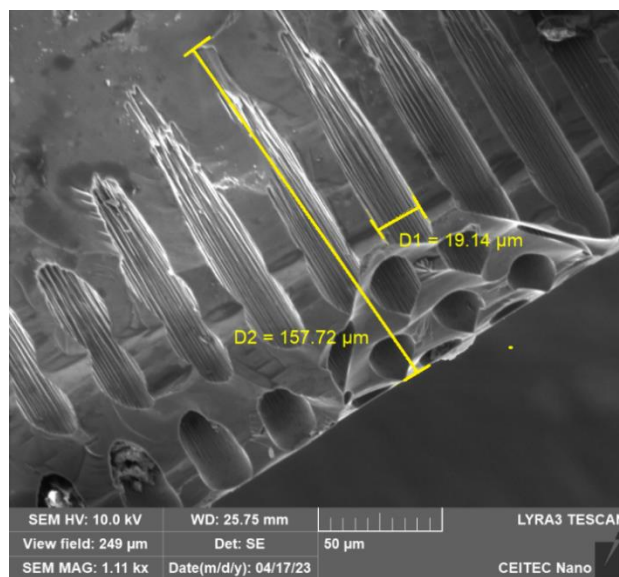


Obrázok 8.21: Závislosť hĺbky vyleptaného otvoru na počte cyklov použitím prvotného nastaveného procesu.

Pre vyššie uvedené parametre leptania korešponduje leptacia rýchlosť uvedená na obrázku 8.22. Z grafu je možné vidieť, že sa rýchlosť leptania začína znižovať už pri hĺbke cca 100 μm a následne možné zastavenie leptacieho procesu smerom nadol už pri hĺbke približne 250 μm. Toto spomaľovanie leptacieho procesu je spôsobené čiernym kremíkom a nízkou urýchľovacou rýchlosťou leptacích iónov (viď obrázok 8.23). Ak by sa proces takto výrazne nespomaľoval a nedochádzalo skoro k zastaveniu leptania, tak by bolo možné z grafu určiť, že vyleptanie skrz substrát by trvalo až približne 1250 cyklov. S prebiehajúcim procesom dochádza aj k podleptávaniu, ktoré je v rozmedzí 3 – 4 μm, teda otvor s návrhom 16 μm bude mať po vyleptaní šírku približne 20 μm.



Obrázok 8.22: Závislosť rýchlosti leptania otvoru na vyleptanej hĺbke.



Obrázok 8.23: SEM snímka leptu 16 µm dier s počtom 465 cyklov.

Dôsledok spomaľovania rýchlosti leptania kvôli čiernemu kremíku je možné eliminovať zvýšením koncentrácie plynu SF₆ alebo najlepšie zvýšením výkonu zdroja CCP (Kapacitne viazaná plazma), ktorá je spôsobená striedavým napätím z RF zdroja (rádiovo frekvenčného zdroja) bežne 13,56 MHz.

8.7.2 Optimalizácia leptacieho procesu (výkon zdroja CCP)

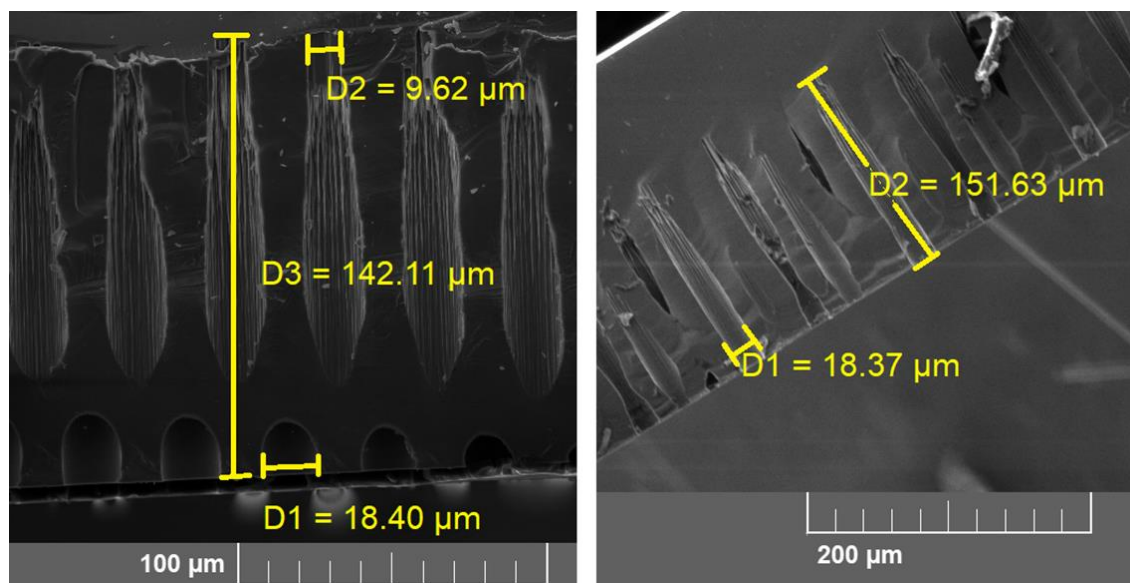
Prvým najlepším možným optimalizovaným parametrom bol výkon zdroja CCP. Pri zvolených parametroch uvedených v tabuľke 8.6, bola zistená tvorba čierneho kremíku pri výkone zdroja 15 W. Ďalšie testovanie zahŕňalo menšie zväčšenie výkonu CCP pre

pasiváciu a depasiváciu a výrazné zvýšenie pre leptáciu časť na hodnotu 8 W (viď tabuľka 8.8). S týmto procesom boli vytvorené ďalšie leptacie testy, ktoré sú uvedené na obrázku 8.24. V dôsledku chyby merania a procesu leptania, pri ktorom boli vzorky položené na nosnom substráte, z ktorého bola odleptaná vrstva SiO₂, sa ióny podieľali aj na leptaní kremíka z nosného substrátu.

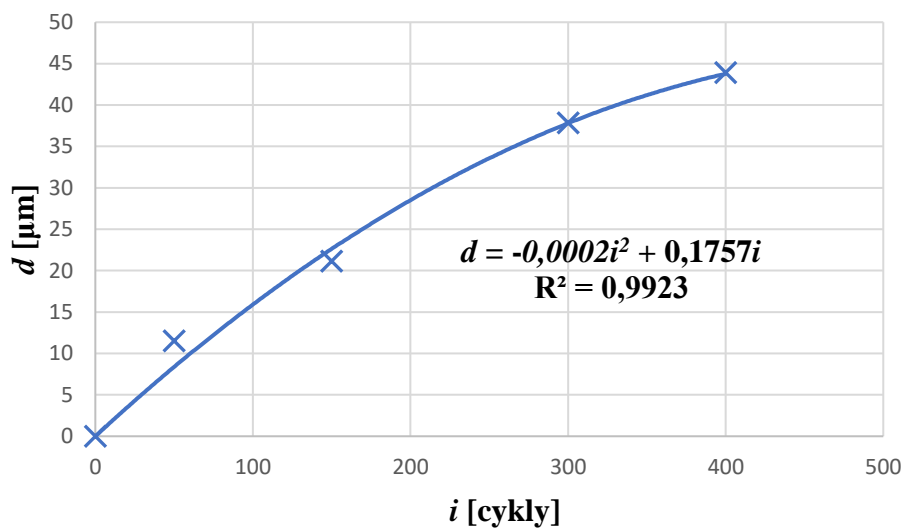
Tabuľka 8.8 Nastavené parametre v komore procesu DRIE pre prvú skúšku optimalizácie procesu, pri teplote 3 °C.

Proces 2	t [s]	p [mTorr]	P _{ICP} [W]	P _{CCP} [W]	Q _{SF6} [sccm]	Q _{C4F8} [sccm]
Pasivácia	2	25	1500	16	5	180
Depasivácia	2,7	30	1300	16	200	5
Leptanie	2,5	40	1300	8	200	5

Na obrázku 8.25 je možné vidieť, že tento proces už od začiatku leptá veľmi pomaly približne **0,13 μm/cyklus**. Kvôli malej rýchlosti leptania sa proces zbytočne predlžuje, a preto s týmto procesom nebolo ďalej experimentované. Ďalším testovaním bolo vytvorenie leptacích fáz, kde sa mení a zvyšuje výkon zdroja CCP, pri určitej hĺbke leptaného substrátu. Použitý bol predošlý proces, ktorý bol modifikovaný do troch fáz leptania.



Obrázok 8.24: Leptané otvory použitím druhého procesu s rozdielom leptania približne 9,5 μm po 100 cykloch (300 cyklov vľavo, 400 cyklov vpravo).

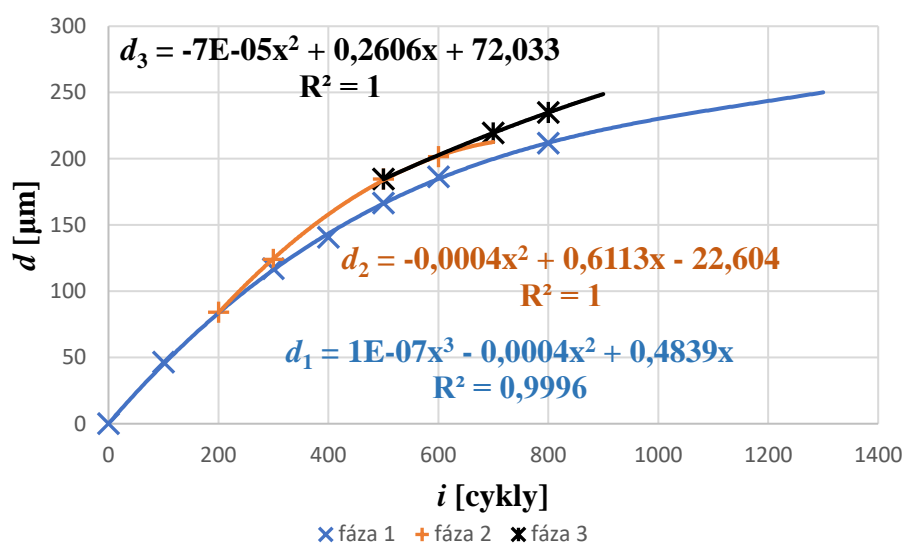


Obrázok 8.25: Závislosť vyleptanej hĺbky na počte cyklov leptania procesom DRIE.

8.7.3 Zmena prvého leptacieho procesu do fáz

Zvyšovanie výkonu zdroja CCP, potláča spomaľovanie leptania, v dôsledku odleptávania čierneho kremíka. V predošlom testovanom procese bola rýchlosť pomerne nízka. K vylepšeniu a skráteniu procesu sa teda využil prvý testovaný proces, ktorý bol otestovaný zvyšovaním výkonu v troch leptacích fázach, kedy sa rýchlosť leptania výrazne znižovala. Leptacie testy na vzorkách boli odskúšané pridávaním výkonu o 5W, kde toto zvýšenie neurobilo veľký rozdiel, preto sa prešlo na zvýšenie výkonu o 10W. Z obrázku 8.21 je možné vidieť, kedy dochádza k spomaľovaniu leptania v bode približne od 300 cyklov, kde by bolo vhodné zmeniť výkon CCP. V tejto časti už dochádza k vytváraniu čierneho kremíka a je potrebné tento výkon zvýšiť o niečo skôr aby sa predišlo zbytočnému rastu už takto skoro v leptacom procese.

Zvýšenie CCP o 10 W bolo preto prevedené už pri 200 cykloch prvého procesu, čo je približne v hĺbke 84 μm , kde nastáva prvá zmena fázy leptania. Pri zvýšení výkonu je na obrázku 8.26 možné vidieť, že sa rýchlosť leptania zvýšila pomerne o veľa, ale pri leptaní ďalších 400 cyklov nastáva spomaľovanie. Preleptanie skrz 250 μm substrát by nastalo, pri približne 1050 cykloch, čo znamená leptanie skoro 2 hodiny. Ďalším zvýšením rýchlosti leptania bolo pridanie výkonu CCP o 10 W. Z rovnakého obrázka ako bolo spomenuté vyššie je možné vidieť, že nárast nebol až tak vysoký, ale aj tak to prispelo k skráteniu doby leptania o 150 cyklov.

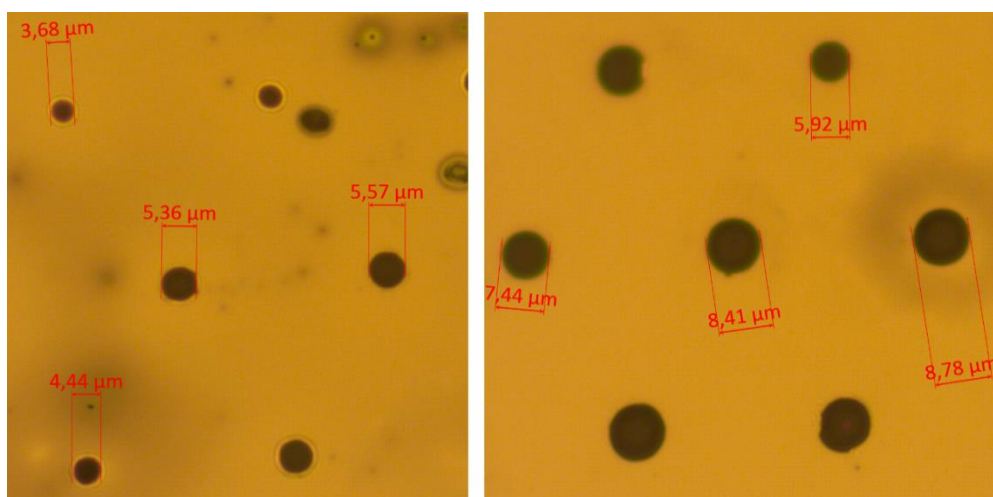


Obrázok 8.26: Závislosť hĺbky vyleptaného otvoru na počte cyklov leptania procesom DRIE v troch fázach menením výkonu CCP.

Experimentálne lepty boli odskúšané aj pri preleptávaní celého vzorku v jednom procese, použitím všetkých troch fáz. Výsledkom bolo úplne preleptanie skrz pripravenú vzorku po celkovo 900 cykloch (viď obrázok 8.27) a proces celkovo trval hodinu a 46 minút. Na ďalšom obrázku 8.28 je zobrazené rozšírenie leptanej diery v dôsledku podleptávania. Uvedené leptacie fázy, kde je pozmenený iba výkon je možné vidieť v tabuľke 8.9.

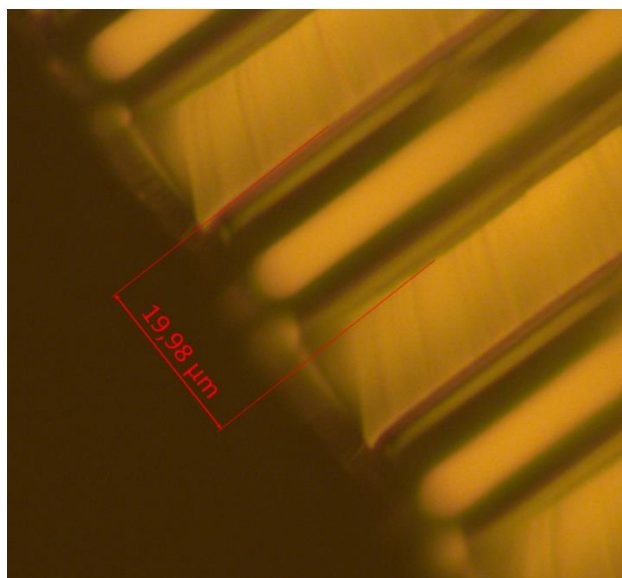
Tabuľka 8.9 Nastavené parametre v komore procesu DRIE leptaním v troch fázach, menením výkonu zdroja CCP, pri teplote 3 °C.

Proces 1 Fáza 1	t [s]	p [mTorr]	P _{ICP} [W]	P _{CCP} [W]	Q _{SF6} [sccm]	Q _{C4F8} [sccm]
Pasivácia	2	35	1500	5	5	180
Depasivácia	2,5	30	1300	15	200	5
Leptanie	2,5	40	1300	0	200	5
Proces 1 Fáza 2	t [s]	p [mTorr]	P _{ICP} [W]	P _{CCP} [W]	Q _{SF6} [sccm]	Q _{C4F8} [sccm]
Pasivácia	2	35	1500	5	5	180
Depasivácia	2,5	30	1300	25	200	5
Leptanie	2,5	40	1300	0	200	5
Proces 1 Fáza 3	t [s]	p [mTorr]	P _{ICP} [W]	P _{CCP} [W]	Q _{SF6} [sccm]	Q _{C4F8} [sccm]
Pasivácia	2	35	1500	5	5	180
Depasivácia	2,5	30	1300	35	200	5
Leptanie	2,5	40	1300	0	200	5

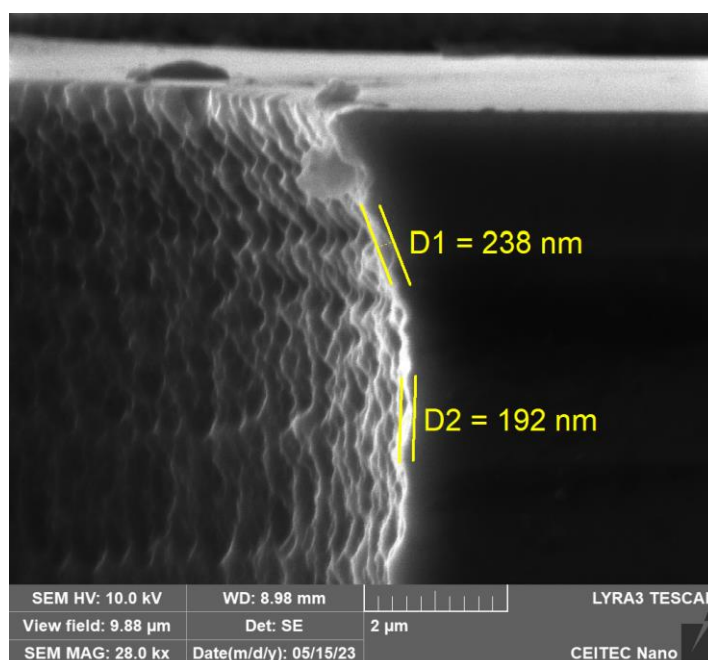


Obrázok 8.27: Výsledné preleptanie vzorky s hrúbkou 250 μm po 900 cykloch fázovaného procesu.

Použitím tohto procesu vznikajú vrúbky na bočných stenách, ktoré vznikajú cyklovaním leptania aby sa predišlo izotropnému leptaniu, o relatívne malej veľkosti pohybujúce sa okolo **200 nm** (viď obrázok 8.29), ktorá vyhovuje aj ďalšiemu postupu pri pokovovaní. Výrazné zlepšenie leptacieho procesu a rýchlosti leptania by bolo možné zvýšením výkonu CCP už na začiatku procesu a aj zvýšením prúdenia plynu SF_6 . Ďalším postupom je príprava celého wafera na proces leptania mikrónových dier a preleptanie sa k SiO_2 vrstve, ktorá slúži ako stop vrstva pre zastavenie leptania skrz celý substrát v komore DRIE. Všetky postupy spomenutého procesu sú uvedené v kapitolách nižšie.



Obrázok 8.28: Zväčšenie otvoru v dôsledku podleptávania motívu (+4 μm z pôvodnej veľkosti 16 μm).

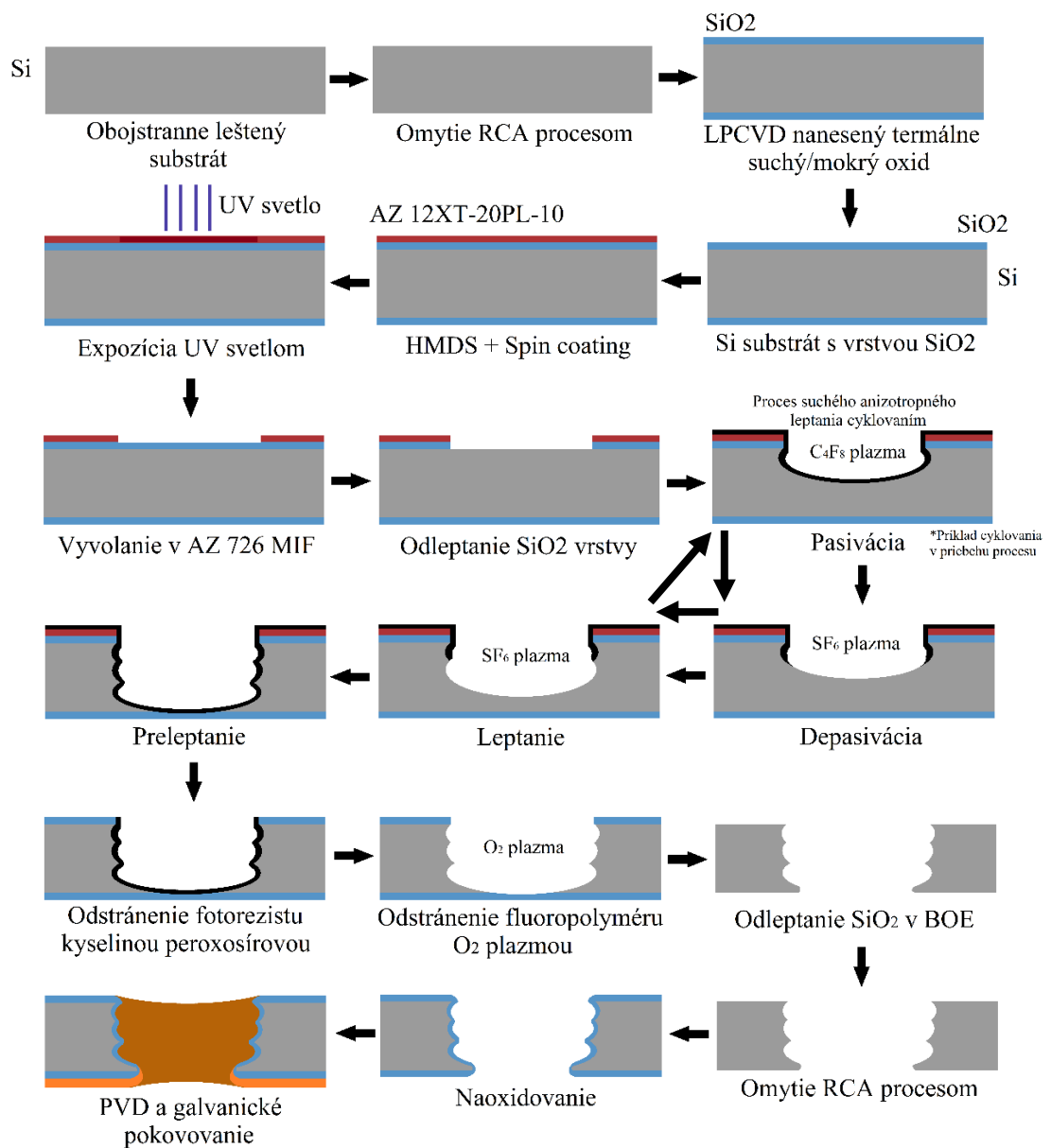


Obrázok 8.29: Vrúbkovanie bočných stien otvoru zapríčinené cyklovaným leptaním.

8.7.4 Postupy a príprava wafera pre leptanie a pokovovanie

V tejto podkapitole je uvedený postup prípravy a vytváranie otvorov v kremíkovom waferi použitím anizotropného suchého leptania. Metódy a experimentálne výsledky leptania sú popísané v predošlých podkapitolách. Na obrázku 8.30 je zobrazený postup výroby a prípravy mikroprepoja v kremíkovom substráte použitím spomenutého procesu. Rovnako ako v časti 8.7, bol pripravený rovnaký wafer a postup bol podobný ako v časti 8.1 až do bodu odleptávania SiO_2 vrstvy, ktorá slúži ako motív a fotorezist slúži ako ochranná vrstva proti leptaniu motívu.

Pripravený wafer na preleptávanie a pokovovanie, bol vytvorený rovnako ako je zobrazené na obrázku 8.19, kde následný postup vytvorenia motívu aj v oxidovej vrstve, bolo preleptanie SiO_2 cez fotorezist použitím leptania v procese fluorinového RIE. Použité parametre pre vyleptanie tejto vrstvy sú uvedené v tabuľke 8.10. Proces preleptania sa až k substrátu kremíka trval 35 minút. Bolo zistené, že pri tomto procese sa odleptáva aj vrstva rezistu pri približne $13 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$. Výsledná hrúbka fotorezistu pri pripravenom motíve na leptanie v procese DRIE bola $7,5 \mu\text{m}$.



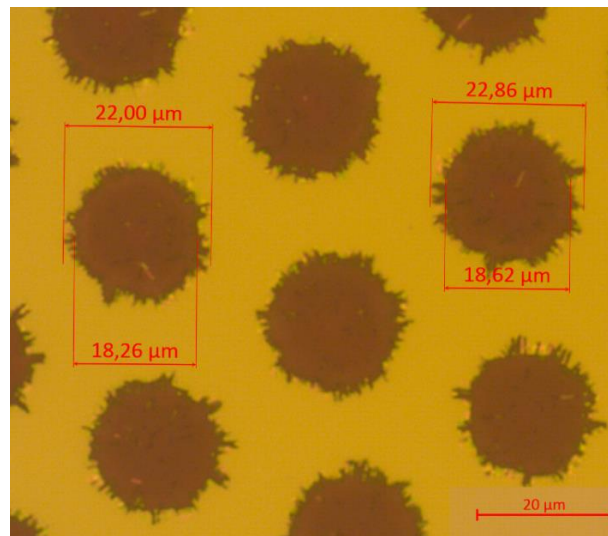
Obrázok 8.30: Grafická schéma postupu prípravy mikroprepojov na kremíkovom substráte suchým anizotropným leptaním.

Tabuľka 8.10 Parametre leptania SiO₂ v procese fluorového RIE.

SiO ₂	t [min]	p [mTorr]	P _{CCP} [W]	Q _{SF6} [sccm]	Q _{CHF3} [sccm]
Lept	15	30	200	38	12

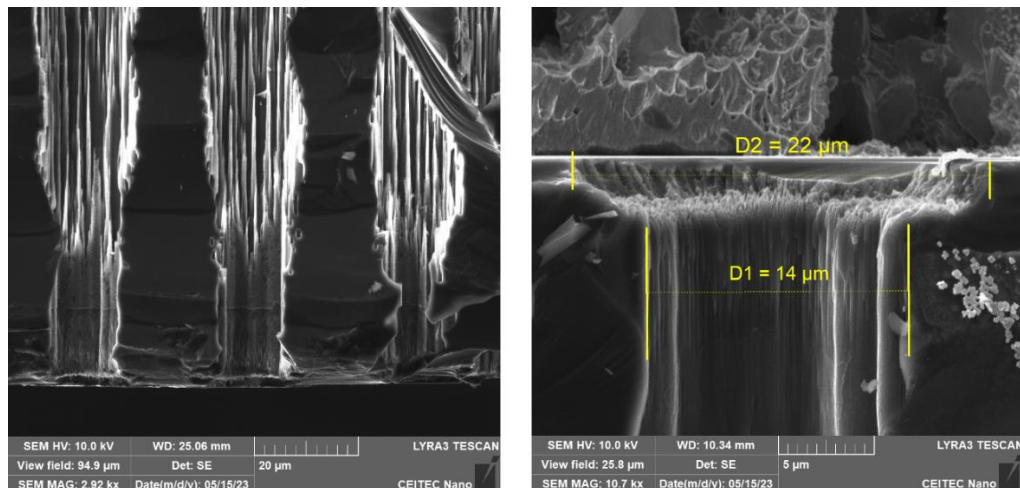
Wafer po vyleptaní motívu v SiO₂ vrstve, bol následne uložený v komore pre proces DRIE a prebehol test vyleptávania dier pri použití optimalizovaného procesu uvedený v tabuľke 8.9. Najprv bol proces prevedený v 800 cykloch, aby sa zistilo, že sa wafer nepreleptá skrz skôr, a aby nedošlo k odleptaniu aj vrstvy SiO₂ na spodnej strane.

Následne sa proces krokoval po 50-tich cykloch až do 900 cyklov. Výsledok preleptania sa k vrstve SiO₂ je zobrazený na obrázku 8.31.



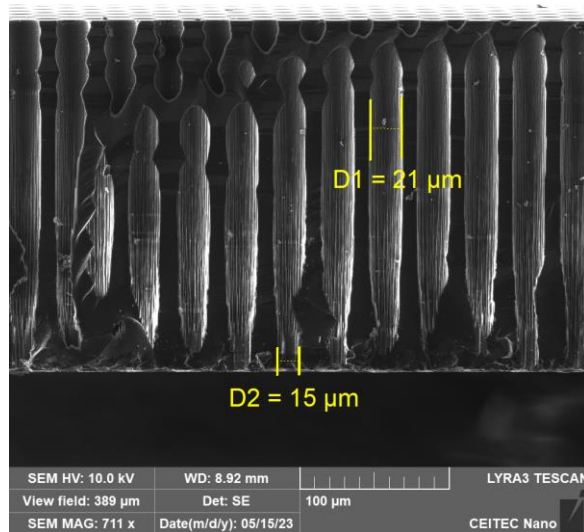
Obrázok 8.31: Vrstva SiO₂ na spodnej strane preleptaného substrátu a rozšírenie otvoru v dôsledku „notching efektu“.

Zväčšenie na strane s vrstvou SiO₂ je spôsobené podleptávaním, čo rozširuje diery až o 4 μm a tiež „notching efektom“, ktorý vzniká vychyľovaním iónov od vrstvy SiO₂ do strán a leptanie bočných stien na konci leptanej diery (vid' obrázok 8.32).



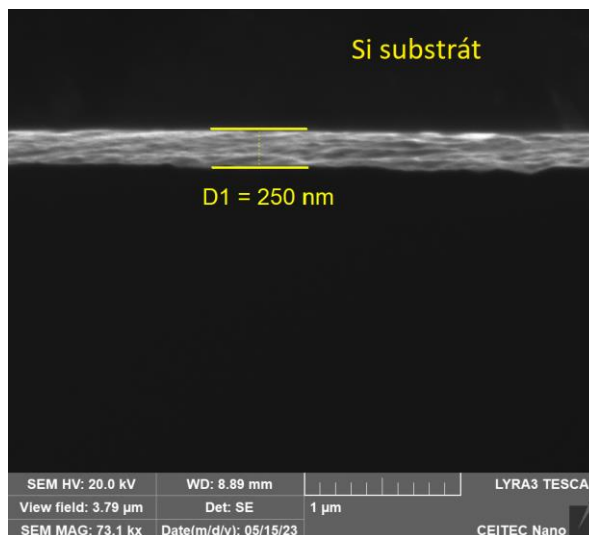
Obrázok 8.32: Notching efekt spôsobený leptaním bočných stien odrážaním iónov od vrstvy SiO₂

Problém je možné vyriešiť znížením leptacieho cyklu, keďže dochádza k vyleptaniu skôr a výsledný počet je možné znížiť na hodnotu 850 – 880 cyklov. Odleptávacia rýchlosť rezistu pri procese DRIE sa pohybuje v rozmedzí **4 – 5 nm/cyklus**. Vytvorené otvory skrz substrát sú uvedené aj na obrázku 8.33 pri pohľade z boku na lámaný substrát.



Obrázok 8.33: Snímok SEM preleptaného mikrootvoru o veľkosti 16 μm skrz 250 μm substrát.

Keďže je celý proces suchého leptania až po pokovenie a vodivú výplň v štádiu testovania, bol vyskúšaný proces pokovenia bez SiO₂ vrstvy, odleptanej v roztoku BHF, po procese DRIE a očistení substrátu od fotorezistu v kyseline peroxosírovej (piraňa) použitím oxidu sírového a peroxidu vodíka v pomere 3:1. Nutnosťou je aj omytie wafera procesom RCA čistenia pred termálnym naoxidovaním o hrúbke 200 nm – vytvorenie izolačnej vrstvy od vodivej vrstvy pri deponovaní kovového materiálu 5 nm titanu a 250 nm medi (viď obrázok 8.34).



Obrázok 8.34: Snímka SEM nadeponovanej vrstvy medi pre zárodok galvanickej výplne.

8.7.5 Zhrnutie nameraných výsledkov suchého leptania

Tabuľka 8.11 slúži ako súhrn dosiahnutých výsledkov pri procese suchého anizotropného leptania s parametrami leptania uvedenými v predošlých častiach práce.

Tabuľka 8.11 Súhrn vypočítaných hodnôt leptacích rýchlostí pri procese suchého anizotropného leptania (Proces DRIE pri teplote 3 °C).

Rýchlosť leptania fotorezistu fluorinovým RIE	Rýchlosť leptania fotorezistu v procese DRIE	$R_{Si,DRIE}$
13 nm · min ⁻¹	5 nm/cyklus	0,484 μm/cyklus

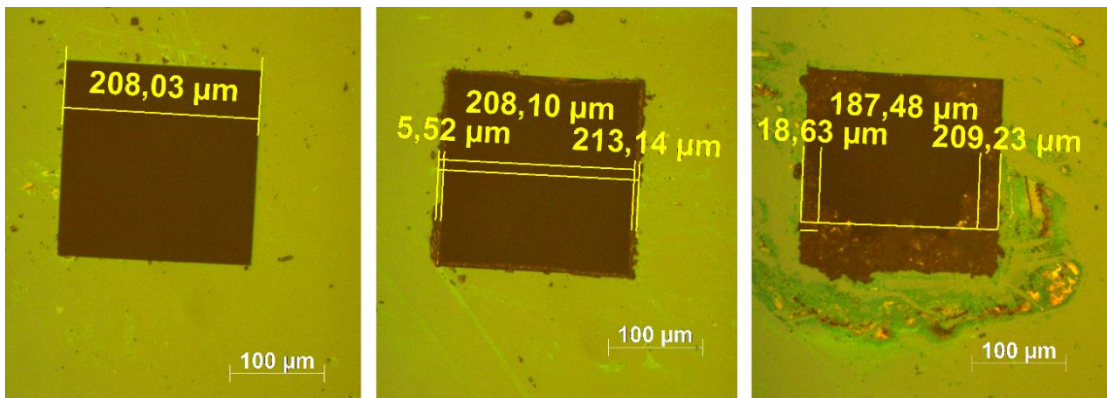
8.8 Galvanická výplň otvorov z mokrého/suchého leptania

Medzi posledné časti procesu vytvárania skrz kremíkových mikrorepojov patrí aj galvanická výplň vytvorených dier, buď mokrým alebo suchým leptacím procesom. Pre vytvorenie elektrického kontaktu je nutné aby sa diera vyplnila celá skrz substrát. Na výplň otvorov, bol použitý roztok vytvorený zmiešaním dikyanozlatnanu draselného K[Au(CN)₂] 0,6g/dl a kyseliny boritej H₃BO₃ 0,232g/dl. Roztok aj s kovovou podložkou, slúžiacou ako anóda, bol následne vyhrievaný na teplotu 55°C a vháňaný membránovým čerpadlom STEPDOS 08 S (Lutz-JESCO GmbH, Nemecko) na substrát do otvorov cez hadičku a katódovú hlavicu (viď obrázok 8.35). Pre anodizáciu bol zvolený prúd 2 mA použitím DC zdroja Agilent 6645A.



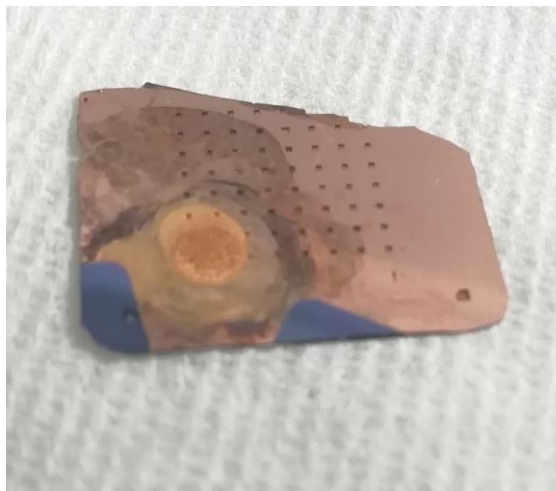
Obrázok 8.35: Elektrochemická depozičná stanica pre vytváranie vodivých vrstiev a výplní.

Experimentálne bola najskôr overená a odmeraná na optickom mikroskope približná rýchlosť rastu vodivej vrstvy na vzorkách z mokrého leptania, kde bol zvolený čas 500 ms a ďalších 1500 ms (viď obrázok 8.36). Je možné vidieť, že rast vodivej vrstvy trvá celkom dlho, približne **10 nm · s⁻¹** a zároveň nastávajú aj problémy, že vrstva nerastie rovnomerne.



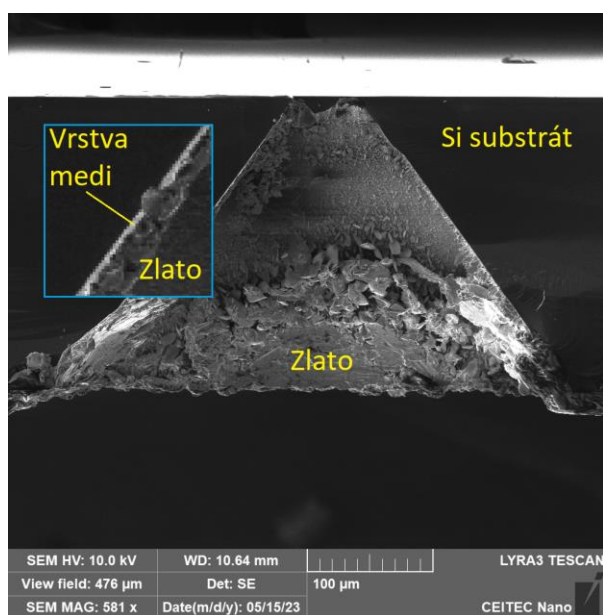
Obrázok 8.36: Proces nanášania vodivej vrstvy na vzorkách z mokrého leptania po časovom intervale (vľavo 0 s; stred 500 s; vpravo 2000 s, pri prúde 2 mA).

Prúd nie je možné zvýšiť, pretože sa zhorší aj nerovnomernosť rastúcej vrstvy. Bola otestovaná aj veľkosť prúdu 10 mA, kde už bol tento problém nerovnomerného rastu vrstvy značne viditeľný. Zníženie prúdu má nevýhodu, že vrstva by bola síce homogénnejšia, ale celkový čas rastu vodivej vrstvy by sa veľmi zvýšil. Počas pokovovania narastá na vrchnej strane nežiadúca pórovitá vrstva nad substrát, ktorá bola odstránená navlhčenou vatovou tyčinkou pre rovnomerné zarovnanie dodatočným galvanickým pokovovaním (viď obrázok 8.37).



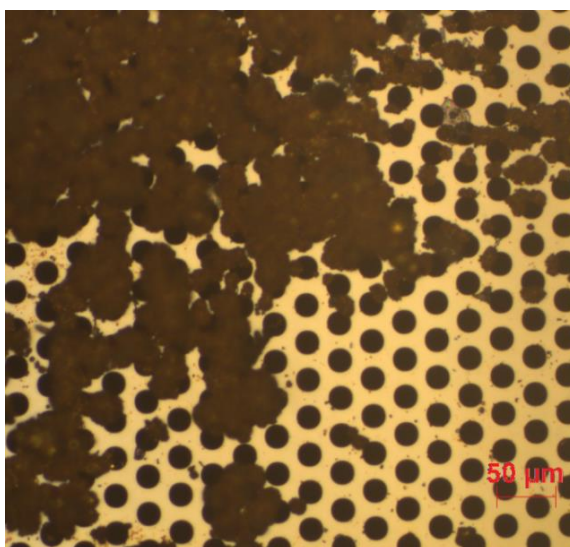
Obrázok 8.37: Nanesená vodivá vrstva a výplň anodizačnou hlavicou v otvoroch vytvorenými procesom mokrého leptania.

Vytvorený skrz kremíkový mikrorepój bol nasnímaný na SEM z profilu nalomením vzorku. Z nasnímaného lomu zobrazeného na obrázku 8.38 je možné vidieť nehomogénnu vodivú výplň na vrchnej strane (širšej).

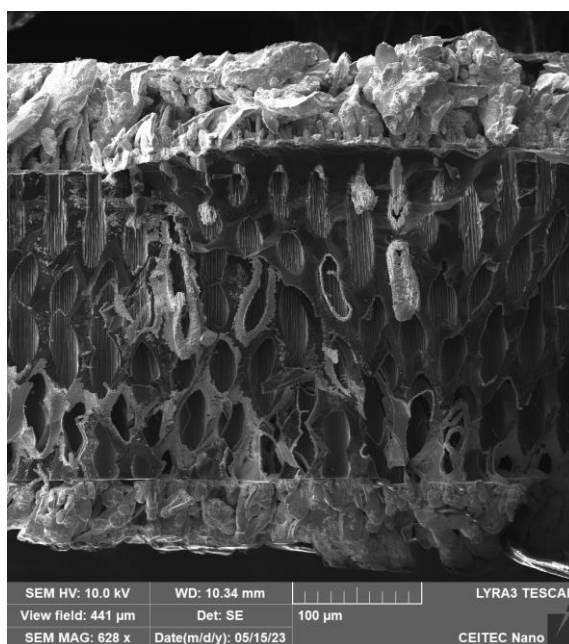


Obrázok 8.38: SEM snímka lomu galvanicky pokoveného mikroprepoja vytvoreného mokrým leptaním (neideálny lom).

Otvory vytvorené suchým leptaním pomocou DRIE, boli galvanicky pokovované rovnakým spôsobom, kde pri takýchto malých dierach o veľkosti 16 μm nastávajú problémy s priechodom roztoku, zmáčanlivosťou a vytváraním prázdnych oblastí – „voidov“, v dôsledku skorého uzatvorenia otvoru vodivou vrstvou na jednej strane, vid' obrázok 8.39 a rovnako aj 8.40 nalomením. Použitý proces galvanického vyplňania nie je ideálny. Kvôli tlaku hlavice na substrát následne dochádza k prasknutiu substrátu a výsledkom je nepoužiteľnosť vyplňanej vzorky.



Obrázok 8.39: Snímka z optického mikroskopu vyplňaných dier, leptané suchým procesom DRIE po čase 126 minút vrchná strana a 50 minút spodná strana.

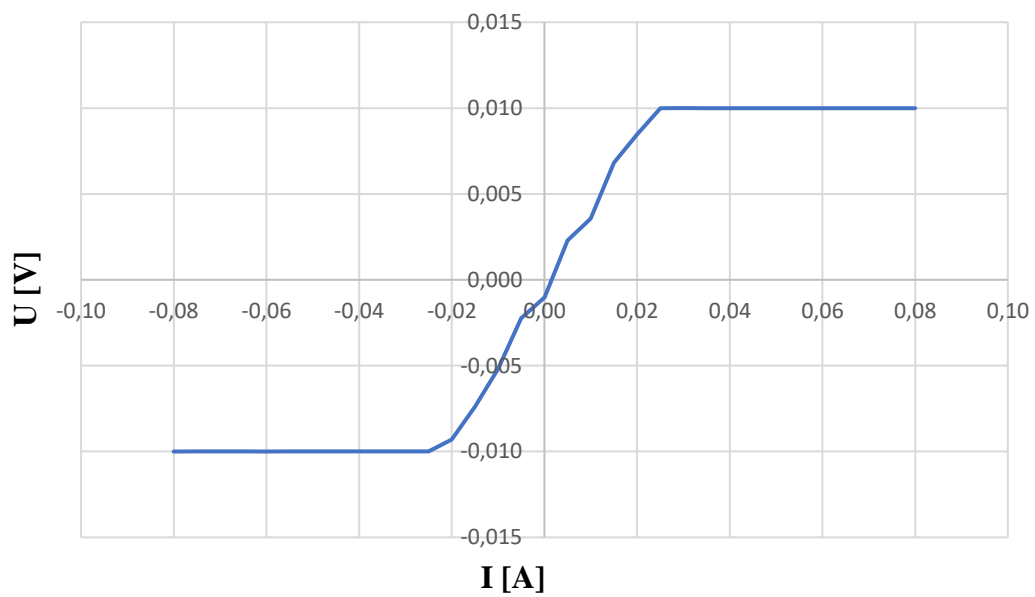


Obrázok 8.40: SEM snímka profilu z testu galvanicky pokoveného mikroprepoja z oboch strán vytvoreného suchým leptaním (neideálny lom).

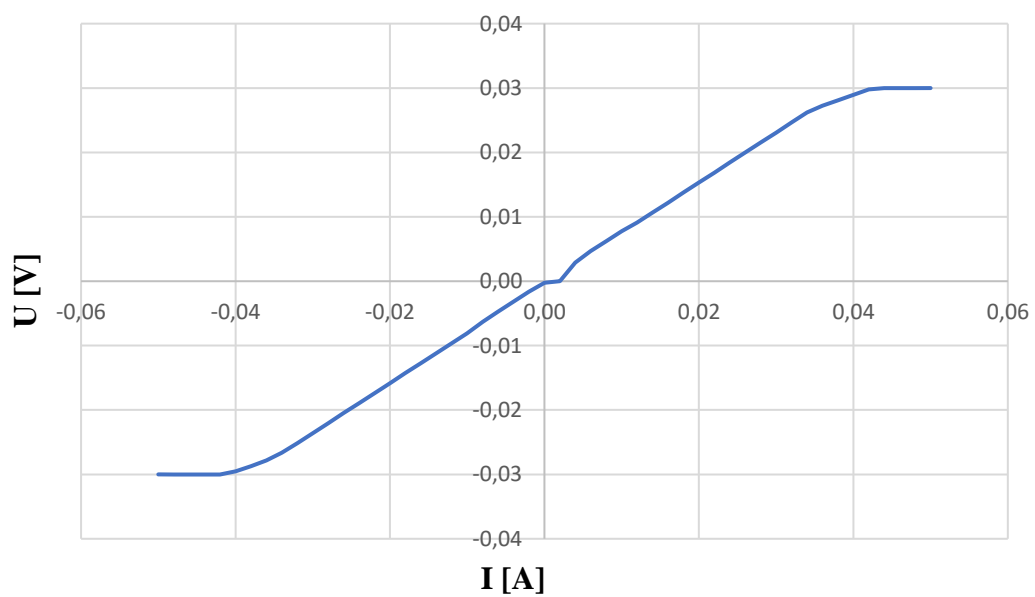
8.9 Elektrické testy vytvorených mikroprepojov

Poslednou časťou práce je overenie elektrického spoja a nameranie parametrov z vytvorených skrz kremíkových mikroprepojov. Elektrické testy boli urobené použitím analyzátora parametrov Keithley 4500-SCS (Keithley Instrumets, Inc., Ohio). Vyplnené prepoje vytvorené procesom mokrého leptania dosahujú hodnoty elektrického odporu okolo $2,3 \Omega$ meraného skrz, dvojbodovou metódou a plošného odporu približne $4 \Omega/\square$ nameraný štvorbodovou van der Pauw metódou. Z procesu suchého leptania, bol nameraný odpor o hodnote okolo $1,3 \Omega$ a plošný odpor približne $6,5 \Omega/\square$. Následne boli odmerané Voltampérové charakteristiky, ktoré sú uvedené na obrázku 8.41 a 8.42.

Vytvorené mikroprepoje boli podrobené aj testom výkonovej zaťažiteľnosti, kde ich maximálna hodnota zaťaženia bola meraná do 50 V s prúdom 10 mA, ktorý saturoval pri 25 mV pre mikroprepoj vytvorený mokrým leptacím procesom. Pre mikroprepoj vytvorený suchým leptacím procesom, bol nameraný prúd 30 mA, ktorý saturoval pri približne 42 mV. Saturácia prúdu v takýchto malých prepojoch vytvorených na kremíkovom substráte, môže byť spôsobená maximálnou únosnosťou prúdu, prehrievaním, elektromigračnými javmi, ale aj defektmi pri výrobe. Jeden z hlavných dôvodov defektu pri výrobe je poškodenie izolačnej vrstvy oxidu kremičitého, ktorý mohol byť spôsobený popraskaním pri deponovaní kovu alebo výplni, alebo mechanickým poškodením. Následne sa môže pri určitom napätí prenášať zvodový prúd aj skrz kremíkovú vrstvu.



Obrázok 8.41: Voltampérová charakteristika mikroprepoja vytvoreného mokrým leptaním.



Obrázok 8.42: Voltampérová charakteristika mikroprepoja vytvoreného suchým leptaním.

9. ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo zoznámenie sa s problematikou vytvárania elektrických prepojení na kremíkovom substráte. Prvotnou časťou práce bolo preštudovanie možností a spôsobov vytvárania mikroprepojení pomocou techník pre realizáciu mikroelektromechanických systémov alebo MEMS zariadení. Pomocou získaných informácií naštudovaných v teoretickej časti práce, bol vytvorený návrh masky otvorov pre realizovanie mokrého anizotropného leptania kremíka v roztoku TMAH.

Ako ochrana častí kremíkoveho substrátu pred leptaním mimo navrhnutých otvorov pre vytvorenie SiO₂ masky, bol aplikovaný pozitívny fotocitlivý rezist ako predprípravný motív, laserovou litografiou a pomocou chemického leptania v BHF. Pre ochranu druhej strany substrátu bol aplikovaný fotorezist z oboch strán. Leptaním boli otestované koncentrácie roztoku TMAH, kde pri 5% koncentrácii je rýchlosť leptania vyššia, ale vznikajú hrboľaté štruktúry v priebehu leptania a dochádza k nekontrolovateľnému podleptávaniu v kryštalografickom smere <111>.

Na základe teoretických a experimentálnych poznatkov, bol použitý 25% roztok TMAH, ktorý v smere <100> leptá pomalšie ako nižšie koncentrácie, ale jeho selektivita je lepšia a dostačujúca. Základnými leptacími experimentmi, boli zistené hlavné parametre rýchlosti leptania otvorov v substráte, kde leptacia rýchlosť v smere <100>, s uvedenými podmienkami v experimentálnej časti práce je $R_{<100>}^{Si} = (687 \pm 8) \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$ a rýchlosť leptania v smere <111> je $R_{<111>}^{Si} = (75 \pm 9) \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$. Je možné vidieť približne 9-násobne nižšiu rýchlosť leptania v smere <111> oproti smeru <100>. Pri tejto selektivite bol optimalizovaný návrh masky aby nedošlo k vytváraniu väčších otvorov na spodnej strane. Boli dosiahnuté otvory s najmenšou veľkosťou približne 0,8 μm, ale nebola dosiahnutá replikovateľnosť rovnakých otvorov v dôsledku meniacej sa koncentrácie roztoku TMAH počas leptania aj vyparovaním, čo by muselo byť kontrolované ďalšími meracími prístrojmi.

Bosch proces hĺbkového reaktívneho iónového leptania (DRIE) bol využitý pre suché anizotropné leptanie. Preto bol využitý motív z vrstvy oxidu kremičitého s hrúbkou 500 nm a fotorezist AZ 12XT-20PL-10 o hrúbke 7,5 μm, ktoré slúžili ako ochrana proti leptaniu povrchu. Testovacie parametre pre leptanie boli zvolené z naštudovaných zdrojov uvedených v priebehu práce, ktoré museli byť optimalizované pre leptanie skrz substrát o hrúbke 250 μm. Najväčší problém počas suchého anizotropného leptania, bol spôsobený tvorením čierneho kremíka, ktorý spomaľoval a zabraňoval preleptaniu skrz substrát a bol viac potlačený zmenou CCP zdroja. Dosiahnutý pomer hĺbky k šírke bol ~15:1, vytvorením dier s najmenším preleptaným priemerom 16 μm. Ďalším optimalizovaním procesu je možné dosiahnuť pomer až ~30:1 s vytvorením dier o veľkosti 8 μm skrz 250 μm hrubý kremíkový substrát. Počas leptacieho cyklovaného Bosch procesu vznikajú vrúbky (scallop) na bočných stenách dier, ktoré boli v tomto prípade o veľkosti 200 nm a jedná sa o hladký Bosch proces.

Preleptávaním sa k vrstve SiO₂ na spodnej strane substrátu dochádza k „notch efektu“, ktorý spôsobuje leptanie diery do strán, odrážaním reaktívnych iónov od tejto vrstvy. Spodnú vrstvu je možné použiť ako stop vrstvu a deponovať na ňu vodivú vrstvu pre rast kovu použitím galvanického pokovovania.

Pre experimentálne testy bola vodivá vrstva deponovaná bez spodnej SiO₂ stop vrstvy. Deponovaná bola vodivá vrstva 5 nm titanu a 250 nm medi. Titan slúži ako adhézna vrstva a meď ako vodivá a zárodková vrstva pre galvanické pokovovanie. Roztok použitý na galvanickú výplň bol na báze dikyanozlatnanu pri teplote 55 °C a konštantnom prúde 2 mA.

Vytvorené skrz kremíkové mikrorepreje boli podrobené aj elektrickým testom, kde bola pre mikrorepreje vytvorené mokrým leptaním dosiahnutá hodnota elektrického odporu približne 2,3 Ω dvojbodovou metódou a plošný odpor ~4Ω/□ nameraný štvorbodovou van der Pauw metódou. Elektrický záťažový test bol vykonaný do 50 V bez poškodenia mikrorepreja a prúd sa satureoval na hodnotu ~10 mA pri napätí približne 25 mV. Mikrorepreje vytvorené suchým leptaním dosahovali hodnotu elektrického odporu približne 1,3 Ω, plošný odpor ~6,5 Ω/□ a satureovaný prúd ~30mA pri napätí približne 42 mV. Saturácia prúdu môže byť spôsobená viacerými faktormi, a to maximálnou únosnosťou prúdu mikrorepreja, prehrievaním, elektromigračnými javmi a defektami pri výrobe, ktoré sú možnou príčinou spôsobené popraskaním izolačnej vrstvy oxidu kremičitého pri deponovaní vodivej vrstvy alebo mechanickým poškodením. Výsledkom je zvodový prúd skrz kremíkovú vrstvu.

V práci sú uvedené aj snímky vyleptaných otvorov a vzorky pokovovaných otvorov, ktoré boli nasnímané pomocou optického a rastrovacieho elektrónového mikroskopu.

Experimentálne testované metódy anizotropného leptania majú svoje výhody a nevýhody. Mokrým anizotropným leptaním boli vytvorené diery s veľkosťou 1 μm, ale selektivita leptania je veľmi nízka a na druhej strane diery vzniká otvor o veľkosti ~330 μm. Táto metóda je lacná, ale ťažšie kontrolovateľná v dôsledku meniacej sa koncentrácie, a teda aj rýchlosti leptania. Suchým anizotropným leptaním je možné vytvoriť diery s pomerom strán hĺbky k šírke ≥15:1, čo prispieva k väčšej hustote, proces je ľahko kontrolovateľný a menej časovo náročný. Pre integrované obvody a čipové aplikácie je výhodnejšie použiť suché anizotropné leptanie, pri ktorom je možné získať veľkú integrovateľnosť.

Nadviazaním tejto bakalárskej práce sa pri mokrom leptaní odporúča kontrolovať koncentráciu roztoku TMAH napríklad meraním pH. Pre proces suchého leptania použiť vyšší výkon zdroja CCP pre eliminovanie tvorby čierneho kremíka a zvýšenie pomeru hĺbky k šírke. Rovnako pri leptaní je vhodné použiť vrstvu SiO₂ ako stop vrstvu, pre deponovanie vodivej vrstvy, od ktorej sa mikroreprej vyplní galvanicky zdola nahor. Použitie pulzného galvanického pokovovania zlepši homogenitu výplne a predíde sa nerovnomernému rastu a vzniku voľných priestorov, tzv. „voidov“ vo vnútri mikrorepreja.

LITERATÚRA

- [1] WRIGHT, Daniel Nilsen, Guido SORDO, Daniel Nilsen WRIGHT a Sigurd T. MOE. Through Silicon Vias in MEMS packaging, a review. NordPac [online]. 2019, 1-4 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2637875/10%2bSORDO%2b-%2bThrough%2bSilicon%2bVias.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [2] Through-Silicon Vias (TSVs). Semiconductor Engineering [online]. Francúzsko: Alchimer, 2016 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: https://semiengineering.com/knowledge_centers/packaging/advanced-packaging/through-silicon-vias/
- [3] The Design and Fabrication of Through-Silicon Vias in 3DICs. Cadence [online]. Kalifornia, USA: Cadence Design Systems, 2021 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-the-design-and-fabrication-of-through-silicon-vias-in-3dics>
- [4] Via first, via middle, and via last processes with through-silicon vias. In: Cadence [online]. Kalifornia, USA: Cadence Design Systems, 2021 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-the-design-and-fabrication-of-through-silicon-vias-in-3dics>
- [5] Possible fabrication of a TSV. In: Sintef [online]. Nórsko: NordPac, 2019 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2637875/10%2bSORDO%2b-%2bThrough%2bSilicon%2bVias.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [6] Through-Silicon-Via. *Teledyne Micralyne* [online]. Kanada: Teledyne Micralyne, 2016 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.micralyne.com/technology-platforms/through-silicon-via/>
- [7] Through-Silicon-Via. In: *Teledyne Micralyne* [online]. Kanada: Teledyne Micralyne, 2016 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.micralyne.com/technology-platforms/through-silicon-via/>
- [8] TSV wafers – Through Silicon Via. *Okmetic* [online]. Fínsko: Okmetic, 2022 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.okmetic.com/silicon-wafers/tsv-through-silicon-vias/>
- [9] FUJIMOTO, Koji, Nobuhide MAEDA, Hideki KITADA, Kosuke SUZUKI, Tomoji NAKAMURA a Takayuki OHBA. TSV (through silicon via) interconnection on wafer-on-a-wafer (WOW) with MEMS technology. In: *TRANSDUCERS 2009 - 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference* [online]. Japonsko: IEEE, 2009, 2009, s. 1877-1880 [cit. 2022-12-13]. ISBN 978-1-4244-4190-7. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/224603286_TSV_through_silicon_via_interconnection_on_wafer-on-a-wafer_WOW_with_MEMS_technology

- [10] FUJIMOTO, Koji, Nobuhide MAEDA, Hideki KITADA, Kosuke SUZUKI, Tomoji NAKAMURA a Takayuki OHBA. Process Flow. In: ResearchGate [online]. Japonsko: ResearchGate, 2009 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/224603286_TSV_through_silicon_via_interconnection_on_wafer-on-a-wafer_WOW_with_MEMS_technology
- [11] BLEIKER, Simon J., Andreas C. FISCHER, Umer SHAH, et al. High-Aspect-Ratio Through Silicon Vias for High-Frequency Application Fabricated by Magnetic Assembly of Gold-Coated Nickel Wires. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* [online]. 2015, 5(1), 21-27 [cit. 2022-12-13]. ISSN 2156-3950. Dostupné z: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:790438/FULLTEXT01>
- [12] FISCHER, A. C., N. ROXHED, T. HARALDSSON, et al. Fabrication of high aspect ratio through silicon vias (TSVs) by magnetic assembly of nickel wires. *2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* [online]. IEEE, 2011, 2011, 5(1), 37-40 [cit. 2022-12-13]. ISBN 978-1-4244-9632-7. ISSN 2156-3950. Dostupné z: doi:10.1109/MEMSYS.2011.5734356
- [13] BLEIKER, Simon J., Andreas C. FISCHER, Umer SHAH, et al. The TSV fabrication process. *DiVA Portal* [online]. 2015, 1 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:790438/FULLTEXT01>
- [14] BURKETT, Susan L., Matthew B. JORDAN, Rebecca P. SCHMITT, et al. Tutorial on forming through-silicon vias. *2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* [online]. IEEE, 2020, 2011, 38(3), 37-40 [cit. 2022-12-13]. ISBN 978-1-4244-9632-7. ISSN 0734-2101. Dostupné z: doi:10.1116/6.0000026
- [15] SHEN, Wen-Wei, Kuan-Neng CHEN, Rebecca P. SCHMITT, et al. Three-Dimensional Integrated Circuit (3D IC) Key Technology: Through-Silicon Via (TSV). *Nanoscale Research Letters* [online]. IEEE, 2017, 2011, 12(1), 37-40 [cit. 2022-12-13]. ISBN 978-1-4244-9632-7. ISSN 1931-7573. Dostupné z: doi:10.1186/s11671-017-1831-4
- [16] Crystallography Overview for MEMS. *NanoHUB* [online]. 2017, 1-14 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: https://nanohub.org/resources/26441/download/Fab_Crystl_PK10_PG.pdf
- [17] SINGH, Priyam. Unit Cell. *Semesters.in* [online]. semesters.in, 2020 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://semesters.in/unit-cell/>
- [18] UNGERSBÖCK, Stephan-Enzo. *Advanced Modeling of Strained CMOS Technology* [online]. Viedeň, 2007 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/ungersboeck/node24.html>. Dizertačná práca. Technischen Universität Wien Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik.

- [19] BRENDEL, Christian. Topologically Protected Transport of Phonons at the Nanoscale. In: ResearchGate [online]. Nemecko: ResearchGate, 2019 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/a-Face-centered-diamond-cubic-crystal-structure-of-silicon-The-dark-blue-atoms-are_fig23_335016071
- [20] Miller indices. *Britannica* [online]. Chicago, USA: Britannica, 2015 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/Miller-indices>
- [21] UNGERSBÖCK, Stephan-Enzo. Three planes in the cubic system along with their Miller indices. In: *TU Wien* [online]. Viedeň, Rakúsko: Technická univerzita Viedeň, 2007 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/ungersboeck/node24.html>
- [22] Calculating the angle between two planes. *Matter* [online]. Anglicko: 2000 MATTER, 2000 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: http://www4.hcmut.edu.vn/~huynhqlinh/project/Minhhoa3/Nhieuxa/Nx2/www.matter.org.uk/diffraction/electron/calculating_angle_between_2_planes.htm
- [23] Crystal Planes in Semiconductors. *BYU* [online]. Anglicko: Department of Electrical and Computer Engineering, 2009 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: https://cleanroom.groups.et.byu.net/EW_orientation.phtml
- [24] Silicon wafer manufacturing method. *FerroTec* [online]. China: Hangzhou Semiconductor Wafer Co., 2022 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://ferrotec-silicon.com/en/product/method/>
- [25] ABOUT WAFERS. *Addison* [online]. Kalifornia, USA: Addison Engineering, 2014 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.addisonengineering.com/about-wafers.html>
- [26] KOCH, C. a T. J. RINKE. *Photolithography*. Nemecko: Siegl Druck & Medien GmbH & Co., 2017. ISBN 978-3-9818782-1-9.
- [27] JHAJ, Sukhwant. Silicon Shaping. *Jhaj* [online]. Oregon, USA: JHAJ, 2005 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <http://www.jhaj.net/jasjeet/tcad/Learn1/11m.htm>
- [28] JHAJ, Sukhwant. Standard flat orientations for different semiconductor wafers. In: *Jhaj* [online]. Oregon, USA: Sukhwant Jhaj, 2005 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <http://www.jhaj.net/jasjeet/tcad/Learn1/11m.htm>
- [29] ADAK, Aniket. Process of semiconductor lithography. In: *Copperpod Intellectual Property* [online]. Copperpod IP, 2021 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.copperpodip.com/post/semiconductor-lithography>
- [30] Nanolithography Overview - Definition and Various Nanolithography Techniques. *AZO NANO* [online]. Anglicko: AZoNetwork UK, 2006 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=1736>
- [31] MACK, Chris A. Optical Lithography. In: *Optical Lithography* [online]. II. Series. Washington, USA: Academia.edu, 2006, s. 1-3 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: https://www.academia.edu/43407293/Chris_A_Mack_iel_Gu_d_o_Field_Guide_t_o_Optical_Lithography_Optical_Lithography

- [32] MACK, Chris A. The general sequence of steps for a typical optical lithography process. In: *Academia* [online]. Washington, USA: Academia.eu, 2006 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: https://www.academia.edu/43407293/Chris_A_Mack_iel_Gu_d_o_Field_Guide_to_Optical_Lithography_Optical_Lithography
- [33] Spin Coating: Complete Guide to Theory and Techniques. *Ossila* [online]. Anglicko: Ossila, 2015 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/spin-coating>
- [34] ANGELY, Christelle. Dry etching VS Wet etching. *Darwin Microfluidics* [online]. Francúzsko: Darwin Microfluidics, 2020 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://darwin-microfluidics.com/blogs/reviews/dry-etching-vs-wet-etching>
- [35] AYODELE, Abiola. Dry Etching vs Wet Etching: Everything You Need To Know. *Wevolver* [online]. Holandsko: Wevolver, 2021 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/dry-etching-vs-wet-etching-everything-you-need-to-know>
- [36] QI, Minghao. Wet Etching Kinetics. In: *NanoHUB* [online]. Indiana, USA: nanoHUB, 2016 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://nanohub.org/resources/25355/download/2016.04.13-ECE695Q-L44.pdf>
- [37] Illustration of dry etching mechanisms in Reactive Ion Etching (RIE). In: ScienceDirect [online]. Anglicko: ScienceDirect, 2012 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: 10.1016/B978-1-4377-7859-5.00005-3
- [38] AYODEL, Abiola. Isotropic and Anisotropic etching. In: *Wevolver* [online]. Holandsko: Wevolver, 2021 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/dry-etching-vs-wet-etching-everything-you-need-to-know>
- [39] ERICKSON, Gregory D. A Study of Anisotropic Chemical Etching on Crystalline Silicon. *Utah State University* [online]. 2014, 2 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=phys_capstoneproject
- [40] CHEN, Wei, Yaoping LIU, Lixia YANG a Juntao WU. Difference in anisotropic etching characteristics of alkaline and copper based acid solutions for single-crystalline Si. *Scientific reports* [online]. 2018, 2018(3408), 8 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-21877-x>
- [41] ROUHI, Jalal, Shahrom MAHMUD, Sabar Derita HUTAGALUNG, Nima NADERI, Saeid KAKOOEI a Mat Johar ABDULLAH. Controlling the shape and gap width of silicon electrodes using local anodic oxidation and anisotropic TMAH wet etching. *Semiconductor Science and Technology* [online]. 2012, 27(6) [cit. 2022-12-14]. ISSN 0268-1242. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/233417400_Controlling_the_shape_and_gap_width_of_silicon_electrodes_using_local_anodic_oxidation_and_anisotropic_TMAH_wet_etching

- [42] Cross-sectional view of the etched profile of a (1 0 0) oriented SOI wafer. In: *ResearchGate* [online]. Malajzia: ResearchGate, 2012 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/233417400_Controlling_the_shape_and_gap_width_of_silicon_electrodes_using_local_anodic_oxidation_and_anisotropic_TMAH_wet_etching
- [43] TABATA, Osamu, Ryouji ASAHI, Hirofumi FUNABASHI, Keiichi SHIMAOKA a Susumu SUGIYAMA. Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 1992, 34(1), 51-57 [cit. 2022-12-14]. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/0924-4247(92)80139-T
- [44] SHUAI, Y., Jeffery PUSCHELL, Hai-mei GONG, et al. *Optimization of (100)-Si TMAH etching for uncooled infrared detector* [online]. 2009-7-3, 73830H- [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: doi:10.1117/12.834985
- [45] TETRAMETHYLAMMONIUM HYDROXIDE | TMAH. *Sachem* [online]. Texas, USA: SACHEM, 2022 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.sacheminc.com/quaternary-ammonium-compounds-quats/tetramethylammonium-hydroxide-tmah/>
- [46] Tetramethylammonium hydroxide. *PubChem* [online]. USA: National Library of Medicine, 2005 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Tetramethylammonium-hydroxide#section=History-and-Incidents>
- [47] Tetramethylammonium hydroxide. *Wikipédia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2009 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Tetramethylammonium_hydroxide
- [48] SWARNALATHA, Veerla, Avvaru Venkata NARASIMHA RAO a PAL. *Effective improvement in the etching characteristics of Si{110} in low concentration TMAH solution* [online]. 2018, 13(8), 1085-1089 [cit. 2022-12-14]. ISSN 1750-0443. Dostupné z: doi:10.1049/mnl.2017.0610
- [49] Deep Reactive Ion Etching. *Oxford Instruments* [online]. Anglicko: Miramar Communications, 2021, 2021 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://plasma.oxinst.com/technology/deep-reactive-ion-etching>
- [50] Deep Reactive Ion Etching (DRIE). *Fraunhofer ISIT* [online]. Nemecko: Fraunhofer Institute for Silicon Technology, 2020 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.isit.fraunhofer.de/en/technology/micro-manufacturing-processes/processes-on-wafer-level/drie.html>
- [51] *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* [online]. 6. 2015 [cit. 2023-03-15]. ISSN 2043-6262. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2043-6262/6/4/045016>
- [52] Introduction to Si-DRIE. *Samco Partners In Progress* [online]. Japonsko: Samco Inc., 2020 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.samcointl.com/introduction-to-si-drie-silicon-deep-reactive-ion-etching/>
- [53] What is the Bosch Process. *Samco Partners In Progress* [online]. Japonsko: Samco Inc., 2020 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.samcointl.com/what-is-the-bosch-process-deep-reactive-ion-etching/>

- [54] MCCOLMAN, Shane. *Bosch processing on the ICPRIE* [online]. Kanada [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://www.nanofab.ualberta.ca/wp-content/uploads/2009/05/bosch_simple.pdf. University of Alberta's NanoFab.
- [55] Process steps of DRIE. *Fraunhofer ISIT* [online]. Nemecko: Fraunhofer Institute for Silicon Technology, 2020 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.isit.fraunhofer.de/en/technology/micro-manufacturing-processes/processes-on-wafer-level/drie.html>
- [56] What Is the Thin Metal Film Deposition Process. *PLATYPUS TECHNOLOGIES* [online]. USA: Platypus Technologies, LLC., 2022 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.platypustech.com/what-is-the-thin-metal-film-deposition-process>
- [57] JILANI, Asim, Mohamed Shaaban ABDEL-WAHAB a Ahmed Hosny HAMMAD. Advance Deposition Techniques for Thin Film and Coating. *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings* [online]. InTech, 2017, 2017-03-08 [cit. 2023-03-23]. ISBN 978-953-51-3003-1. Dostupné z: doi:10.5772/65702
- [58] JILANI, Asim, Mohamed Shaaban ABDEL-WAHAB a Ahmed Hosny HAMMAD. Schematic of thermal evaporation system with substrate holder. *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings* [online]. InTech, 2017, 2017-03-08 [cit. 2023-03-23]. ISBN 978-953-51-3003-1. Dostupné z: doi:10.5772/65702
- [59] What Is DC Sputtering. *Korvus Technology* [online]. Anglicko: Korvus Technology, 2022 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://korpustech.com/dc-sputtering/>
- [60] BASHIR, Almas, Tahir Iqbal AWAN, Aqsa TEHSEEN, Muhammad Bilal TAHIR a Mohsin IJAZ. Interfaces and surfaces. *Chemistry of Nanomaterials* [online]. Elsevier, 2020, 2020, 51-87 [cit. 2023-03-23]. ISBN 9780128189085. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-818908-5.00003-2
- [61] BASHIR, Almas, Tahir Iqbal AWAN, Aqsa TEHSEEN, Muhammad Bilal TAHIR a Mohsin IJAZ. The phenomenon of the electron beam evaporation system in a schematic. *Chemistry of Nanomaterials* [online]. Elsevier, 2020, 2020, 51-87 [cit. 2023-03-23]. ISBN 9780128189085. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-818908-5.00003-2
- [62] MAGNETRON SPUTTERING: OVERVIEW. *Angstrom Engineering* [online]. Kanada: Angstrom Engineering, 2017 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://angstromengineering.com/tech/magnetron-sputtering/>
- [63] PANSILA, P. Pungboon, Nirun WITIT-ANUN, Tongchai JAMNONGKAN a Surasing CHAIYAKUN. The schematic diagram of DC magnetron sputtering: Study on the Effect of Oxygen Partial Pressure. *Advanced Materials Research* [online]. 2012, 463-464, 1415-1419 [cit. 2023-03-28]. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.463-464.1415

- [64] Electroplating 101: How Metal Plating Works. *Formlabs* [online]. USA: Formlabs, 2021 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/electroplating-metal-plating/>
- [65] HAMDY MAKHLOUF, Abdel Salam a Yashwanth GAJARLA. Schematic for the electroplating process. *Advances in Smart Coatings and Thin Films for Future Industrial and Biomedical Engineering Applications* [online]. Elsevier, 2020, 2020, 245-261 [cit. 2023-04-07]. ISBN 9780128498705. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-849870-5.00016-1
- [66] RCA-1 Silicon Wafer Cleaning. *Integrated Nanosystems Research Facility: INRF* [online]. 2012, 3 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.inrf.uci.edu/wordpress/wp-content/uploads/sop-wet-silicon-rca-1.pdf>
- [67] What is LPCVD?. *Tystar* [online]. Kalifornia, USA: Tystar Corporation, 2020 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://lpcvd.com>
- [68] The Best Method of Controlling HMDS Use in Semiconductor Manufacturing. Brighton Science [online]. Ohio, USA: Brighton Science (formerly, BTG Labs), 2020 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.brighton-science.com/blog/the-best-method-of-controlling-hmids-use-in-semiconductor-manufacturing>
- [69] SPIN CURVES (150mm Wafers). In: *MicroChemicals* [online]. Nemecko: Microchemicals, 2021 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: https://www.microchemicals.com/micro/tds_az_1500_series.pdf
- [70] CEITEC. Heidelberg DWL66fs [online]. [cit. 2022-12-12] Dostupné z: <https://www.ceitec.cz/document/download/38086/>
- [71] STEVIC, Pauline. BOE / HF – Silicon dioxide Etching Standard Operating Procedure. Kavli Nanolab Delft [online]. 2018, 1-2 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://d2k0ddhflgrk1i.cloudfront.net/TNW/Afdelingen/Quantum%20Nanoscienc e/Kavli%20Nanolab%20Delft/Equipment/BOE-HF%20SOP%20Silicon%20Etching.pdf>
- [72] *Microelectronic Engineering* [online]. 227. 2020 [cit. 2023-04-10]. ISSN 01679317. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167931720301118>
- [73] MERCK KGAA. Chemically Amplified Positive Tone Photoresists AZ® 12XT-20PL Series [online]. Rev. (03/21), 2021 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: https://microchemicals.com/micro/tds_az_12xt_photoresist.pdf
- [74] KIM, Taeyeong a Jungchul LEE, 2022. Optimization of deep reactive ion etching for microscale silicon hole arrays with high aspect ratio. *Micro and Nano Systems Letters* [online]. 10(1) [cit. 2023-04-10]. ISSN 2213-9621. Dostupné z: doi:10.1186/s40486-022-00155-6

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

(hkl)	Millerove indexy roviny
[hkl]	Millerove indexy smeru
{hkl}	Millerove indexy súboru krystalografických ekvivalentných rovín
$\langle hkl \rangle$	Millerove indexy súboru kryštalograficky ekvivalentných smerov
2,5D	Puzdrenie viacero čipov v rovnakom puzdre
3D	Trojdimenzionálny priestor
3HCL	Kyselina chlorovodíková
ALD	Atómová depozícia vrstvy (Atomic Layer Deposition)
BCB	Benzocyklobutén
BEOL	Definovanie elektrických prepojení (Back-End-Of-Line)
BHF	Kyselina fluorovodíková
C ₄ F ₈	Oktafluorocyklobután
CCP	Kapacitne viazaná plazma (Capacitively Coupled Plasma)
CMOS	Komplementárny kov-oxid-polovodič (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)
CO ₂	Oxid uhličitý
CVD	Chemická depozícia pár (Chemical Vapor Deposition)
DRIE	Leptanie hlboko reaktívnymi iónmi (Deep Reactive Ion Etching)
EDP	Ethyléndiamín pyrokatechol
FEOL	Definovanie tranzistorových zariadení (First-End-Of-Line)
H ₂	Vodík
HCL	Kyselina chlorovodíková
HMDS	Hexamethyldisilazán
ICP	Induktívne viazaná plazma (Inductively Coupled Plasma)
IPA	Isopropanol
KOH	Kyselina draselná
LPCVD	Chemická depozícia pár pri nízkom tlaku (Low pressure chemical vapor deposition)

MEMS	Mikroelektromechanické systémy (microelectromechanical systems)
NaOH	Hydroxid sodný
NH ₄ F	Fluorid amónny
OH	Hydroxid
PN prechod	Prechod polovodičov typu P a N
PTFE	Polytetrafluórethylén (Teflón)
PVD	Fyzikálna depozícia par (Physical Vapor Deposition)
RCA	Štandardný set procesu čistenia kremíkových substrátov
RF	Rádiová frekvencia
RIE	Reaktívne iónové leptanie (Reactive Ion Etching)
SEM	Rastrovacia elektrónová mikroskopia (Scanning Electron Microscopy)
SF ₆	Fluorid sírový
Si	Kremík
Si ₃ N ₄	Nitrid kremičitý
SiHCL ₃	Trichlorosilan
SiO ₂	Oxid kremičitý
SiO ₃	Silikát
SOI	Kremík na izolante
TaN	Nitrid tantalu
TMAH	Hydroxid tetramethylamonný (TMAOH, (CH ₃) ₄ NOH)
TSV	Skrz kremíkové prepoje (Through-hole Silicon Vias)
WOW	Substrát na substráte (Wafer On a Wafer)

Symboly:

$R_{\langle 100 \rangle}$	Rýchlosť leptania v smere $\langle 100 \rangle$	($\mu\text{m}/\text{min}$)
$R_{\langle 111 \rangle}$	Rýchlosť leptania v smere $\langle 111 \rangle$	($\mu\text{m}/\text{min}$)
R_x	Rýchlosť podleptávania v smere x	($\mu\text{m}/\text{min}$)
C_{par}	Parazitná kapacita mikroprepoja voči zemi	(F)
d	Hrúbka vyleptaného otvoru v substráte	(μm)
d_0	Hrúbka kremíkovej doštičky	(μm)
d_{SiO_2}	Hrúbka vrstvy SiO ₂	(μm)

R_{TSV}	Parazitný sériový odpor mikroprepoja	(Ω)
t	Čas leptania	(min)
w	Šírka šikmej steny vyleptaného otvoru	(μm)
x	Veľkosť preleptaného otvoru na spodnej strane kremíkového substrátu	(μm)
x_0	Veľkosť počiatočného otvoru pred leptaním na vrchnej strane substrátu	(μm)
$x_{0,min}$	Minimálna veľkosť otvoru pri preleptaní skrz celý substrát	(μm)
y	Kolmá dĺžka podleptávania na rovinu (111)	(μm)
δ	Šírka podleptania	(μm)