



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

## **TECHNOLOGIE LEPTÁNÍ KŘEMÍKU**

THE SILICON ETCHING TECHNOLOGY

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. STANISLAV KRÁTKÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. MILAN MATĚJKA**

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektrotechnická výroba a management**

**Student:** Bc. Stanislav Krátký

**ID:** 106559

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2011/2012

**NÁZEV TÉMATU:**

## Technologie leptání křemíku

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s procesem tvorby struktur obecných tvarů v elektronovém rezistu pomocí elektronové litografie a následnými technologiemi leptání křemíkových substrátů. Osvojte si základy technických postupů a pojmů v oblasti technologie leptání křemíku suchou a mokrou cestou. Proměřte leptací rychlosti křemíku a maskovacího materiálu. Vyhodnoťte selektivity leptání pro dané parametry procesu leptání. Stanovte závislosti procesu leptání na daných parametrech (koncentrace roztoku, teplota lázně, resp. výkon a tlak při plasmatických cestách). Proměřte vytvořené reliefy pomocí AFM/profilometru.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 24.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Milan Matějka

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

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

## Abstrakt:

Tato práce se zabývá technologií mokrého a suchého leptání křemíku. Zkoumá se použití vodného roztoku hydroxidu draselného. V suchých technikách se práce zaměřuje na plazmatické leptání křemíku směsí  $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ . U obou leptacích procesů jsou stanoveny důležité parametry leptání, jako je rychlost leptání křemíku, maskovacího materiálu, selektivita leptání, drsnost povrchu a podleptání masky. Řeší se zde i další pomocné a přípravné práce v technologii leptání. Konkrétně jde o vytváření masky v rezistu a v oxidu křemíku, litografii a leptání rezistu za pomoci kyslíkové plazmy.

## Abstract:

This thesis deals with the silicon etching technology. It Examines using of water solution of potassium hydroxide. It focuses on plasma etching of silicon using mixture of  $\text{CF}_4$  and  $\text{O}_2$  as the dry way of etching. Important parameters of etching like etching rate of silicon and masking materials, etching selectivity, surface roughness and underetching of mask are determined for both ways. Some additional processes has been examined as well, namely creating of mask of resist and silicon dioxide, lithography process and etching of resist using oxygen plasma.

## Klíčová slova

Leptadlo POL, mokré anizotropní leptání, monokrystalický křemík (100), plazma  $\text{CF}_4$ , plazma  $\text{O}_2$ , suché plazmatické leptání, vodný roztok KOH.

## Key words:

BOE, dry plasma etching, monocrystalline silicon (100), plasma  $\text{CF}_4$ , plasma  $\text{O}_2$ , water solution of KOH, wet anisotropic etching.

### Bibliografická citace díla:

KRÁTKÝ, S. *Technologie leptání křemíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Matějka.

### Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci na téma Technologie leptání křemíku vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 23. 5. 2012

.....

### Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Matějkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům skupiny Mikrolitografie na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky, jmenovitě pak Ing. Miroslavu Horáčkovi, Ph.D., doc. Ing. Vladimíru Kolaříkovi, Ph.D., Stanislavu Královi, Mgr. Františku Matějkovi a Mgr. Michalu Urbánkovi za jejich ochotu a pomoc při zpracování této práce a Mgr. Aleši Patákovi, Ph.D. ze skupiny Mikroskopie a mikroanalýzy.

V Brně dne 23. 5. 2012

.....

# Obsah

<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
1.1 MONOKRYSTALICKÝ KŘEMÍK .....	12
1.2 LEPTÁNÍ .....	15
1.3 TVORBA LEPTACÍ MASKY .....	15
1.3.1 <i>Leptací maska SiO<sub>2</sub></i> .....	16
1.3.2 <i>Litografie</i> .....	17
1.3.3 <i>Leptání SiO<sub>2</sub> masky</i> .....	17
1.4 MOKRÉ LEPTACÍ PROCESY .....	18
1.5 MOKRÉ ANIZOTROPNÍ LEPTÁNÍ .....	19
1.5.1 <i>Leptání křemíku (100)</i> .....	19
1.5.2 <i>Leptání vodným roztokem KOH</i> .....	22
1.5.3 <i>Seidelův model anizotropního leptání</i> .....	23
1.5.4 <i>Elwenspoekův model anizotropního leptání</i> .....	25
1.6 SUCHÉ LEPTACÍ PROCESY .....	26
1.7 PLAZMATICKÉ LEPTÁNÍ .....	28
1.7.1 <i>Čištění kyslíkovou plazmou</i> .....	32
1.7.2 <i>Leptání křemíku CF<sub>4</sub> plazmou</i> .....	32
1.7.3 <i>F/C poměrový model</i> .....	34
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>36</b>
2.1 NÁVRH EXPOZIČNÍCH DAT .....	36
2.2 PŘÍPRAVA KŘEMÍKOVÝCH SUBSTRÁTŮ .....	36
2.3 EXPOZICE A VYVOLÁVÁNÍ .....	37
2.4 LEPTÁNÍ OXIDOVÉ MASKY .....	38
2.5 ANIZOTROPNÍ LEPTÁNÍ KŘEMÍKU VODNÝM ROZTOKEM KOH.....	41
2.5.1 <i>Leptání křemíku vodným roztokem KOH při teplotě 40°C</i> .....	41
2.5.2 <i>Leptání křemíku vodným roztokem KOH při teplotě 60°C</i> .....	43
2.5.3 <i>Leptání křemíku vodným roztokem KOH při teplotě 80°C</i> .....	44
2.5.4 <i>Teoretické ověření anizotropního leptání vodným roztokem KOH</i> .....	45
2.6 LEPTÁNÍ V KYSLÍKOVÉ PLAZMĚ .....	48
2.6.1 <i>Testování homogenity plazmatického výboje v zařízení DIENER nano</i> .....	49
2.6.2 <i>Leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě v závislosti na změně tlaku</i> .....	49
2.6.3 <i>Leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě při výkonu 250 – 750 W</i> .....	50

2.6.4	<i>Stanovení závislosti rychlosti leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě na výkonu.....</i>	54
2.7	LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ $CF_4+O_2$ V ZAŘÍZENÍ TESLA 214 VT .....	56
2.8	LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ $CF_4+O_2$ V ZAŘÍZENÍ DIENER NANO .....	57
2.8.1	<i>Leptání křemíku plazmou <math>CF_4+O_2</math> v závislosti na změně tlaku .....</i>	57
2.8.2	<i>Leptání křemíku plazmou <math>CF_4+O_2</math> při výkonu 250 – 750 W.....</i>	59
2.8.3	<i>Stanovení závislosti rychlosti leptání křemíku a rezistu PMMA plazmou <math>CF_4+O_2</math> na výkonu .....</i>	65
<b>3</b>	<b>VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ, DISKUZE.....</b>	<b>69</b>
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>77</b>

## Seznam Obrázků

OBR. 1: KRYSTALICKÁ MŘÍŽKA KŘEMÍKU .....	12
OBR. 2: KRYSTALOGRAFICKÉ SMĚRY .....	13
OBR. 3: KRYSTALOGRAFICKÉ ROVINY .....	13
OBR. 4: MILLEROVY INDEXY .....	14
OBR. 5: KŘEMÍKOVÉ SUBSTRÁTY (100) A (111) <sup>[10]</sup> .....	14
OBR. 6: PŘÍKLAD IZOTROPNÍHO A ANIZOTROPNÍHO LEPTÁNÍ .....	19
OBR. 7: OBDÉLNÍKOVÁ MASKA SESOUHLESENÁ S FAZETAMI A VÝSLEDNÝ TVAR LEPTU SUBSTRÁTU (100) PŘI ANIZOTROPNÍM MOKRÉM LEPTÁNÍ.....	20
OBR. 8: MAXIMÁLNÍ HLOUBKA LEPTU PŘI ANIZOTROPNÍM LEPTÁNÍ SUBSTRÁTU (100) PŘES OBDÉLNÍKOVOU MASKU SESOUHLESENOU S FAZETAMI SUBSTRÁTU.....	21
OBR. 9: VLIV NATOČENÍ MASKY O 45° VZHLEDEM K FAZETÁM SUBSTRÁTU (100) NA ANIZOTROPNÍ LEPTÁNÍ.....	21
OBR. 10: PROFIL LEPTU PRO A) IBE, B) PLAZMATICKÉ LEPTÁNÍ, C) RIE <sup>[10]</sup> .....	28
OBR. 11: PROCES PLAZMATICKÉHO LEPTÁNÍ <sup>[10]</sup> .....	30
OBR. 12: NĚKTERÉ PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ INTERAKCE V PLAZMATICKÉ FÁZI A INTERAKCE NA ROZHRANÍ PLAZMA-POVRCH <sup>[19]</sup> .....	31
OBR. 13: MECHANIZMUS REAKCE ATOMŮ FLUORU NA POVRCHU KŘEMÍKU <sup>[7]</sup> .....	33
OBR. 14: ČÁST LEPTACÍ MASKY V REZISTU PMMA, SNÍMEK Z CLSM .....	38
OBR. 15: OXIDOVÁ MASKA, ČTVEREČKY 6×6 MM (VLEVO), OBDÉLNÍKY 6×2 MM (VPRAVO), SNÍMEK Z AFM, SKENOVANÁ PLOCHA 30×30 MM (XY:Z/1:17).....	40
OBR. 16: OXIDOVÁ MASKA, ČTVERCOVÁ RAZÍTKA, SNÍMEK Z AFM, SKENOVANÁ PLOCHA 30×30 MM (XY:Z/1:10) .....	40
OBR. 17: TEORETICKÁ ZÁVISLOST RYCHLOSTI LEPTÁNÍ 40% <sub>HM</sub> VODNÝM ROZTOKEM KOH NA TEPLITĚ .....	46
OBR. 18: NAMĚŘENÁ ZÁVISLOST RYCHLOSTI LEPTÁNÍ 40% <sub>HM</sub> VODNÝM ROZTOKEM KOH NA TEPLITĚ .....	48
OBR. 19: ULOŽENÍ SUBSTRÁTŮ V ZAŘÍZENÍ DIENER NANO .....	49
OBR. 20: ZÁVISLOST RYCHLOSTI LEPTÁNÍ REZISTU PMMA KYSLÍKOVOU PLAZMOU NA TLAKU PRACOVNÍHO PLYNU.....	50
OBR. 21: ZÁVISLOST RYCHLOSTI LEPTÁNÍ REZISTU PMMA V KYSLÍKOVÉ PLAZMĚ NA ČASE PRO VÝKON 250 W .....	51
OBR. 22: ZÁVISLOST RYCHLOSTI LEPTÁNÍ REZISTU PMMA V KYSLÍKOVÉ PLAZMĚ NA ČASE PRO VÝKON 500 W .....	52
OBR. 23: ZÁVISLOST RYCHLOSTI LEPTÁNÍ REZISTU PMMA V KYSLÍKOVÉ PLAZMĚ NA ČASE PRO VÝKON 750 W .....	53

OBR. 24: ZÁVISLOST RYCHLOSTI LEPTÁNÍ REZISTU PMMA V KYSLÍKOVÉ PLAZMĚ NA VÝKONU .....	54
OBR. 25: VYPOČTENÁ ZÁVISLOST RYCHLOSTI LEPTÁNÍ REZISTU PMMA KYSLÍKOVOU PLAZMOU NA VÝKONU .....	55
OBR. 26: ZÁVISLOST ZMĚNY HLOUBKY PŘI LEPTÁNÍ KŘEMÍKU PLAZMOU $CF_4+O_2$ V ZAŘÍZENÍ TESLA 214 VT NA ČASE .....	57
OBR. 27: ZÁVISLOST RYCHLOSTI LEPTÁNÍ PŘI PLAZMATICKÉM LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ $CF_4+O_2$ NA TLAKU.....	58
OBR. 28: ZÁVISLOST ZMĚNY HLOUBKY PŘI PLAZMATICKÉM LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ $CF_4+O_2$ NA ČASE PRO VÝKON 250 W .....	60
OBR. 29: ZÁVISLOST ZMĚNY HLOUBKY PŘI PLAZMATICKÉM LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ $CF_4+O_2$ NA ČASE PRO VÝKON 500 W .....	62
OBR. 30: ZÁVISLOST ZMĚNY HLOUBKY PŘI PLAZMATICKÉM LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ $CF_4+O_2$ NA ČASE PRO VÝKON 750 W .....	64
OBR. 31: ZÁVISLOST PODLEPTÁNÍ REZISTOVÉ MASKY NA HLOUBCE LEPTU PŘI PLAZMATICKÉM LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ $CF_4+O_2$ .....	65
OBR. 32: ZÁVISLOST RYCHLOSTI LEPTÁNÍ KŘEMÍKU A REZISTU PMMA PŘI LEPTÁNÍ PLAZMOU $CF_4+O_2$ .....	65
OBR. 33: VYPOČÍTANÉ ZÁVISLOSTI RYCHLOSTI LEPTÁNÍ KŘEMÍKU A REZISTU PMMA PŘI PLAZMATICKÉM LEPTÁNÍ SMĚSÍ $CF_4+O_2$ NA VÝKONU.....	68

## Seznam tabulek

TAB. 1: ÚHLY MEZI DŮLEŽITÝMI KRYSTALOGRAFICKÝMI ROVINAMI A SMĚRY V KUBICKÉ KRYSTALOVÉ SOUSTAVĚ <sup>[12]</sup> .....	19
TAB. 2: SROVNÁNÍ MOKRÝCH A SUCHÝCH LEPTACÍCH PROCESŮ <sup>[10]</sup> .....	27
TAB. 3: HOMOGENNÍ A HETEROGENNÍ REAKCE PLAZMATICKÉHO LEPTÁNÍ <sup>[19]</sup> .....	30
TAB. 4: MĚŘENÍ TLOUŠŤKY OXIDOVÉ VRSTVY .....	39
TAB. 5: NAMĚŘENÉ HODNOTY LEPTÁNÍ 40% <sub>HM</sub> VODNÝM ROZTOKEM KOH PŘI TEPLOTĚ 40°C .....	41
TAB. 6: NAMĚŘENÉ HODNOTY LEPTÁNÍ 40% <sub>HM</sub> VODNÝM ROZTOKEM KOH PŘI TEPLOTĚ 60°C .....	43
TAB. 7: NAMĚŘENÉ HODNOTY LEPTÁNÍ 40% <sub>HM</sub> VODNÝM ROZTOKEM KOH PŘI TEPLOTĚ 80°C .....	44
TAB. 8: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY PLAZMATICKÉHO LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub> V ZAŘÍZENÍ TESLA 214VT .....	56
TAB. 9: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY PLAZMATICKÉHO LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub> V ZÁVISLOSTI NA TLAKU, P = 500 W .....	58
TAB. 10: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY PLAZMATICKÉHO LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub> , P = 250 W, P = 30 PA, Q = 20 SCCM, T = X+3 MIN, D <sub>PMMA01</sub> = 123 NM, D <sub>PMMA02</sub> = 110 NM .....	60
TAB. 11: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY PLAZMATICKÉHO LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub> , P = 500 W, P = 30 PA, Q = 20 SCCM, T = X+3 MIN, D <sub>PMMA03</sub> = 145 NM, D <sub>PMMA04</sub> = 142 NM, D <sub>PMMA05</sub> = 113 NM, D <sub>PMMA06</sub> = 91 NM .....	61
TAB. 12: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY PLAZMATICKÉHO LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub> , P = 750 W, P = 30 PA, Q = 20 SCCM, T = X+3 MIN, D <sub>PMMA07</sub> = 96 NM, D <sub>PMMA08</sub> = 97 NM, D <sub>PMMA09</sub> = 98 NM, D <sub>PMMA010</sub> = 94 NM .....	63
TAB. 13: SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ LEPTÁNÍ KŘEMÍKU (100) 40% <sub>HM</sub> VODNÝM ROZTOKEM KOH .....	69
TAB. 14: SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ LEPTÁNÍ REZISTU PMMA KYSLÍKOVOU PLAZMOU V ZAŘÍZENÍ DIENER NANO .....	70
TAB. 15: SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PLAZMATICKÉHO LEPTÁNÍ KŘEMÍKU SMĚSÍ CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub> V ZAŘÍZENÍ DIENER NANO .....	71

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Název
$a, a_0$	Šířka leptu, šířka odkryté masky
$\Delta a$	Rozdíl rozměru masky a výsledného leptu
$c_A$	Molární koncentrace A-té složky
$d, d_{\max}$	Hloubka, resp. maximální hloubka leptu
$E_a$	Aktivační energie
$\Delta G$	Změna Gibbsovy volné energie
$h, k, l$	Millerovy indexy
$k$	Boltzmanova konstanta
$k_0, k_1, k_2, k_3$	Konstanty
$m_A$	Hmotnost A-té složky
$M_A$	Molární hmotnost A-té složky
$N$	Počet atomů
$N_A$	Koncentrace akceptorových příměsí
$N_D$	Koncentrace donorových příměsí
$p$	Tlak pracovního plynu
$P$	Výkon
$Q$	Průtok pracovního plynu
$r$	Poloměr ostrůvku či dutiny
$R_A$	Průměrná drsnost povrchu
$R_{\langle hkl \rangle}$	Rychlost leptání křemíku v daném krystalografickém směru
$R_{\text{PMMA}}$	Rychlost leptání rezistu PMMA
$R_{\text{Si}}$	Rychlost leptání křemíku
$R_{\text{SiO}_2}$	Rychlost leptání oxidu křemíku
$t$	Doba leptání
$T$	Termodynamická teplota
$V$	Objem
$w$	Tloušťka rezistové/oxidové vrstvy
$\gamma$	Specifická volná energie
$\Delta\mu$	Změna chemického potenciálu
$\rho$	Hustota
$\vartheta$	Teplota
$\Theta, \Theta', \gamma$	Úhel mezi krystalografickými rovinami

## Úvod

Leptání se obvykle používá v polovodičovém průmyslu při výrobě elektronických součástek, mikro-mechanických prvků nebo při různých povrchových úpravách křemíku. Cílem této práce je proměřit důležité parametry procesu anizotropního mokrého leptání a suchého plazmatického leptání. Výsledky z části anizotropního leptání by měly posloužit jako podklady pro technologii tvorby mikrostruktur v křemíku (např. metrické normály pro rastrovací elektronové mikroskopy). Výsledky z plazmatického leptání by měly určit, zda tato technologie je použitelná k tvorbě hlubokých reliéfních struktur.

Teoretická část se zabývá popisem krystalografických rovin a směrů v kubické mřížce diamantového typu, ze které je monokrystal křemíku složen. V další části je popsána příprava leptacích masek, konkrétně pak vytváření oxidové masky, litografický proces a leptání oxidové masky. Následně jsou zde rozebrány možnosti anizotropního leptání křemíku (100) ve vodném roztoku hydroxidu draselného. V části suché leptací procesy se tato práce zaměřuje na plazmatické leptání křemíku ve směsi  $CF_4+O_2$  a plazmatickým čištěním substrátů v kyslíkovém plazmatu.

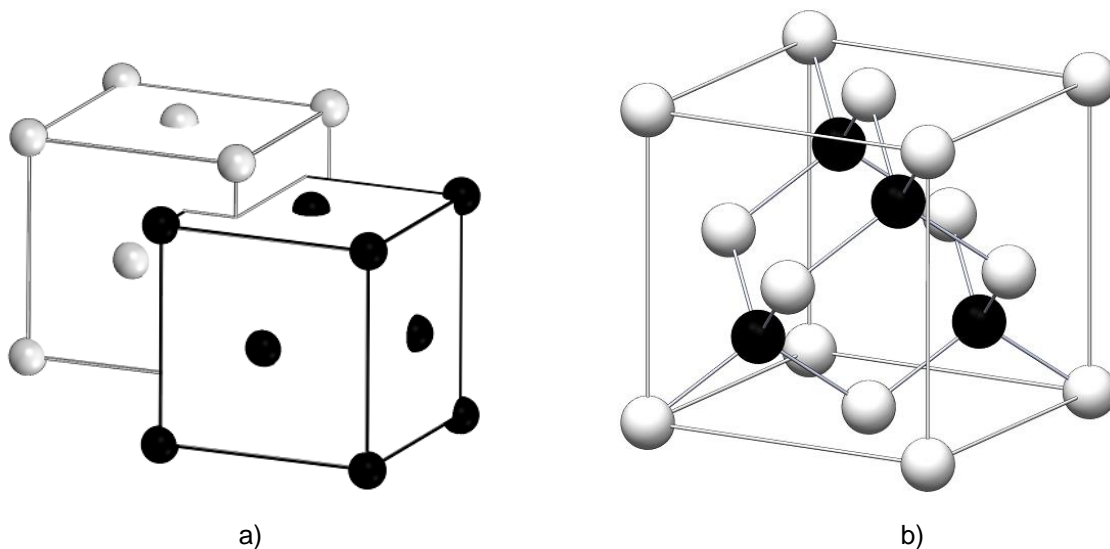
Praktická část popisuje tvorbu leptací masky z polymerního rezistu PMMA pomocí elektronové litografie a tvorbu oxidové leptací masky za použití leptadla POL. Vytvořené oxidové masky jsou použity pro anizotropní leptání křemíku (100) v leptací lázni vodného roztoku hydroxidu draselného při různých teplotách a výsledné lepty jsou změřeny na mikroskopu atomárních sil, kontaktním profilometru a elektronovém rastrovacím mikroskopu. Z naměřených hodnot jsou vyhodnoceny parametry, jako je rychlost leptání, selektivita leptání, drsnost povrchu, podleptání masky apod. Vzorky, na kterých je vytvořena maska z polymerního rezistu PMMA, poslouží na testování parametrů plazmatického leptání v zařízení TESLA 214 VT. Další vzorky jsou použity pro leptání v zařízení DIENER nano, které by mělo stávající zařízení TESLA nahradit. Leptané vzorky jsou, stejně jako u mokrého anizotropního leptání, podrobeny měření a jsou u nich vyhodnoceny stejné parametry.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Monokrystalický křemík

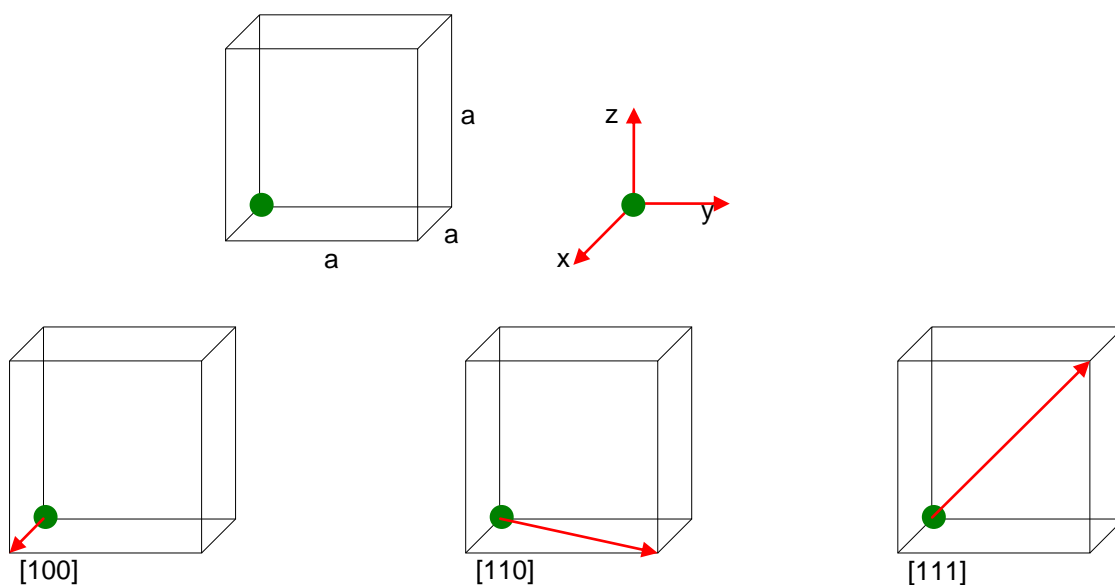
Tato práce se zabývá technologií leptání křemíku, proto je nejdříve nutné zmínit několik nejdůležitějších informací o této látce. Jde o velmi rozšířený prvek, který se v přírodě vyskytuje prakticky jen ve sloučeninách. V praxi se nejvíce používá monokrystalický nebo polykrystalický křemík.

Předmětem této práce je právě monokrystalická forma křemíku (základní charakteristiky monokrystalického křemíku jsou uvedeny v příloze A). Ten se nejčastěji vyrábí tažením z taveniny polykrystalického křemíku Czochralski metodou. Celý ingot monokrystalického křemíku se skládá z opakování krystalické mřížky diamantového typu (obr. 1b). Ta vznikne složením dvou mřížek kubických plošně centrovaných (obr. 1a).<sup>[10]</sup>



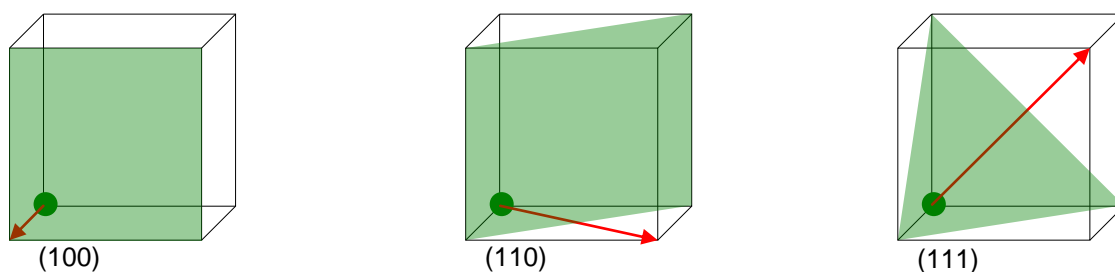
Obr. 1: Krystalická mřížka křemíku

Z hlediska leptání je důležitý popis tzv. krystalografických směrů a krystalografických rovin. K tomuto účelu se obecně používají Millerovy indexy. Krystalografickým směrem (vedeným z počátku souřadnic) se rozumí zapsání mřížkových souřadnic koncového bodu na přímce v jednotkách rozměrů elementární buňky, která určuje daný směr.<sup>[12]</sup> Směrové indexy se obvykle píší do hranatých závorek.<sup>[11]</sup> Pro lepší názornost poslouží obr. 2.



**Obr. 2:** Krystalografické směry

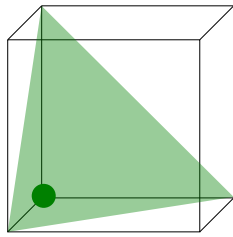
Krystalografické roviny se identifikují tak, že se spojí jednotlivé souřadnice, které rovina vytíná na krystalografických osách. Indexy rovin se píšou do kulatých závorek. Krystalografický směr odpovídající dané rovině v kubické mřížce je na tuto rovinu vždy kolmý.<sup>[12]</sup> Pro lepší názornost opět poslouží obr 3.



**Obr. 3:** Krystalografické roviny

Millerovy indexy odpovídající určité rovině se zapisují ve tvaru  $(hkl)$ . Millerovy indexy pro danou rovinu se získají podle následujících kroků<sup>[12]</sup> (obr. 4):

- zapíšou se úseky, které vytíná daná rovina na osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,
- převrácené hodnoty takto získaných čísel se převedou na nejmenšího společného jmenovatele,
- trojice čísel v čitateli jsou Millerovy indexy dané roviny.

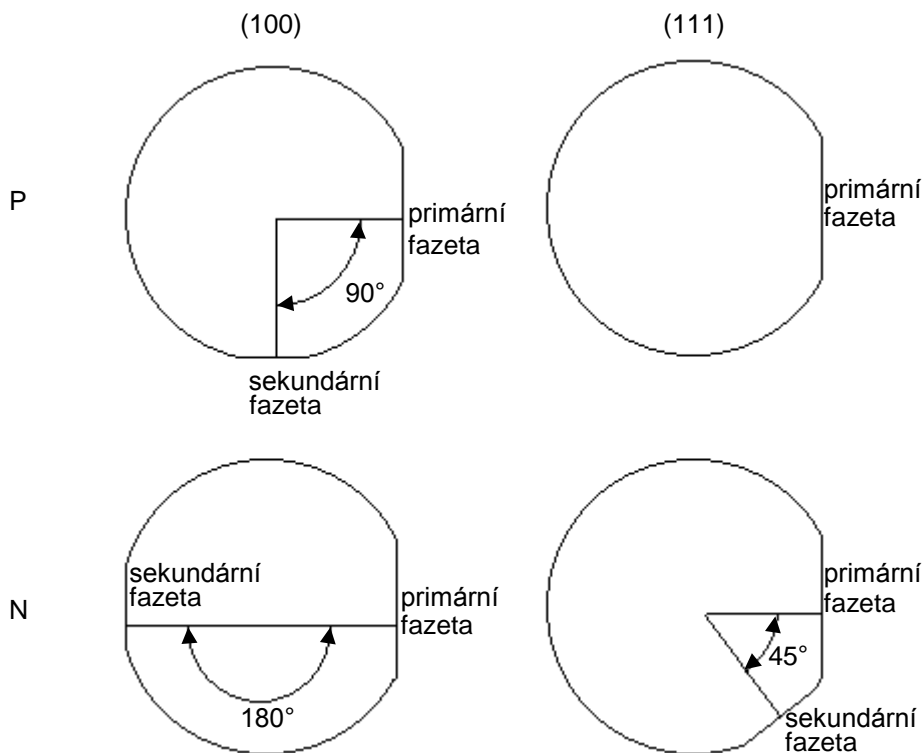


Úseky na osách	1	1	1
Převrácené hodnoty	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$
Millerovy indexy	1	1	1

**Obr. 4:** Millerovy indexy

Pro označení rovin, které jsou v daném krystalu krystalograficky ekvivalentní, se dále používá zápisu ve složených závorkách. Například v kubické soustavě jsou stěny krychle tvořeny rovinami  $\{100\} = (100) + (010) + (001) + (\bar{1}00) + (0\bar{1}0) + (00\bar{1})$ .<sup>[12]</sup>

V mikroelektronice se nejčastěji používají křemíkové substráty s označením (100) a (111), tzn. funkční leštěný povrch je totožný s krystalografickými rovinami (100) a (111) s tím, že z výroby mají určitou toleranci odklonu od požadované roviny povrchu. Jednotlivé typy křemíkových substrátů se od sebe jednoduše rozliší podle seříznutých krajů, tzv. fazet (obr. 5). Fazety také slouží k rozpoznání typu dopantu v křemíku (N, P).



**Obr. 5:** Křemíkové substráty (100) a (111)<sup>[10]</sup>

## 1.2 Leptání

Obecně se leptání může popsat jako chemicko-fyzikální proces, kdy dochází ke tvarování povrchu leptaného materiálu. Vhodným leptadlem je možno leptat všechny typy materiálů od vodičů, přes polovodiče až po dielektrické materiály. Nejvíce se však v mikroelektronice využívá leptání polovodičových materiálů. Konkrétně pak při těchto operacích:

- čištění, leštění a odstraňování zhmožděnin na povrchu substrátu polovodiče s cílem zlepšit povrchové vlastnosti daného materiálu,
- ztenčování polovodičových substrátů,
- ve spojení s litografickým procesem, kdy leptání probíhá přes masku (tvořenou např. polymerním rezistem nebo oxidem leptaného materiálu) a dochází tak ke tvarování funkční vrstvy polovodičového substrátu,
- diagnostika polovodičů a vyrobených struktur, např. při zvýraznění dislokací, zviditelnění PN přechodů a koncentračních profilů, apod.<sup>[8]</sup>

V technologii polovodičů se nejčastěji používá rozdělení technologie leptání na tzv. mokré a suché leptací procesy. Tyto dvě velké skupiny se dále dělí na další leptací techniky (viz níže). Mokrymi procesy se rozumí chemické leptání, kdy roztok leptadla působí na leptanou látku. Naproti tomu v suchých procesech dochází k leptání působením plynu, obvykle ionizovaného.<sup>[8]</sup> Ať už jde o mokré nebo suché procesy, ve výsledku jsou nejdůležitější následující parametry:

- leptací rychlost,
- selektivita leptání (poměr leptacích rychlostí leptaného materiálu a masky),
- dosažitelné rozlišení,
- izotropie procesu,
- opakovatelnost,
- říditelnost.

Na následujících stránkách jsou popsány různé leptací techniky se zaměřením na mokré anizotropní leptání a plazmatické leptání křemíku (100).

## 1.3 Tvorba leptací masky

Leptací maska slouží jako šablona leptaného motivu a zároveň jako ochranný film proti leptání daným leptadlem. Hlavním požadavkem na maskovací materiál je dostatečná odolnost proti použitému leptadlu. Leptací masky mohou být dvojího typu, tzv. tvrdé masky (kovy jako zlato, chrom, hliník,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) a měkké masky (rezisty).<sup>[10]</sup> Každý z materiálů je vhodný

pro jiné procesy (mokré, suché) a pro různá leptadla (KOH, HNA atd.). Samotný motiv se v leptací masce vytváří pomocí litografie (UV, elektronové, iontové atd.). Leptací maska tedy může být tvořena přímo rezistem, nebo se přes rezistovou masku připraví maska z jiného materiálu.

### 1.3.1 Leptací maska $SiO_2$

Pro mokré anizotropní leptání (konkrétně leptadlo na bázi vodného roztoku KOH) se nejčastěji používají masky vytvořené z  $SiO_2$  a  $Si_3N_4$ . Jelikož se v této práci pracuje pouze s maskami z  $SiO_2$ , bude zde rozebrána technika přípravy pouze tohoto typu masky. Při vystavení povrchu křemíku vzdušnému kyslíku (prostředí) vzniká prakticky okamžitě jistá tenká vrstva tzv. nativního oxidu. Tato vrstva má tloušťku pouze několika molekul a časem roste až do konečné tloušťky přibližně 2 nm (této tloušťky dosáhne přibližně za 200 h<sup>[18]</sup> v závislosti na teplotě, tlaku, relativní vlhkosti) a dále již neroste.<sup>[15]</sup> Při leptání, ať už mokrou či suchou cestou, je tvorba nativního oxidu značně problematická, jelikož brání přístupu leptadla ke křemíku a negativně tak ovlivňuje výsledek leptání.

Tvorba silnějších vrstev oxidu, které slouží jako leptací maska, se provádí v difúzní peci při teplotě mezi 900 až 1200°C. Termická oxidace odehrávající se na povrchu křemíku může probíhat dvěma způsoby. Buďto za přítomnosti vodních par (mokrý oxidace)<sup>[9]</sup>:



nebo za přítomnosti čistého kyslíku (suchá oxidace)<sup>[9]</sup>:



Na povrchu křemíku dochází k růstu oxidu v obou směrech (pod povrch křemíku i nad povrch křemíku), 46% pod původní hranici povrchu a 56% nad hranici povrchu.<sup>[9]</sup> Jestliže se tedy vytvoří 1  $\mu m$  vrstvu oxidu, ubude 460 nm Si, ale celková tloušťka substrátu naroste o 560 nm.

Rychlost růstu oxidové vrstvy závisí na mnoha faktorech. S časem, jak roste tloušťka oxidové vrstvy, dochází ke zpomalování rychlosti růstu. Vyšších rychlostí se dosahuje u mokré oxidace. Rychlost oxidace narůstá se zvyšující se teplotou a se zvyšujícím se tlakem. Rychlost oxidace ovlivňuje i krystalografická orientace křemíku a koncentrace příměsí v křemíku. Vlivem pomalejšího růstu oxidové vrstvy při suché oxidaci je výsledkem oxid o vyšší hustotě.<sup>[9]</sup>

### **1.3.2 Litografie**

Ať už je k vytvoření leptaného motivu použit jakýkoliv druh litografie, postup je vždy v zásadě stejný:

- ošetření povrchu křemíkového substrátu,
- nanesení rezistu,
- sušení rezistu,
- expozice,
- vyvolání obrazu v rezistu.

Před nanesením rezistu je nutno křemíkový substrát důkladně očistit a zbavit ho všech nečistot (především organických látek a vody). Případně může dojít k dodatečnému ošetření substrátu za účelem zvýšení adheze rezistu k substrátu (případně k maskovacímu substrátu).

K nanášení rezistu se obvykle využívá technika odstředivého lití. Výsledná tloušťka závisí na parametrech použité odstředivky (rychlost otáčení, způsob uchycení substrátu,...), na použitém rezistu, na tvaru a velikosti použitého křemíkového substrátu, teplotě apod.

K sušení nanesených rezistových vrstev se používají sušárny nebo vyhřáté podložky. Při sušení dojde k odstranění rozpouštědla z rezistu a k jeho zpevnění. Parametry sušení (teplota, čas, způsob sušení) ovlivňují vlastnosti rezistu při následné expozici a vyvolávání (citlivost, kontrast).

Při použití elektronové litografie způsobem přímého zápisu dochází k expozici elektronovým svazkem bez použití jakékoliv šablony. Při interakci elektronů s rezistem dochází k fyzikálně-chemickým pochodům, jež mají za následek změnu vlastností rezistu. V případě negativního rezistu dochází k sesíťování polymerních řetězců, u pozitivního rezistu naopak k rozpadu polymerních vazeb.

K vyvolávání se použije vývojka doporučená pro daný rezist. Jestliže byl použit negativní rezist, rozpouští se neexponovaná část rezistu rychleji než exponovaná. Pro pozitivní rezist je tomu naopak (exponovaná část se rozpouští rychleji). Proces vyvolávání ovlivňuje nejen použitý rezist a vývojka, ale i teplota, čas vyvolávání a další parametry.

Po procesu vyvolávání se může ještě použít dodatečné očištění v kyslíkové plazmě, kdy se odstraní zbytky nevyvolaného rezistu na povrchu křemíku, resp. maskovacího materiálu.

### **1.3.3 Leptání $\text{SiO}_2$ masky**

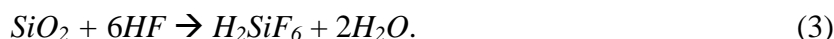
V případě, že rezist zároveň neplní maskovací funkci pro leptání substrátu (křemíku), je nutné přenést motiv vytvořený v rezistu do vhodnějšího maskovacího materiálu. K tomu poslouží vhodné leptadlo, které leptá maskovací materiál, ale nepoškodí rezistovou masku. Na leptání

SiO<sub>2</sub> se nejčastěji používá tzv. POL (Pomalé Oxidové Leptadlo), někdy se uvádí název BOE (z anglického *Buffered Oxide Etch*). Toto leptadlo se skládá z HF (40%ní kyselina fluorovodíková), NH<sub>4</sub>F (fluorid amonný) a demineralizované vody v následujícím poměru<sup>[14]</sup>:

$$(400 \text{ g NH}_4\text{F} + 600 \text{ g H}_2\text{O}) : \text{HF} = 6:1,$$

Leptadlo POL je naprosto netečné k polymerním rezistům i k samotnému křemíku, přičemž rychlost leptání SiO<sub>2</sub> je přibližně 100 nm min<sup>-1</sup>.

Během leptání probíhá následující chemická reakce<sup>[14]</sup>:



Působením kyseliny fluorovodíkové dochází k rozpouštění oxidu křemičitého za vzniku kyseliny hexafluorokřemičité a vody. Současně s touto hlavní reakcí dochází k dorovnávání koncentrace HF<sup>[14]</sup>:



Problémem leptadla POL je jeho izotropnost. Dochází totiž k podleptávání rezistové vrstvy a tím k rozšiřování vytvářeného motivu. Tento jev je kritický z hlediska maximálního dosažitelného rozlišení, proto je nutné znát co nejpřesněji leptací rychlost, aby bylo možno zastavit leptání oxidové masky v okamžiku, kdy POL dosáhne povrchu křemíku.

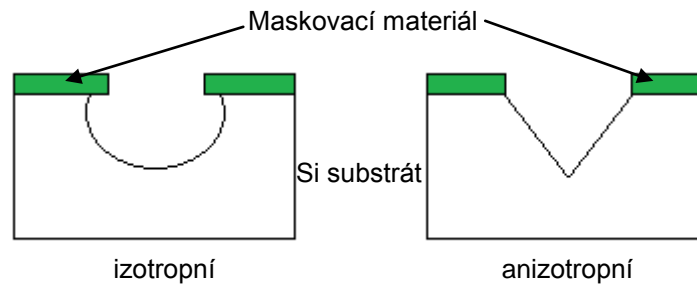
Leptadlo POL se může použít i po dokončení procesu leptání k odstranění oxidové masky, je-li to vzhledem k aplikaci žádoucí.

## 1.4 Mokrý leptací procesy

Jak už bylo řečeno výše, u mokrých procesů jde o chemické leptání, kdy dochází k chemické reakci mezi leptadlem a povrchem leptané látky. Tato reakce se dá obecně rozdělit do tří následujících fází<sup>[8]</sup>:

- transport molekul leptadla a jejich adsorpce k povrchu leptané látky,
- chemická reakce mezi molekulami leptadla a molekulami leptané látky (oxidačně redukční reakce),
- uvolnění produktů chemické reakce z povrchu leptané látky.

U mokrých leptacích procesů se obvykle rozlišují izotropní a anizotropní procesy. U izotropního leptání dochází k leptání materiálu (v našem případě křemíku) stejnou rychlostí ve všech krystalografických směrech (obr. 6). V případě anizotropního leptání dochází k leptání různými rychlostmi v různých směrech (obr. 6). Obě dvě techniky našly své využití v různých operacích.



Obr. 6: Příklad izotropního a anizotropního leptání

## 1.5 Mokré anizotropní leptání

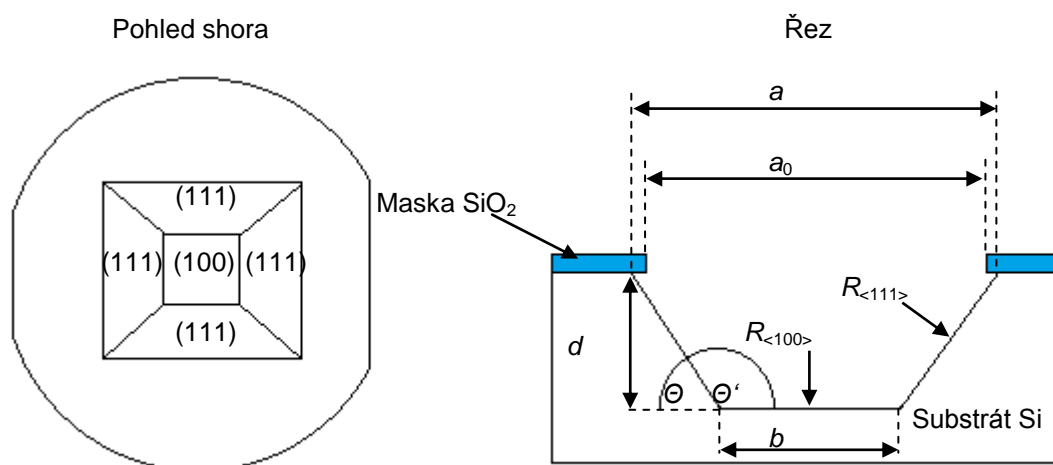
Mokrým anizotropním leptáním se dá dosáhnout rozličných tvarů leptu. Právě to je umožněno různými leptacími rychlostmi v různých krystalografických směrech. Pro mokré anizotropní leptání se prakticky využívají substráty (100) a (110). Substrát (111) se nevyužívá, protože leptací rychlost v tomto směru je oproti dvěma výše zmíněným velmi malá, prakticky zanedbatelná. Autoři v [10] a [3] se shodují v typických poměrech leptacích rychlostí  $R_{\langle 110 \rangle} / R_{\langle 100 \rangle} / R_{\langle 111 \rangle}$  (400/200/1). V tab. 1 jsou uvedeny úhly mezi důležitými krystalografickými rovinami a směry, díky nimž se poté může vypočítat rychlost leptání v různých směrech.

Tab. 1: Úhly mezi důležitými krystalografickými rovinami a směry v kubické krystalové soustavě<sup>[12]</sup>

HKL	hkl	úhel	úhel	úhel
100	100	0,00°	90,00°	
	110	45,00°	90,00°	
	111	54,74°		
110	110	0,00°	60,00°	90,00°
	111	35,26°	90,00°	
111	111	0,00°	70,53°	

### 1.5.1 Leptání křemíku (100)

Jelikož je předmětem této práce leptání křemíku (100), je zde popis anizotropního leptání omezen pouze na tento typ křemíku. Jestliže se tedy leptá substrát (100), může se prakticky dosáhnout dvou různých tvarů výsledného leptu. Výsledný tvar závisí na tvaru (orientaci) masky. Obvykle se tvar masky vytváří souhlasně s orientací fazet substrátu (obr. 7). Výsledný lept bude mít tvar pyramidy s rovným dnem, kde šikmé plochy jsou tvořeny rovinami {111} a dno tvoří stejná rovina jako povrch substrátu (100). Úhel mezi šikmými plochami a dnem je  $\theta = 54,74^\circ$  resp. doplňkový úhel  $\theta' = 125,26^\circ$ . Pro lepší názornost poslouží obr. 7.<sup>[11]</sup>



**Obr. 7:** Obdélníková maska sesouhlasená s fazetami a výsledný tvar leptu substrátu (100) při anizotropním mokrém leptání

Pro hloubku leptu a rychlost leptání pro rovinu (100) a roviny {111} se dají odvodit následující vztahy<sup>[11]</sup>:

$$d = \frac{a-b}{2} \operatorname{tg} \Theta, \quad (5)$$

$d$ ...hloubka leptu ( $\mu\text{m}$ )

$a$ ...šířka leptu ( $\mu\text{m}$ )

$b$ ...šířka dna ( $\mu\text{m}$ )

$\Theta$ ...úhel mezi rovinou (100) a rovinami {111}, vždy  $54,74^\circ$

$$R_{\langle 100 \rangle} = \frac{\Delta d}{\Delta t}, \quad (6)$$

$t$ ...doba leptání (min)

$$R_{\langle 111 \rangle} = \frac{\Delta a \sin \Theta}{2t}. \quad (7)$$

$R_{\langle 100 \rangle}$ ...rychlost leptání ve směru [100] ( $\mu\text{m min}^{-1}$ )

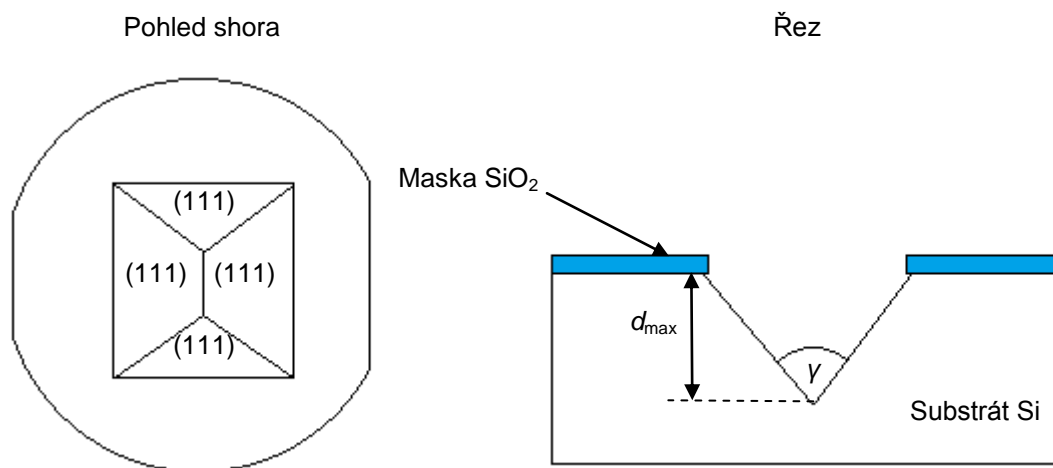
$\Delta a = (a - a_0)$ ...rozdíl rozměru masky a výsledného leptu (viz obr. 7) ( $\mu\text{m}$ )

Jestliže se bude leptat dostatečně dlouhou dobu, dosáhne se maximální hloubky:<sup>[11]</sup>

$$d_{\max} = \frac{a \sqrt{2}}{2}, \quad (8)$$

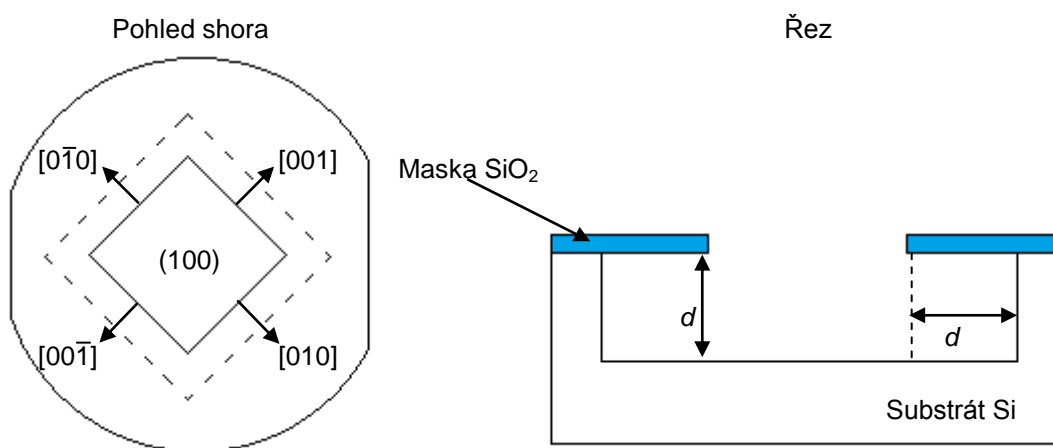
$d_{\max}$ ...maximální hloubka ( $\mu\text{m}$ )

kdy dojde k protnutí rovin  $\{111\}$  a leptání se tím prakticky zastaví. Vertikální řez bude mít tvar písmena **V**, s vrcholovým úhlem  $\gamma = 70,53^\circ$  (viz obr. 8). K podleptání masky prakticky nedochází, pokud bude tvar masky dokonale sesouhlasen s krystalografií substrátu.<sup>[11]</sup> Čím větší bude odchylka, tím dojde k většímu podleptání, i přesto bude ale nepatrné oproti izotropnímu leptání.



**Obr. 8:** Maximální hloubka leptu při anizotropním leptání substrátu (100) přes obdélníkovou masku sesouhlasenou s fazetami substrátu.

Jestliže se zvolí tvar masky natočený o  $45^\circ$  vzhledem k fazetě substrátu (100) (obr. 9), pak vznikne lept s kolmými stěnami, které odpovídají krystalografickým rovinám  $\{100\}$  stejně jako dno leptu.<sup>[10]</sup>



**Obr. 9:** Vliv natočení masky o  $45^\circ$  vzhledem k fazetám substrátu (100) na anizotropní leptání

Vlivem rychlého leptání ve směru  $[100]$  dochází k výraznému podleptání masky. Výsledné podleptání masky je rovno výsledné hloubce leptu. Kvůli zmíněnému podleptání masky se proto tento způsob vytváření kolmých stěn anizotropním leptáním nepoužívá.

### 1.5.2 Leptání vodným roztokem KOH

Anizotropních leptadel křemíku používaných při mokřích leptacích procesech existuje velké množství, pokaždé jde o alkalické lázně. Patří sem množství anorganických roztoků jako KOH, NaOH, LiOH, CsOH, RbOH, NH<sub>4</sub>OH. Mezi organická řešení patří ethylenediamine, hydrazin, pyrokatechol a pyrazin.<sup>[11]</sup>

Nejčastěji se ze zmíněných leptadel používá vodný roztok KOH. Po smíchání KOH v pevném stavu s vodou dojde k disociaci KOH na následující ionty:



kde anionty OH<sup>-</sup> způsobují leptání křemíku (leptací reakce budou vysvětleny dále).

Nejvyšších leptacích rychlostí se dosahuje při koncentracích 10%<sub>hm</sub> KOH. Se zvyšující se koncentrací KOH leptací rychlosti klesají, ale zvyšují se poměry leptacích rychlostí mezi jednotlivými rovinami. Někdy se do roztoku KOH přidává isopropanol za účelem snížení leptacích rychlostí ve směru [111] a zvýšení poměrů rychlostí mezi krystalovými směry.<sup>[10][11]</sup>

Výše zmíněné závislosti jsou dosahovány při teplotě 80°C, což je běžná teplota pro anizotropní leptání vodným roztokem KOH. Leptání v jednotlivých směrech je na teplotě velmi závislé a se vzrůstající teplotou se zvyšuje. Stupeň závislosti leptacích rychlostí na teplotě pro jednotlivé roviny je následující: (111) > (100) > (110).<sup>[10]</sup>

Co se týče závislosti leptacích rychlostí na koncentraci příměsí, tak u křemíku typu N dochází se zvyšujícími se koncentracemi k nepatrnému snížení leptacích rychlostí (dochází k tomu ale až od vysokých koncentrací  $N_D > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ )<sup>[10]</sup>. Ovšem pro křemík typu P s příměsí bóru se projevuje silná závislost leptací rychlosti  $R_{<100>}$  od koncentrace  $N_A > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Závislost má také klesající charakter a při koncentraci  $N_A = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  dochází k úplnému zastavení leptání. Toho se využívá k dosažení velmi přesných hloubek leptů (např. při tvorbě membrán), kdy se do určité hloubky vytvoří vrstva silně dotovaná bórem. Poté se provede leptání z druhé strany substrátu a leptání se samovolně zastaví na zmíněné vrstvě.<sup>[11]</sup>

Anizotropní leptání za sebou obvykle zanechává poměrně drsný povrch. Drsnost se snižuje se zvyšující se koncentrací KOH, ale současně tím klesá leptací rychlost. Většinou se volí koncentrace kolem 40%<sub>hm</sub> jako dobrý kompromis mezi drsností povrchu a leptací rychlostí. Někdy se k dosažení vyšší hladkosti povrchu používá krátké izotropní leptání, které následuje bezprostředně po anizotropním leptání.<sup>[10]</sup>

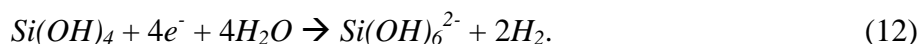
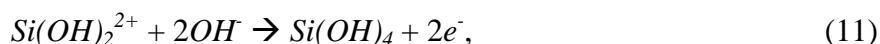
Maskovací materiál se vybírá podle charakteru výsledného leptu. Jestliže se budou vytvářet nepřiliš hluboké lepty a leptání proběhne poměrně rychle, může se použít SiO<sub>2</sub>. Leptací rychlost SiO<sub>2</sub> je přibližně 80 nm h<sup>-1</sup> při teplotě 60°C pro koncentraci 35%<sub>hm</sub> KOH. Jestliže bude leptání probíhat několik hodin, pro dosažení velmi hlubokých leptů, popř. proleptání celého substrátu, je nutné použít jiný maskovací materiál. Jako vhodný materiál se v tomto

případě jeví  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , kdy během leptání v roztoku KOH dochází k odleptání pouze jednotek nanometrů během několika hodin.<sup>[10]</sup> Při nízkých teplotách (do 40°C) se může použít jako maskovací materiál i rezist PMMA, kdy nedochází k tepelné degradaci rezistu. Ovšem v přítomnosti isopropanolu dochází k okamžitému smytí vrstvy PMMA.<sup>[11]</sup>

### 1.5.3 Seidelův model anizotropního leptání

Podle autora [10] existuje několik modelů, které se snaží vysvětlit anizotropii leptání. Dvěma nejkompexnějšími a pravděpodobně i nejvýstižnějšími jsou tzv. Seidelův model a Elwenspoekův model.

Seidelův model je založen na měnící se energii pásového modelu rozhraní křemík-leptadlo. Tento model předpokládá injekci elektronů do vodivého pásu křemíku a vytváření negativního náboje na povrchu křemíku během procesu leptání. To vede ke snižování hladiny energiového pásu na rozhraní pevná látka/roztok. Následně hydroxidové ionty způsobí, že povrch křemíku začne oxidovat. Tato reakce spotřebovává vodu za současného uvolňování vodíku. Celý proces se dá popsat pomocí následujících reakcí<sup>[10]</sup>:



V reakci (12) dochází ještě působením čtyř elektronů k rozpadu vody na hydroxidový iont a vodík<sup>[10]</sup>:



Hydroxidové ionty vzniklé touto reakcí tvoří převážnou většinu iontů, které se účastní leptání křemíku. Většina hydroxidových iontů přítomných v objemu roztoku je odpuzována od povrchu křemíku negativním nábojem a reakce se neúčastní. Z toho vyplývá, že leptací rychlost je silně závislá na molární koncentraci vody v roztoku (jak bylo řešeno výše, nejvyšších rychlostí leptání je dosahováno při koncentraci 10%<sub>hm</sub> KOH).<sup>[10]</sup>

Hnačí síla odtržení křemíku od povrchu je dána vazebnou energií Si-O (193 kcal mol<sup>-1</sup>), která je větší než vazební energie Si-Si (78 kcal mol<sup>-1</sup>). 4 elektrony z reakce (12), resp. (13), jsou injektovány do vodivostního pásu křemíku ve dvou krocích. V případě rovin {100} existují dvě obsazené vazby (pod povrchem) na každém atomu křemíku na povrchu a dvě volné vazby nad povrchem na každém atomu. Tyto dvě volné vazby se obsadí dvěma hydroxidovými anionty a dva elektrony z volných vazeb jsou injektovány do vodivostního pásu. Důsledkem silné elektronegativity kyslíkového atomu oba dva vázané hydroxidové anionty oslabí dvě

podpovrchové vazby křemíku. Přiblížením dalších dvou hydroxidových iontů k povrchu dojde k injekci zbývajících dvou elektronů (ty tentokrát pochází z obsazených vazeb pod povrchem) do vodivostního pásu a sloučenina tvořená jedním křemíkovým atomem a dvěma hydroxilovými skupinami reaguje se zbylými dvěma hydroxidovými anionty. Seidelův model tvrdí, že aktivace druhé dvojice elektronů je faktorem, který limituje leptací rychlost ve spojení s tepelnou aktivační energií (0,595 eV pro roviny {100}).<sup>[10]</sup>

Aktivační energie je rozdílná pro různé krystalografické roviny. S tím, že pro roviny {111} je nejnižší, proto je tato rovina nejvíce odolná proti leptání. Tento fakt podporuje i to, že atomy na povrchu rovin {111} mají tři obsazené vazby pod povrchem a pouze jednu volnou vazbu nad povrchem. Ani silná elektronegativita kyslíku v hydroxidovém aniontu (pouze jeden, který se může navázat) nestačí na oslabení těchto tří vazeb. Proto druhým faktorem limitujícím rychlost leptání je nutnost rozbití tří vazeb s nízkou energií. To nekoresponduje s faktem, že roviny {110} (mající vysokou aktivační energii, která podporuje teorii o vysoké rychlosti leptání) se leptají rychle, ale také mají tři obsazené vazby pod povrchem. Seidelův model to vysvětluje tím, že tyto vazby mají jinou orientaci a proto jsou snadněji porušitelné.<sup>[10]</sup>

Konečným krokem v anizotropním leptání je odstranění produktu reakce  $\text{Si(OH)}_4$  pomocí difúze. Jestliže produkce  $\text{Si(OH)}_4$  probíhá příliš rychle v roztocích s vysokou koncentrací vody, může docházet k vytvoření tenkého filmu sloučeniny na základě  $\text{SiO}_2$  na povrchu křemíku dříve, než  $\text{Si(OH)}_4$  stihne difundovat pryč. Může to být pozorováno jako bílé zbarvení povrchu. Na zajištění dostatečného rozpouštění produktu reakce  $\text{Si(OH)}_4$ , stejně jako na rozpouštění nativního oxidu, je vyžadována vysoká hodnota pH leptadla.<sup>[10]</sup>

Ze Seidelova modelu se dá stanovit následující empirický vztah pro rychlost leptání křemíku (100), platný pro vodný roztok KOH o koncentracích mezi 10 až 60 %<sub>hm</sub><sup>[17]</sup>:

$$R = k_0 [\text{H}_2\text{O}]^4 [\text{KOH}]^{0,25} e^{\frac{-E_a}{kT}} \quad (15)$$

$R$ ...rychlost leptání ( $\mu\text{m h}^{-1}$ )

$k_0$ ...empirická konstanta  $2480 \mu\text{m h}^{-1} (\text{mol dm}^{-1})^{-4,25}$

$[\text{H}_2\text{O}]$ ,  $[\text{KOH}]$ ...molární koncentrace ( $\text{mol dm}^{-1}$ ),  $c_A = \frac{m_A}{M_A V}$ , kde  $m_A$  je

hmotnost A-té složky (g),  $M_A$  je molární hmotnost A-té složky ( $\text{g mol}^{-1}$ )  
a  $V$  je objem roztoku

$E_a$ ...aktivační energie (J), pro křemík (100)  $E_a = 0,595 \text{ eV}$

$T$ ...termodynamická teplota (K)

$k$ ...boltzmannova konstanta ( $\text{J K}^{-1}$ )

#### 1.5.4 Elwenspoekův model anizotropního leptání

Elwenspoekův model je založen na teorii růstu krystalu. Seidelův model podle autora [10] prý jasně nevysvětluje rychlé leptání rovin {110}, přestože tyto roviny mají také tři vazby obsazené, tudíž by měly být leptány mnohem pomaleji. Seidel přikládá různé rychlosti leptání difúzi. Naproti tomu Elwenspoek poukazuje na to, že alespoň při pomalém leptání by neměla difúze hrát příliš velkou roli a leptání je podle něj řízeno reakcí na povrchu křemíku.<sup>[10]</sup>

Tento model dává do souvislosti rychlost růstu daných krystalografických rovin s rychlostí jejich leptání. Klíčem k pochopení obou těchto procesů (růst nebo leptání) je koncept energií spojených s vytvářením zárodků na hladkém povrchu monokrystalu (volná energie spojená s tvorbou ostrůvků při růstu a s tvorbou dutin při leptání). Růst krystalu či jeho leptání začíná na „speciálních“ místech, kde atomy mají stejný počet obsazených vazeb pod povrchem monokrystalu a stejný počet volných vazeb směrem do tekutiny (tavenina při růstu, leptací lázeň při leptání). Kinetika tohoto procesu je silně závislá právě na počtu takovýchto míst. Změna volné energie popisující růst ostrůvků nebo hloubení dutin o určitém poloměru na atomárně hladkém povrchu je dána následujícím vztahem<sup>[10]</sup>:

$$\Delta G = -N \Delta\mu + 2 \pi r \gamma. \quad (16)$$

$\Delta G$ ...změna Gibbsovy volné energie (J)

$N$ ...počet atomů formujících ostrůvek, počet atomů odstraněných z dutiny ( $\text{mol}^{-1}$ )

$\Delta\mu$ ...změna chemického potenciálu mezi atomy křemíku v pevném stavu a atomy křemíku v roztoku ( $\text{J mol}^{-1}$ )

$r$ ...poloměr ostrůvku či dutiny (m)

$\gamma$ ...specifická volná energie ( $\text{J m}^{-1}$ )

Specifická volná energie nabývá rozdílných hodnot pro různé krystalografické roviny. Dokonale rovný povrch roviny {111} v křemíkové mřížce nemá žádná „speciální“ místa (tři obsazené vazby a jen jedna volná vazba). Zatímco na povrchu rovin {100} má každý atom dvě vazby obsazené a dvě vazby volné, tudíž celý povrch se skládá ze „speciálních“ míst. Což znamená, že přidání (růst krystalu) či odebrání (leptání) atomu na rovinách {111} stojí energii (musí se rozbít tři vazby a jedna vytvořit), zatímco v případě rovin {100} nikoliv (dvě vazby se rozbijí a dvě se vytvoří).  $N$  je dále definováno následovně:

$$N = \pi r^2 h \rho. \quad (17)$$

$h$ ...hloubka dutiny (m)

$\rho$ ...hustota pevného materiálu (počet atomů  $\text{m}^{-3}$ )

Podle autora [10] nabývá  $\Delta G$  svého maxima  $\Delta G^*$  při určité kritické hodnotě  $r$ :

$$r^* = \left( \frac{\gamma}{h \rho \Delta\mu} \right). \quad (18)$$

$r^*$  ...kritický poloměr ostrůvku či dutiny (m)

Při hodnotě  $r < r^*$  dojde k zaplnění vytvořené dutiny, než aby došlo k odleptání celé vrstvy. Ovšem při  $r > r^*$  se bude dutina rozšiřovat, dokud nedojde k odleptání celé vrstvy. Aby tedy mohlo dojít k leptání, musí na dané rovině dosáhnout Gibbsova volná energie svého maxima. Jelikož  $\Delta G$  je závislá na  $\gamma$ , bude i rychlost leptání rozdílných rovin různá. Pro roviny {111} je  $\Delta G^*$  mnohem větší než pro ostatní roviny, proto se tato rovina leptá velmi pomalu. Rychlost leptání je úměrná následujícímu výrazu<sup>[5]</sup>:

$$R \sim \exp\left(\frac{-\Delta G^*}{kT}\right). \quad (19)$$

Při zvyšování teploty se rozdíly mezi leptacími rychlostmi začínají stírat, protože specifická volná energie i změna chemického potenciálu jsou závislé na teplotě. Platnost tohoto modelu potvrzuje i skutečnost, že při špatně sesouhlasené masce dochází k výraznějšímu podleptání masky, než při masce dokonale sesouhlasené. Podleptání je způsobeno odhalením rovin, které na sobě nesou „speciální“ místa, a ne leptáním roviny {111}. Toto podleptání je úměrné úhlu odchýlení (pro malé úhly).<sup>[5]</sup>

## 1.6 Suché leptací procesy

V důsledku miniaturizace v mikro a nano výrobních technologiích jsou kladeny větší technologické požadavky na leptací techniky. To vedlo ke vzniku a rozvoji suchých leptacích procesů. Suché leptací procesy využívají leptacího média v plynné fázi. Suché leptací procesy se dají rozdělit na ty, co využívají ionizovaného plynu (plazmy) a na ty, co k leptání plazmu nevyžadují (za určitého tlaku, kdy se daná leptací směs nachází ve formě páry). Suché leptací procesy se od těch mokrých liší nejen fází leptacího média, ale i dalšími vlastnostmi. Shrnutí těchto rozdílů je uvedeno v tab. 2.<sup>[1][2]</sup>

**Tab. 2:** Srovnání mokrých a suchých leptacích procesů<sup>[10]</sup>

Parametr	Suché leptání	Mokrý leptání
Tvary leptů	Pro většinu materiálů prakticky libovolné	Určité tvary pouze pro monokrystalické materiály
Automatizace	Dobrá	Slabá
Negativní dopady na životní prostředí	Nízké	Vysoké
Adheze maskovacích materiálů	Ne až tak kritická	Velmi kritická
Cena leptadel	Nízká	Vysoká
Selektivita	Nízká	Až velmi vysoká
Leptané materiály	Pouze určité materiály (nedá se lepat např. Fe, Ni, Co)	Všechny
Poškození zářením	Za určitých podmínek ano	Žádné
Čistota procesu	Za správných podmínek dobrá	Velmi dobrá
Tolerance dosažených rozměrů	Velmi dobrá (<0.1 μm)	Slabá
Cena vybavení	Vysoká	Nízká
Submikrometrové rozměry	Velmi dobře dosažitelné	Obtížně dosažitelné
Typická leptací rychlost	Pomalá (0,1 μm)	Rychlá (1 μm)
Teorie dané techniky	Velmi komplexní	Lépe pochopitelná
Nastavitelné parametry	Mnoho	Málo
Řízení leptací techniky	Dobré, díky pomalé leptací rychlosti a mnoha nastavitelným parametrům	Obtížné

Suché leptací procesy, které nevyužívají k leptání plazmu, jsou založeny na spontánní reakci vhodné směsi reaktivních plynů a leptaného materiálu. Vyznačují se izotropií a vysokou selektivitou mezi maskovacím materiálem a leptacím materiálem. Tyto procesy jsou poměrně dobře říditelné nastavením tlaku směsi leptacího plynu a jeho teploty. K leptání křemíku touto metodou se používají směsi plynu obsahující fluor (XeF<sub>2</sub>, BrF<sub>3</sub>, ClF<sub>3</sub>). Jako produkt leptání vzniká především SiF<sub>4</sub>. Na přípravu masky se dá použít široké spektrum materiálů, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, polymerní rezisty, Al, Cu, Au, Ni. Nevýhodou této leptací techniky je vysoká drsnost leptaného povrchu (~40 až 150 nm). Dalším důležitým problémem je, že XeF<sub>2</sub> při reakci s vodou či vodními párami (obsažená ve vzduchu) vytváří HF.<sup>[1][2]</sup>

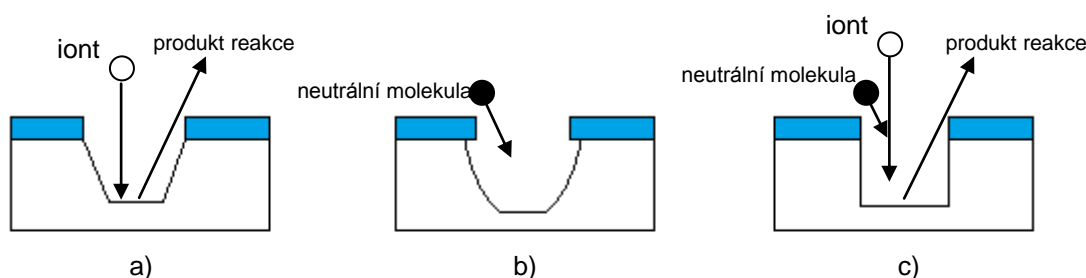
Techniky suchého leptání, kde se využívá plynu v ionizované podobě, se dají rozdělit do tří základních skupin podle mechanismů, které uskutečňují leptání na chemické, fyzikální a chemicko-fyzikální.

U fyzikálního leptání ionty bombardují povrch leptaného materiálu a leptání je docíleno kinetickou energií bombardujících částic, jde vlastně o odprašování materiálu. Tyto leptací techniky vyžadují nejnižší tlak (~10<sup>-2</sup> Pa). Vyznačují se velmi slabou selektivitou leptání a pomalou leptací rychlostí. Profil leptu je anizotropní. Patří sem techniky IBE (leptání svazkem iontů z anglického *Ion-Beam Etching*) MIE (magneticky podpořené leptání

z anglického *Magnetically enhanced Ion Etching*) a další. Typický příklad takového profilu vytvořeného technikou IBE je uveden na obr. 10 a).<sup>[10]</sup>

Chemické leptání je založeno na chemické reakci mezi částicemi, které vzniknou ionizací plynu (leptadla) a částicemi leptaného materiálu. Běžně probíhají při tlaku v řádu  $10^2$  Pa. Chemická podstata tohoto procesu vede k poměrně dobré selektivitě a vysoké leptací rychlosti. Leptaný profil má izotropní charakter. Typickým zástupcem těchto technik je plazmatické leptání, které bude podrobněji popsáno v následující kapitole. Na obr. 10 b) je uveden typický tvar leptu dosažený plazmatickým leptáním.<sup>[10]</sup>

Leptání, které využívá chemicko-fyzikálních mechanismů, v sobě kombinuje obě výše zmíněné techniky (odprašování materiálu podpořené chemickou reakcí mezi ionizovaným plynem a leptaným materiálem). Tlak plynu je v rozmezí  $10^{-2}$  až  $10^2$ . Tyto leptací techniky se vyznačují dobrou selektivitou a vysokou leptací rychlostí. V současné době jde o nejpoužívanější suché leptací techniky v polovodičovém průmyslu. Nejvýznamnějším zástupcem těchto technik je RIE (reaktivní iontové leptání z anglického *Reactive Ion Etching*) či jeho modifikace DRIE (hluboké reaktivní iontové leptání z anglického *Deep Reactive Ion Etching*) nebo RIBE (reaktivní leptání svazkem iontů z anglického *Reactive Ion-Beam Etching*). Charakter leptu je anizotropní, typický profil je uveden na obr. 10 c).<sup>[10]</sup>



**Obr. 10:** Profil leptu pro a) IBE, b) plazmatické leptání, c) RIE<sup>[10]</sup>

Důležité je zmínit, že anizotropního tvaru leptu u suchého leptání se dá dosáhnout u monokrystalických, polycrystalických i amorfních materiálů. Anizotropie totiž v tomto případě není způsobena rozdílnou leptací rychlostí v různých krystalografických směrech, jako je tomu v případě mokrého leptání. Anizotropie je řízena podmínkami v plazmě (směrovost, chemické reakce na povrchu leptaného materiálu, pasivace vertikálních stěn leptaného profilu).

## 1.7 Plazmatické leptání

Jak již bylo řečeno výše, plazmatické leptání využívá k leptání reaktivní neutrální částice, které vzniknou ionizací plynu. K ionizaci plynu dojde, pokud je mu dodáno dostatečné množství energie. Ionizací plynu určeného k plazmatickému leptání vznikne plazma (slabě

ionizovaná plazma), která v sobě obsahuje záporně nabitě elektrony, kladně a záporně nabitě ionty a neutrální atomy (nebo molekuly), zvané též radikály. A právě tyto radikály reagují s atomy (molekulami) leptaného materiálu a vytvářejí těkavé sloučeniny, které jsou odstraňovány z povrchové vrstvy. Jedinou rolí plazmy je tedy tvorba dostatečného množství požadovaných radikálů, které budou nejen snadno reagovat s leptaným materiálem, ale zároveň bude snadno docházet k desorpci reakčních produktů vzniklých při leptání. Lze tedy říct, že pokud by byl samotný plyn dostatečně reaktivní, nebylo by zapotřebí plazmy (toho využívají některé suché leptací procesy popsané výše). Jednotlivé částice obsažené v leptací komoře jsou zastoupeny přibližně v následujících poměrech z celkového množství všech částic<sup>[10][19]</sup>.

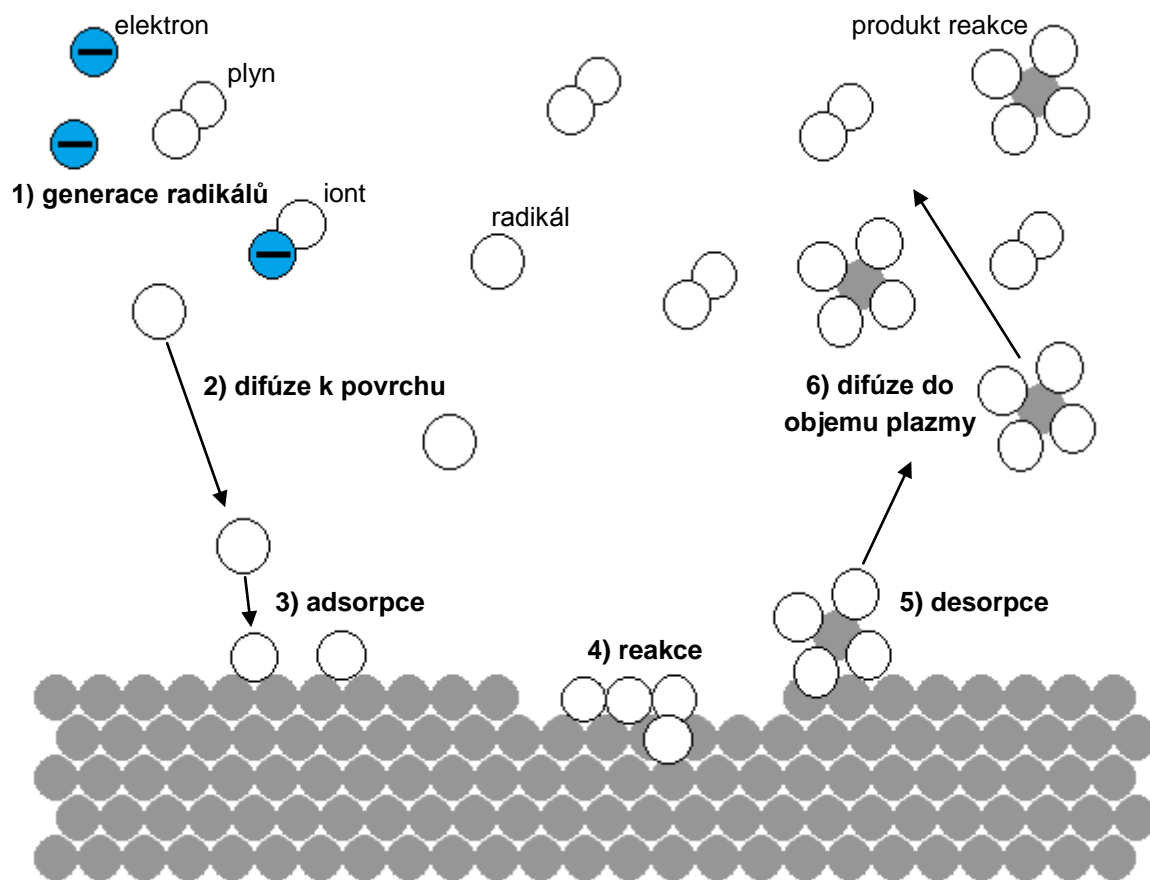
- molekuly leptacího plynu – 70-98%,
- částice vzniklé leptáním – 2-20%,
- radikály – 0,1-20%,
- nabitě částice (elektrony, kladné, případně záporné ionty) – 0,001-0,01%.

Jak je vidět, radikály se vyskytují v plazmě v mnohem větších koncentracích než nabitě částice. To je dáno tím, že jsou generovány rychleji než nabitě částice a mají také delší dobu života.<sup>[19]</sup>

Celý proces plazmatického leptání může být rozdělen do šesti dílčích kroků<sup>[10]</sup>:

- 1) Generace radikálů srážkami plynu s elektrony.
- 2) Difúze radikálů k povrchu leptaného materiálu.
- 3) Adsorpce radikálů na povrchu leptaného materiálu.
- 4) Chemická reakce mezi radikálem a atomem/molekulou leptaného materiálu, která vede k vytvoření těkavého produktu reakce.
- 5) Desorpce produktu z povrchu leptaného materiálu.
- 6) Difúze produktu do objemu plazmy.

Nejdůležitějším krokem je krok 5), jelikož mnoho typů radikálů poměrně snadno reaguje s leptaným materiálem, ovšem jestliže nedojde za daných podmínek k desorpci, leptání se zastaví. Na obr. 11 je pro lepší představu ilustrováno všech šest kroků plazmatického leptání.



Obr. 11: Proces plazmatického leptání<sup>[10]</sup>

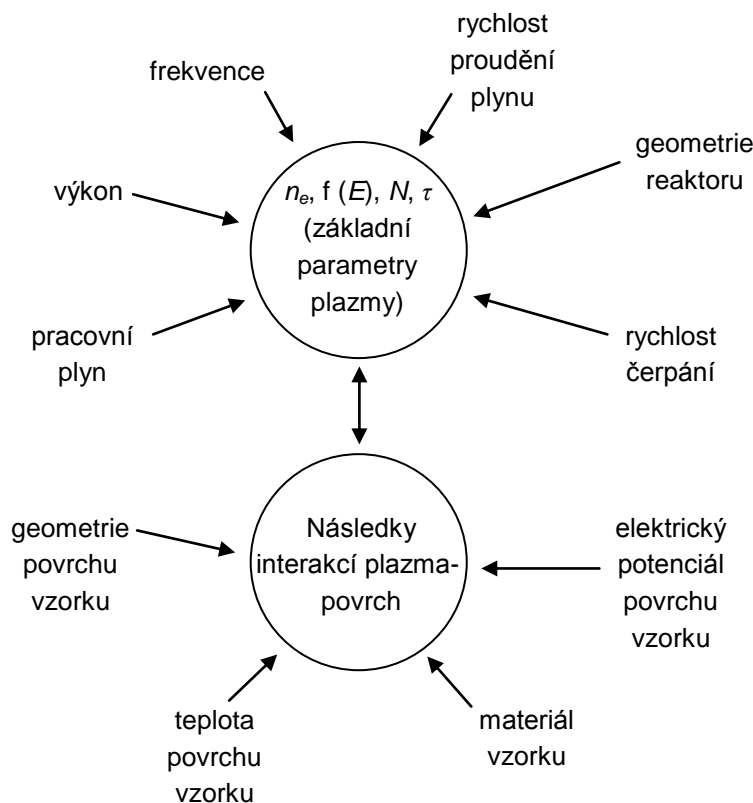
Reakce, které probíhají při plazmatickém leptání, se dají rozdělit do dvou skupin. Reakce uskutečňující se v plynné fázi (v plazmě) se nazývají homogenní (reakce vlivem srážkami s elektrony). A ty, které probíhají na povrchu leptaného materiálu, se nazývají heterogenní. V tab. 3 jsou uvedeny možné reakce, které mohou nastat.

Tab. 3: Homogenní a heterogenní reakce plazmatického leptání<sup>[19]</sup>

Homogenní reakce	Heterogenní reakce
Excitace $e + A_2 \rightarrow A_2 + e$	Atomová rekombinace $S-A + A \rightarrow S + A_2$
Disociace $e + A_2 \rightarrow A + A + e$	Metastabilní deexcitace $S + M^* \rightarrow S + M$
Ionizace $e + A_2 \rightarrow A_2^+ + 2e$	Atomová abstrakce $S-S + A \rightarrow S^+ + AS$
Disociativní ionizace $e + A_2 \rightarrow A^+ + A + e$	Odprašování (leptání) $S-S + M^* \rightarrow S^+ + S + M$
Disociativní zachycení $e + A_2 \rightarrow A^+ + A^- + e$	

Pozn:  $e$  – elektron,  $A$  – atom plynu, radikál,  $S$  – atom na povrchu,  $M$  – molekula,

Celý proces plazmatického leptání ovlivňuje řada parametrů, které jsou mezi sebou různými způsoby provázány. Jde o parametry, které ovlivňují interakce v plazmatické fázi a interakce mezi povrchem a plazmou (obr. 12). Ačkoliv lze mnoho makroskopických parametrů (tlak plynu, výkon,...) ovládat přímo, stále ještě nejsou všechny pochody, které nastanou se změnou jednoho parametru, pochopeny. Lze říci, že změna jednoho makroskopického parametru má za příčinu změnu dvou či více parametrů plazmy a jednoho či více parametrů na rozhraní plazma-povrch (teplota, elektrický potenciál,...).<sup>[19]</sup>



**Obr. 12:** Některé parametry ovlivňující interakce v plazmatické fázi a interakce na rozhraní plazma-povrch<sup>[19]</sup>

Zařízení (reaktorů), ve kterých se uskutečňuje plazmatické leptání, existuje mnoho typů. Tři nejčastější konfigurace jsou barelový reaktor, planární reaktor a reaktor s dolním čerpáním. Tato zařízení se liší konfigurací uložením substrátů, způsobem čerpání a dalšími parametry. V zásadě se ale všechna zařízení skládají z následujících částí<sup>[19]</sup>:

- Leptací komora, která musí být čerpatelná na snížený tlak. Musí být vyrobena z materiálu, který je pokud možno inertní vůči leptacímu plynu, aby nedocházelo k degradaci komory.
- Systém čerpání, který umožňuje dosažení a udržení sníženého tlaku v leptací komoře.
- Měřidlo tlaku na monitorování tlaku v leptací komoře.

- VF zdroj k vytvoření plazmatického výboje. Většinou se využívá zdrojů o frekvenci 13,56 MHz, ovšem v dnešní době se používají i zdroje s frekvencí 40 kHz nebo 2,45 GHz.
- Ovládání proudění pracovního plynu do leptací komory.
- Elektrody.

Dále se jednotlivé konfigurace liší tím, jakým způsobem je buzena plazma. U kapacitního buzení jsou elektrody ve formě plátu (rovinných či válcovitých) umístěny vně leptací komory. Tyto systémy se vyznačují nižší hustotou plazmy. Naproti tomu u reaktorů s induktivním buzením plazmy je na leptací komoru navinuta cívka, kterou prochází vysokofrekvenční proud. U těchto systémů se dosahuje vysoké hustoty plazmy.<sup>[1]</sup>

### **1.7.1 Čištění kyslíkovou plazmou**

Kyslíková plazma se využívá k čištění křemíkových substrátů od organických nečistot. Kyslíková plazma produkuje radikály, které snadno napadají vazby u organických materiálů. A v následných reakcích dochází ke tvorbě CO, CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O jako konečných produktů, které jsou odčerpávány z leptací komory.<sup>[19]</sup>

Využívá se i k odstranění rezistu (jelikož jsou na organické bázi), a to buď k odstranění celé rezistové masky (většinou jako doplňující čisticí prostředek po chemickém odstranění rezistu např. chloroformem), nebo k odstranění rezistových reziduí po vyvolávání (v případě binární litografie). Po sebezpraciznějším vyvolávání zůstane na křemíkovém substrátu vždy jisté množství rezistových reziduí, které vývojka neodplaví. Proto se doporučuje několikaminutové vystavení substrátu kyslíkové plazmě, kdy dojde k odstranění reziduí a substrát je tak připraven na další operaci (např. leptání). Parametry plazmatického čištění je nutno nastavit s ohledem na tloušťku rezistové masky. Je nutno brát v potaz, že při tomto procesu dochází k ubývání celkové tloušťky rezistové masky.

### **1.7.2 Leptání křemíku CF<sub>4</sub> plazmou**

Na leptání křemíku suchou cestou se většinou používají plyny na bázi chlóru (BCl<sub>3</sub>, CCl<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>,...) nebo fluoru (CF<sub>4</sub>, SF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>,...).<sup>[10]</sup> V plazmatickém leptání monokrystalického křemíku je nejrozšířenější použití plynu CF<sub>4</sub>. Samotný plyn CF<sub>4</sub> je vůči křemíku netečný. Působením plazmy dochází ke vzniku volných radikálů F, které následně reagují s křemíkem za vzniku těkavých produktů (jak bylo naznačeno výše).

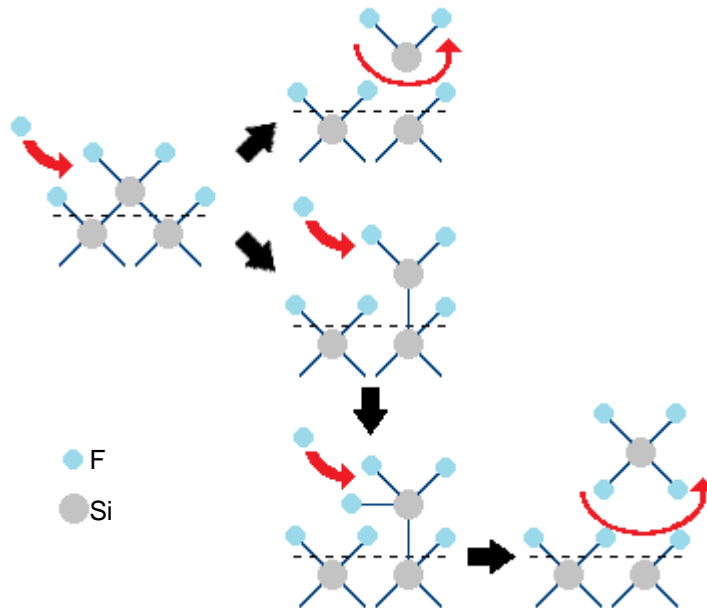
Elektrony, které se účastní homogenních reakcí, mají energii v rozmezí 1-10 eV. Jelikož hodnota prvního ionizačního potenciálu většiny atomů a molekul plynu je větší nebo rovna 8 eV, mají některé elektrony dostatečnou energii, aby způsobily ionizaci. Obecné homogenní rovnice uvedené v tabulce 3 poté nabývají konkrétní podoby<sup>[19][6]</sup>:



Z hlediska leptání jsou nejdůležitější reakce (20), (21), (22), kdy dochází k tvorbě volných radikálů F, které následně zapříčiňují leptání křemíku (ve skutečnosti dochází i dalším reakcím, které ovšem nemají takový dopad na proces leptání, jelikož probíhají s mnohem menší pravděpodobností). Jestliže tedy dojde ke vzniku volných radikálů F, jsou tyto radikály adsorbovány na povrchu křemíku a dojde k jedné z následujících reakcí<sup>[19]</sup>:



Mechanismus reakcí (25) a (26) je naznačen na obr. 13.



**Obr. 13:** Mechanismus reakce atomů fluoru na povrchu křemíku<sup>[7]</sup>

Volné radikály ovšem nemusí reagovat pouze s atomy křemíku na povrchu substrátu. Mohou reagovat s různými ionty vytvořenými během celého procesu nebo také samy se sebou<sup>[6]</sup>:



Tyto reakce mají za následek pokles koncentrace volných radikálů a tím i zpomalení leptacích rychlostí. Experimentálně bylo zjištěno, že přidání O<sub>2</sub> do leptací směsi CF<sub>4</sub> má za následek snížení pravděpodobnosti rekombinačních reakcí volných radikálů s ionty a zároveň ještě podporuje tvorbu dalších volných radikálů. Tím dochází k výraznému nárůstu leptací rychlosti křemíku. Dále bylo vysledováno, že nejvyšších leptacích rychlostí se dosahuje při poměru 85% CF<sub>4</sub> a 12% O<sub>2</sub>.<sup>[19]</sup>

### 1.7.3 F/C poměrový model

F/C poměrový model je jedním ze dvou modelů, které byly vypracovány, aby napomohly vstřebat velké množství informací týkajících se chemických a fyzikálních pochodů pozorovaných při plazmatickém leptání. Poměr F/C je poměr mezi atomy fluoru a uhlíku, což jsou dva radikály, které se účastní procesu leptání křemíku. Tento model se nesnaží vysvětlovat konkrétní pochody, ke kterým dochází v plazmě, ale namísto toho považuje plazmu za směs radikálů F a C v určitém poměru, které můžou reagovat s křemíkem. Generace nebo eliminace těchto dvou radikálů pomocí různých mechanismů nebo příměsí dalších plynů má za následek změnu výchozího poměru F/C. Zjednodušeně se dá říct, že zvýšením poměru F/C dochází ke zvýšení leptací rychlosti křemíku a snížením poměru F/C dochází k poklesu leptací rychlosti křemíku.<sup>[19]</sup>

Dva zmíněné radikály mají za následek dva rozdílné pochody. Radikál F, jak již bylo několikrát popsáno výše, má za následek leptání křemíku. Naproti tomu radikál C má za následek tvorbu uhlovodíků (nebo samotný uhlík), které se deponují na povrch křemíku a zabraňují tak přístupu F radikálů k povrchu a zpomalují tak proces leptání (v literatuře se tyto děje jednoduše označují jako polymerizace).<sup>[10]</sup> K této depozici dochází i na stěnách leptací komory, což má vliv na reprodukovatelnost leptacího procesu. Proto se doporučuje leptací komoru často čistit, aby se tento vliv eliminoval.<sup>[16]</sup>

Který proces bude převládat, jestli leptání nebo polymerizace, určují vlastnosti použitého plynu, případné příměsi, množství leptaného materiálu a potenciál elektrod. Použitý plyn udává výchozí poměr F/C (u CF<sub>4</sub> je tento poměr roven 4). Příměsový plyn tento výchozí poměr upravuje. U CF<sub>4</sub> přidáním O<sub>2</sub> dochází ke zvyšování poměru F/C, kdy uhlík reaguje více s kyslíkem za vzniku CO a CO<sub>2</sub>, než s fluorem za vzniku COF<sub>2</sub>. Přidání O<sub>2</sub> ovšem ovlivňuje i selektivitu, jelikož dochází ke zvýšení rychlosti leptání rezistu (případně i SiO<sub>2</sub>). Naopak přidáním H<sub>2</sub> dochází k reakci mezi F a H za vzniku HF a tím dochází ke snižování poměru F/C. Množství leptaného materiálu ovlivňuje poměr F/C následujícím způsobem. Jestliže je k dispozici více odkrytého materiálu k leptání, dochází k rychlejší konzumaci

radikálů F, což má za následek snižování leptací rychlosti. Jestliže je na povrch substrátu přiveden záporný náboj, dochází ke zvýšení leptacích rychlostí (dochází k posunu hranice mezi leptáním a polymerizací ve prospěch leptání).<sup>[19]</sup>

## 2 Praktická část

### 2.1 Návrh expozičních dat

Pro experimentální leptání křemíku byla na křemíkových substrátech vytvořena leptací maska. Maska byla zhotovena za pomoci elektronové litografie. Navržená maska byla shodná pro anizotropní mokré leptání i suché plazmatické leptání.

Celý test se skládal ze série linek s šířkami 10; 12; 15; 18; 22; 27; 33; 39; 48; 56; 68; 82 a 100  $\mu\text{m}$ , všechny s délkou 2 mm. Tyto linky sloužily k měření hloubky vytvořených leptů na kontaktním profilometru a mikroskopu atomárních sil (dále jen AFM), resp. k měření leptacích rychlostí jednotlivých technik. Linky byly dostatečně široké, aby se leptáním vytvořila rovná plocha, která byla vhodná pro měření drsnosti vytvořených leptů na AFM.

Testovací motiv dále obsahoval matici čtvercových razítek s rozměry  $1 \times 1 \mu\text{m}$  (mezery mezi razítky 1  $\mu\text{m}$ ),  $3 \times 3$  (mezery mezi razítky 3  $\mu\text{m}$ ) a  $6 \times 6 \mu\text{m}$  (mezery mezi razítky 6  $\mu\text{m}$ ) a matici obdélníkových otvorů seřazených do křížového pole s rozměry  $1,5 \times 0,5 \mu\text{m}$  (mezery mezi obdélníky 1,5 a 0,5  $\mu\text{m}$ ),  $3 \times 1 \mu\text{m}$  (mezery mezi obdélníky 3 a 1  $\mu\text{m}$ ) a  $6 \times 2 \mu\text{m}$  (mezery mezi obdélníky 6 a 2  $\mu\text{m}$ ). Tato pole jsou vhodná k měření tvaru vytvořených leptů na AFM. Dalším prvkem byla série binárních mřížek s periodami 0,2; 0,4; 0,8; 1,0; 1,5 a 2  $\mu\text{m}$  ve vertikální a horizontální poloze.

Součástí motivu masky byla i řada standardních testů používaných při každé expozici elektronovým litografem. Tyto testy poskytují užitečné informace o nastavení litografu a průběhu expozice.

Výše zmíněné motivy dávají dohromady jednu leptací masku. Tato maska byla několikrát zkopírována, aby pokryla celý povrch křemíkového substrátu, který byl následně rozřezán na jednotlivé čipy, které byly leptány samostatně.

### 2.2 Příprava křemíkových substrátů

Na leptání byly připraveny čtyři rozdílné substráty, aby odpovídaly požadavkům dané leptací techniky. U všech se jednalo o křemík typu P, krystalografické orientace (100).

Na anizotropní mokré leptání byl použit 3" křemíkový substrát, na kterém byla termickou oxidací vytvořena vrstva  $\text{SiO}_2$  o tloušťce 480 nm (viz kapitola 2.4). Tloušťka oxidové masky byla zvolena z důvodu možnosti důkladného proměření leptací rychlosti  $\text{SiO}_2$  leptadlem POL a následně i vodným roztokem KOH. Zvolená tloušťka byla ovšem na úkor rozlišení leptací masky. Pro dosažení lepšího rozlišení (metrické normály) v rámci oxidové masky je vhodnější tenčí vrstva oxidu, řádově desítky nanometrů. Pro zlepšení adheze rezistu byl na substráty aplikován HMDS (Hexamethyldisilazan), aby nedocházelo k odplavení rezistové

vrstvy při následné aplikaci mokrých leptadel. Následně byla nanесena vrstva pozitivního elektronového rezistu PMMA (4,5%<sub>hm</sub> roztok v anisolu). Parametry nanášení byly zvoleny tak, aby byla nanесena tenká vrstva rezistu. Tlustá vrstva by zapříčinila ztrátu rozlišení a případné slití jemných motivů vlivem jevu blízkých expozic a volby vývojky.

Pro další experiment (leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě) byla připravena sada několika 3" substrátů s rezistovou maskou různých tloušťek (v rozmezí od 200 do 1000 nm).

Na experiment s plazmatickým leptáním směsí CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub> byl připraven 4" substrát. Rezistová maska byla vytvořena opět z rezistu PMMA (4,5%<sub>hm</sub> roztok v anisolu). K plazmatickému leptání byl vytvořen ještě jeden typ substrátu, který sloužil ke kontrolnímu měření úbytku rezistu při leptání směsí CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub>. Povrch substrátu bylo nutné upravit tak, aby bylo možné měřit pouze úbytek rezistu. Substrát byl tedy před nanесením rezistu PMMA (6%<sub>hm</sub> roztok v anisolu) pokoven platinou tloušťky přibližně 40 nm. Platinová vrstva byla zvolena z důvodu, že k jejímu leptání v plazmatu CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub> nedochází, a tím je umožněno měření úbytku rezistu.

Po nanесení rezistu se všechny substráty vysušily na horké plotně (dále jen HP) po dobu 9 minut při teplotě 150°C. Vysušené substráty byly podrobeny kontrolnímu měření tloušťky rezistu na kontaktním profilometru. Tloušťky rezistů pro jednotlivé experimenty byly následující: substrát pro anizotropní leptání křemíku 230 nm, k leptání rezistu PMMA v rozmezí od 200 do 1000 nm, k leptání směsí CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub> 120 nm a ke kontrolnímu měření úbytku rezistu 250 nm. Takto připravené substráty byly připraveny k expozici v elektronovém litografu.

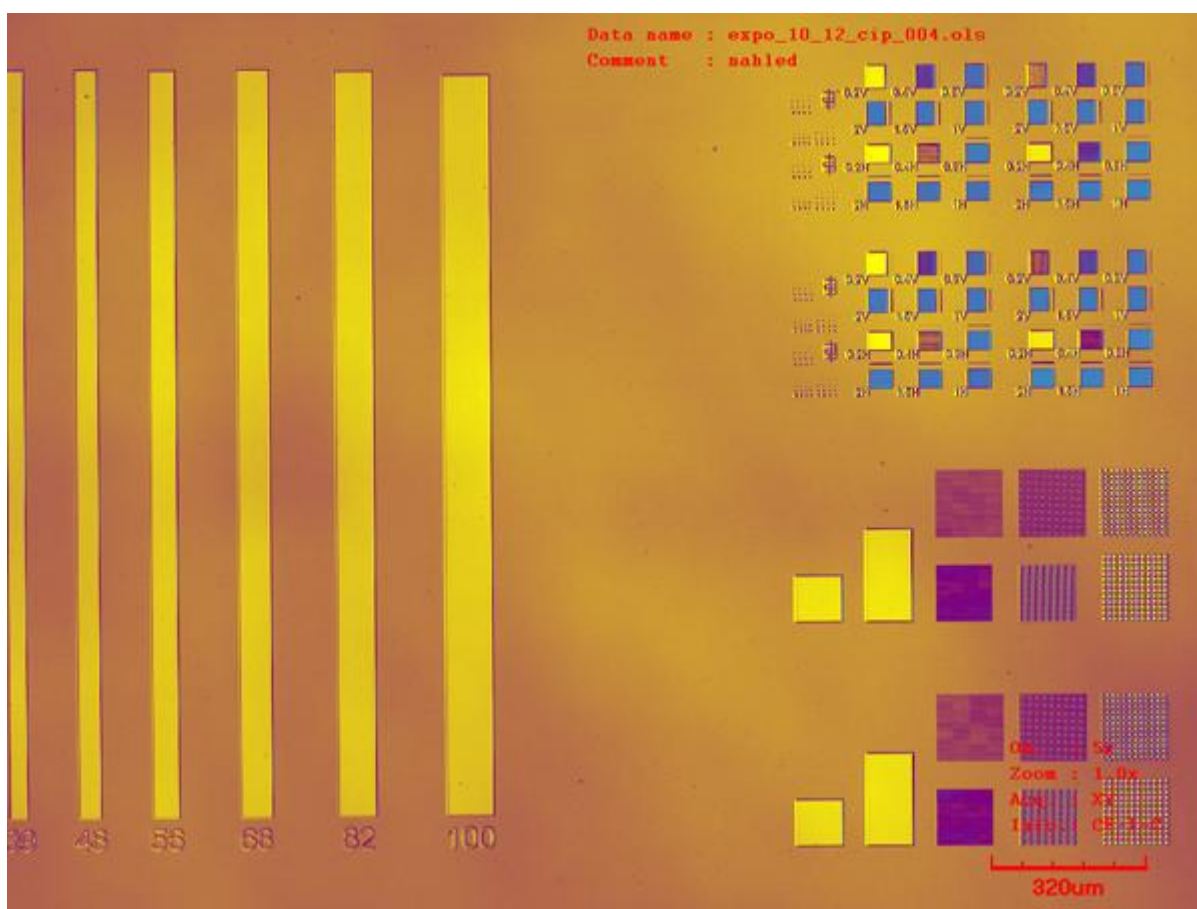
### 2.3 Expozice a vyvolávání

Programové časy pro expozice na jednotlivých substrátech byly určeny dle expoziční dávky (ta se volí podle křivky citlivosti pro daný rezist a danou vývojku tak, aby bylo dosaženo vyvolání celé rezistové vrstvy v přijatelném čase) a podle proudové hustoty elektronového svazku. Expozice celého motivu masky byla na substrát provedena několikanásobně, aby bylo k dispozici dostatečné množství vzorků určených k leptání.

Po expozici se provedlo vyvolání vývojkou s označením nAAc (n-Amylacetát). Jednotlivé substráty byly vyvolávány při standardní teplotě 23°C po různou dobu (vzhledem k naměřené výchozí tloušťce rezistu) a to tak, aby došlo k vyvolání skrze celou tloušťku rezistové vrstvy. Během vyvolávání byla použita především optická kontrola, zda již bylo dosaženo povrchu substrátu/oxidu. Pro kontrolu bylo vždy provedeno kontrolní měření na kontaktním profilometru, které potvrdilo vyvolání požadovaným způsobem.

Po vyvolávání byly jednotlivé substráty vysušeny na HP při teplotě 125°C po dobu 5 minut, aby došlo k odstranění zbytků vývojky z rezistu. Takto vyvolané substráty byly pomocí diamantového hrotu nařezány a nalámány na jednotlivé čipy. Aby bylo zajištěno, že na dně

odhalených ploch v rezistové masce nejsou zbytky rezistu (viz 1.7.1), byly čipy očištěny v kyslíkové plazmě. Čipy určené pro anizotropní leptání byly očištěny v zařízení TESLA 214 VT při výkonu 100 W po dobu 60 s. Ostatní čipy byly očištěny v zařízení DIENER nano při výkonu 250 W po dobu 180 s. Čipy určené k plazmatickému leptání byly v této fázi připraveny k experimentu. U čipů pro anizotropní leptání bylo ještě nutné vytvořit masku v oxidu křemíku. Na snímku z konfokálního laserového mikroskopu je zobrazena část vytvořené masky v rezistu (viz obr. 14). Další snímky vytvořené masky jsou uvedeny v příloze F (obr. F1-F7).



Obr. 14: Část leptací masky v rezistu PMMA, snímek z CLSM

## 2.4 Leptání oxidové masky

U čipů určených pro anizotropní leptání bylo ještě potřeba přenést motiv z rezistu do oxidové vrstvy. Leptání bylo provedeno leptadlem POL. Leptadlo POL bylo k tomuto experimentu namícháno s větším podílem HF, než je uvedeno v 1.3.3, tudíž se dalo předpokládat, že leptací rychlost bude vyšší než při standardních poměrech.

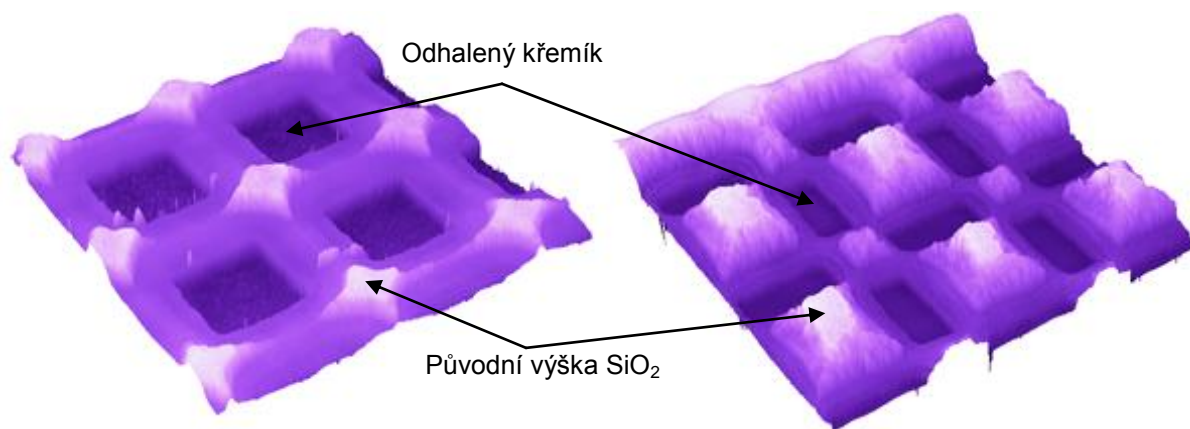
Tloušťka oxidové vrstvy byla známa pouze odhadem, proto bylo nutné zjistit přesnou tloušťku postupným leptáním. Jelikož je leptadlo POL vůči použitému rezistu PMMA

a křemíku netečné, bylo možné jednotlivé kroky leptání opakovat tak dlouho, dokud se naměřená hloubka nepřestala měnit. Pro toto měření byl použit jeden z výše vytvořených čipů. Leptání probíhalo ponořením vzorku do lázně s leptadlem POL po jednodominutových krocích při teplotě 25°C. Po každém kroku byl vzorek důkladně opláchnut v lázni s demineralizovanou vodou a poté odstředěn na vakuové odstředivce a následně 5 minut sušen na HP při teplotě 125°C po dobu 5 minut. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.

**Tab. 4:** Měření tloušťky oxidové vrstvy

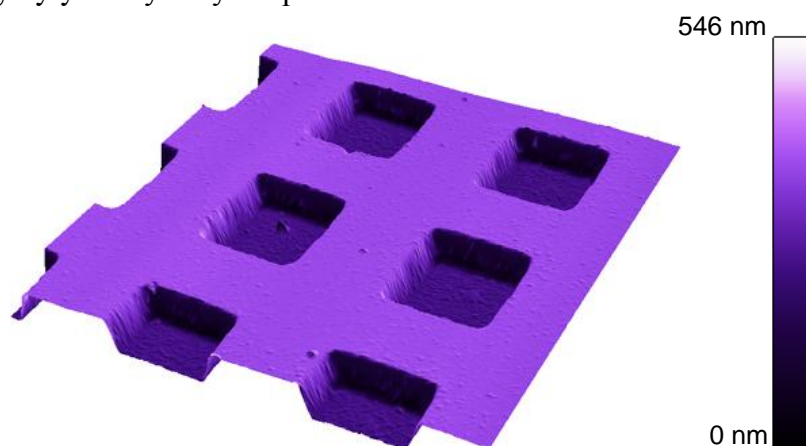
Krok leptání	Doba leptání	Linka 80 $\mu\text{m}$		Linka 100 $\mu\text{m}$	
		tloušťka	úbytek	tloušťka	úbytek
	$t$ (s)	$w_{\text{rezist+SiO}_2}$ (nm)	$\Delta w_{\text{rezist+SiO}_2}$ (nm)	$w_{\text{rezist+SiO}_2}$ (nm)	$\Delta w_{\text{rezist+SiO}_2}$ (nm)
<b>Tloušťka rezistu</b>		230	–	224	–
<b>1.</b>	60	322	92	326	102
<b>2.</b>	60	436	114	430	104
<b>3.</b>	60	542	106	545	115
<b>4.</b>	60	656	114	653	108
<b>5.</b>	60	707	51	709	56
<b>6.</b>	60	708	1	706	–
<b>Tloušťka SiO<sub>2</sub></b>		478		485	

Z naměřených hodnot vyplývalo, že povrchu křemíku bylo dosaženo již po 5. kroku leptání. Aby bylo jisté, že nešlo o nepředvídatelnou chybu měření, tak se provedl ještě 6. krok, který potvrdil, že byla celá vrstva oxidu opravdu odleptána. Tloušťka oxidu SiO<sub>2</sub> na křemíkovém substrátu byla tedy stanovena na hodnotu 480 nm. Dle naměřených hodnot se dala stanovit i leptací rychlost SiO<sub>2</sub> leptadlem POL o daném složení. Ta je v rozmezí 92 – 115 nm min<sup>-1</sup>, což odpovídá hodnotám udávaným v literatuře<sup>[14]</sup>. Po zjištění tloušťky oxidové vrstvy a rychlosti leptání SiO<sub>2</sub> bylo možno stanovit dobu 5 minut jako dostatečně dlouhý čas na proleptání celé tloušťky oxidové vrstvy u jednotlivých čipů. Ačkoliv by se mohlo se zdát, že leptací maska o tloušťce 480 nm je vhodná pro provedení hlubokých leptů, platí to pouze u motivů linek s šířkami 10 – 100  $\mu\text{m}$ . U jemných struktur (malá čtvercová razítka a obdélníková razítka) je situace poněkud odlišná. Souvisí to s izotropním chováním leptadla POL vůči SiO<sub>2</sub>. Dochází totiž k oleptání hran oxidové masky, jak je vidět na obr. 15 (zde leptadlo POL působilo záměrně delší dobu, aby bylo vidět nežádoucí podleptání rezistu), a tím i zmenšení tloušťky skutečně použitelné oxidové masky přibližně až na 100 nm. To může vést (jak se opravdu stalo u čtvercových razítek o rozměrech 1×1  $\mu\text{m}$  a obdélníkových razítek o rozměrech 1,5×0,5  $\mu\text{m}$ ) až k úplnému podleptání rezistové masky, resp. odleptání SiO<sub>2</sub>, a po jeho odstripování zůstane místo matice čtverců/obdélníků odhalená plocha křemíku o rozměrech původní matice.



**Obr. 15:** Oxidová maska, čtverečky 6×6 μm (vlevo), obdélníky 6×2 μm (vpravo), snímek z AFM, skenovaná plocha 30×30 μm (XY:Z/1:17)

Po přenesení motivu z rezistové masky do oxidu je nutné se rezistové masky zbavit. To bylo provedeno ve dvou krocích. Nejprve byla většina rezistu rozpuštěna pomocí chloroformu (působení 60 s na povrch substrátu při teplotě 25°C), poté se provedl oplach demineralizovanou vodou a odstředění zbývající vody. Následně byly čipy vysušeny na HP po dobu 5 min při teplotě 125°C. Druhým krokem bylo odstranění zbytků rezistu působením kyslíkové plazmy v zařízení TESLA VT 214 při výkonu 200 W po dobu 15 min (dostatečně vysoký výkon a dlouhá doba na dokonalé odstranění všech zbytků rezistu). Po odstranění rezistu se provedlo kontrolní měření tloušťky oxidové masky. Tloušťka oxidu byla v rozmezí 475 – 480 nm, což se shoduje s výše uvedeným předpokladem zjištěným při leptání oxidové masky. Na obr. 16 je uveden příklad vytvořené oxidové masky po odstranění rezistu. Takto připravené čipy byly nachystány k leptání.



**Obr. 16:** Oxidová maska, čtvercová razítka, snímek z AFM, skenovaná plocha 30×30 μm (XY:Z/1:10)

## 2.5 Anizotropní leptání křemíku vodným roztokem KOH

Jako anizotropní leptadlo byl použit 40%<sub>hm</sub> vodný roztok KOH. Leptání probíhalo v lázni vyhříváné termostatem pro tři různé teploty: 40°C, 60°C a 80°C, za stálého míchání leptadla. Leptání bylo prováděno v několika krocích, aby se dosáhlo takové hloubky, kdy by obdélníky s rozměry 6×2 μm byly vyleptány do maximální hloubky (podle vztahu (8)). Po každém kroku leptání byl vzorek důkladně pláchnut demineralizovanou vodou a poté odstředěn na odstředivce a vysušen na HP po dobu 5 min při teplotě 125°C.

### 2.5.1 Leptání křemíku vodným roztokem KOH při teplotě 40°C

V tomto případě se lázeň vyhřála na teplotu 40°C. Naměřené hodnoty pro teplotu 40°C jsou uvedeny v tab. 5.

**Tab. 5:** Naměřené hodnoty leptání 40%<sub>hm</sub> vodným roztokem KOH při teplotě 40°C

Krok leptání	Doba leptání	Teplota lázně	Hloubka leptu	Změna hloubky
	$t$	$\vartheta$	$d$	$\Delta d$
	(s)	(°C)	(nm)	(nm)
Tloušťka SiO <sub>2</sub>	–	–	475	–
1.	60	40	475	–
2.	60	40	475	–
3.	300	40	780	305
4.	600	40	1630	850
5.	240	40	1810	180
6.	240	40	1980	170

Z naměřených hodnot v prvním kroku leptání je patrné, že leptání neproběhlo. To je s největší pravděpodobností způsobeno vrstvou nativního oxidu SiO<sub>2</sub>, který se vytvoří prakticky okamžitě po vystavení křemíku vzdušné atmosféře (viz 1.3.1). 60 s při teplotě 40°C očividně není dostatečně dlouhá doba na proleptání vrstvičky nativního oxidu. Aby se dala s určitou jistotou vyloučit chyba měření, byl druhý krok prováděn stejně dlouhou dobu. Jak se ovšem ukázalo, opět k leptání nedošlo, dá se tedy říci, že 60 s je opravdu nedostačující doba na proleptání vrstvičky nativního oxidu. Následně tedy byl proveden další krok, tentokrát s dobou leptání 300 s. V tomto případě již k jistému úbytku došlo. Poté bylo ještě provedeno několik kroků, aby bylo dosaženo požadované hloubky přibližně 2 μm.

Z naměřených hodnot lze po dosazení do vztahu (6) vypočítat rychlost leptání ve směru [100]. Ta vychází v rozmezí 0,04 – 0,09 μm min<sup>-1</sup>. Jak je vidět, s rostoucí dobou leptání roste i rychlost leptání, tím jak klesá poměr času potřebného na proleptání nativního oxidu k celkové době leptání. U leptání při této teplotě se musí tedy s tímto efektem počítat. Z naměřených hodnot dále vyplývá, že přibližnou dobou potřebnou na proleptání nativního oxidu jsou přibližně 2 minuty (rozdíly mezi kroky leptání 3, 5, 6). Ovšem v uvedených rychlostech leptání je zahrnuto i ubývání oxidové masky. Při této teplotě se dá podle výše

uvedených zjištění očekávat velice pomalé ubývání oxidové masky. Leptací rychlost samotného křemíku byla vždy určována až po odstranění oxidové masky (viz níže).

Pomocí AFM se naskenoval povrch vyleptané struktury v ploše (linka s šířkou 100  $\mu\text{m}$ ), viz obr. G1 v příloze G. Z takto získaných dat byla pomocí sw k AFM určena drsnost povrch  $R_A = 18 \text{ nm}$ .

AFM bylo použito také na změření obdélníkové a čtvercové struktury. U obdélníkové struktury o rozměrech  $6 \times 2 \mu\text{m}$  bylo ověřeno, že bylo dosaženo maximální hloubky leptu a došlo tak k zastavení leptání. Na těchto strukturách byl dále vyhodnocen úhel leptu, resp. úhel mezi rovinami. Úhel leptu  $\theta$  mezi rovinou (100) a rovinami {111} byl naměřen v rozmezí  $51 - 55^\circ$ , což prakticky odpovídá hodnotě  $54,74^\circ$  z teorie krystalografie křemíku (kapitola 1.5). Nepřesnost lze svádět na chybu měření AFM, resp. na závislost naměřeného úhlu na tvaru hrotové sondy, která byla pro měření použita.

Nakonec se odstranila oxidová maska působením leptadla POL po dobu 6 min při teplotě  $25^\circ\text{C}$ . Vzorek byl poté důkladně opláchnut demineralizovanou vodou a byl vysušen na HP při teplotě  $125^\circ\text{C}$  po dobu 5 min. Naměřená hloubka po odstranění oxidové masky (tedy celková hloubka vytvořeného leptu) byla  $d = 1520 \text{ nm}$ . Pomocí této hodnoty byl zjištěn úbytek oxidové masky 15 nm, což odpovídá průměrné rychlosti leptání  $\text{SiO}_2$  při teplotě  $40^\circ\text{C}$   $R_{\text{SiO}_2} = 0,6 \text{ nm min}^{-1}$ . Z hloubky leptu se dá určit i průměrná rychlost leptání samotného křemíku. Celkový čas, který se uvažuje při výpočtu, je součet dob leptání kroků 3, 4, 5 a 6 (od jednotlivých časů jsou odečteny 2 minuty z důvodu proleptávání nativního oxidu, určení hodnoty uvedeno výše). Výpočet je tedy následující:

$$R_{\langle 100 \rangle} = \frac{d}{\sum t}, \quad (29)$$

$$R_{\langle 100 \rangle} = \frac{1,52}{15} \mu\text{m min}^{-1},$$

$$R_{\langle 100 \rangle} = 0,10 \mu\text{m min}^{-1}.$$

Díky vypočítané průměrné rychlosti leptání křemíku a oxidu se dá stanovit selektivita leptání jako poměr mezi uvedenými rychlostmi:

$$Si : SiO_2 = \frac{R_{\langle 100 \rangle}}{R_{SiO_2}}, \quad (30)$$

$$Si : SiO_2 = \frac{0,1}{0,0006},$$

$$Si : SiO_2 = 167 : 1.$$

## 2.5.2 Leptání křemíku vodným roztokem KOH při teplotě 60°C

Naměřené hodnoty pro teplotu 60°C jsou uvedeny v tab. 6.

**Tab. 6:** Naměřené hodnoty leptání 40%<sub>hm</sub> vodným roztokem KOH při teplotě 60°C

Krok leptání	Doba leptání	Teplota lázně	Hloubka leptu	Změna hloubky
	$t$	$\vartheta$	$d$	$\Delta d$
	(s)	(°C)	(nm)	(nm)
<b>Tloušťka SiO<sub>2</sub></b>	–	–	479	–
<b>1.</b>	60	60	505	25
<b>2.</b>	60	60	800	295
<b>3.</b>	60	60	1060	260
<b>4.</b>	60	60	1320	260
<b>5.</b>	60	60	1570	250
<b>6.</b>	60	60	1800	230
<b>7.</b>	60	60	2030	230

Z naměřených hodnot opět vyplývá, že v prvním kroku bylo leptání zpomaleno nativním oxidem. V dalších krocích již proběhlo leptání v pořádku. Leptací rychlost při teplotě 60°C ve směru [100] byla tedy v rozmezí 0,23 – 0,31  $\mu\text{m min}^{-1}$ . Ovšem do této hodnoty rychlosti je zahrnuto i ubývání oxidové masky. Pro stanovení rychlosti leptání samotného křemíku je níže použit stejný postup jako v kapitole 2.5.1.

Následně byl opět naskenován povrch leptané struktury (linka s šířkou 100  $\mu\text{m}$ ) na AFM, viz obr. G2 v příloze G, a byla zjištěna drsnost povrchu  $R_A = 15$  nm. Stejně jako při teplotě leptací lázně 40°C bylo ověřeno dosažení maximální hloubky leptu a úhel mezi rovinou (100) a rovinami {111} byl naměřen ve stejných mezích jako při teplotě 40°C, a to 51 – 55°. Na obr. G4 a G5 v příloze G jsou uvedeny vyleptané struktury i s oxidovou maskou.

Po odstranění oxidové masky (leptadlo POL po dobu 6 min při teplotě 22°C, následný oplach demineralizovanou vodou a vysušení na HP při teplotě 125°C po dobu 5 min) byla změřena hloubka leptu  $d = 1570$  nm. Pomocí této hodnoty byl zjištěn úbytek oxidové masky 19 nm, což odpovídá průměrné rychlosti leptání SiO<sub>2</sub> při teplotě 60°C  $R_{\text{SiO}_2} = 2,7$  nm min<sup>-1</sup>. Z hloubky leptu byla opět odvozena i průměrná rychlost leptání samotného křemíku. Celkový čas, který se uvažuje při výpočtu, je součet dob leptání kroků 2 – 7 (první krok není do výpočtu zahrnut, jelikož prohloubení bylo minimální z důvodu proleptávání nativním oxidem). Výpočet je tedy následující:

$$R_{\langle 100 \rangle} = \frac{d}{\sum t}, \quad (31)$$

$$R_{\langle 100 \rangle} = \frac{1,57}{6} \mu\text{m min}^{-1},$$

$$R_{\langle 100 \rangle} = 0,26 \mu\text{m min}^{-1}.$$

Ze známé průměrné rychlosti leptání křemíku a rychlosti leptání oxidu se podle vztahu (30) opět určila selektivita leptání  $\text{Si}:\text{SiO}_2 = 96:1$ . V příloze H jsou uvedeny snímky z elektronového rastrovacího mikroskopu vyleptaných struktur (obr. H1-H5). Na obrázcích je vidět, že opravdu u některých struktur došlo k vyleptání „do dna“. Také stojí za zmínku, že u některých čtvercových struktur došlo k vytvoření spíše obdélníků než čtverců (především vlivem nedokonalosti nastavení rozměrů „razítek“ při expozici elektronovým svazkem).

### 2.5.3 Leptání křemíku vodným roztokem KOH při teplotě 80°C

Naměřené hodnoty pro teplotu 80°C jsou uvedeny v tab. 7.

**Tab. 7:** Naměřené hodnoty leptání 40%<sub>hm</sub> vodným roztokem KOH při teplotě 80°C

Krok leptání	Doba leptání	Teplota lázně	Hloubka leptu	Změna hloubky
	$t$	$\vartheta$	$d$	$\Delta d$
	(s)	(°C)	(nm)	(nm)
Tloušťka $\text{SiO}_2$	–	–	477	–
1.	60	80	1280	803
2.	60	80	2160	880

Jelikož při teplotě 80°C došlo k markantnímu nárůstu leptací rychlosti, 1. krok nebyl doprovázen problémem spojeným s nativním oxidem jako ve dvou předchozích případech. Leptací rychlost při teplotě 80°C ve směru [100] byla naměřena v rozmezí 0,80 – 0,88  $\mu\text{m min}^{-1}$ . Stanovení rychlosti leptání samotného křemíku bylo opět provedeno postupem jako v kapitolách 2.5.1 a 2.5.2.

Stejným způsobem jako v předchozích případech byla změřena drsnost povrchu vyleptané struktury (naskenovaný povrch viz obr. G3 v příloze G)  $R_A = 9\text{nm}$ . Opět bylo dosaženo maximální hloubky leptu u obdélníků s rozměry  $6 \times 2 \mu\text{m}$ , stejně tak úhel mezi rovinou (100) a rovinami {111} byl ve stejném rozmezí jako v předchozích dvou případech.

Následovalo odstranění oxidové masky pomocí leptadla POL (6 min, 25°C) a vysušení na HP při 125°C po dobu 5 min. Měřením byla získána hodnota hloubky leptu  $d = 1720 \text{ nm}$ . To odpovídá úbytku oxidové masky 37 nm. Průměrná rychlost leptání  $\text{SiO}_2$  při teplotě 80°C tedy byla stanovena na  $R_{\text{SiO}_2} = 18,5 \text{ nm min}^{-1}$ . Známým postupem byla stanovena průměrná rychlost leptání samotného křemíku (čas použitý pro výpočet je čas leptání kroků 1 a 2):

$$R_{\langle 100 \rangle} = \frac{d}{\sum t}, \quad (32)$$

$$R_{\langle 100 \rangle} = \frac{1,72}{2} \mu\text{m min}^{-1},$$

$$R_{\langle 100 \rangle} = 0,86 \mu\text{m min}^{-1}.$$

Selektivita leptání stanovena podle vztahu (30) odpovídá hodnotě  $\text{Si}:\text{SiO}_2 = 46:1$ . Kvůli určitému leptání oxidové masky do stran (jejímu rozšiřování) a chybě měření AFM nebylo při leptání 40%<sub>hm</sub> vodným roztokem KOH prakticky zjištěno žádné podleptání oxidové masky (leptání křemíku ve směru [111]).

#### 2.5.4 Teoretické ověření anizotropního leptání vodným roztokem KOH

Jestliže se vynesou naměřené hodnoty leptacích rychlostí křemíku vodným roztokem KOH do grafické závislosti na teplotě, závislost by měla mít exponenciální charakter (viz vztah (15), kapitola 1.5.3). Podle zmíněného vzorce jsou proměnnými molární koncentrace vody, molární koncentrace hydroxidu draselného a právě teplota. Podle následujícího postupu lze vypočítat teoretické hodnoty rychlosti leptání křemíku v závislosti na teplotě pro leptací lázeň použitou v tomto experimentu (molární koncentrace vody a hydroxidu draselného se v tomto případě neměnily a budou tedy konstantami). Pro výpočet se uvažovaly následující hodnoty<sup>[13][17]</sup>:

$$E_a = 0,595 \text{ eV} = 9,53 \cdot 10^{-20} \text{ J}; \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}; \quad k_0 = 2480 \text{ } \mu\text{m h}^{-1} (\text{mol dm}^{-1})^{-4,25};$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 90 \text{ g}; \quad m_{\text{KOH}} = 60 \text{ g}; \quad \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,99 \text{ g cm}^{-3}; \quad \rho_{\text{KOH}} = 2,04 \text{ g cm}^{-3}; \quad M_{\text{H}_2\text{O}} = 18,02 \text{ g mol}^{-1};$$

$$M_{\text{KOH}} = 56,11 \text{ g mol}^{-1}.$$

Nejdříve je nutno vypočítat celkový objem vodného roztoku KOH:

$$V = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{m_{\text{KOH}}}{\rho_{\text{KOH}}}, \quad (33)$$

$$V = \frac{90}{0,99} + \frac{60}{2,04} \text{ cm}^{-3},$$

$$V = 120,32 \text{ cm}^{-3},$$

$$V = 0,12032 \text{ dm}^{-3}.$$

Pomocí celkového objemu roztoku se dá stanovit molární koncentrace vody a hydroxidu draselného:

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}} V}, \quad (34)$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{90}{18,02 \cdot 0,12032} \text{ mol dm}^{-3},$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 41,51 \text{ mol dm}^{-3},$$

$$c_{\text{KOH}} = \frac{m_{\text{KOH}}}{M_{\text{KOH}} V}, \quad (35)$$

$$c_{\text{KOH}} = \frac{60}{56,11 \cdot 0,12032} \text{ mol dm}^{-3},$$

$$c_{\text{KOH}} = 8,89 \text{ mol dm}^{-3}.$$

Když se tyto hodnoty dosadí do vztahu (15), dá se vypočítat rychlost leptání křemíku ve směru [100] při teplotě 60°C (vypočtené hodnoty pro další teploty, které jsou použity pro sestavení teoretické závislosti leptací rychlosti na teplotě, jsou uvedeny v tab. D1 v příloze D):

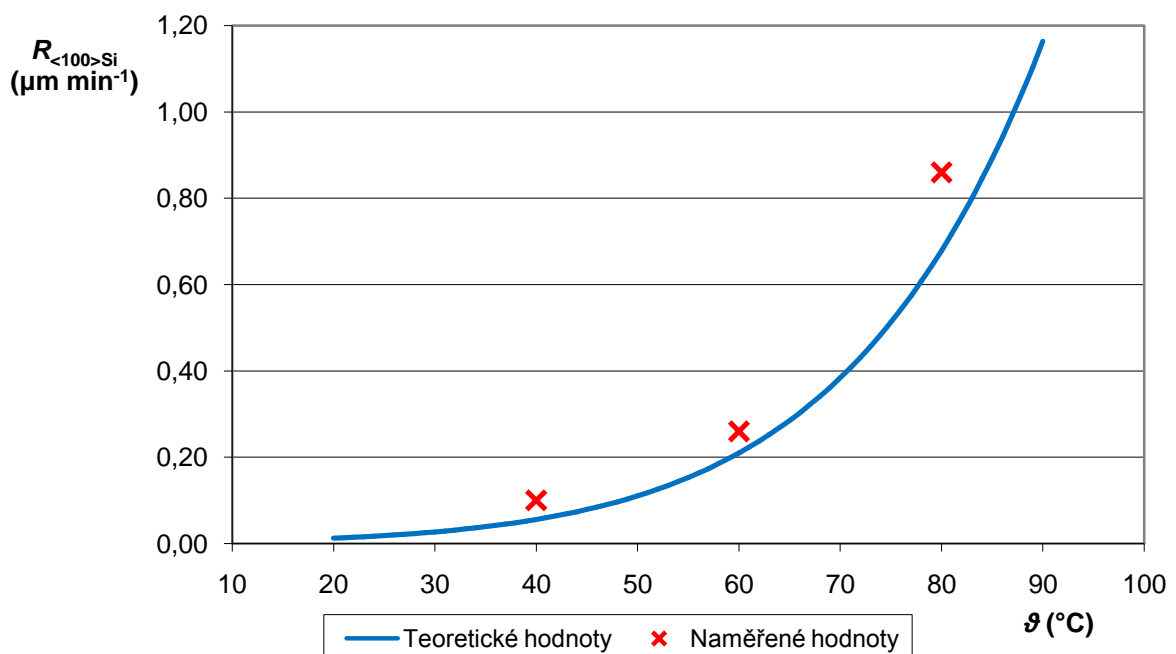
$$R_{\langle 100 \rangle} = k_0 c_{\text{H}_2\text{O}}^4 c_{\text{KOH}}^{0,25} e^{\frac{-E_a}{kT}}, \quad (36)$$

$$R_{\langle 100 \rangle} = 2480 \cdot 41,51^4 \cdot 8,89^{0,25} e^{\frac{-9,53 \cdot 10^{-20}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 333,15}} \mu\text{m h}^{-1},$$

$$R_{\langle 100 \rangle} = 12,64 \mu\text{m h}^{-1},$$

$$R_{\langle 100 \rangle} = 0,21 \mu\text{m min}^{-1}.$$

Na obr. 17 je uvedena teplotní závislost rychlosti leptání pro teoreticky vypočtené hodnoty podle výše zmíněného postupu. Na obr. 17 jsou uvedeny i naměřené hodnoty rychlosti leptání. Jak je vidět, mají sice stejný trend jako teoretické hodnoty, ale jsou od teoretického průběhu odchýleny. To je zřejmě způsobeno nepřesnostmi při měření (odchylka nastavené teploty leptací lázně, odchylka skutečných koncentrací při přípravě vodného roztoku KOH).



**Obr. 17:** Teoretická závislost rychlosti leptání 40%<sub>nm</sub> vodným roztokem KOH na teplotě

Ze závislosti naměřených hodnot lze vyjádřit konstanty  $k_1$  a  $k_2$  zjednodušené exponenciální závislosti (rychlosti leptání na teplotě), která odpovídá naměřeným hodnotám. Při výpočtu se uvažují následující hodnoty:

$$R_{<100>1} = 0,10 \mu\text{m min}^{-1}; R_{<100>2} = 0,86 \mu\text{m min}^{-1}; \vartheta_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}, \vartheta_2 = 80 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Vychází se ze dvou rovnic o dvou neznámých:

$$R_{<100>1} = k_1 e^{k_2 \vartheta_1}, \quad (37)$$

$$R_{<100>2} = k_1 e^{k_2 \vartheta_2}. \quad (38)$$

Po úpravě vztahů (37) a (38) se vyjádří konstanty  $k_1$  a  $k_2$ :

$$k_1 = \frac{R_{<100>1}}{e^{k_2 \vartheta_1}}, \quad (39)$$

$$k_2 = \frac{\ln\left(\frac{R_{<100>2}}{R_{<100>1}}\right)}{\vartheta_2 - \vartheta_1}. \quad (40)$$

Následně se ze vztahu (40) vyčíslí konstanta  $k_2$ :

$$k_2 = \frac{\ln\left(\frac{R_{<100>2}}{R_{<100>1}}\right)}{\vartheta_2 - \vartheta_1}, \quad (41)$$

$$k_2 = \frac{\ln\left(\frac{0,86}{0,10}\right)}{80 - 40} \text{ }^\circ\text{C}^{-1},$$

$$k_2 = 0,0538 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}.$$

Se známou hodnotou konstanty  $k_2$ , se pomocí vztahu (39) vyjádří konstanta  $k_1$ :

$$k_1 = \frac{R_{<100>1}}{e^{k_2 \vartheta_1}}, \quad (42)$$

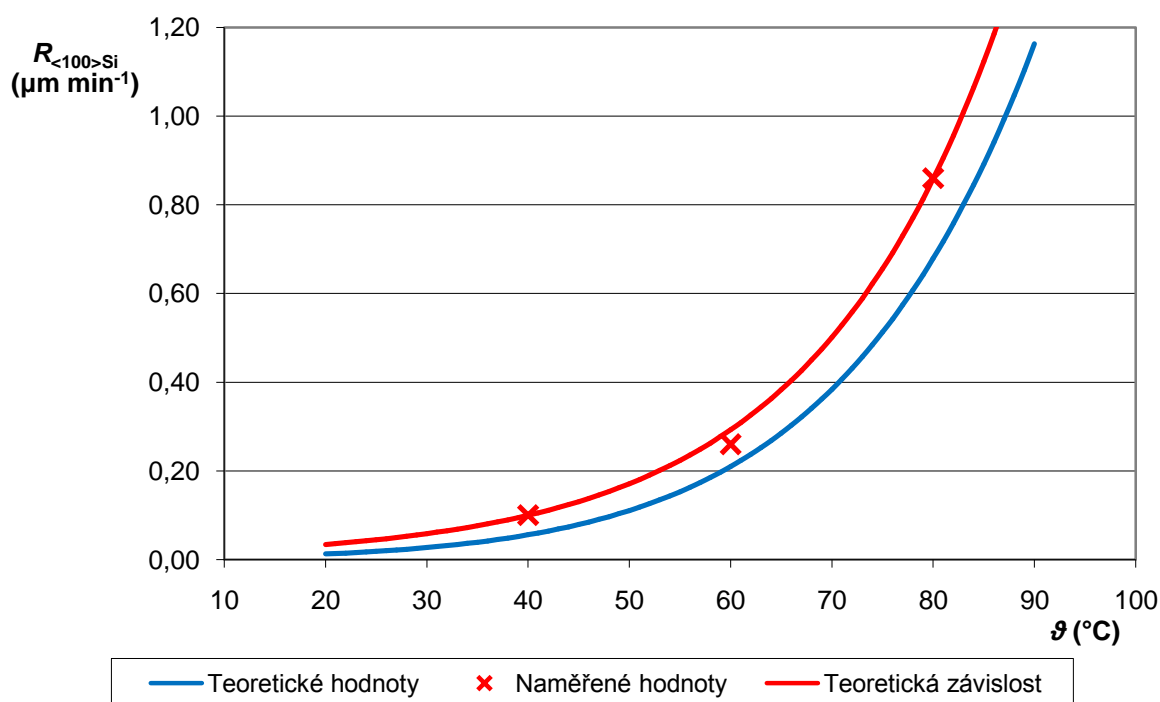
$$k_1 = \frac{0,10}{e^{0,0538 \cdot 40}} \mu\text{m min}^{-1},$$

$$k_1 = 0,0116 \mu\text{m min}^{-1}.$$

Se známými konstantami se může zapsat zjištěná exponenciální závislost rychlosti leptání křemíku ve směru [100] ve 40%<sub>hm</sub> vodném roztoku hydroxidu draselného na teplotě vyhovující naměřeným hodnotám:

$$R_{\langle 100 \rangle} = 0,0538 e^{0,0116\vartheta} \mu\text{m min}^{-1}. \quad (43)$$

Na obr. 18 jsou zobrazeny naměřené hodnoty, teoretická závislost rychlosti leptání v závislosti na teplotě (a koncentraci vody a hydroxidu draselného) a vypočtená zjednodušená závislost odpovídající naměřeným hodnotám (hodnoty použité k sestavení závislosti jsou uvedené v tab. D2 v příloze D).



**Obr. 18:** Naměřená závislost rychlosti leptání 40%<sub>hm</sub> vodným roztokem KOH na teplotě

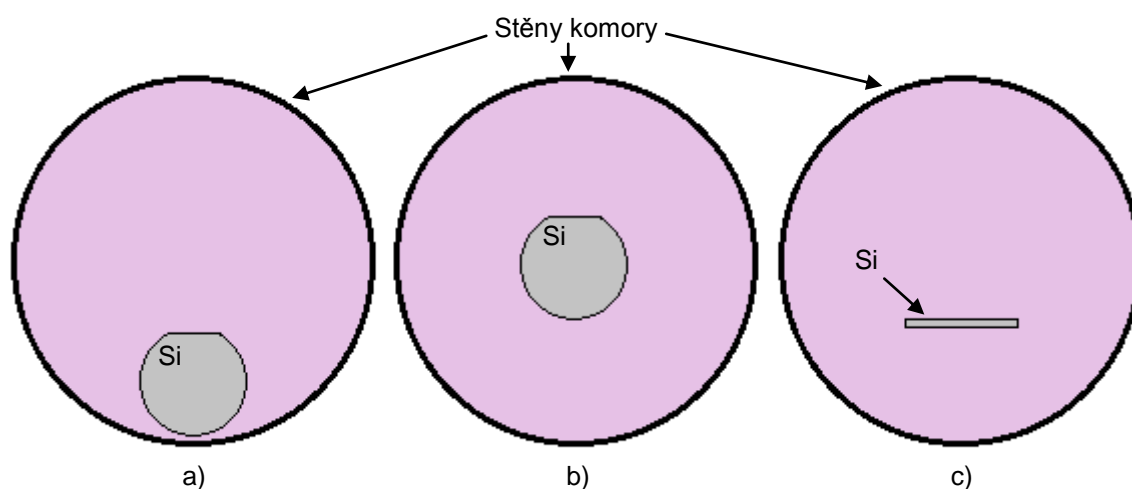
## 2.6 Leptání v kyslíkové plazmě

Testování leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě probíhalo v zařízení DIENER nano (základní parametry zařízení jsou uvedeny v příloze B). Leptání probíhalo vždy na jednom substrátu pro danou sérii kroků. Během experimentu byl měřen úbytek rezistu na různých místech substrátu, a to z důvodu zjištění homogenity leptání. Testováno bylo několik různých poloh pro uložení vzorku v komoře při plazmatickém čištění/leptání, aby se stanovila poloha, při které bude čištění/leptání nejhomogennější. Pro experiment byly použity testovací substráty s vrstvou rezistu PMMA. Na těchto substrátech byla na různých místech vytvořena testovací struktura popsána v kapitole 2.1. Měření probíhalo na linkách šířky 22  $\mu\text{m}$ .

### 2.6.1 Testování homogenity plazmatického výboje v zařízení DIENER nano

Výrobce neuvádí doporučené parametry pro leptání rezistu PMMA, proto byly pro testování homogenity plazmatického výboje zvoleny následující parametry:

Pracovní plyn:  $O_2$ ;  $P = 250 - 500$  W;  $Q = 53$  sccm;  $p = 40$  Pa;  $t = x+3$  min (3 minuty proplach kyslíkovou atmosférou při nulovém výkonu + nastavená doba leptání při zvoleném výkonu). Kde  $P$  je výkon,  $Q$  je průtok plynu (jednotka standardní kubický centimetr z anglického „standard cubic centimeter“),  $p$  je pracovní tlak plynu v leptací komoře,  $t$  je čas leptání. Propláchnutí kyslíkovou atmosférou při nulovém výkonu po určitou dobu zaručuje přibližně stejné podmínky při každém kroku leptání. Doba 3 minut by měla být dostačující, aby došlo k rovnoměrnému naplnění celé leptací komory kyslíkem. Na obr. 19 jsou uvedeny pozice substrátu, ve kterých testování probíhalo.



Obr. 19: Uložení substrátů v zařízení DIENER nano

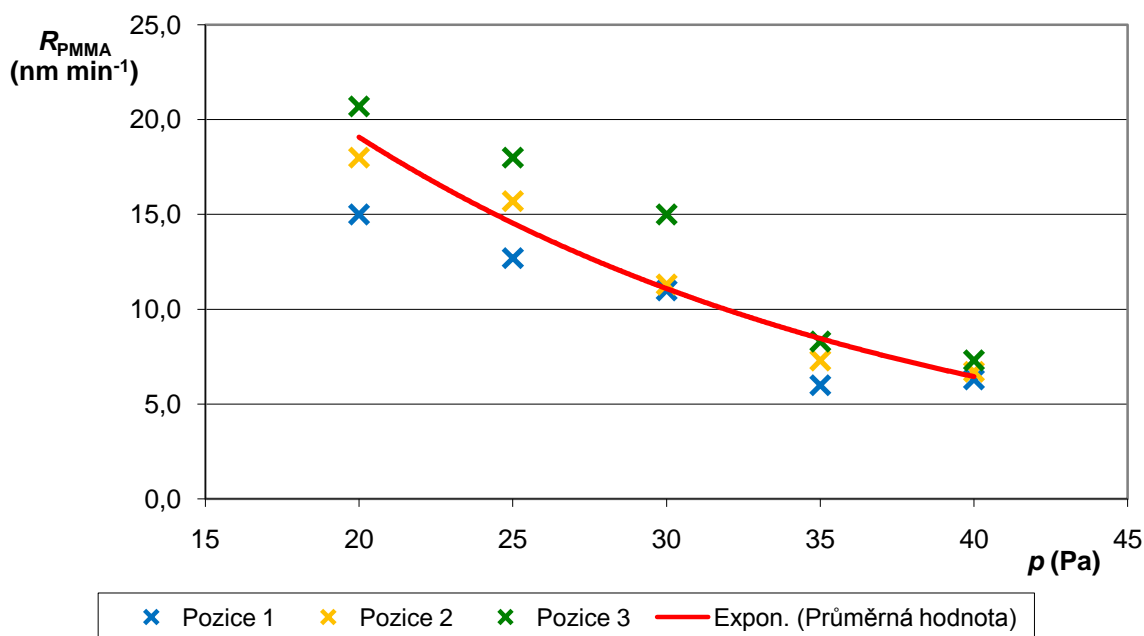
Jako nejvhodnější z hlediska homogenity leptání se jeví uložení substrátu v horizontální poloze, přibližně v jedné třetině průměru leptací komory (obr. 20 c)). Naměřené grafické závislosti pro jednotlivé polohy jsou uvedeny v příloze E (obr. E1-E3). Hodnoty použité pro sestavení grafických závislostí jsou uvedeny v příloze D v tab. D3-D5. Nejvhodnější poloha (z hlediska homogenity leptání) byla zvolena také jako výchozí poloha pro experimentální plazmatické leptání křemíku směsí  $CF_4+O_2$ .

### 2.6.2 Leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě v závislosti na změně tlaku

Dalším krokem pro nalezení nejvhodnějších podmínek leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě bylo určení závislosti rychlosti leptání na tlaku pracovního plynu v leptací komoře. Jak již bylo uvedeno výše, výrobce pro materiál PMMA neuvádí doporučené parametry leptání, proto bylo pro testování zvoleno rozmezí tlaků 20 – 40 Pa (přiblížení se tlakům uváděným výrobcem pro jiný typ plastu). Další parametry leptání byly následující:

Pracovní plyn: O<sub>2</sub>;  $P = 250 \text{ W}$ ;  $Q = 22 - 53 \text{ sccm}$ ;  $p = 20 - 40 \text{ Pa}$ ;  $t = 3+3 \text{ min}$ .

Výsledná naměřená závislost je uvedena na obr. 20. Hodnoty použité pro sestavení závislosti jsou uvedeny v příloze D v tab. D6.



Obr. 20: Závislost rychlosti leptání rezistu PMMA kyslíkovou plazmou na tlaku pracovního plynu

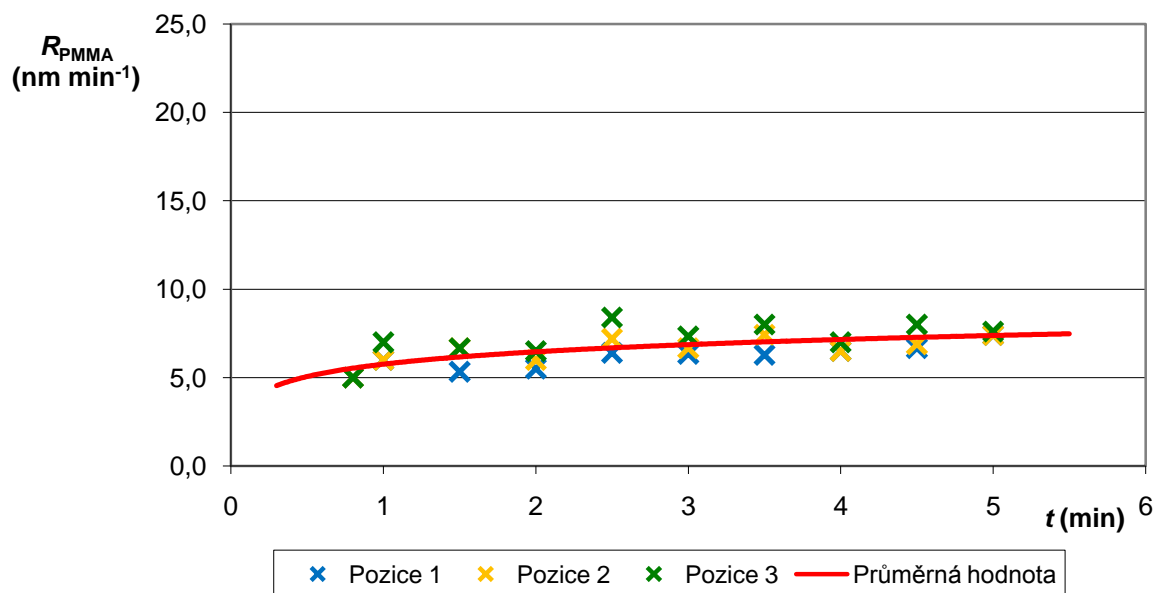
Z naměřené závislosti vyplývá, že nejvhodnější pracovní tlak kyslíku pro leptání rezistu PMMA pro operaci dovyvolání je 40 Pa. Hodnota leptací rychlosti je při tomto tlaku nejnižší, protože vyšší tlak plynu má za následek navýšení počtu srážek mezi jednotlivými částicemi v plazmě, čímž se zvyšuje pravděpodobnost zániku kyslíkových radikálů, které způsobují leptání rezistu PMMA. Na druhou stranu je ale leptací proces nehomogennější a tím i lépe říditelný a opakovatelný. Tlak 40 Pa se jeví jako vhodný i z hlediska stability plazmatického výboje, protože při nižších tlacích byl pozorován periodický pokles v intenzitě jasu plazmatického výboje, což může mít souvislost s okamžitým výkonem plazmatu a homogenitou leptání.

### 2.6.3 Leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě při výkonu 250 – 750 W

Další část experimentu se zabývala měřením závislosti rychlosti leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě na době leptání s parametrem výkonu (250 W, 500 W a 750 W). Pro měření závislosti bylo provedeno 10 kroků leptání s dobou leptání 0,8; 1 – 5 min (s krokem 30 s) pro každý z výkonů. Měření úbytku hloubky rezistu probíhalo na lince šířky 22  $\mu\text{m}$ . Parametry pro všechny výkony byly následující:

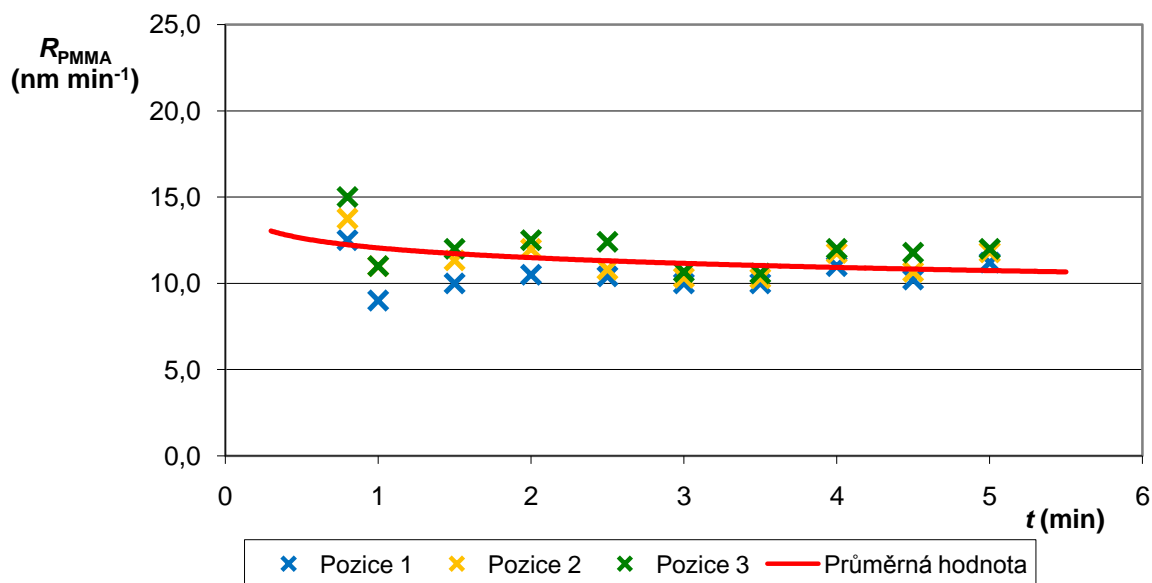
Pracovní plyn: O<sub>2</sub>;  $P = 250 - 750 \text{ W}$ ;  $Q = 53 \text{ sccm}$ ;  $p = 40 \text{ Pa}$ ;  $t = x+3 \text{ min}$ .

Po každém kroku byl změřen úbytek rezistu a vypočítána rychlost leptání. Naměřené a vypočtené hodnoty pro jednotlivé výkony jsou uvedeny v příloze D, tab. D7-D9. Na obr. 21 je zobrazena grafická závislost rychlosti leptání na době leptání pro výkon 250 W.



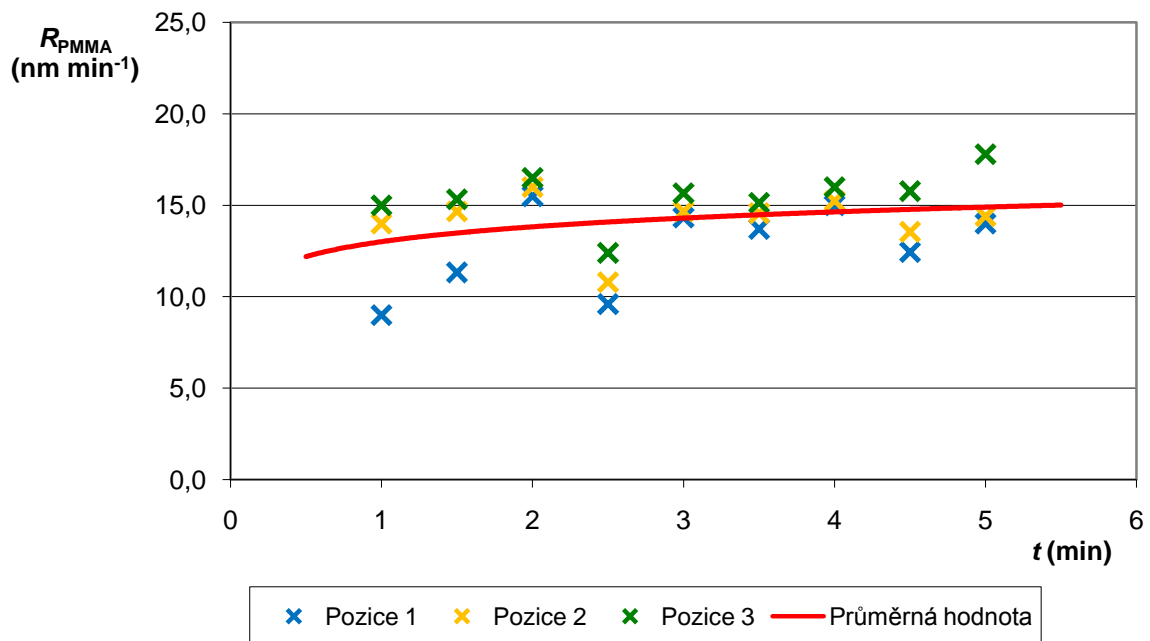
**Obr. 21:** Závislost rychlosti leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě na čase pro výkon 250 W

Ze závislosti je patrné, že při výkonu 250 W jsou pouze velmi malé odchylky mezi hodnotami na různých místech substrátu. Dá se tedy říct, že při výkonu 250 W je leptání velmi homogenní na celé ploše substrátu. Se vzrůstajícím časem hodnota rychlosti leptání nepatrně vzrůstá (viz křivka průměrných hodnot), což může být dáno vlivem teploty na rychlost leptání. Malý vliv teploty na rychlost leptání s narůstající dobou leptání je dán nízkou budící frekvencí výboje. Pro systémy s nízkou budící frekvencí je mimo jiné charakteristické, že dochází k malému ohřevu vzorku během leptání. Celková průměrná rychlost leptání rezistu kyslíkovou plazmou při výkonu 250 W je  $R_{\text{PMMA}250} = 6,6 \text{ nm min}^{-1}$ .



**Obr. 22:** Závislost rychlosti leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě na čase pro výkon 500 W

Jako další je na obr. 22 zobrazena závislost rychlosti leptání na době leptání při výkonu 500 W. Z naměřené závislosti je patrné, že při zvýšení výkonu na 500 W se i rychlost leptání zvýšila. Leptání je stále velice homogenní. Leptací rychlost v tomto případě spíše mírně klesá s časem (viz křivka průměrných hodnot). Ovšem na trend zmíněné křivky mají zásadní vliv hodnoty prvního kroku (0,8 s), které jsou vyšší než zbývající hodnoty. Při tak krátké době leptání se nestihne ustanovit rovnovážný tlak pracovního plynu a parametry leptání se během začátku leptání mění. Proto když vyloučíme hodnoty prvního kroku leptání, tak se rychlost leptání s časem nemění. Celková průměrná rychlost při výkonu 500 W je  $R_{\text{PMMA}500} = 11,3 \text{ nm min}^{-1}$ .

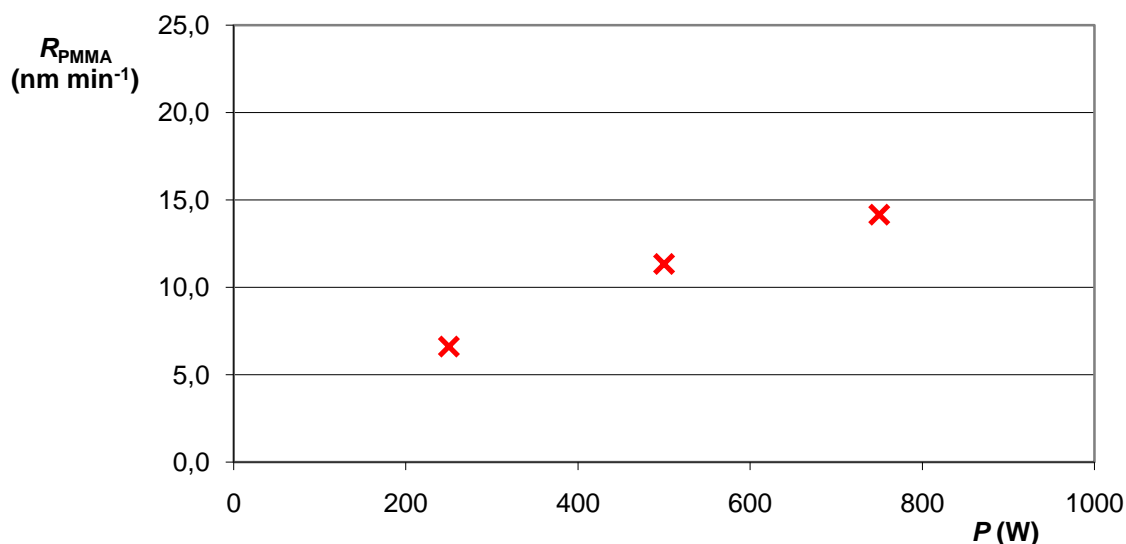


**Obr. 23:** Závislost rychlosti leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě na čase pro výkon 750 W

Závislost rychlosti leptání na době leptání odpovídající výkonu 750 W je uvedena na obr. 23. Naměřené hodnoty vypovídají, že při výkonu 750 W rychlost leptání opět vzrostla a leptání již není tak homogenní jako při nižším výkonu. S časem opět rychlost leptání nepatrně roste, pravděpodobně vlivem teploty. Průměrná rychlost leptání rezistu PMMA kyslíkovou plazmou při výkonu 750 W je  $R_{\text{PMMA}750} = 14,2 \text{ nm min}^{-1}$ .

### 2.6.4 Stanovení závislosti rychlosti leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě na výkonu

Z vypočítaných průměrných rychlostí se dá sestavit závislost rychlosti leptání rezistu PMMA kyslíkovou plazmou na výkonu (obr. 24).



**Obr. 24:** Závislost rychlosti leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě na výkonu

Ze závislosti je patrné, že se vzrůstajícím výkonem rychlost leptání sice stoupá, ale dochází k určité saturaci. Pro daný rozsah výkonů by tedy mohlo jít o logaritmickou závislost. Pomocí naměřených hodnot se tedy dá určit vztah závislosti rychlosti leptání rezistu PMMA kyslíkovou plazmou na výkonu. Pro výpočet se uvažují následující hodnoty:

$$R_{PMMA1} = 6,6 \text{ nm min}^{-1}; R_{PMMA2} = 14,2 \text{ nm min}^{-1}; P_1 = 250 \text{ W}; P_2 = 750 \text{ W}.$$

Vypočet je následující:

$$R_{PMMA1} = k_1 \ln(P_1) + k_2, \quad (44)$$

$$R_{PMMA2} = k_1 \ln(P_2) + k_2. \quad (45)$$

Po úpravě vztahů (44) a (45) se vyjádří konstanty  $k_1$  a  $k_2$ :

$$k_2 = R_{PMMA1} - k_1 \ln(P_1), \quad (46)$$

$$k_1 = \frac{R_{PMMA2} - R_{PMMA1}}{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}. \quad (47)$$

Následně se po dosazení vyčíslí ze vztahu (47) konstanta  $k_1$ :

$$k_1 = \frac{R_{\text{PMMA}2} - R_{\text{PMMA}1}}{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}, \quad (48)$$

$$k_1 = \frac{14,2 - 6,6}{\ln\left(\frac{750}{250}\right)} \text{ nm min}^{-1},$$

$$k_1 = 6,918 \text{ nm min}^{-1}.$$

Jestliže je známá hodnota konstanty  $k_1$ , může se pomocí vztahu (46) vyjádřit konstanta  $k_2$ :

$$k_2 = R_{\text{PMMA}1} - k_1 \ln(P_1), \quad (49)$$

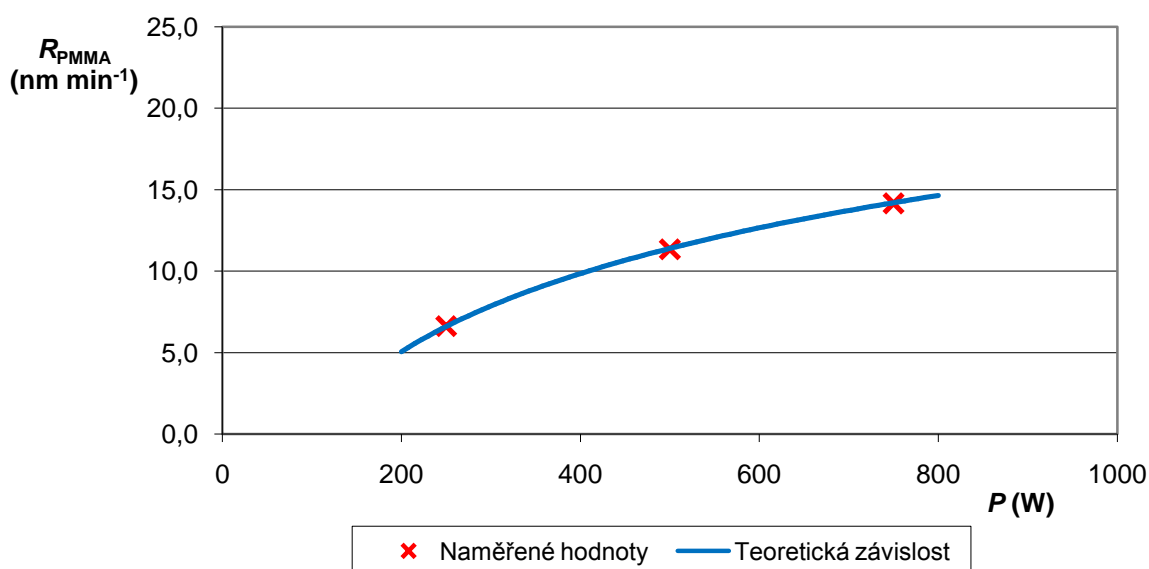
$$k_2 = 6,6 - 6,918 \cdot \ln(250) \text{ nm min}^{-1},$$

$$k_2 = -31,597 \text{ nm min}^{-1}.$$

Se známými konstantami se může zapsat zjištěná logaritmická závislost rychlosti leptání rezistu PMMA v kyslíkové plazmě na výkonu:

$$R_{\text{PMMA}} = 6,918 \ln(P) - 31,597 \text{ nm min}^{-1}. \quad (50)$$

Jak je vidět na obr. 25, vypočtená logaritmická závislost koresponduje s naměřenými hodnotami. Hodnoty potřebné pro sestavení závislosti jsou uvedeny v tabulce D10 v příloze D.



**Obr. 25:** Vypočtená závislost rychlosti leptání rezistu PMMA kyslíkovou plazmou na výkonu

## 2.7 Leptání křemíku směsí CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub> v zařízení TESLA 214 VT

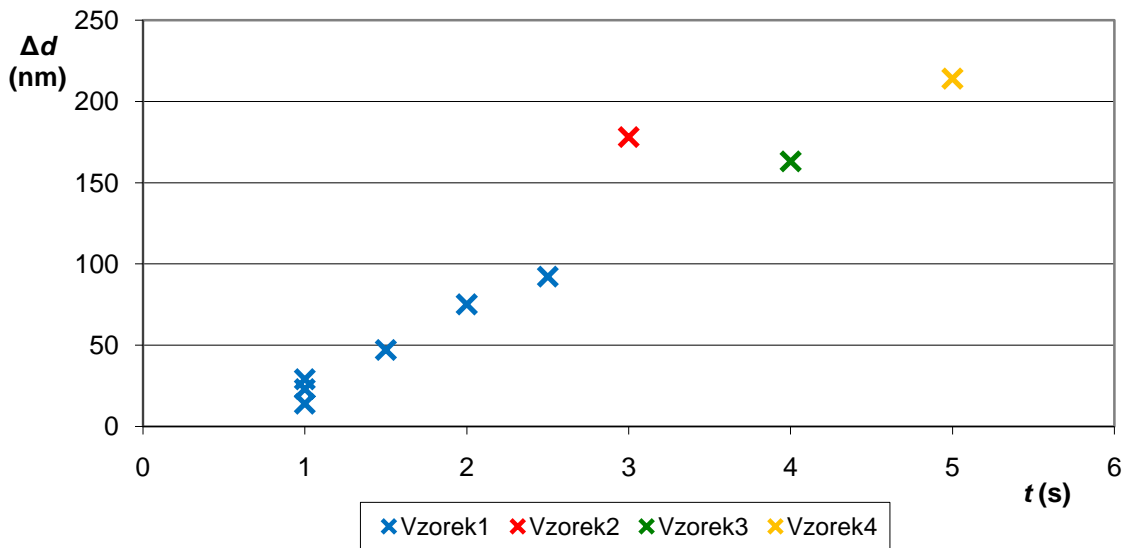
Základní parametry zařízení TESLA 214 VT jsou uvedeny v příloze C. Leptání v této kapitole slouží k vytvoření představy, v jakém stavu se nachází dané zařízení.

Leptání proběhlo na čtyřech různých vzorcích (leptán byl vždy právě jeden z nich). Směs plynu na leptání se skládala z 85% CF<sub>4</sub> a 15% O<sub>2</sub>. Mezi každým krokem leptání uběhla vždy minimálně hodina, aby byla zajištěna vždy stejná výchozí teplota v leptací komoře. Na rozdíl od leptání rezistu kyslíkovou plazmou nelze počítat rychlost leptání rovnou při každém kroku leptání ze změny hloubky a doby leptání. To proto, že s každým krokem leptání ubývá křemík zároveň s rezistem. Proto se do grafické závislosti obvykle vynáší změny hloubky leptu. Měření změny hloubky probíhalo na lince šířky 22 μm. Výslednou rychlost leptání lze následně vypočítat po odstranění zbytku rezistivní masky. Naměřené a vypočítané hodnoty pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tab. 8.

**Tab. 8:** Naměřené a vypočtené hodnoty plazmatického leptání křemíku směsí CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub> v zařízení TESLA 214VT

Tlak	Doba leptání	Hloubka leptu	Úbytek leptu	Rychlost leptání Si	Rychlost leptání PMMA	Selektivita	Podleptání
$p$	$t$	$d$	$\Delta d$	$R_{Si}$	$R_{PMMA}$	$Si:PMMA$	$\frac{a-a_0}{2}$
(Pa)	(min)	(nm)	(nm)	(nm min <sup>-1</sup> )	(nm min <sup>-1</sup> )	(-)	(nm)
<b>Vzorek 1:</b> $P = 250 \text{ W}$ ; $Q = 0,5 \text{ l h}^{-1}$ ; $t = x+3 \text{ min}$ ; $d_{PMMA0} = 104 \text{ nm}$							
1000	1	133	29				
750	1	156	23				
700	1	170	14				
750	1,5	217	47				
700	2	292	75				
650	2,5	384	92				
Strip rezistu		$d_{Si} = 347 \text{ nm}$	$\Delta d_{PMMA} = 67 \text{ nm}$	38,6	7,4	5:1	280
<b>Vzorek 2:</b> $P = 250 \text{ W}$ ; $Q = 0,5 \text{ l h}^{-1}$ ; $t = x+3 \text{ min}$ ; $d_{PMMA0} = 87 \text{ nm}$							
700	3	265	178				
Strip rezistu		$d_{Si} = 212 \text{ nm}$	$\Delta d_{PMMA} = 34 \text{ nm}$	70,7	11,3	6:1	
<b>Vzorek 3:</b> $P = 250 \text{ W}$ ; $Q = 0,5 \text{ l h}^{-1}$ ; $t = x+3 \text{ min}$ ; $d_{PMMA0} = 105 \text{ nm}$							
800	4	242	163				
Strip rezistu		$d_{Si} = 190 \text{ nm}$	$\Delta d_{PMMA} = 53 \text{ nm}$	47,5	13,3	4:1	150
<b>Vzorek 4:</b> $P = 250 \text{ W}$ ; $Q = 0,5 \text{ l h}^{-1}$ ; $t = x+3 \text{ min}$ ; $d_{PMMA0} = 101 \text{ nm}$							
600	5	315	212				
Strip rezistu		$d_{Si} = 252 \text{ nm}$	$\Delta d_{PMMA} = 38 \text{ nm}$	50,4	7,6	7:1	200

Z tabulky naměřených a vypočtených hodnot vyplývá, že jednotlivé parametry jsou poměrně dost proměnlivé i přesto, že nastavené parametry byly pro jednotlivé kroky leptání vždy stejné. Vzhledem ke stáří zařízení nemá obsluha jistotu, že nastavené parametry opravdu odpovídají skutečnosti. U vzorku 1 byla změřena i drsnost povrchu (obr. G6 v příloze G), a to  $R_A = 1,5 \text{ nm}$ . Na obr. 26 je uvedena závislost změny hloubky leptu na čase.



**Obr. 26:** Závislost změny hloubky při leptání křemíku plazmou  $\text{CF}_4+\text{O}_2$  v zařízení TESLA 214 VT na čase

Ze závislosti je vidět, že se vzrůstajícím časem se lept prohlubuje přibližně lineárně, tudíž leptací rychlost je téměř konstantní. Při leptání vzorku 2 zřejmě došlo k nějakým nepředvídatelným změnám uvnitř aparatury a to mělo za následek, že hodnota úbytku hloubky leptu (resp. rychlosti leptání) vybočuje z lineárního trendu.

## 2.8 Leptání křemíku směsí $\text{CF}_4+\text{O}_2$ v zařízení DIENER nano

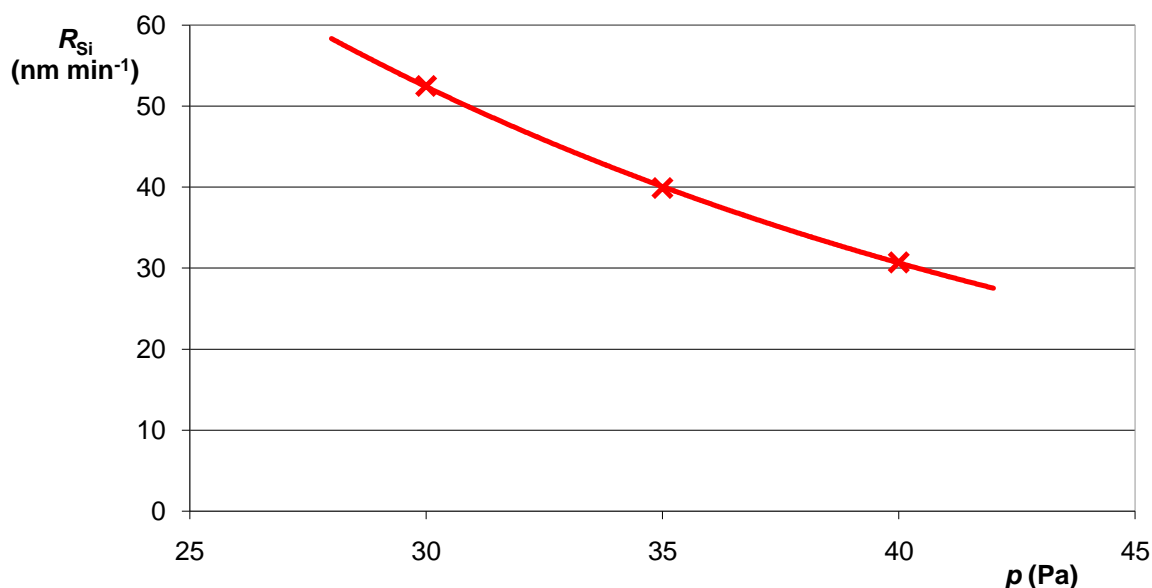
Díky výsledkům z kapitoly 2.6.1 již bylo zjištěno, jaké je nejvhodnější umístění vzorků v leptací komoře vzhledem k homogenitě leptání, a to v jedné třetině výšky leptací komory. V této poloze tedy probíhaly všechny následující experimenty. Na každý krok leptání byly použity vždy čtyři čipy, první dva s rezistovou maskou s odhaleným křemíkem a další dva čipy s rezistovou maskou s odhalenou platinou. Čipy s platinou sloužily pouze pro sledování úbytku rezistu.

### 2.8.1 Leptání křemíku plazmou $\text{CF}_4+\text{O}_2$ v závislosti na změně tlaku

Stejně jako v případě leptání kyslíkovou plazmou, tak i u směsi  $\text{CF}_4$  a  $\text{O}_2$  je nutno nejdříve stanovit určité standardní podmínky leptání. Především jde o stanovení vhodného tlaku k leptání. Výrobce v tomto případě uvádí doporučené hodnoty tlaku 10 – 40 Pa. Proběhlo tedy měření pro rozmezí 20 – 40 Pa v krocích po 5 Pa. Mezi každým krokem leptání byla opět minimálně jednogodinová prodleva, aby byly zaručeny stejné výchozí podmínky. Leptání probíhalo vždy ve čtyřech krocích pro časy 1; 4; 4; 4 minuty u každého tlaku. Změna hloubky leptu byla měřena na lince šířky 22  $\mu\text{m}$ . Parametry leptání byly následující:

Pracovní plyn: 85%  $\text{CF}_4$  + 15%  $\text{O}_2$ ;  $P = 500 \text{ W}$ ;  $p = 20\text{-}40 \text{ Pa}$ ;  $Q = 12,5\text{-}34 \text{ sccm}$ ;  $t = x+3 \text{ min}$ .

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. D11-D14 v příloze D. Závislosti změny hloubky leptu na čase jsou pro jednotlivé tlaky uvedeny v příloze E (obr. E4-E6). Během měření vyvstal problém s nastavením tlaku menšího než 30 Pa pro zvolený plyn, neboť při tlaku 25 Pa byl průtok již tak malý, že nebylo zaručeno, zda plyn v požadovaném množství opravdu vnikal do leptací komory. Dalším problémem bylo nastavení tak nízkého tlaku pomocí průtoku plynu, jelikož docházelo k potlačování nastaveného tlaku čerpáním vakua rotační vývěvou. Proto měření při tlaku 20 Pa ani neproběhlo a hodnoty při tlaku 25 Pa neodpovídají předpokládanému trendu, takže nebyly ani zahrnuty do závislosti rychlosti leptání na tlaku na obr. 27.



**Obr. 27:** Závislost rychlosti leptání při plazmatickém leptání křemíku směsí  $CF_4+O_2$  na tlaku

V tab. 9 jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty pro leptání v závislosti na tlaku.

**Tab. 9:** Naměřené a vypočtené hodnoty plazmatického leptání křemíku směsí  $CF_4+O_2$  v závislosti na tlaku,  $P = 500$  W

Tlak	Průtok	Rychlost leptání Si	Rychlost leptání PMMA	Selektivita	Podleptání	Drsnost
$p$	$Q$	$R_{Si}$	$R_{PMMA}$	-	$a/d$	$R_A$
(Pa)	(sccm)	(nm min <sup>-1</sup> )	(nm min <sup>-1</sup> )	(-)	(-)	(nm)
40	34	30,7	1,9	16:1	0,90	2,7
35	26	39,9	2,9	14:1	1,00	4,9
30	20	52,5	3,6	15:1	1,00	9,1

Naměřené hodnoty potvrdily teoretický předpoklad, že s klesajícím tlakem vzrůstá rychlost leptání jak křemíku, tak rezistu PMMA. Je to dáno snížením rekombinace radikálů účastnících se leptací reakce. Čím nižší je tlak, tím vyšší je hustota plazmatu a jeho aktivita. Selektivita se prakticky nemění a izotropnost leptání je téměř 100% pro všechny hodnoty

tlaku. Se snižujícím se tlakem roste drsnost leptaného povrchu. Díky těmto poznatkům lze usuzovat, že jako nejvhodnější se jeví využití tlaku 30 Pa, jelikož má nejvyšší rychlost leptání křemíku, přičemž selektivita je zachována.

Po určení vhodné hodnoty tlaku pro plazmatické leptání křemíkem směsí  $CF_4+O_2$  proběhlo ještě několik testovacích leptů, které nejsou přímo zahrnuty do této práce. Tato testovací leptání měla za úkol zjistit možné problémy během procesu plazmatického leptání. Těmito leptáními bylo zjištěno několik zásad, které je nutno při leptání dodržovat:

- Promíchání bomby se směsí plynu před každým leptáním. Protože  $CF_4$  má vyšší hustotu než  $O_2$  a má tendenci se usazovat na dně nádoby. Promíchání před každým krokem zajistí, že do pracovní komory se načerpá směs pracovního plynu o správné koncentraci.
- Dodržování stejné doby proplachu pracovním plynem při nulovém výkonu. Při nedodržení stanovené doby se nestihne celá komora rovnoměrně zaplnit pracovním plynem a leptání je poté nehomogenní.
- Pravidelné čištění komory izopropylalkoholem a následné čištění kyslíkovou plazmou. Během každého leptání směsí  $CF_4+O_2$  dochází k zanášení stěn leptací komory, na kterou se zřejmě deponují některé produkty reakce leptání křemíku resp. rezistu PMMA. Na stěnách se postupně vytváří film mléčného zbarvení. Tento film se bohužel nedá odstranit, jelikož je způsoben i leptáním komory samotné. Dále se stěny zanášejí bílým práškem, jenž je také tvořen produkty reakce leptání. Tento prach může být zdrojem kontaminace vzorků během dalšího leptání/čištění kyslíkovou plazmou. Pravidelné čištění by mělo alespoň zabránit tvorbě zmíněného prášku.
- Proměnlivé výsledky během prvního kroku leptání. U každého vzorku při prvním kroku leptání byly naměřeny hodnoty, které nekorrespondují s dalšími naměřenými hodnotami. Je to dáno vrstvou nativního oxidu (stejný problém jako u anizotropního mokrého leptání). Proto při dalším experimentálním měření nejsou první kroky zahrnuty do výsledků měření. Ovšem při vytváření hlubokých reliéfních struktur je nutno s tímto faktem počítat a přizpůsobit tak proces leptání.

### **2.8.2 Leptání křemíku plazmou $CF_4+O_2$ při výkonu 250 – 750 W**

Měření probíhalo pro tři různé výkony 250, 500 a 750 W. Každý krok leptání byl proveden se dvěma vzorky na leptání křemíku a dvěma vzorky s platinou na kontrolu úbytku rezistu. Leptání probíhalo pro každý z výkonů po dobu 1 až 8 min po minutových krocích. U výkonu 500 a 750 W bylo nutné použít na změření celé časové závislosti více vzorků, jelikož při opakovaném leptání na jednom vzorku by byly vyleptané struktury příliš hluboké a nebylo by

možno je měřit na AFM. Měření změny hloubky probíhalo na lince šířky 22  $\mu\text{m}$ . Parametry leptání byly následující:

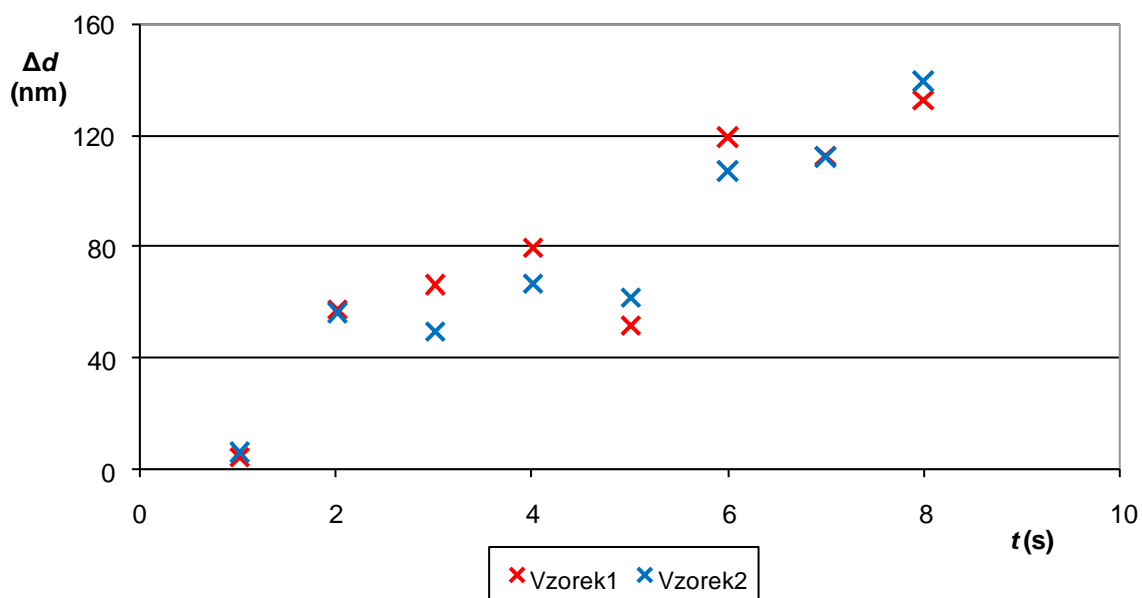
Pracovní plyn: 85%  $\text{CF}_4$  + 15%  $\text{O}_2$ ;  $P = 250\text{-}750$  W;  $p = 30$  Pa;  $Q = 20$  sccm;  $t = x+3$  min.

Naměřené a vypočtené hodnoty při výkonu 250 W jsou uvedeny v tab. 10.

**Tab. 10:** Naměřené a vypočtené hodnoty plazmatického leptání křemíku směsí  $\text{CF}_4+\text{O}_2$ ,  $P = 250$  W,  $p = 30$  Pa,  $Q = 20$  sccm,  $t = x+3$  min,  $d_{\text{PMMA01}} = 123$  nm,  $d_{\text{PMMA02}} = 110$  nm

Doba leptání	Vzorek 1			Vzorek 2		
	Hloubka leptu	Změna hloubky	Podleptání	Hloubka leptu	Změna hloubky	Podleptání
$t$	$d_1$	$\Delta d_1$	$\frac{a-a_0}{2}_1$	$d_2$	$\Delta d_2$	$\frac{a-a_0}{2}_2$
(min)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
2	93	-30	350	90	-20	390
1	98	5	podleptání hloubka 0,54	96	6	podleptání hloubka 0,62
2	156	58		152	56	
3	222	66		202	50	
4	302	80		269	67	
5	354	52		331	62	
6	473	119		438	107	
7	586	113		550	112	
8	719	133		689	139	
Strip rezistu	$d_{\text{Si1}} = 650$ nm; $\Delta d_{\text{PMMA1}} = 54$ nm; $R_{\text{Si1}} = 18,6$ nm min <sup>-1</sup> ; $R_{\text{PMMA1}} = 1,4$ nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 13:1					
	$d_{\text{Si2}} = 634$ nm; $\Delta d_{\text{PMMA2}} = 55$ nm; $R_{\text{Si2}} = 18,1$ nm min <sup>-1</sup> ; $R_{\text{PMMA2}} = 1,4$ nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 13:1					
Průměr	$R_{\text{Si}} = 18,4$ nm min <sup>-1</sup> ; $R_{\text{PMMA}} = 1,4$ nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 13:1; Podleptání: 0,58 $R_A = 7,7$ nm					

Závislost změny hloubky leptu na době leptání je zobrazena na obr. 28.



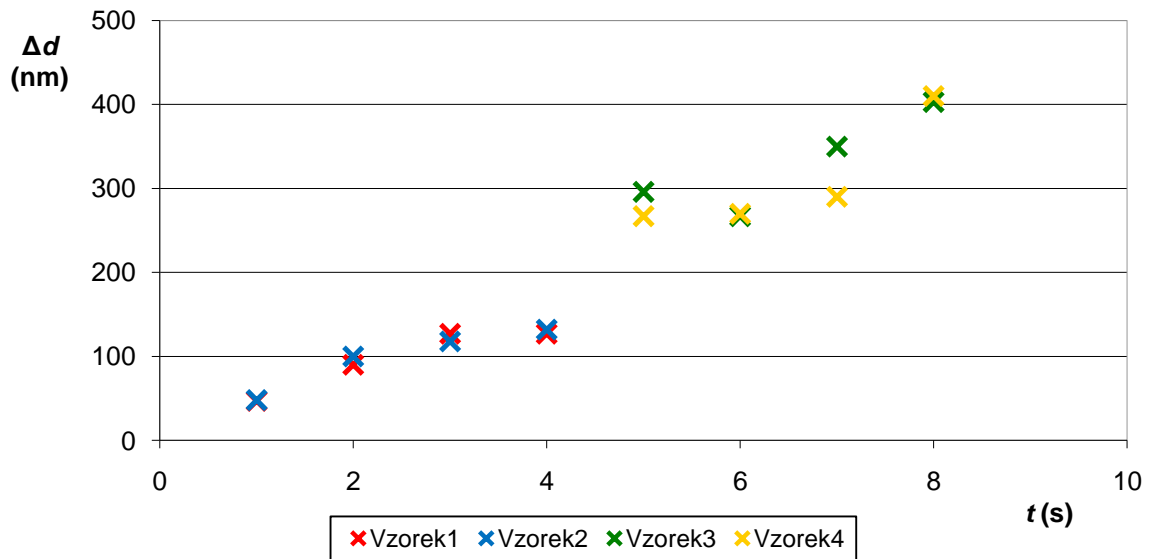
**Obr. 28:** Závislost změny hloubky při plazmatickém leptání křemíku směsí  $\text{CF}_4+\text{O}_2$  na čase pro výkon 250 W

Z naměřené závislosti vyplývá, že se vzrůstající dobou leptání se adekvátně prohlubuje i výsledný lept, což značí, že rychlost leptání se přibližně udržuje na konstantní hodnotě. Je zde ovšem několik odchylek (především při 5 a 6 minutovém kroku leptání), u kterých se jen těžko dá vysledovat příčina, když všechny možné nastavitelné parametry byly shodné s ostatními kroky leptání. Při výpočtu celkové rychlosti leptání křemíku nebyl zahrnut do výpočtu čas prvních dvou kroků (2 minuty a 1 minuta), jelikož nedošlo k prakticky žádné změně hloubky. 1. krok leptání nebyl zahrnut ani do zmíněné závislosti z důvodů uvedených v kapitole 2.8.1 Na vzorku 1 byla po skončení leptání změřena drsnost povrchu, naměřený povrch je uveden na obr. G7 v příloze G.

V tab. 11 jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty při výkonu 500 W.

**Tab. 11:** Naměřené a vypočtené hodnoty plazmatického leptání křemíku směsí  $CF_4+O_2$ ,  $P = 500$  W,  $p = 30$  Pa,  $Q = 20$  sccm,  $t = x+3$  min,  $d_{PMMA03} = 145$  nm,  $d_{PMMA04} = 142$  nm,  $d_{PMMA05} = 113$  nm,  $d_{PMMA06} = 91$  nm

Doba leptání	Vzorek 3			Vzorek 4		
	Hloubka leptu	Změna hloubky	Podleptání	Hloubka leptu	Změna hloubky	Podleptání
$t$	$d_3$	$\Delta d_3$	$\frac{a-a_0}{2}_3$	$d_4$	$\Delta d_4$	$\frac{a-a_0}{2}_4$
(min)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
1	148	3	310	140	-2	290
1	195	47	podleptání hloubka	188	48	podleptání hloubka
2	285	90		288	100	
3	412	127	0,73	406	118	0,69
4	539	127	$R_A = 10,2$ nm	538	132	
	Vzorek 5			Vzorek 6		
	$d_5$	$\Delta d_5$	$\frac{a-a_0}{2}_5$	$d_6$	$\Delta d_6$	$\frac{a-a_0}{2}_6$
1	80	-33	830	100	9	640
5	376	296	podleptání hloubka	367	267	podleptání hloubka
6	643	267		637	270	
7	993	350	0,61	927	290	0,49
8	1396	403	$R_A = 18,8$ nm	1337	410	
Strip rezistu	$d_{Si3} = 427$ nm; $\Delta d_{PMMA3} = 33$ nm; $R_{Si3} = 42,7$ nm min <sup>-1</sup> ; $R_{PMMA3} = 3,0$ nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 14:1					
	$d_{Si4} = 418$ nm; $\Delta d_{PMMA4} = 22$ nm; $R_{Si4} = 41,8$ nm min <sup>-1</sup> ; $R_{PMMA4} = 2,2$ nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 19:1					
	$d_{Si5} = 1360$ nm; $\Delta d_{PMMA5} = 77$ nm; $R_{Si5} = 52,3$ nm min <sup>-1</sup> ; $R_{PMMA5} = 2,9$ nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 18:1					
	$d_{Si6} = 1301$ nm; $\Delta d_{PMMA6} = 55$ nm; $R_{Si6} = 50,0$ nm min <sup>-1</sup> ; $R_{PMMA6} = 2,1$ nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 24:1					
Průměr	$R_{Si} = 46,7$ nm min <sup>-1</sup> ; $R_{PMMA} = 2,6$ nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 18:1 ; Podleptání: 0,63					



**Obr. 29:** Závislost změny hloubky při plazmatickém leptání křemíku směsí  $CF_4+O_2$  na čase pro výkon 500 W

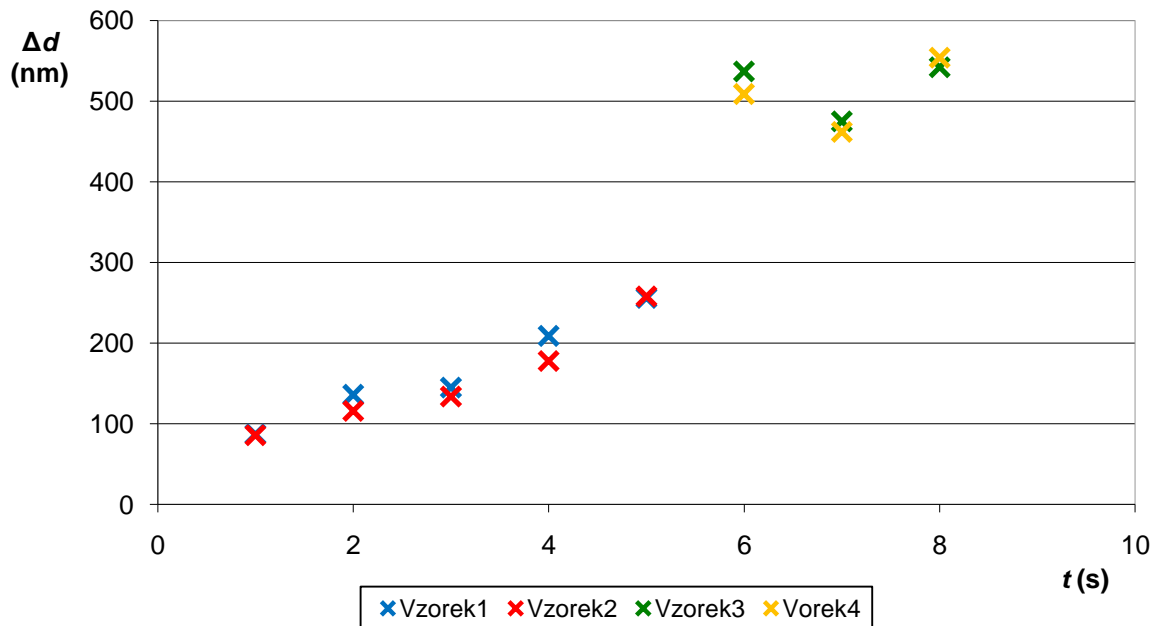
Na obr. 29 je zobrazena závislost změny hloubky na době leptání pro výkon 500 W. Opět je v závislosti vidět, že některé kroky (4 a 5 minut) vybočují z celkového trendu. Celková rychlost leptání křemíku i rezistu PMMA se podle předpokladu zvýšila. Pro výpočet celkové rychlosti křemíku byly vynechány první kroky leptání, jelikož opět nebyla naměřena žádná změna hloubky leptu. Na vzorcích 3 a 4 byla změřena drsnost povrchu, naměřené povrchy jsou uvedeny v příloze G na obr. G8 (vzorek 3) a G9 (vzorek 5). V příloze G na obr. G12 je uvedena vyleptaná čtvercová struktura po odstranění rezistu. Na takovýchto strukturách probíhalo měření podleptání pro všechna leptání.

Naměřené a vypočtené hodnoty pro výkon 750 W jsou uvedeny v tab. 12.

**Tab. 12:** Naměřené a vypočtené hodnoty plazmatického leptání křemíku směsí CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub>, P = 750 W, ρ = 30 Pa, Q = 20 sccm, t = x+3 min, d<sub>PMMA07</sub> = 96 nm, d<sub>PMMA08</sub> = 97 nm, d<sub>PMMA09</sub> = 98 nm, d<sub>PMMA010</sub> = 94 nm

Doba leptání	Vzorek 7			Vzorek 8		
	Hloubka leptu	Změna hloubky	Podleptání	Hloubka leptu	Změna hloubky	Podleptání
<i>t</i>	<i>d</i> <sub>7</sub>	$\Delta d_7$	$\frac{a-a_0}{2}_7$	<i>d</i> <sub>8</sub>	$\Delta d_8$	$\frac{a-a_0}{2}_8$
(min)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
1	156	60	470	130	33	590
1	243	87	podleptání hloubka	216	86	podleptání hloubka
2	379	136		332	116	
3	524	145	0,50	466	134	0,69
4	733	209	<b>R<sub>A</sub> = 10,5 nm</b>	644	178	
5	989	256		902	258	
	Vzorek 9			Vzorek 10		
	<i>d</i> <sub>9</sub>	$\Delta d_9$	$\frac{a-a_0}{2}_9$	<i>d</i> <sub>10</sub>	$\Delta d_{10}$	$\frac{a-a_0}{2}_{10}$
1	242	144	1360	245	151	1360
6	779	537	podleptání hloubka	754	509	podleptání hloubka
7	1254	475	0,77	1216	462	0,78
8	1796	542	<b>R<sub>A</sub> = 22 nm</b>	1770	554	
Strip rezistu	<i>d</i> <sub>Si7</sub> = 943 nm; $\Delta d_{PMMA7}$ = 50 nm; <i>R</i> <sub>Si7</sub> = 58,9 nm min <sup>-1</sup> ; <i>R</i> <sub>PMMA7</sub> = 3,1 nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 19:1					
	<i>d</i> <sub>Si8</sub> = 858 nm; $\Delta d_{PMMA8}$ = 53 nm; <i>R</i> <sub>Si8</sub> = 53,6 nm min <sup>-1</sup> ; <i>R</i> <sub>PMMA8</sub> = 3,3 nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 16:1					
	<i>d</i> <sub>Si9</sub> = 1768 nm; $\Delta d_{PMMA9}$ = 70 nm; <i>R</i> <sub>Si9</sub> = 80,4 nm min <sup>-1</sup> ; <i>R</i> <sub>PMMA9</sub> = 3,2 nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 25:1					
	<i>d</i> <sub>Si10</sub> = 1753 nm; $\Delta d_{PMMA10}$ = 77 nm; <i>R</i> <sub>Si10</sub> = 79,7 nm min <sup>-1</sup> ; <i>R</i> <sub>PMMA10</sub> = 3,6 nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 22:1					
Průměr	<i>R</i> <sub>Si</sub> = 68,2 nm min <sup>-1</sup> ; <i>R</i> <sub>PMMA</sub> = 3,3 nm min <sup>-1</sup> ; Si:PMMA = 21:1 ; Podleptání: 0,69					

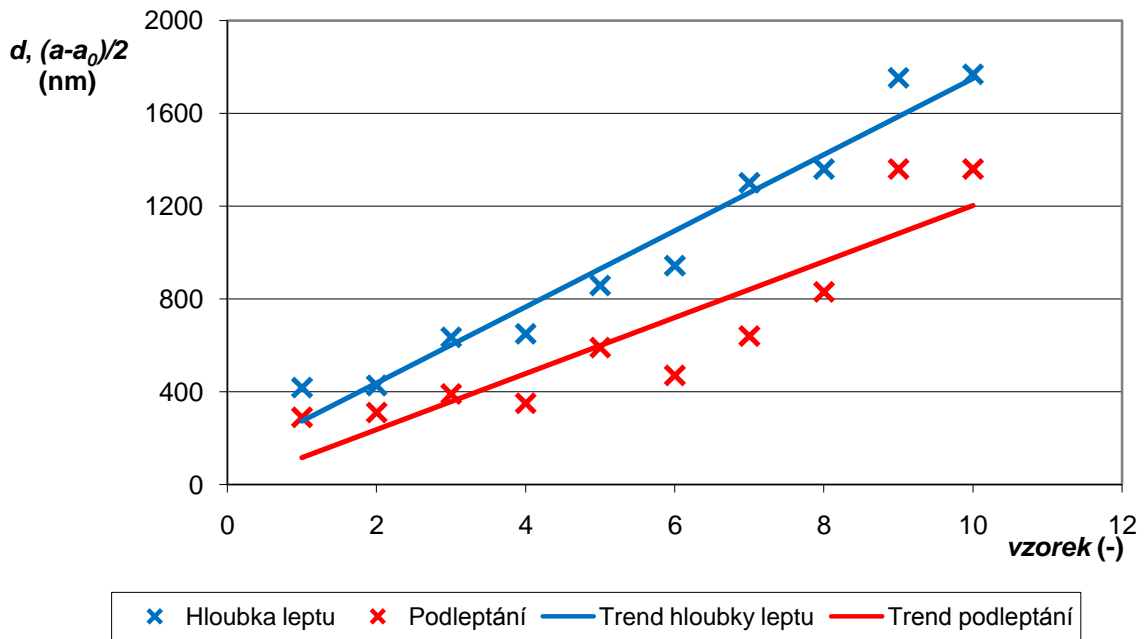
Na obr. 30 je zobrazena závislost změny hloubky na době leptání pro výkon 750 W. V naměřené závislosti opět jeden bod vybočuje z celkového trendu (krok 6 minut). Tentokrát při výpočtu celkové rychlosti křemíku nebyl zanedbán žádný časový krok, protože při výkonu 750 W již nedošlo ke zpomalení vlivem vrstvy nativního oxidu. Opět byla změřena drsnost výsledných leptů. Naměřené povrchy jsou v příloze G, na obr. G10 (vzorek 7) a G11 (vzorek 9).



**Obr. 30:** Závislost změny hloubky při plazmatickém leptání křemíku směsí  $\text{CF}_4 + \text{O}_2$  na čase pro výkon 750 W

Z naměřených hodnot pro jednotlivé výkony je patrné, že drsnost vyleptané struktury nezávisí pouze na aplikovaném výkonu (s vyšším výkonem je vyšší drsnost), ale i na výsledné hloubce leptu (čím hlubší lept, resp. delší doba leptání, tím je vyšší drsnost). Tuto skutečnost dokazují i snímky v příloze I a snímky v příloze G (obr. G7-G14). Na obrázcích v příloze I je vidět, jak došlo k deformaci původně zamýšlených obdélníkových a čtvercových struktur. Deformace je zapříčiněna již deformovanou leptací maskou a následně umocněna plazmatickým leptáním.

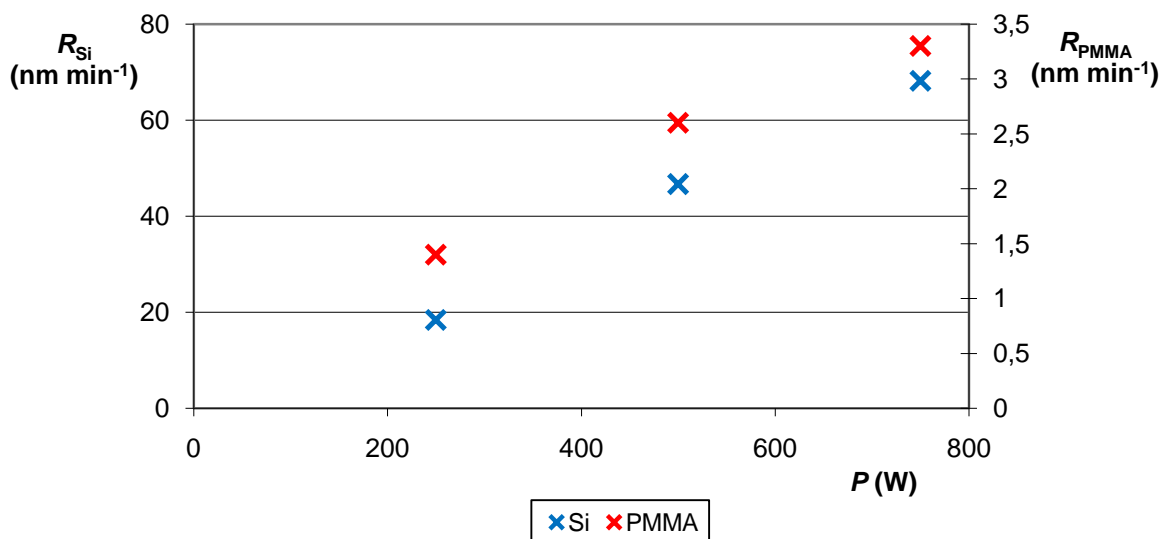
Závislost na hloubce leptu vykazuje i míra podleptání rezistové masky. Zde se ukazuje, že s narůstající hloubkou přibližně stoupá i míra podleptání. Na obr. 31 je znázorněna hloubka leptu pro jednotlivé vzorky a jí odpovídající podleptání. Vzorky jsou seřazeny od nejmělkčího k nejhlubšímu tak, aby byl vidět trend obou závislostí. Křivky se od sebe sice vzdalují, ale poměr podleptání a hloubky se zvyšuje. Na výsledné podleptání má i vliv výchozí tloušťka rezistové masky. Jestliže byla rezistová maska tenčí, tak i míra podleptání je vyšší.



Obr. 31: Závislost podleptání rezistové masky na hloubce leptu při plazmatickém leptání křemíku směsí  $CF_4+O_2$

### 2.8.3 Stanovení závislosti rychlosti leptání křemíku a rezistu PMMA plazmou $CF_4+O_2$ na výkonu

Na obr. 32 jsou uvedeny hodnoty leptacích rychlostí křemíku a rezistu PMMA při plazmatickém leptání směsí  $CF_4+O_2$  v závislosti na aplikovaném výkonu.



Obr. 32: Závislost rychlosti leptání křemíku a rezistu PMMA při leptání plazmou  $CF_4+O_2$

V případě závislosti rychlosti leptání rezistu PMMA na výkonu by mohlo opět jít o logaritmickou závislost jako v případě leptání kyslíkovou plazmou. Postup tedy bude obdobný a pro výpočet se počítá s následujícími hodnotami:

$$R_{\text{PMMA1}} = 1,4 \text{ nm min}^{-1}; R_{\text{PMMA2}} = 3,3 \text{ nm min}^{-1}; P_1 = 250 \text{ W}; P_2 = 750 \text{ W}.$$

Vypočet je následující:

$$R_{\text{PMMA1}} = k_1 \ln(P_1) + k_2, \quad (51)$$

$$R_{\text{PMMA2}} = k_1 \ln(P_2) + k_2. \quad (52)$$

Po úpravě vztahů (51) a (52) se vyjádří konstanty  $k_1$  a  $k_2$ :

$$k_2 = R_{\text{PMMA1}} - k_1 \ln(P_1), \quad (53)$$

$$k_1 = \frac{R_{\text{PMMA2}} - R_{\text{PMMA1}}}{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}. \quad (54)$$

Následně se ze vztahu (54) vyčíslí konstanta  $k_1$ :

$$k_1 = \frac{R_{\text{PMMA2}} - R_{\text{PMMA1}}}{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}, \quad (55)$$

$$k_1 = \frac{3,3 - 1,4}{\ln\left(\frac{750}{250}\right)} \text{ nm min}^{-1},$$

$$k_1 = 1,729 \text{ nm min}^{-1}.$$

Se známou hodnotou konstanty  $k_1$  se pomocí vztahu (53) vyjádří konstanta  $k_2$ :

$$k_2 = R_{\text{PMMA1}} - k_1 \ln(P_1), \quad (56)$$

$$k_2 = 1,4 - 1,729 \cdot \ln(250) \text{ nm min}^{-1},$$

$$k_2 = -8,147 \text{ nm min}^{-1}.$$

Se známými konstantami se může zapsat zjištěná logaritmická závislost rychlosti leptání rezistu PMMA v plazmě  $\text{CF}_4 + \text{O}_2$  na výkonu:

$$R_{\text{PMMA}} = 1,729 \cdot \ln(P) - 8,147 \text{ nm min}^{-1}. \quad (57)$$

Zmíněná závislost je uvedena na obr. 33 níže, společně se závislostí rychlosti leptání křemíku. Hodnoty použité pro sestavení závislosti jsou uvedeny v tab. D15 v příloze D.

Závislost rychlosti leptání křemíku na výkonu by také mohla odpovídat logaritmické závislosti. Ovšem při pokusném vykreslení závislosti pomocí softwaru se ukázalo, že naměřené hodnoty spíše korespondují s polynomickeou závislostí. Konkrétně pak polynomem 2. stupně. Pro výpočet budou potřeba následující hodnoty:

$$R_{Si1} = 18,4 \text{ nm min}^{-1}; \quad R_{Si2} = 46,7 \text{ nm min}^{-1}; \quad R_{Si3} = 68,2 \text{ nm min}^{-1}; \quad P_1 = 250 \text{ W}; \quad P_2 = 500 \text{ W}; \quad P_3 = 750 \text{ W}.$$

V tomto případě se vychází ze tří rovnic o třech neznámých:

$$R_{Si1} = k_1 P_1^2 + k_2 P_1 + k_3, \quad (58)$$

$$R_{Si2} = k_1 P_2^2 + k_2 P_2 + k_3, \quad (59)$$

$$R_{Si3} = k_1 P_3^2 + k_2 P_3 + k_3. \quad (60)$$

Po dosazení konkrétních hodnot do rovnic (58), (59) a (60) a jejich zapsání do matice dostaneme následující rozšířenou matici soustavy rovnic:

$$\left( \begin{array}{cc|c} 250^2 & 250 & 18,4 \\ 500^2 & 500 & 46,7 \\ 750^2 & 750 & 68,2 \end{array} \right). \quad (61)$$

Po několika úpravách v matici (61) dostaneme hodnoty konstant  $k_1, k_2, k_3$ :

$$k_1 = -5,44 \cdot 10^{-5} \text{ nm W}^{-2} \text{ min}^{-1}, \quad (62)$$

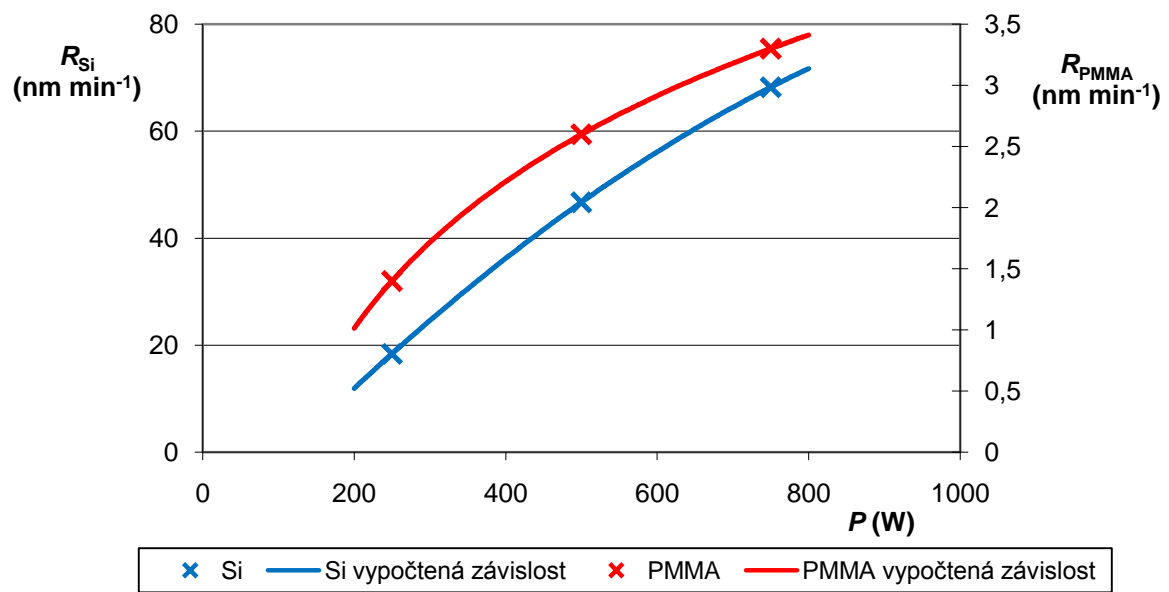
$$k_2 = 0,154 \text{ nm W}^{-1} \text{ min}^{-1}, \quad (63)$$

$$k_3 = -16,7 \text{ nm min}^{-1}. \quad (64)$$

Se známými konstantami se zapíše vypočítaná závislost rychlosti leptání křemíku při plazmatickém leptání směsí  $\text{CF}_4 + \text{O}_2$  na výkonu:

$$R_{Si} = -5,44 \cdot 10^{-5} P^2 + 0,154 P - 16,7 \text{ nm min}^{-1}. \quad (65)$$

Vypočítaná závislost je uvedena na obr. 33. Hodnoty potřebné pro sestavení závislosti jsou uvedeny v příloze D v tab. D16. Jak je vidět, obě dvě teoreticky vypočítané závislosti velice přesně odpovídají naměřeným hodnotám.



**Obr. 33:** Vypočítané závislosti rychlosti leptání křemíku a rezistu PMMA při plazmatickém leptání směsí  $CF_4+O_2$  na výkonu

### 3 Výsledky experimentů, diskuze

Srovnání výsledků leptání vodným roztokem hydroxidu draselného je uvedeno v tab. 13.

**Tab. 13:** Srovnání výsledků leptání křemíku (100) 40%<sub>hm</sub> vodným roztokem KOH

Použité leptadlo	Teplota lázně	Rychlost leptání	Rychlost leptání s nativním oxidem	Rychlost leptání SiO <sub>2</sub>	Selektivita Si:SiO <sub>2</sub>	Drsnost povrchu
	$\vartheta$	$R_{\text{Si}<100>}$	$R_{\text{Si+SiO}_2<100>}$	$R_{\text{SiO}_2}$	–	$R_A$
	(°C)	( $\mu\text{m min}^{-1}$ )	( $\mu\text{m min}^{-1}$ )	( $\text{nm min}^{-1}$ )	(–)	(nm)
KOH-H <sub>2</sub> O 40% <sub>hm</sub>	40,0	0,10	0,04 - 0,09	0,6	167:1	18
KOH-H <sub>2</sub> O 40% <sub>hm</sub>	60,0	0,26	0,23 - 0,31	2,7	96:1	15
KOH-H <sub>2</sub> O 40% <sub>hm</sub>	80,0	0,86	0,80 - 0,88	18,5	46:1	9

Jestliže se nejdříve zaměříme na anizotropní leptání použitého křemíku, lze z naměřených výsledků vyvodit, že se stoupající teplotou leptací lázně roste rychlost leptání leptadlem KOH-H<sub>2</sub>O 40%<sub>hm</sub> ve směru [100], a to podle následující vypočítané závislosti:

$$R_{<100>} = 0,0538 e^{0,0116\vartheta} \mu\text{m min}^{-1}. \quad (43)$$

Zároveň klesá vliv vrstvy nativního oxidu na výslednou rychlost leptání. Dále se vzrůstající teplotou roste rychlost leptání oxidové masky a klesá selektivita leptání Si:SiO<sub>2</sub>. U nejvyšší teploty bylo ovšem dosaženo vyšší selektivity, než se uvádí v literatuře. Se vzrůstající teplotou se snižuje i drsnost povrchu a ten se stává hladším. Během leptání nebylo zjištěno měřitelné podleptání oxidové masky. Aby došlo k určitému podleptání, muselo by leptání probíhat mnohem delší dobu. Oxid SiO<sub>2</sub> se projevil jako dostatečně dobrý maskovací materiál pro použité leptadlo v rozsahu teplot 40 – 80°C. Jestliže se tedy má provést anizotropní leptání 40%<sub>hm</sub> vodným roztokem KOH, volí se teplota podle předpokládané hloubky leptu (s tím souvisí tloušťka oxidové masky a selektivita leptání) a požadované drsnosti povrchu. Důležitým parametrem je i řízení celého procesu. Vzhledem k nepřiliš vysokým rychlostem leptání pro zkoumaný rozsah teplot je procese anizotropního leptání velmi dobře říditelný pro všechny teploty.

Zařízení na plazmatické leptání DIENER nano bylo úspěšně uvedeno do provozu. Měřením bylo zjištěno vhodné uložení substrátů v leptací komoře během leptání, a to v jedné třetině výšky leptací komory. Dále proběhlo měření leptání kyslíkové plazmy a plazmy CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub>. V tab. 14 jsou uvedeny výsledky leptání rezistu kyslíkovou plazmou v zařízení DIENER nano.

**Tab. 14:** Srovnání výsledků leptání rezistu PMMA kyslíkovou plazmou v zařízení DIENER nano

Leptací plyn	Výkon	Tlak	Průtok plynu	Rychlost leptání
	$P$ (W)	$p$ (Pa)	$Q$ (sccm)	$R_{PMMA}$ (nm min <sup>-1</sup> )
O <sub>2</sub>	250	20	22	15,0 - 20,7
O <sub>2</sub>	250	25	30	12,7 - 18,0
O <sub>2</sub>	250	30	38	11,0 - 15,0
O <sub>2</sub>	250	35	48	6,0 - 8,3
O <sub>2</sub>	250	40	53	6,3 - 7,3
O <sub>2</sub>	250	40	53	6,6
O <sub>2</sub>	500	40	53	11,3
O <sub>2</sub>	750	40	53	14,2

Měřením leptání rezistu PMMA při různém tlaku se stanovila vhodná hodnota tlaku (40 Pa) potřebného k leptání kyslíkovou plazmou. S klesajícím tlakem dochází i k poklesu leptací rychlosti rezistu PMMA, ale výsledky leptání byly nehomogennější. Při tomto tlaku byla pozorována i největší stabilita plazmatického výboje bez nežádoucí periodické změny intenzity jasu. Z naměřených výsledků dále vyplývá, že se vzrůstajícím výkonem dochází k růstu leptací rychlosti podle vypočítané závislosti:

$$R_{PMMA} = 6,918 \ln(P) - 31,597 \text{ nm min}^{-1}. \quad (49)$$

Pro měřené časy leptání a rozsah měřených výkonů se neprokázal znatelný vliv teploty na rychlost leptání rezistu PMMA kyslíkovou plazmou. Se vzrůstajícím výkonem mírně klesá homogenita leptání. Pro leptání po operaci vyvolávání, aby se odstranily rezistové zbytky na odhalených plochách substrátu, se pomocí dosažených výsledků doporučují následující parametry leptání kyslíkovou plazmou:

$P = 250 \text{ W}$ ;  $p = 40 \text{ Pa}$ ;  $Q = 53 \text{ sccm}$ ;  $t = (3 \text{ až } 5) + 3 \text{ min}$ .

Pro čištění substrátů za účelem odstranění celé rezistové vrstvy se doporučují následující parametry:

$P = 750 \text{ až } 1000 \text{ W}$ ;  $p = 40 \text{ Pa}$ ;  $Q = 53 \text{ sccm}$ ;  $t = 30 + 3 \text{ min}$ ; s případným opakováním podle potřeby.

V tab. 15 jsou uvedeny výsledky plazmatického leptání křemíku směsí CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub>.

**Tab. 15:** Srovnání výsledků plazmatického leptání křemíku směsí CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub> v zařízení DIENER nano

Pracovní plyn	Výkon	Tlak	Průtok	Rychlost leptání křemíku	Rychlost leptání PMMA	Selektivita Si:PMMA	Drsnost povrchu	Podleptání
	<i>P</i>	<i>p</i>	<i>Q</i>	<i>R</i> <sub>Si</sub>	<i>R</i> <sub>PMMA</sub>	–	<i>R</i> <sub>A</sub>	$\frac{a - a_0}{2}$
	(W)	(Pa)	(sccm)	(nm min <sup>-1</sup> )	(nm min <sup>-1</sup> )	(–)	(nm)	(nm)
CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub>	500	40	34	30,7	1,9	16:1	2,7	0,90
CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub>	500	35	26	39,9	2,9	14:1	4,9	1,00
CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub>	500	30	20	52,5	3,6	15:1	9,1	1,00
CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub>	250	30	20	18,4	1,4	13:1	7,7	0,54 - 0,62
CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub>	500	30	20	46,7	2,6	16:1	10,2 - 18,8	0,49 - 0,73
CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub>	750	30	20	68,2	3,3	21:1	10,5 - 22,0	0,50 - 0,78

Nejdříve se opět stanovil vhodný tlak na leptání směsí CF<sub>4</sub>+O<sub>2</sub> (30 Pa). Při leptání touto směsí s klesajícím tlakem roste rychlost leptání křemíku i rezistu PMMA, ale selektivita je zachována, proto se vybraný tlak jeví jako nejvhodnější. Stejně tak naměřené výsledky v několika krocích byly podobnější než pro jiné hodnoty tlaku. Dále bylo zjištěno, že se vzrůstajícím tlakem klesá drsnost povrchu vyleptané struktury. Drsnost je zároveň závislá i na výkonu (se vzrůstajícím výkonem drsnost také vzrůstá) a na výsledné hloubce leptu (čím větší hloubka, tím větší drsnost). Co se týče podleptání, tak to je závislé na několika faktorech. Z naměřených výsledků vyplývá, že se vzrůstající hloubkou výsledného leptu dochází ke zvyšování míry podleptání. Míra podleptání je závislá i na výchozí tloušťce rezistové masky. Jestliže byla rezistová maska na začátku leptání tenčí, tak míra podleptání je vyšší. Pomocí předpokládané hloubky leptu a známé míry podleptání pro danou hloubku se dá i přibližně stanovit dosažitelné rozlišení. Z naměřených výsledků se vypočítaly závislosti rychlosti leptání rezistu PMMA a křemíku na výkonu:

$$R_{\text{PMMA}} = 1,729 \cdot \ln(P) - 8,147 \text{ nm min}^{-1}. \quad (57)$$

$$R_{\text{Si}} = -5,44 \cdot 10^{-5} P^2 + 0,154 P - 16,7 \text{ nm min}^{-1}. \quad (65)$$

Se zvyšujícím se výkonem stoupá i rychlost leptání křemíku a rezistu PMMA a zvyšuje se selektivita leptání. Homogenita byla u všech měřených výkonů přibližně stejná. Nebyl zjištěn vliv teploty na průběh leptání pro měřené doby leptání. Během měření bylo pozorováno několik zvláštních úkazů. Pro každý výkon se vždy alespoň u jednoho kroku naměřily hodnoty, které nekorespondovaly se zbývajícím trendem leptání. Tento úkaz nebyl vysvětlen a nedá se žádným způsobem předpovídat. Dále u leptání každého vzorku se podobný úkaz stával při prvním kroku leptání. V tomto případě lze úkaz vysvětlit maskovacím vlivem vrstvy nativního oxidu. Nastavení jednotlivých parametrů plazmatického leptání závisí na typu konkrétní leptané struktury (tvar, požadovaná hloubka, rozlišení,...). Nicméně pro každé

leptání lze stanovit několik zásad, které je vhodné při leptání dodržet (podrobněji byly vysvětleny již v kapitole 2.8.1):

- Promíchání bomby se směsí plynu před každým leptáním.
- Dodržování doporučené doby proplachu pracovním plynem při nulovém výkonu.
- Pravidelné čištění komory izopropylalkoholem a následné čištění kyslíkovou plazmou.
- Počítat s proměnlivými výsledky během prvního kroku leptání.

## 4 Závěr

V této práci jsem se seznámil s procesy leptání křemíku. Konkrétně s anizotropním mokrým leptáním vodným roztokem hydroxidu draselného a suchým plazmatickým leptáním směsí  $\text{CF}_4+\text{O}_2$ . Kromě leptání křemíku jsem se zabýval i leptáním rezistu PMMA kyslíkovou plazmou. K samotným procesům leptání patří i další přípravné a pomocné práce, které jsem si v průběhu vypracování práce osvojil. Jmenovitě šlo o přípravu křemíkových substrátů, přípravu leptacích masek (zhotovených z rezistu PMMA a oxidu křemíku) a proces elektronové litografie.

V praktické části jsem se zabýval leptáním křemíku (100) 40%<sub>hm</sub> vodným roztokem hydroxidu draselného při různých teplotách leptací lázně. Stanovil jsem závislost rychlosti leptání na teplotě leptací lázně a ověřil, že výsledky korespondují s teoretickými předpoklady. Kromě rychlosti leptání křemíku byly stanoveny i další parametry, jako rychlost leptání maskovacího materiálu, selektivita leptání a drsnost povrchu vyleptaných struktur.

Úspěšně jsem uvedl do provozu zařízení na plazmatické leptání DIENER nano, které, jak se potvrdilo, velice dobře nahradí poruchové zařízení na plazmatické leptání TESLA 214 VT. Nejdříve jsem určil nejvhodnější uložení vzorků v leptací komoře během plazmatického leptání. V zařízení DIENER nano jsem proměřil rychlost leptání rezistu PMMA kyslíkovou plazmou v závislosti na tlaku pracovního plynu a stanovil jsem závislost rychlosti leptání rezistu PMMA na aplikovaném výkonu. Naměřené výsledky opět vedly ke stanovení doporučení pro různé leptací operace při leptání kyslíkovou plazmou v zařízení DIENER nano. V zařízení DIENER nano jsem testoval i leptání křemíku směsí  $\text{CF}_4+\text{O}_2$ . Určil jsem nejvhodnější tlak pracovního plynu pro leptání křemíku a stanovil jsem závislost rychlosti leptání křemíku a rezistu PMMA na aplikovaném výkonu. Stanovil jsem i další parametry, podobně jako u procesu anizotropního leptání. Dále jsem stanovil zásady, které je nutno dodržovat při leptání v tomto zařízení, aby prováděné operace proběhly pokud možno bez výrazných komplikací.

K měření a vyhodnocení všech leptaných struktur jsem používal následující zařízení: kontaktní profilometr, konfokální laserový mikroskop, mikroskop atomárních sil a elektronový rastrovací mikroskop.

Výsledky této práce by měly posloužit jako podklady k praktickému využití při tvorbě mikrostruktur přesných rozměrů v křemíku (mokrý anizotropní leptání) a hlubokých reliéfních struktur (plazmatické leptání).

Nabízí se i několik možností, jak by se dalo na výsledky této práce navázat a pokračovat dále ve zdokonalování a zkoumání možností v technologii leptání křemíku. Zmínil bych například

možnosti využití suchých leptacích procesů při tvorbě leptacích masek zhotovených z oxidu křemíku a využití nových pracovních plynů pro plazmatické leptání křemíku (např. SF<sub>6</sub>).

## 5 Seznam použitých zdrojů

- [1] Clarycon. *Capacitive and Inductive Coupling* [online]. 2004 [citováno 2012-04-10]. Dostupné z: <<http://www.clarycon.com/plasmacoupling2.html>>.
- [2] CUI, T. *Dry Etching* [online]. 2009 (citováno 2012-03-27). Dostupné z: <[http://mems.caltech.edu/courses/EE185/03\\_a%20Dry%20etching.pdf](http://mems.caltech.edu/courses/EE185/03_a%20Dry%20etching.pdf)>.
- [3] CUI, Z. *Nanofabrication: Principles, Capabilities and Limits*. 1. vyd. New York: Springer Science + Business Media, LLC, 2008. 343 s. ISBN 978-0-387-75576-2.
- [4] Diener electronic. *Plasma systems NANO* [online]. 2009 [citování 2012-05-01]. Dostupné z: <<http://www.plasma.de/en/plasmasystems/nano.html>>.
- [5] FLACHSBART, Bruce R. Lecture 14 – Etching Models. In: *Mechanical Science and Engineering* [online]. 2010-10-12 [citováno 2012-03-21]. Dostupné z: <[http://mechse.illinois.edu/media/uploads/course\\_websites/lecture\\_14\\_-\\_etching\\_models.20101012.4cb4c5b5488736.79199211.ppt](http://mechse.illinois.edu/media/uploads/course_websites/lecture_14_-_etching_models.20101012.4cb4c5b5488736.79199211.ppt)>.
- [6] FRIDMAN, A. *Plasma Chemistry* [online]. 1. vyd. New York: Cambridge University Press, 2009 [citováno 2012-04-15]. 978 s. ISBN 978-0-521-84735-3. Dostupné z: <[http://books.google.cz/books?id=ZzmtGEHCC9MC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.cz/books?id=ZzmtGEHCC9MC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)>.
- [7] GHODSSI, R., PINYEN, L. *MEMS Materiále and Processes Handbook* [online]. 1. vyd. New York: Springer Science + Business Media, LCC, 2011 [citováno 2012-04-15]. 1188 s. ISBN 978-0-387-47316-1. Dostupné z: <[http://books.google.cz/books?id=brkBFk1MH10C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.cz/books?id=brkBFk1MH10C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)>.
- [8] HÜTTEL, I. *Technologie materiálů pro elektroniku a optoelektroniku*. 1. vyd. Praha: VŠCHT v Praze, 2000. 200 s. ISBN 80-7080-387-8.
- [9] JAEGER, Richard C. *Introduction to Microelectronic Fabrication*. 2. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 332 s. ISBN: 0-201-44494-7.
- [10] MADOU, Marc J. *Fundamentals of microfabrication: The Science of Miniaturization*. 2. vyd. Boca Raton: CRC Press LLC, 2002. 723 s. ISBN 0-8493-0826-7.
- [11] MATĚJKA, F. *Technologie anizotropního leptání monokrystalického křemíku* [Interní zpráva ÚPT AV ČR]. 2007.
- [12] MATĚJKA, F., BRZOBOHATÝ, J. *Technologie materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 168 s.

- [13] MIKULČÁK, J., CHARVÁT, J., MACHÁČEK, M. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. Dotisk 1. vyd. Praha: Prometheus s.r.o., 2007. 280 s. ISBN 978-80-7196-264-9.
- [14] PLUMMER, James D., DEAL, Michael D., GRIFFIN, Peter B. *Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling*. Ilustrované vyd. New Jersey: Dentice Hall, 2000. 817 s. ISBN 0130850373.
- [15] PROCESS SPECIALTIES INC. *Thermal Oxide* [online]. 1999 [citováno 2012-03-21]. Dostupné z: <<http://www.processspecialties.com/thermox.htm>>.
- [16] RACK, Philip D. *Plasma Etching Outline* [online]. 2002 [citováno 2012-04-15]. Dostupné z: <<http://web.utk.edu/~prack/Thin%20films/Etching.pdf>>.
- [17] SEIDEL, H., CSEPREGI, L., HEUBERGER, A. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions: I. Orientation Dependence and Behavior of Passivation Layers. *Journal of The Electrochemical Society*. 1990, roč. 137, č. 11. ISSN 0013-4651. Dostupné z: <<http://www.lmm.uni-saarland.de/content/stuff/lehrstuhl/publikationen/papers/JES003612.pdf>>.
- [18] STEWART, D., BECK, P., THUMSER, U. Growth of Native Oxide (with Cleans over Time). In: *Stanford Nanofabrication Facility: Processes* [online]. 2003-08-28 [citováno 2012-03-21]. Dostupné z: <<http://snf.stanford.edu/Process/Characterization/NativeOx.html>>.
- [19] WOLF, S., TAUBER, Richard N. *Silicon Processing for VLSI Era Vol. 1: Process Technology*. 1. vyd. Sunset Beach: Lattice Press, 1986. 661 s. ISBN 0-961672-3-7.

## **6 Seznam příloh**

- A Základní charakteristiky monokrystalického křemíku**
- B Zařízení na plazmatické leptání DIENER nano**
- C Zařízení na plazmatické leptání TESLA 214 VT**
- D Tabulky**
- E Grafické závislosti**
- F Snímky z konfokálního laserového mikroskopu OLYMPUS LEXT OLS 3100**
- G Snímky z mikroskopu atomárních sil AFM Nano-R Pacific Technology**
- H Snímky z elektronového rastrovacího mikroskopu JEOL JSM 6700F**
- I Snímky z elektronového rastrovacího mikroskopu FEI MAGELLAN 400**