



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## OPTIMALIZACE PROCESU HLOUBKOVÉHO REAKTIVNÍHO IONTOVÉHO LEPTÁNÍ

OPTIMIZATION OF DEEP REACTIVE ION ETCHING PROCESS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Houška

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Prášek, Ph.D.

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**  
Ústav mikroelektroniky

**Student:** David Houška

**ID:** 170858

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Optimalizace procesu hloubkového reaktivního iontového leptání

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s technologií mikroobrábění křemíkových desek pomocí hloubkového reaktivního iontového leptání. Na základě získaných znalostí navrhnete vhodnou testovací strukturu a provedte test leptání pomocí standardního Bosch procesu a kryogenního procesu. Zaměřte se na optimalizaci procesu s cílem dosáhnout co možná největšího poměru otvoru ku hloubce s maximální uniformností struktury. Dosažené výsledky vyhodnoťte pomocí rastrovací elektronové mikroskopie a porovnejte s výsledky udávanými v literatuře.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 30.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Prášek, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá optimalizací kryogenního a Bosch procesu hloubkového reaktivního iontového leptání (DRIE). V práci je shrnuta charakterizace leptacích metod křemíku, princip funkce DRIE a vliv jednotlivých parametrů na výsledný profil leptu. Na základě analýzy realizovaných vzorků pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM) byla provedena optimalizace obou jmenovaných procesů pro vytvoření úzkých děr s průměry 1 až 16  $\mu\text{m}$  s nejvyšším dosaženým poměrem hloubky ku šířce 28:1 na křemíkovém substrátu. Mimoto byla analyzována drsnost povrchu stěn struktur leptaných oběma procesy pomocí mikroskopie atomárních sil (AFM) a přítomnost fluorových reziduí pomocí rentgenové fotoelektronové spektroskopie (XPS).

## **Klíčová slova**

Suché leptání, leptání plazmatem, RIE, DRIE, ICP, kryogenní proces, Bosch proces

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with optimization of cryogenic and Bosch deep reactive ion etching (DRIE) processes. The thesis describes characterization of silicon etching methods, the principle of DRIE and the influence of individual parameters on the resulting etch profile. Based on the analysis of fabricated samples using scanning electron microscopy (SEM), both processes were optimized to create narrow holes with diameters ranging from 1 to 16  $\mu\text{m}$  with the highest achieved depth-to-width ratio of 28:1 on a silicon substrate. Furthermore, surface roughness was analyzed using atomic force microscopy (AFM) and the presence of fluorine residues by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) in structures etched by both processes.

## **Keywords**

Dry etching, plasma etching, RIE, DRIE, ICP, cryogenic process, Bosch process

HOUŠKA, David. *Optimalizace procesu hloubkového reaktivního iontového leptání*. Brno, 2019, 75 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Ing. Jan Prášek, Ph.D.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Práškoví, Ph.D. za přidělení této práce, ochotnému přístupu, a účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc.

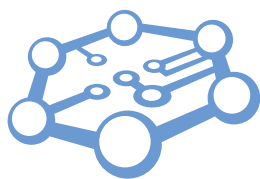
Dále bych rád poděkoval kolegům Bc. Patriku Zahálkovi, Ing. Janu Slavíkovi a Bc. Peterovi Feckovi za přínosné diskuze a cenné rady.

V poslední řadě bych rád poděkoval rodičům za jejich nesmírnou ochotu, trpělivost a neocenitelnou podporu. Nebyl bych dnes tam kde jsem nebýt Vás, a to v mnoha ohledech, nejen v těch zjevných.

V Brně dne 29. května 2019

.....

podpis autora



CEITEC  
NANO

Research Infrastructure  
BRNO | CZECH REPUBLIC

Experimentální část této práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury **CEITEC Nano** (ID LM2015041, MŠMT, 2016–2019), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



2007–13  
OP Výzkum a vývoj  
pro inovace

# Obsah

Úvod	1
<b>1 Charakterizace leptacích procesů pro křemík</b>	<b>2</b>
1.1 Maska	2
1.1.1 UV litografie	2
1.1.2 Litografie elektronovým svazkem	4
1.1.3 Litografie nanootiskem	5
1.1.4 Jiné maskovací techniky	6
1.2 Mokrý leptání	7
1.2.1 Hlavní aspekty anizotropního mokrého leptání	8
1.2.2 Běžná anizotropní leptadla	8
1.2.3 Výhody a použití mokrého leptání	9
1.3 Suché leptání	10
1.3.1 Leptání pomocí plynu	10
1.3.2 Plazmové leptání	10
1.3.3 Reaktivní iontové leptání	12
<b>2 Hlubkové reaktivní iontové leptání</b>	<b>14</b>
2.1 Chemické a fyzikální procesy u DRIE	14
2.1.1 Kryogenní proces	14
2.1.2 Bosch proces	16
2.2 Leptací aparatura	19
2.2.1 Chlazení waferu	19
2.2.2 Konfigurace zdrojů ICP	19
2.3 RIE lag a ARDE	21
2.4 Efekt zatížení	21
2.5 Efekt zařezávání	22
<b>3 Experimentální část</b>	<b>23</b>
3.1 Příprava vzorků k leptání	23
3.2 Příprava vzorků pro SEM analýzu	25
3.3 Optimalizace kryogenního procesu	26
3.3.1 Sledování vlivu teplotního šoku na kvalitu fotorezistu	26
3.3.2 Optimalizace výkonu zdroje CCP	26
3.3.3 Optimalizace celkového průtoku SF <sub>6</sub> +O <sub>2</sub>	28
3.3.4 Optimalizace výkonu zdroje ICP	29
3.3.5 Optimalizace poměru plynů SF <sub>6</sub> /O <sub>2</sub>	31
3.3.6 Rozdělení procesu na dvě fáze	33
3.3.7 Omezení „bottling“ efektu	34

3.3.8	Výsledný optimalizovaný proces .....	38
3.4	Optimalizace Bosch procesu .....	39
3.4.1	Výchozí parametry procesu.....	39
3.4.2	Vliv nastavené teploty komory .....	40
3.4.3	Optimalizace impedančního přizpůsobení .....	41
3.4.4	Optimalizace kroku depasivace.....	42
3.4.5	Rozdělení procesu na dvě a více fází .....	44
3.4.6	Výsledný optimalizovaný proces .....	50
3.5	Analýza uniformnosti povrchu leptaných struktur .....	50
3.5.1	Analýza drsnosti povrchu struktur pomocí AFM.....	50
3.5.2	Prvková analýza povrchu struktur pomocí XPS .....	54
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>59</b>
	<b>Reference</b>	<b>61</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>68</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>72</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>74</b>

# ÚVOD

V roce 1959 americký laureát nobelovy ceny Richard Feynman přednášel na téma „Dole je spousta místa“ („*There's Plenty of Room at the Bottom*“). Naznačoval tím možnost manipulace s jednotlivými atomy jako účinnější formu syntetické chemie. Dnes sice tak daleko nejsme, avšak díky neustálé miniaturizaci se Feynmanovu výroku milovými kroky blížíme. Velkým krokem byla mimo jiné miniaturizace elektromechanických systémů. Mezi první mikroelektromechanické systémy (MEMS) lze zařadit rezonistor patentovaný v roce 1971. V té době byly tyto systémy vytvářeny mokrým leptáním, které je však limitováno orientací krystalografické roviny leptaného materiálu.

V průběhu devadesátých let minulého století byl představen nový způsob leptání pomocí indukčně vázaného plazmatu (ICP). Tento způsob rychle vedl k vývoji techniky hlubkového reaktivního iontového leptání (DRIE) a našel své uplatnění mimo jiné právě při výrobě MEMS. DRIE nabídlo oproti tehdy dostupným technikám nevídanou rychlost leptání, vysokou selektivitu, snadné řízení profilu leptu nezávisle na krystalografii a vysoký poměr hloubky leptané struktury ku jeho šířce. [1-3]

Využití DRIE nekončí pouze u MEMS. Tato metoda leptání je v dnešní době běžně nasazována při výrobě MOS kapacitorů využívaných v pamětech DRAM. V náramkových hodinkách je pomocí DRIE možné vyrobít pružinky libovolného tvaru a ozubená kolečka s vysokou přesností. DRIE usnadňuje výrobu zavěšených struktur, torzních tyčí, nosníků a jiných mechanických elementů. Využívá se při vytváření otvorů skrze wafer. Dále je možné vytvářet rozličné mikroreaktory pro chemické reakce, separační systémy, kanálky libovolného tvaru, mikropumpy, kapilární ventily a mnohé, mnohé další. [1]

Obsahem této práce je v první kapitole stručné přiblížení procesů nutných při přípravě struktur na křemíkovém substrátu. Tyto procesy zahrnují přípravu motivu leptané struktury a samotné techniky leptání včetně techniky RIE.

V druhé kapitole se práce zabývá technikou DRIE včetně chemických procesů a leptacích aparatur. Jsou popsány dva DRIE procesy – kryogenní proces a Bosch proces. Obě techniky vyžadují rozdílný přístup k optimalizaci a nabízejí své určité výhody i nevýhody.

V experimentální části je v rámci první části třetí kapitoly charakterizován vliv nastavitelných parametrů obou procesů s následnou optimalizací pro vytvoření hlubokých děr s průměrem 1, 2, 4, 8 a 16  $\mu\text{m}$ . Zvýšená pozornost je věnována dířám s průměrem 2  $\mu\text{m}$ . Analýza leptaných vzorků probíhala pomocí rastrovací elektronové mikroskopie za účelem zjištění poměru stran a odhalení defektů leptaných struktur.

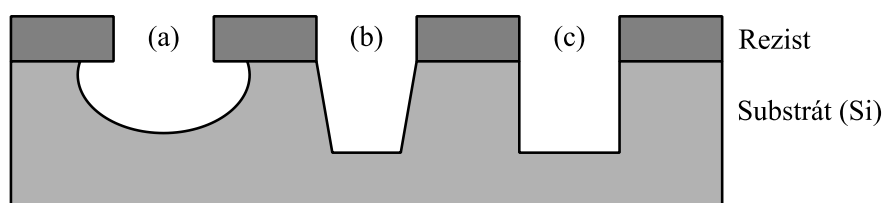
Dále je v rámci druhé části třetí kapitoly analyzována uniformnost leptaných struktur, a to sice drsnost povrchu mikroskopií atomárních sil a poměrné množství reziduí, resp. fluoru rentgenovou fotoelektronovou spektroskopií.

# 1 CHARAKTERIZACE LEPTACÍCH PROCESŮ PRO KŘEMÍK

Při vytváření struktur na křemíkovém waferu je nutné určité části leptat. Aby bylo dosaženo leptání pouze předem definovaných struktur, používá se maska, nejčastěji oxid křemičitý nebo polymerní fotorezist, která zakryté části waferu chrání před leptáním.

Leptací procesy se zpravidla dělí na izotropní a anizotropní. U izotropního leptání nezáleží na směru leptu, materiál je leptán ve všech směrech rovnoměrně. Naopak při izotropním leptání na směru leptu velmi záleží, tento fakt je způsoben buďto charakterem daného leptacího procesu, nebo orientací krystalové mřížky leptaného materiálu [4]. Na obr. 1.1 jsou zobrazeny tři možné způsoby leptu.

Jiným možným způsobem dělení leptacích procesů je dělení na tzv. mokré a suché. Mokré leptání využívá kapalných látek, které čistě chemickými procesy leptají povrch leptaného vzorku. Naproti tomu suché leptání zahrnuje buďto čistě fyzikální nebo chemický charakter procesu, nebo kombinaci obojího, leptání však vždy probíhá pomocí plynu nebo plazmatu, nejčastěji za sníženého tlaku [1].



**Obr. 1.1:** Ilustrace izotropního a anizotropního profilu leptu (převzato z [5]):

- (a) izotropní lept;
- (b) anizotropní lept se šikmými bočními stěnami;
- (c) anizotropní lept s kolmými bočními stěnami.

## 1.1 Maska

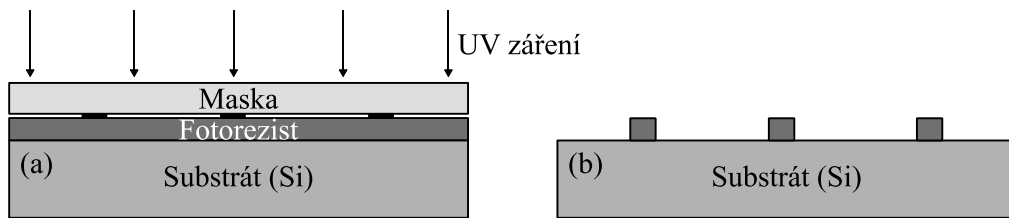
Maska je, až na některé výjimky (např. leptání iontovým svazkem, viz podkapitola 1.3.2), nezbytná k vytvoření žádané struktury na křemíkovém waferu. Způsobů, kterých lze při výrobě masky použít, je několik, v následujících podkapitolách jsou přiblíženy principy těch nejčastějších.

### 1.1.1 UV litografie

UV litografie je v dnešní době stále nejpoužívanější metoda přípravy masky. Na křemíkový substrát je nanášena tenká vrstva fotorezistu citlivého na UV záření, nejčastěji tzv. spin-coatingem, který spočívá v roztočení waferu na několik set až tisíc otáček za minutu a nanášení tekutého fotorezistu [5-7]. Odstředivou silou se fotorezist vyrovná a na waferu

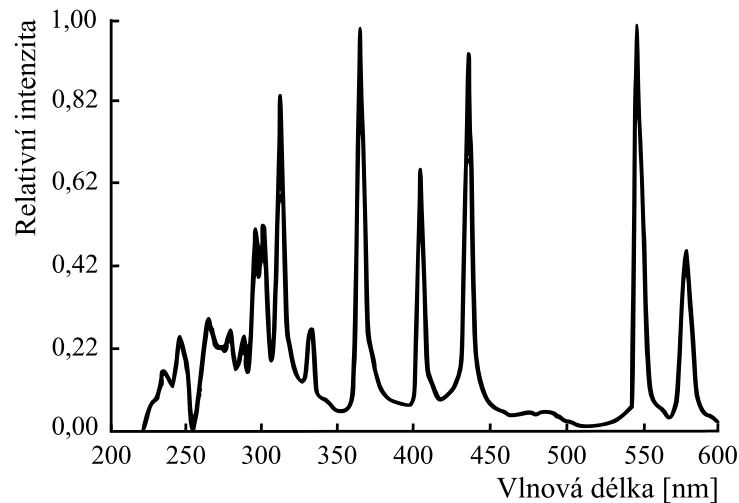
tak vytvoří vrstvu s homogenní tloušťkou – tloušťka se dá tedy nastavit dle velikosti odstředivé síly, resp. dle rychlosti otáčení. Na závěr se nanosený fotorezist suší.

Vysušený fotorezist je vystaven UV záření skrze masku z křemene s motivem vytvořeným na tenké vrstvě z chromu, na obr. 1.2 je ilustrován základní princip této metody. Typicky se k expozici používá rtuťová výbojka se špičkou intenzity záření v 436 nm, 405 nm, nebo 365 nm, viz obr. 1.3 [5,8]. Modernější litografické přístroje již pracují s 248 nm KrF, 193 nm ArF nebo 157 nm F<sub>2</sub> excimerovými lasery, čímž je dosaženo vyššího rozlišení motivu [9,10].



**Obr. 1.2:** UV litografie (převzato z [5]): (a) expozice UV zářením;  
(b) pozitivní fotorezist po aplikaci vývojky

Expozice UV zářením vyvolá chemické reakce, které v závislosti na typu fotorezistu vytvoří buďto pozitivní nebo negativní obraz masky. U pozitivního fotorezistu dochází při expozici k narušení polymerní struktury, exponovaná místa se tak jednoduše leptají. Naopak v případě negativního fotorezistu dochází během expozice k polymerizování, resp. k vytvrzení fotorezistu. Po expozici se fotorezist vyvolává v roztoku, nejčastěji v slabé zásadě. K přenosu motivu z masky na substrát se nejčastěji používá pozitivní fotorezist z důvodu vyššího rozlišení a jednoduššího odstranění. Naproti tomu negativní fotorezist je typicky mechanicky pevnější a jeho odstranění je tak náročnější. [5,11]



**Obr. 1.3:** Spektrum záření rtuťové výbojky (převzato z [8])

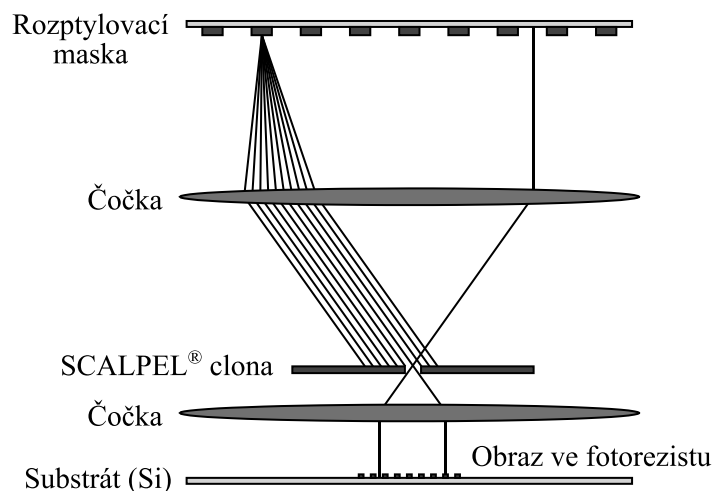
V dnešní době lze UV litografií připravit i velmi jemné struktury menší než je vlnová délka použitého záření díky využití Fresnelovy difrakce [12]. Například 157 nm F<sub>2</sub> excimerový laser byl původně plánován pro přípravu struktur s rozlišením až 70 nm, postupným zdokonalováním procesu však bylo dosaženo rozlišení až 32 nm [10,13].

Nejmodernější litografické procesy využívají zdrojů extrémního UV záření (124 nm až 10 nm) s dosažitelným rozlišením struktury pod 8 nm [14]. Setkávají se však s řadou problémů, mimo jiné s nutností použití výkonných laserů, použití reflektivního optického systému fokusace záření s vrstvenými zrcadly a se značnými ztrátami intenzity záření [10].

### 1.1.2 Litografie elektronovým svazkem

Jelikož je při použití konvenční optické litografie výroba masek s velmi jemným rozlišením velmi náročná, bylo nutné zavést jiné metody přípravy těchto masek. V nedávné době byl proveden značný progres týkající se litografie elektronovým svazkem (EBL). Využití elektronového svazku při litografických procesech má vícero uplatnění. Prvním z nich je tvorba fotomasky pro optickou litografii, viz podkapitola 1.1.1. EBL dále nalézá uplatnění například při přípravě prototypů křemíkových nanostruktur [5].

Svazkem lze tvořit struktury s rozlišením i pod 10 nm díky vysokému difrakčnímu limitu elektronů, nevýhodou je však časová náročnost procesu [15-17]. Metoda spočívá v expozici fotorezistu citlivého na elektrony (nejčastěji PMMA) buďto přesně zaměřeným svazkem, anebo projekcí masky obdobně jako je tomu u optické litografie [16,17]. V obou případech se však nepohybuje svazek, nýbrž maska a připevněný wafer, vysoká přesnost pohybu je umožněna interferometry [16]. Projekční metoda se k dnešnímu dni stále setkává s řadou problémů, mimo jiné například s nutností použití velmi tenké masky z důvodu nízké průchodnosti elektronů skrz pevné látky [17]. Schematický diagram jedné z projekčních metod známé též jako SCALPEL<sup>®</sup> je zobrazen na obr. 1.4.



**Obr. 1.4:** Projekční litografická metoda SCALPEL<sup>®</sup> (převzato z [18])

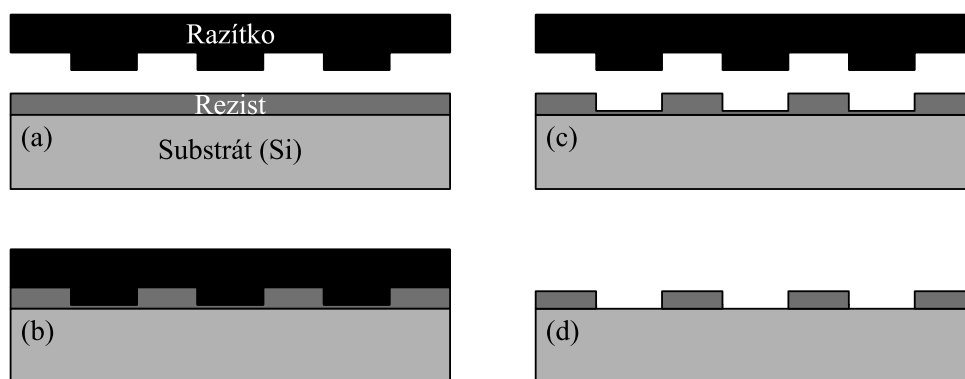
Komerční využití je stále velmi omezené, avšak vyskytují se různorodé aplikace, ve kterých EBL nalézá uplatnění – kromě výše zmíněných například při výrobě zákaznických integrovaných obvodů (ASIC) a vysokofrekvenčních zařízení v menším množství [17,19].

### 1.1.3 Litografie nanootiskem

Technika litografie nanootiskem (NIL) byla původně představena týmem Chou et al. v roce 1995 [20,21]. Je založena na principu používaném již několik desetiletí, mimo jiné například při výrobě kompaktních disků [20,21]. V některých odvětvích již konkuruje optické litografii díky své jednoduchosti, nízké finanční náročnosti a vysoké rychlosti celého procesu. [5,21]

Principem je použití razítka, viz ilustrace na obr. 1.5, které mechanicky tvaruje polymerní látku na substrátu. Metoda představená týmem Chou et al., tzv. teplotní NIL, využívá formy zhotovené z  $\text{SiO}_2$ , jako polymer se typicky používá PMMA. Tato kombinace zaručí, že se tenká vrstva polymeru při procesu nepřichytí k razítku, PMMA je navíc při změně teploty objemově stálý materiál. Razítko i polymer se zahřejí nad teplotu skelného přechodu  $T_G$  polymeru s dostatečnou rezervou (v případě PMMA  $T_G = 105 \text{ }^\circ\text{C}$ , razítko i polymer se zahřívají na teplotu kolem  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ); nad touto teplotou se polymer chová jako viskózní kapalina a pod tlakem tak může téct, resp. nechat se tvarovat. [20,21]

Razítko se přitlačí k vrstvě na substrátu, čímž dojde k vytvarování polymeru do požadovaného tvaru. V tomto stadiu procesu se obě části zchladí pod teplotu skelného přechodu  $T_G$  polymeru, čímž dojde ke ztuhnutí vrstvy polymeru a razítko se vyjme. Jelikož po tvarování vždy zůstane velmi tenký film PMMA, je substrát s vrstvou vystaven kyslíkovému plazmatu, které tenkou vrstvu filmu odleptá. Zbyde tak pouze požadovaná struktura motivu. Celý proces je ilustrován na obr. 1.5. [5,20,21]



**Obr. 1.5:** Proces litografie nanootiskem (převzato z [5]): (a–b) zahřáté razítko je přitlačeno k zahřátému termoplastickému polymeru na substrátu; (c) po vychladnutí je razítko odděleno; (d) výsledná maska po odstranění zbylého nežádoucího filmu polymeru kyslíkovým plazmatem

Obdobným způsobem lze využít ultrafialového záření k vytvrzení polymeru v technice tzv. UV-NIL. V tomto případě je vrstva rezistu nanášena ve formě kapaliny. Je však třeba zohlednit nízkou viskozitu tohoto rezistu a potřebu použití razítka opticky propustného v oblasti UV záření [5,22]. Této technice se v dnešní době věnuje značná část výzkumu v akademické, ale i v komerční sféře.

Typická tloušťka nanášené vrstvy polymeru se liší v rozsahu řádově desítek až stovek nanometrů v závislosti na rozlišení výsledného motivu. Důležitým parametrem je také přítlak formy, který se v případě teplotní NIL pohybuje kolem 13 MPa. [20,21]

Výhodou oproti konvenčním litografickým metodám je ostrost a hladkost výsledné vrstvy rezistu. NIL metoda navíc není omezená difrakčním limitem energetického svazku. Další nespornou výhodou je nízká cena, jelikož není zapotřebí sofistikovaného aparátu k zaměření energetického svazku, jako je tomu u běžnějších litografických metod. Navíc je možné zpracovávat relativně velkou plochu najednou, čímž klesá časová náročnost procesu. [21]

Touto metodou již byly demonstrovány i 3D struktury s rozlišením 5 nm, což z ní v kombinaci s nízkou cenou činí konkurenceschopnou techniku konvenčních litografických metod. Je však třeba zdůraznit, že nikdy nebyla plánována jako next-gen litografie a dnes tak nalézá uplatnění v oblastech, ve kterých Moorův zákon nehraje značnou roli. Příkladem dnešního využití NIL jsou senzory, biočipy, polymerní LED, nano-optická zařízení a další. [22]

#### 1.1.4 Jiné maskovací techniky

Existuje řada dalších, v praxi méně používaných litografických metod. V této podkapitole jsou stroze shrnuty dva příklady.

##### **Litografie nanokuličkami**

Tato technika, původně představena již na začátku osmdesátých let, využívá polystyrenových nanokuliček, které se elektrostaticky seskupí do jedné uniformní vrstvy. Následně lze substrát s maskou z nanokuliček leptat, nebo lze deponovat určité materiály. Velkou nevýhodou je však špatné řízení výsledného seskupení kuliček a častý výskyt defektů. Často je pro tuto techniku používán také výraz koloidní litografie. [23,24]

##### **Bloková kopolymerová litografie**

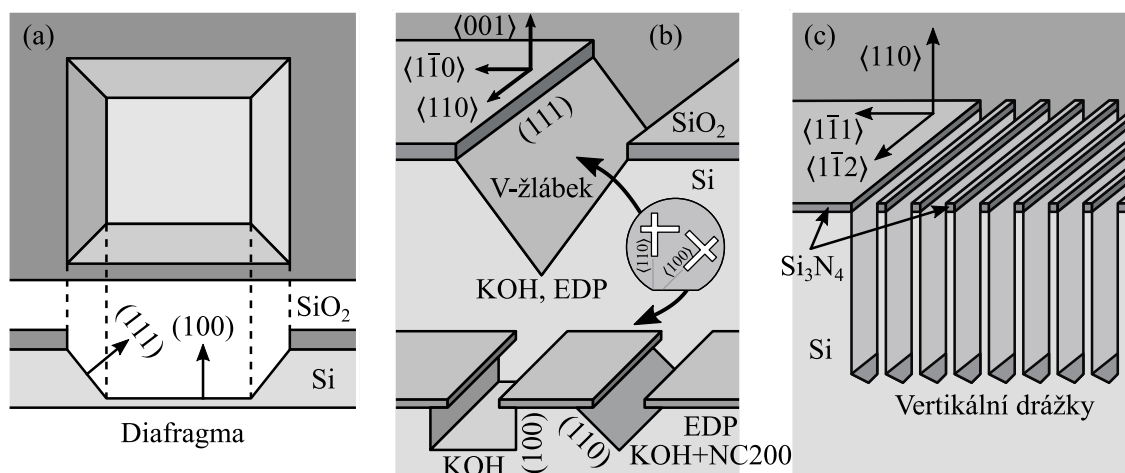
Použití blokových kopolymerů k přípravě masky je založeno, obdobně jako u nanokuliček, na seskupení použitého materiálu do požadované struktury. Kopolymer je polymer sestávající se z alespoň dvou různých monomerů, blokový kopolymer je potom polymer, v jehož molekulách jsou bloky monomerů uspořádány lineárně, tj. -AAAA-BBBB- [25].

V závislosti na morfologii jsou kopolymery schopny tvořit pilíře, díry, žlaby, lamely, nebo složitější struktury jako například hexagonální válce a gyroidní struktury [26]. Výsledná struktura je kromě leptací masky vhodná také pro následnou depozici různých materiálů a tvorbu dalších, složitějších struktur [27]. Podobně jako u polystyrenových nanokuliček je však řízení morfologie problematické. Navíc je pro dosažení seskupení zapotřebí tepelného zpracování trvajícího několik hodin, což limituje použití blokových kopolymerů v komerčních aplikacích [28].

## 1.2 Mokrý leptání

Mokrý leptání je založeno na použití zásaditého nebo kyselého roztoku k chemickému odstranění materiálu z povrchu vzorku. Velmi záleží na rozpustnosti výsledného produktu chemické reakce v leptadle. K leptání křemíku se nejčastěji používají hydroxid sodný (KOH) [29], hydroxid tetramethylamonný (TMAH) [30], nebo ethylendiamin pyrokatechol (EDP) [31]. Jelikož tyto chemikálie leptají polymerní rezisty, je nutné použít odolnější materiály – nejčastěji  $\text{SiO}_2$  nebo  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [29].

Ačkoliv je tato metoda obecně izotropní, dají se mokrým leptáním vytvářet struktury anizotropně, k čemuž se využívá orientací krystalografických rovin křemíku. Dají se tak vytvářet například V-žlábků na  $\text{Si}\langle 100 \rangle$  a hluboké vertikální drážky na  $\text{Si}\langle 110 \rangle$  [31], viz obr. 1.6. Principem této metody, tzv. fazetování, je leptání určitých rovin pomaleji než rovin jiných. Důvodem jsou buďto silnější atomové vazby v některých rovinách, nebo vyšší počet těchto atomů. Výsledkem anizotropního mokrého leptání jsou hladké a lesklé fazety. Díky této technice je možné vyrábět komplexní struktury při zachování nízkých nákladů a vysoké preciznosti. [32]



**Obr. 1.6:** Anizotropní mokré leptání (převzato z [32]): (a) diafragma a (b) V-žlábek na  $\text{Si}\langle 100 \rangle$ ; (c) vertikální drážky na  $\text{Si}\langle 110 \rangle$

### 1.2.1 Hlavní aspekty anizotropního mokrého leptání

Hlavními aspekty mokrého leptání jsou selektivita (tedy poměr rychlosti leptání leptaného materiálu vůči rychlosti leptání masky), seřízení masky vůči krystalové rovině a způsob přerušování procesu v požadovaný okamžik. Za nejdůležitější aspekt se však dá považovat selektivitu. Křemík se dá anizotropně leptat látkami jako například NaOH, KOH, LiOH, CsOH, RbOH, NH<sub>4</sub>OH, EDP, TMAH, hydrazin atd., avšak pouze KOH, EDP a TMAH poskytují dostatečnou selektivitu vůči rozličným materiálům používaným při přípravě masek. [32]

Další zmiňovaný aspekt, seřízení masky vůči krystalové rovině, je při anizotropním mokrého leptání taktéž důležitý, jelikož při špatném seřízení dochází k podleptávání. Dnešní litografická zařízení jsou však dostatečně přesná a k podleptávání by tak nemělo docházet. [32,33]

Zastavení leptání se dá provést několika způsoby. Jednoznačně nejjednodušším způsobem je vyjmutí leptaného vzorku z leptací lázně. Sofistikovanější metody se spoléhají na leptání až k vrstvě materiálu, které dané leptadlo leptá jen těžko [4,34,35]. Například metoda elektrochemické pasivace využívá napětí z externího zdroje, kterým se v požadovaný moment na křemíkovém vzorku vytvoří vrstva nativního oxidu [36]. Podobného efektu lze dosáhnout použitím vrstvy křemíku vysoce dopovaného borem ( $>2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ). Leptání automaticky skončí, když leptadlo narazí na tuto vrstvu [30,35,37].

### 1.2.2 Běžná anizotropní leptadla

Jak již bylo uvedeno, křemík se dá leptat rozličnými anizotropními leptadly, avšak pouze KOH, EDP a TMAH poskytují dostatečnou selektivitu leptaného materiálu vůči masce. [29,32]

#### **Ethylendiamin pyrokatechol**

EDP, nebo také EDA (EthylenDiAmin), byl hojně používán v sedmdesátých a osmdesátých letech a na začátku let devadesátých [4,29,31]. Leptání se dá při použití EDP maskovat např. pomocí SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Au, Cr, Ag, Cu a Ta. Poměr leptání rovin  $\langle 100 \rangle : \langle 111 \rangle$  činí přibližně 17:1 až 35:1 v závislosti na koncentraci a teplotě [29]. Díky absenci draslíku nebo sodíku je vhodný pro vytváření MOS/CMOS [31]. Dnes je však při výrobě mikroelektroniky zakázán z důvodů vysoké toxicity. Mezi další nevýhody lze zařadit vysokou korozivitu a rychlé stárnutí chemikálie. [32]

### **Hydroxid draselný**

Při použití KOH se dá leptání maskovat materiály  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Cr a Au. Ačkoliv je selektivita při použití  $\text{SiO}_2$  malá (~100), je velmi dobrá při použití  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (~1000). KOH je netoxický, jednoduchý na používání a poskytuje výborné profily leptu. Poměr leptání rovin  $\langle 110 \rangle : \langle 100 \rangle : \langle 111 \rangle$  činí přibližně 160:80:1 při 35 w% a 70 °C – poměry se výrazně liší při rozdílné koncentraci a teplotě. Například při vysoce koncentrovaném roztoku KOH 55 w% byl zaznamenán poměr leptání rovin  $\langle 110 \rangle : \langle 111 \rangle$  až 500:1 [29]. Z důvodu obsahu draslíku se však KOH nehodí pro MOS/CMOS technologie. [32]

### **Hydroxid tetramethylamonný**

Hydroxid tetramethylamonný (TMAH) s chemickým vzorcem  $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ , je relativně netoxická, čirá, bezbarvá nebo světle žlutá kapalina jednoduchá na používání a kompatibilní s MOS a CMOS. Leptání se dá při použití TMAH maskovat  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Cr a Au. Poměr leptání rovin  $\langle 110 \rangle : \langle 100 \rangle : \langle 111 \rangle$  činí přibližně 70:35:1 při 20 w% a 80 °C, obdobně jako u ostatních anizotropních leptadel však poměry velmi závisí na použité koncentraci a teplotě. Například při 22 w% a 90 °C bylo dosaženo poměru leptání rovin  $\langle 100 \rangle : \langle 111 \rangle$  až 50:1 [30]. Oproti KOH je tento poměr stále malý, výhodou je však vyšší selektivita Si vůči  $\text{SiO}_2$  a výše zmíněná kompatibilita s MOS a CMOS. [32]

### **1.2.3 Výhody a použití mokrého leptání**

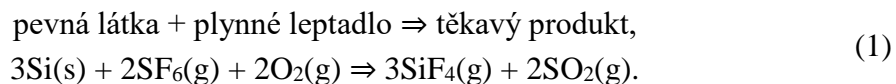
V nedávné době do techniky leptání pronikly alternativní technologie jako například reaktivní iontové leptání. Nicméně tyto technologie jsou omezeny vyšší cenou procesu a limitací zpracování vyššího množství najednou. Mokré leptání je tak v dnešní době stále dominantní technikou. Pokud se dá struktura vytvořit mokřím leptáním, obvykle je tak učiněno.

Preference mokrého leptání je způsobena také faktem, že se touto technikou dosahuje velmi hladkých povrchů a přesných úhlů mezi fazetami [38]. Izotropní mokré leptání je vyžadováno při podleptání některých zavěšených struktur [39]. Dále lze zmínit čištění a přípravu povrchů vzorků pomocí této metody.

Pomocí mokrého leptání se vytvářejí například mikrozrcadla nebo struktury aktuátorů a senzorů tlaku, zrychlení, průtoku nebo úhlové rychlosti. Dále struktury s nanometrovým rozlišením jako například nanosondy, nanodráty, nanokanály a mnohé, mnohé další. [29,32]

## 1.3 Suché leptání

U mokrého leptání záleží na rozpustnosti leptaného materiálu v leptadle, u suchého leptání pak na těkavosti. Zjednodušený zápis s názorným příkladem lze zapsat jako [1]



### 1.3.1 Leptání pomocí plynu

Leptání pomocí plynu má své výhody. Není zapotřebí excitace plynu, čímž výrazně stoupá selektivita a klesají náklady na provoz. Přestože jsou tyto plyny v praxi obecně hojně využívané například při přípravě MEMS, jsou v následujících odstavcích stručně shrnuty pouze dva příklady nejpoužívanějších leptacích plynů – fluoridu xenonového a fluoridu chloritového. [40,41]

#### Fluorid xenonový

Fluorid xenonový ( $\text{XeF}_2$ ) je za pokojové teploty a atmosférického tlaku bílá, krystalická látka, která však sublimuje při tlaku syté páry  $\sim 3,8\text{--}4,0$  Torr při  $25^\circ\text{C}$  [40,42,43]. Jeho velmi slibnou výhodou je vysoká leptací rychlost křemíku dosahující až desítek mikrometrů za minutu (na ploše několika milimetrů čtverečních) [43].

Má však i své nevýhody – na rozdíl od mokrého leptání nelze využít krystalografických rovin materiálu k dosažení anizotropie procesu [40]. Hodí se tedy pouze tam, kde je žádaná izotropie leptu.  $\text{XeF}_2$  je navíc poměrně drahý materiál a není tak předurčen k leptání v masové výrobě [40,42].

#### Fluorid chloritový

Fluorid chloritový ( $\text{ClF}_3$ ) je za pokojové teploty a atmosférického tlaku bezbarvý, jedovatý a vysoce reaktivní plyn [44]. Neleptá oxid křemičitý, hliník ani nerezovou ocel, tyto materiály tak lze použít jako masku, resp. materiál reakční komory.  $\text{ClF}_3$  má oproti fluoridu xenonovému velmi dobrý tlak syté páry  $\sim 1140$  Torr (1,5 atm) při  $20^\circ\text{C}$ . Dá se využít k leptání křemíku, více se však uplatňuje při čištění aparátu CVD. [45,46]

### 1.3.2 Plazmové leptání

Leptání plazmatem lze rozdělit do třech hlavních kategorií: leptání iontovým svazkem, chemické leptání plazmatem a reaktivní iontové leptání. Ačkoliv reaktivní iontové leptání kategoricky zapadá do této podkapitoly, je mu z důvodu úzké souvislosti s hloubkovým reaktivním iontovým leptáním podrobněji věnována samostatná podkapitola 1.3.3.

### **Leptání iontovým svazkem**

Často neexistují alternativní chemická leptadla, v takových případech se využívá odprašování svazkem iontů (IBE). Tento svazek vytváří zužující se profil leptu, viz obr. 1.1(b). Selektivita je velmi malá. Odprášený materiál má tendenci usazovat se na opracovávaném materiálu, celý proces se tak za účelem minimalizování tohoto efektu provádí za sníženého tlaku ( $<1$  mTorr). Nejčastěji je využíváno iontů argonu nebo galia [1]. Jelikož je tvorba plazmatu při tomto tlaku náročná, je toto plazma tvořeno v samostatné odlehle komoře, ze které jsou následně ionty elektrostaticky odsávány. [2]

Leptací rychlost je velice chabá (typicky 1–30 nm za minutu), IBE se tak používá výhradně při výrobě prototypů nanostruktur [1,2]. Občas se ke zvýšení leptací rychlosti do reaktoru vhání reaktivní plyny, například fluor nebo chlor, takový proces je pak označován jako CAIBE (chemicky doprovázené leptání iontovým svazkem) [1,2]. Aditivní reaktivní plyn způsobuje chemické reakce, stále však dominuje odprašování svazkem iontů, tedy fyzikální mechanismus [1].

### **Chemické leptání plazmatem**

U chemického leptání plazmatem je toto plazma excitováno mikrovlnami. Charakterizujícím znakem je minimální vliv odprašování ionty a čistě chemický mechanismus leptání. Využívá se látek běžně využívaných při plynném leptání, tedy například  $\text{XeF}_2$ ,  $\text{F}_2$  a  $\text{Cl}_2$ . Tyto excitované plyny reagují s křemíkem, obdobně jako u plynného leptání, za vzniku volatilních molekul (například  $\text{SiF}_4$  nebo  $\text{SiCl}_4$ ). Bylo zjištěno, že excitovaný fluorid xenonátý reaguje za vzniku volatilních molekul i se sloučeninami  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$  a  $\text{SiC}$ . Tyto látky nereagují s neexcitovaným  $\text{XeF}_2$ . [47]

Selektivita je zde výrazně vyšší než u IBE, resp. CAIBE, dosaženo je i vysoké rychlosti leptání. U aparátu využívajícího chemického leptání lze použít buďto symetrické, nebo asymetrické paralelní desky reaktoru. U symetrického systému nedochází kvůli totožným plochám desek k akumulaci náboje na těchto deskách. Naopak u asymetrického systému k akumulaci náboje dochází. Elektroda s větší plochou a přichyceným waferem je připojena ke zdroji RF, zatímco menší elektroda je zemnicí. Tímto systémem je dosaženo vysokého potenciálu napájené elektrody vůči zemi a prakticky totožného potenciálu vůči generovaného plazmatu. Důsledkem je nízké odprašování ionty v oblasti napájené elektrody – ionty jsou urychlovány k zemnicí elektrodě. Nevýhodou je však možná kontaminace waferu materiálem odprášeným ze zemnicí elektrody. Proces je izotropní, využíván je tak zejména při stripování fotorezistu a v jiných aplikacích, kde je zapotřebí vysoké selektivity a nezáleží na směru leptu. [2]

### 1.3.3 Reaktivní iontové leptání

Reaktivní iontové leptání (RIE) je nerozšířenější metodou suchého leptání, často je tak nesprávně označována jako synonymum pro suché leptání, tedy jako jediná technika suchého leptání. RIE je metoda spojující fyzikální i chemické účinky plazmatu k odstranění povrchu leptaného materiálu. Rychlost leptání je u tohoto procesu výrazně vyšší nežli u čistě fyzikálního nebo čistě chemického procesu. Oproti typickému mokrému leptání je anizotropní, a to nezávisle na krystalografii leptaného materiálu. [1,48]

#### Chemické a fyzikální procesy u RIE

U suchého leptání záleží na těkavosti produktu reakce, u RIE tomu není jinak. Nejčastěji se k leptání používají halidy [1]. Spousta z nich je těkavá, ne všechny z těkavých halidů se však využívají, ať už z důvodu toxicity, rychlosti leptání, nebo z náročnosti řízení procesu. Křemík a jeho sloučeniny se nechají leptat plazmatem fluoru, chloru, nebo bromu, oxidy a nitridy se leptají plazmatem látek jako například  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{C}_2\text{F}_6$ ,  $\text{C}_3\text{F}_8$  nebo polymerem  $\text{c-C}_4\text{F}_8$ . [4,49]

Z pohledu rychlosti leptání křemíku se nejčastěji využívá fluorové plazma, to však s křemíkem reaguje spontánně a leptací proces je tak bez použití určitých opatření (viz podkapitola 2.1) anizotropní. Chlorové plazma zaručuje anizotropii procesu, jelikož se nejedná o spontánní reakci jako je tomu u fluoru. Nevýhodou tohoto plazmatu je však nízká selektivita a nižší rychlost leptání. [49]

Celý proces se dá rozdělit na několik samostatných etap. Jednotlivé etapy probíhají souběžně a celý proces je tím pádem kontinuální. První z etap je generace, při které výboj disociuje/ionizuje vhodný plyn (například  $\text{SF}_6$  v případě leptání Si). Z plynu jsou tak získány neutrální látky, elektrony, fotony, radikální látky ( $\text{F}^*$ ) a pozitivní ( $\text{SF}_5^+$ ) a negativní ( $\text{F}^-$ ) ionty. [2]

Další etapou je vznik stejnosměrného napětí mezi elektrodou s leptaným vzorkem a plazmatem. Ionty a elektrony jsou k této elektrodě urychlovány střídavým napětím potřebným k tvorbě plazmatu. Jelikož však mají elektrony oproti iontům vyšší pohyblivost [50], je tato elektroda nabíjena záporným nábojem. [1,2]

V dalším kroku jsou kladně nabitě reaktivní radikály z plazmatu difuzí přemísťovány k leptanému vzorku na elektrodě se záporným nábojem. Tyto radikály se na vzorku usadí – tento krok je výrazným rozlišovacím prvkem oproti ostatním suchým leptacím technikám. Díky současnému odprašování povrchu vzorku ionty se radikály usazují rychleji, jelikož se tímto odprašováním odleptává pasivující  $\text{SiF}_x$  vrstva, která normálně usazování radikálů omezuje. [2]

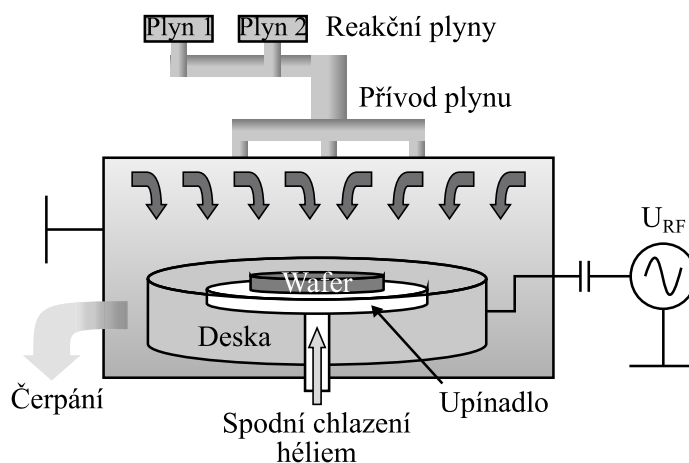
Poslední etapou je samotná chemická reakce. V případě fluorového leptání je reakce mezi fluorem a křemíkem spontánní za vzniku volatilní molekuly  $\text{SiF}_4$ , která je pak z komory odsáta pomocí vakuové vývěvy. V případě chlorového leptání se sice atomy chloru na povrchu usadí, ale nereagují spontánně. Ke vzniku volatilní molekuly  $\text{SiCl}_4$  dojde až při předání energie dopadem dalšího iontu. [2]

Vyšší koncentrace fluoru v plazmatu má za následek vyšší rychlost leptání křemíku, vyváženější poměr fluoru a uhlíkových sloučenin má za následek lepší selektivitu. K plynům účastnícím se samotného leptacího procesu se často přidávají další, mezi tyto aditivní plyny se řadí kyslík, vodík, argon, helium, dusík, a další. Obecně pozměňují chemické a fyzikální procesy a teplotní charakteristiku, například kyslík napomáhá anizotropii procesu, jelikož kontroluje volné radikály fluoru. [1,51]

Maskovací fotorezist je odleptáván relativně rychle a anizotropie procesu je zaručena jen díky směru dopadajících iontů. U RIE je selektivita křemíku oproti fotorezistu typicky 5:1 až 10:1. Během procesu neprobíhá pasivace bočních stěn nebo probíhá velmi slabě, poměr hloubky leptu ku jeho šířce je tak bez použití aditivních plynů velmi chabý – zhruba 2:1 při zachování anizotropie leptu. [1]

### Leptací aparatura a charakterizace RIE

Typické leptání pomocí reaktivních iontů probíhá ve vakuovaném reaktoru. Dnešní standardní RIE reaktor sestává z kondenzátoru tvořeného deskou a stěnami komory – stěny komory slouží jako zemnicí elektroda. Mezi těmito elektrodami díky střídavému napětí ze zdroje RF (běžně 13,56 MHz [1,2]) vzniká kapacitně vázané plazma (CCP). Wafer je položen na spodní elektrodu a je v přímém kontaktu s plazmatem. Tento způsob leptání je poměrně rychlý, nevýhodou je však špatné, resp. náročné řízení procesu. Základní schéma RIE aparatury je zobrazeno na obr. 1.7. [1]



**Obr. 1.7:** Základní schéma RIE aparatury (podle [1,52])

Kromě aparatury ilustrované na obr. 1.7 se používají reaktory schopné pojmout vyšší množství waferů. Typická aparatura pro leptání vyššího množství waferů najednou obsahuje hexodu, která je speciálně navržena ve tvaru šestiúhelníku. Další možnou konfigurací aparatury je pak použití triody ke zvýšení účinku odprašování ionty. [2]

## 2 HLOUBKOVÉ REAKTIVNÍ IONTOVÉ LEPTÁNÍ

Hlubkové reaktivní iontové leptání (DRIE) je určitou nadstavbou RIE, obě metody využívají fyzikálně-chemického procesu leptání, DRIE však umožňuje leptání úzkých hlubokých struktur či otvorů skrz wafer [5,53], a dokonce výrazně vyšší leptací rychlost (v určitých případech až 50  $\mu\text{m}/\text{min}$  [5]), než je tomu u RIE. Tato rychlost leptání byla do té doby nedosažitelná, a to i v porovnání s mokrým leptáním. DRIE navíc oproti RIE poskytuje vyšší selektivitu a sofistikovanější kontrolu nad celým procesem [1].

### 2.1 Chemické a fyzikální procesy u DRIE

Princip leptání je u DRIE prakticky totožný s tím u RIE. U DRIE se nejčastěji využívá fluorové plazma, jelikož je však leptání tímto plazmatem z důvodů popsaných v podkapitole 1.3.3 izotropní, zavádějí se u DRIE dvě různé techniky ošetřující tuto nevýhodu, a to sice kryogenní proces a Bosch proces. Tyto procesy umožňují na rozdíl od RIE pasivaci stěn leptaných struktur k dosažení anizotropie leptu.

#### 2.1.1 Kryogenní proces

První pokusy kryogenního leptání byly provedeny týmem Tachi et al. již v roce 1988 [54]. Bylo zjištěno, že při nízkých teplotách na povrchu leptané struktury vzniká pasivační vrstva. Navíc jsou chemické reakce na stěnách leptané struktury inhibovány, čímž dochází ke zlepšení anizotropie [1,5,54-56]. Pasivace těchto stěn probíhá za současného leptání dna leptané struktury, v případě leptání křemíku se do komory vhání plyny  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  a pasivační vrstva je tvořena oxyfluoridem křemíku  $\text{SiO}_x\text{F}_y$  [1,5,53,55,56]. Fluor se jen velice těžko usazuje na povrchu této vrstvy, dochází tak pouze k velmi omezenému množství reakcí – leptáno je převážně dno struktury, kde je pasivační vrstva odprašována ionty, což umožňuje spontánní reakci fluoru s křemíkem popsanou v podkapitole 1.3.3 [1].

Ačkoliv si původně tým Tachi et al. neuvědomil funkci kyslíku v procesu, bylo později ukázáno, že hraje v kryogenním procesu klíčovou roli, neboť přímo určuje tloušťku pasivační vrstvy. Nízký poměr kyslíku vůči  $\text{SF}_6$  má za následek nedostatečnou tvorbu oxyfluoridu křemíku, což způsobuje izotropii leptu, vysoký poměr naopak způsobuje naprosté zastavení procesu leptání z důvodu tlusté pasivační vrstvy a tvorby křemičitých jehliček na dně leptané struktury, tzv. černého křemíku, který se leptá jen velmi obtížně. [1,5,53-55]

Jelikož je pasivační vrstva typicky velmi tenká ( $\sim 10$  nm), stačí k jejímu odleptání nízká kinetická energie (10-30 eV [55]) dopadajících iontů [1,5,56]. Tato energie je přímo řízena zdrojem CCP, stačí tak velmi nízký výkon tohoto zdroje – řádově v jednotkách Wattů [1,55,56]. Tím je dosaženo i vysoké selektivity vůči rezistu, jelikož ionty nemají

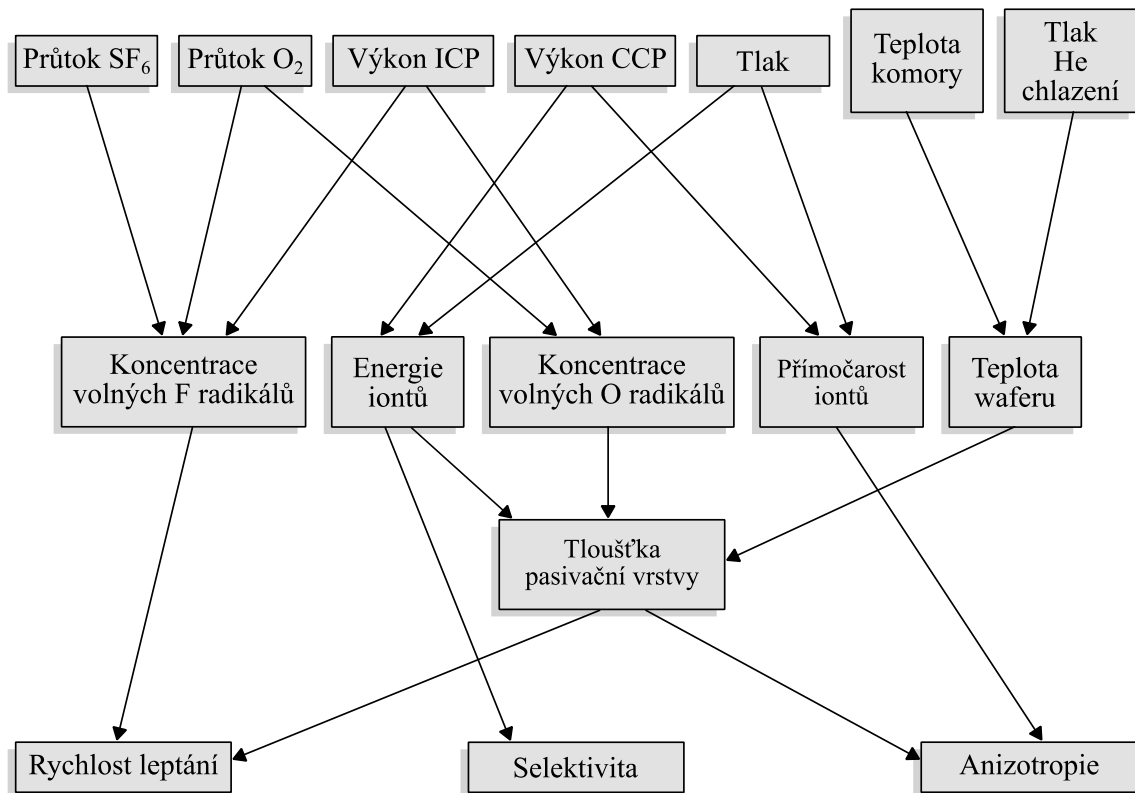
dostatečnou energii k jeho odleptání [1,56]. Vysoký výkon zdroje CCP má za následek pouze podleptávání a snížení selektivity, naopak velmi nízký výkon zapříčiňuje zastavení leptání a tvorbu černého křemíku [5,55,56]. Výkonem zdroje CCP je taktéž definována směrovost dopadajících iontů – s vyšším výkonem tohoto zdroje je trajektorie iontů vůči substrátu kolmější, čímž je možno dosáhnout vyšší hloubky leptu [55].

Rychlost leptání je dána hustotou plazmy, která je určena výkonem zdroje ICP a průtokem SF<sub>6</sub> – oba parametry přímo definují počet volných radikálů fluoru účastnících se leptání [5,55]. S rostoucím průtokem SF<sub>6</sub> klesá výkon zdroje CCP nezbytný k odleptání pasivující vrstvy na dně leptané struktury [55]. U výkonu zdroje ICP byl také kromě rychlosti leptání pozorován vliv na kvalitu pasivační vrstvy [5,55].

Dalším nastavitelným parametrem je tlak komory. Při nízkém tlaku nedochází k častým kolizím mezi jednotlivými ionty, a tedy jejich trajektorie je vůči substrátu víceméně kolmá [5,55]. Konečným důsledkem je omezení podleptávání a dosažení hlubšího leptu [55,56].

Samotná teplota komory, resp. substrátu musí být velmi nízká z důvodu inhibice chemických reakcí [54-56]. Při teplotě nad -75 °C již nedochází k tvorbě pasivační vrstvy SiO<sub>x</sub>F<sub>y</sub> a leptání je tak izotropní [54,56]. Naopak při teplotě pod -140 °C začíná SF<sub>6</sub> kondenzovat na chladném povrchu a k leptání tak nedojde vůbec [54,56]. Při teplotě v rozmezí od -140 °C až -95 °C lze při určitém nastavení procesu dosáhnout jevu podobného u anizotropního mokrého leptání, tedy závislosti leptu na krystalografické rovině křemíku [56]. Obecně se doporučuje nastavit pevnou teplotu komory a tlak chlazení héliem na začátku procesu optimalizace a měnit tyto parametry pouze za účelem jemného ladění.

Na obr. 2.1 jsou shrnuty nastavitelné parametry mající vliv na výslednou rychlost leptání, selektivitu a anizotropii do přehledného diagramu.



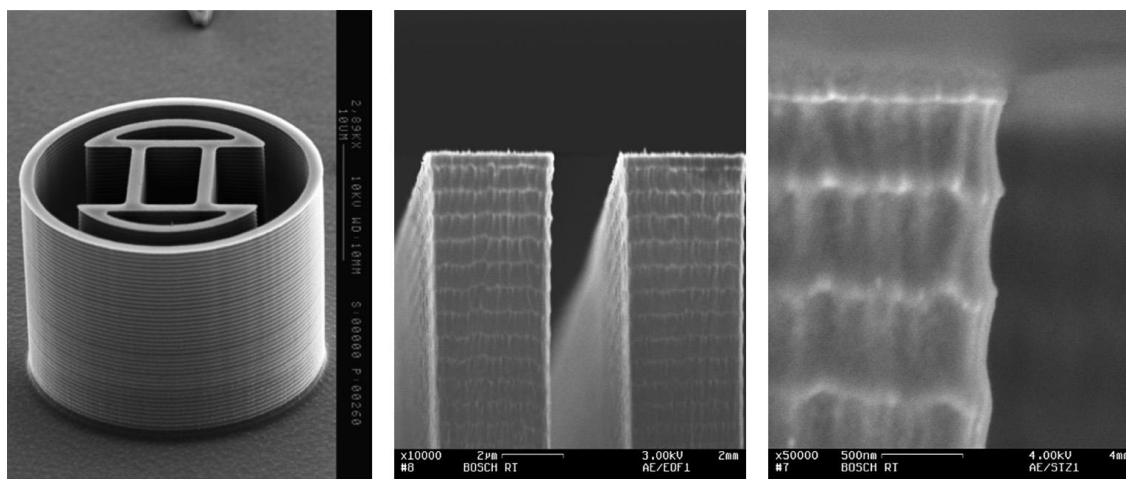
**Obr. 2.1:** Vliv nastavených parametrů na rychlost leptání, selektivitu a anizotropii u kryogenního DRIE procesu (převzato z [5])

Nespornými výhodami kryogenního procesu oproti Bosch procesu jsou velmi hladké stěny leptané struktury a těkavost  $\text{SiO}_x\text{F}_y$  při pokojové teplotě – po vyjmutí z reaktoru tak na povrchu nezůstávají žádná fluorová rezidua [1,53,56]. Nevýhodou je však nižší rychlost leptání a možné popraskání rezistu z důvodu rozdílného teplotního koeficientu roztažnosti vůči křemíku [5]. Tento jev lze obejít použitím rezistu s podobným teplotním koeficientem roztažnosti jako například oxidu křemičitého, tím však roste náročnost procesu – oxid je třeba deponovat a vyleptat na něm požadovaný motiv.

### 2.1.2 Bosch proces

Druhou technikou je tzv. Bosch proces vyvinutý a patentovaný [57] německou firmou Robert Bosch GmbH. Tento proces se k dosažení anizotropie spoléhá, obdobně jako kryogenní proces, na pasivaci stěn leptané struktury. V případě Bosch procesu se stěny pokryjí polymerem  $(\text{CF}_2)_n$  podobným Teflonu<sup>®</sup>, který zabraňuje spontánní reakci fluoru [1,5,48,58]. Hlavním rozlišujícím parametrem oproti kryogennímu procesu je však střídání procesu pasivace a leptání. Z tohoto důvodu se Bosch proces taktéž označuje jako časově multiplexované hloubkové leptání (TMDE) [58-61].

Nejjednodušší forma Bosch procesu je následující: Plazmatem  $\text{SF}_6$  se započne leptací proces. Samotné leptání plazmatem  $\text{SF}_6$  je izotropní, vytvoří tak podleptanou strukturu. Následně se do komory vžene prekurzor, například fluoroform  $\text{CHF}_3$ , hexafluorpropan  $\text{C}_3\text{F}_6$ , nebo oktafluorcyklobutan  $\text{C}_4\text{F}_8$  [1]. Při určitých podmínkách začne ionizovaný prekurzor polymerizovat a kondenzovat na povrchu leptaného materiálu včetně podleptané struktury. Tím vytvoří tenký film zabraňující dalšímu (spontánnímu) leptání, navíc toto fluorouhlíkové plazma leptá oxidy, které mohou vznikat na dně leptané struktury [1]. Do komory se opět vžene  $\text{SF}_6$ . Jelikož nemají ionty tohoto plazmatu dokonale svislou trajektorii, narážejí na tenký film na stěnách. Část pasivačního filmu je tak odleptána a strhnuta hlouběji do leptané struktury. Film na dně leptané struktury je odleptán kompletně, což umožňuje spontánní reakci fluoru. Jednotlivé kroky se dále opakují, čímž vzniká charakteristické vroubkování zobrazené na obr. 2.2. Diagram celého procesu je ilustrován na obr. 2.3 vlevo. [5,58,59]

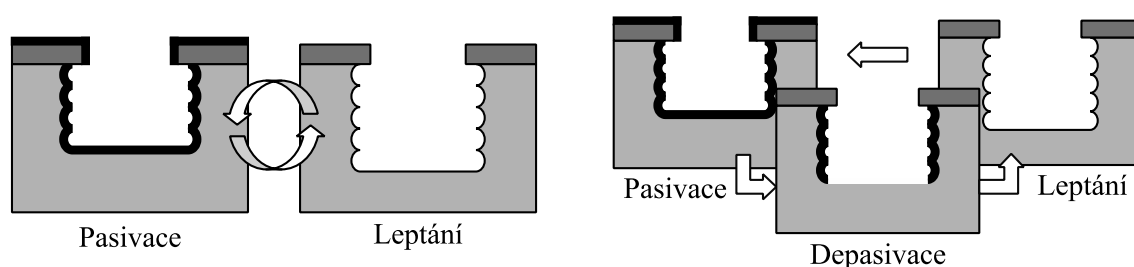


**Obr. 2.2:** Charakteristické vroubkování stěn u Bosch procesu (převzato z [1])

Pasivační vrstvu lze odstranit dopadem iontů s poměrně malou energií, selektivita tak dosahuje vysokých hodnot  $>150:1$  pro fotorezist a  $>300:1$  pro  $\text{SiO}_2$ . Při použití tvrdší pasivační vrstvy by bylo zapotřebí vyšší kinetické energie dopadajících iontů, čímž však klesá selektivita. Parametry nastavitelné během procesu mají totožný vliv jako u kryogenního procesu (viz podkapitola 2.1.1), je však potřeba odlišný přístup k optimalizaci. [1]

Existují i další formy Bosch procesu. Ačkoliv se přímo nejedná o TMDE proces, lze například využít souběžného leptání a pasivace, tedy podobně, jako je tomu u kryogenního procesu. Chemické procesy jsou shodné s těmi u klasického Bosch procesu. Díky paralelní povaze procesu nevzniká charakteristické vroubkování na stěnách. Nevýhodou je však částečná rekombinace iontů v oblasti generace plazmatu, tedy před dopadem na leptaný materiál, což způsobuje obtížné řízení procesu pro hlubší struktury. Limit hloubky leptu se u této variace procesu pohybuje kolem  $10\ \mu\text{m}$ . [1]

Další variantou jsou pokročilé Bosch procesy. Tým Abdolvand, R. a Ayazi, F. použil proces se třemi a čtyřmi kroky. Mezi jednotlivými kroky pasivace a leptání lze použít argonové nebo kyslíkové plazma k depasivaci filmu na dně leptané struktury. Toto plazma je potřeba urychlit vyšším napětím řízeným CCP zdrojem. Tím získají ionty dostatečnou kinetickou energii potřebnou k odprašení filmu na dně leptané struktury. Výhodou je zvýšení dosažitelného poměru stran, jelikož při rostoucí hloubce je náročnější odstraňovat pasivační film na dně struktury pomocí samotného SF<sub>6</sub> plazmatu. Diagram tohoto procesu je zobrazen na obr. 2.3 vpravo. Proces se čtyřmi kroky využívá k depasivaci argonové plazma. Navíc je však v procesu zahrnut krátký pulz kyslíkového plazmatu, který odstraní rezidua ze všech povrchů a zvyšuje tak uniformnost celé struktury. [58]



**Obr. 2.3:** Diagram Bosch procesu (převzato z [58]): základní (vlevo); pokročilý (vpravo)

Jednotlivé kroky pasivace a leptání trvají řádově sekundy [5,58,60]. Delší časy způsobují výraznější vroubkování, které je nežádoucí zejména u struktur se submikronovým rozlišením [58]. Vroubky je však možné minimalizovat při proceduře po procesu leptání. Povrch vyleptané struktury se nechá oxidovat a leptat látkou s vysokou selektivitou oxidu vůči křemíku. Tento proces se dá opakovat – po třech takovýchto opakováních byla zaznamenána redukce hloubky vroubků až o ~80 %. [62]

Díky časovému multiplexování nedochází k vzájemné rekombinaci iontů v oblasti generace plazmatu – tyto ionty mohou koexistovat mimo tuto oblast. Mezi jednotlivými kroky tak není nutné čerpat celou komoru a trvání jednotlivých kroků tak lze snížit. Přesto je však stále potřeba použít vysoce rychlé ventily a přesné regulátory průtoku. [1,5]

## 2.2 Leptací aparatura

Reaktor využívaný při DRIE je modernější iterací RIE reaktoru [3]. Zdroje střídavého napětí jsou nejméně dva namísto jednoho [1,5]. Vysoká hustota plazmatu je tvořena střídavým zdrojem (běžně ~2 MHz [49]) indukčně vázaného plazmatu (ICP) – při použití ICP zdroje lze dosáhnout hustoty plazmatu o jeden až dva řády větší nežli u zdroje CCP ( $10^{10}$  vs.  $10^{12}$  iontů/cm<sup>3</sup>), rychlost leptání je tedy taktéž zhruba o dva řády vyšší [1,3,5,63]. Stejnoseměrné napětí mezi plazmatem a elektrodou je řízeno CCP zdrojem, čímž výrazně stoupá selektivita [1,5]. U DRIE lze dosáhnout selektivity křemíku vůči fotorezistu až 100:1 a poměr hloubky leptu ku jeho šířce 40:1 až 60:1, čili přibližně dvacetkrát až třicetkrát více, než je tomu u RIE [48,58,64]. Při velmi dobrém nastavení procesu však již bylo dosaženo i poměru přes 100:1 [3,60]. Velmi však záleží na morfologii leptané struktury, velký vliv zde hraje např. RIE lag a ARDE (viz podkapitola 2.3). Navíc je nezbytné pro velké poměry použití oxidové nebo metalické masky z důvodu vyšší selektivity vůči křemíku.

Průtok, tlak a objem reaktoru spolu souvisí skrze rezidenční čas  $\tau$  reprezentující čas molekul v reaktoru před jejich vyčerpáním a vypočtený dle [1]

$$\tau = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{V}{Q}, \quad (2)$$

kde  $p_0 = 1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr}$ ,  $V$  je objem reaktoru a  $Q$  je průtok plynu. Objem reaktoru však nehraje pro Bosch proces významnou roli, jelikož se mezi jednotlivými kroky procesu nečerpá celá komora, ale pouze její část. U Bosch procesu je navíc zapotřebí použití vysoce rychlých ventilů, které se dokáží otevřít (resp. zavřít) během velice krátkého času s ideálně nulovým zpožděním, a přesných regulátorů průtoku. [1]

### 2.2.1 Chlazení waferu

Wafer je při procesu leptání zahříván, je tak nutné ho chladit. Chlazení probíhá nepřímo tekutým dusíkem – wafer je k elektrodě připevněn elektrostatickým nebo mechanickým upínadlem a zespodu je ofukován héliem, které je chlazené právě tekutým dusíkem. Hélium má ze všech plynů nejvyšší tepelnou vodivost [65] a je inertní, přenos tepla mezi dusíkem a waferem je tak efektivní. Wafer musí být přichycen pevně, neboť by v opačném případě nebylo chlazení účinné, navíc by hélium kompromitovalo plazma. [1]

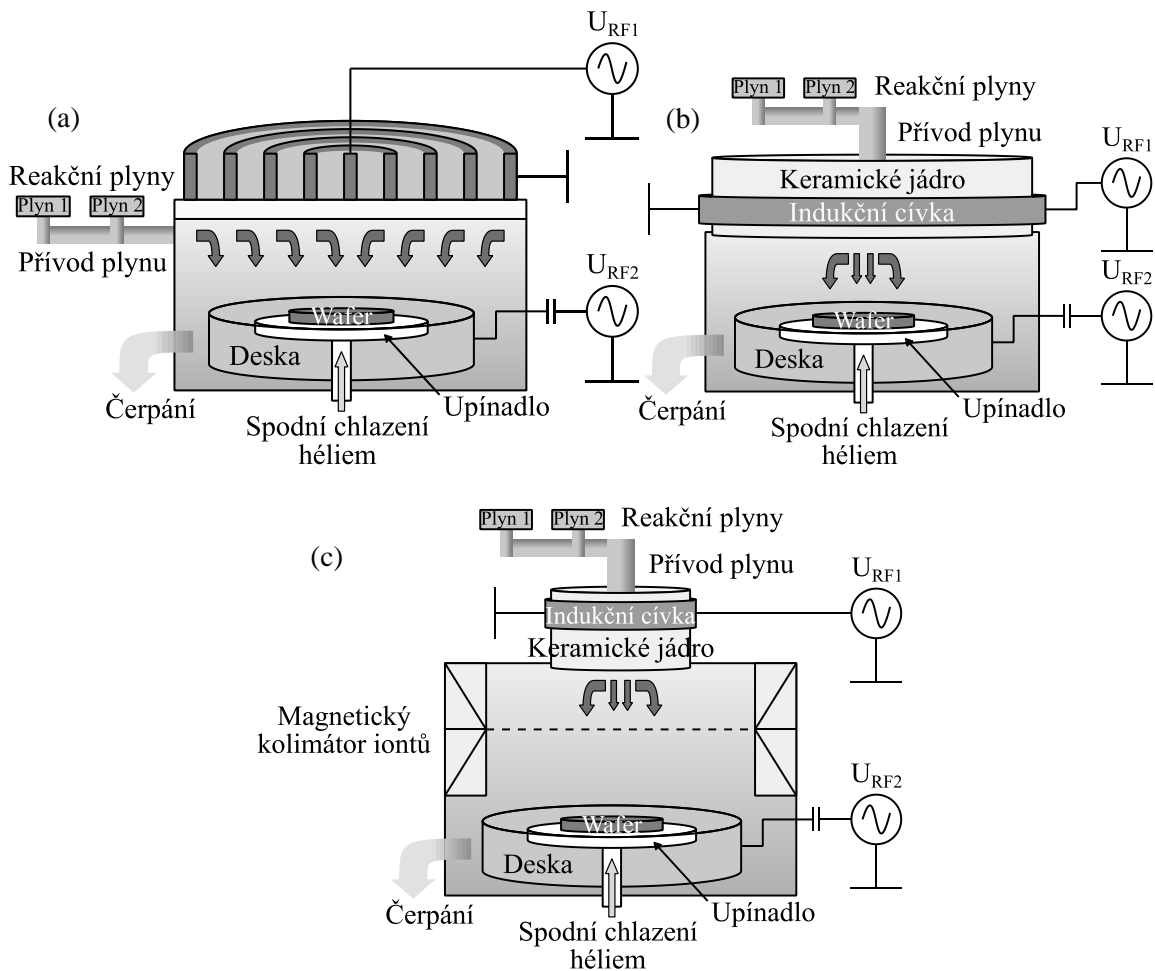
### 2.2.2 Konfigurace zdrojů ICP

V dnešní době existují tři nejčastější konfigurace DRIE reaktorů s rozdílnými zdroji ICP.

V prvním typu reaktoru, viz obr. 2.4(a), je na víku komory z dielektrika umístěna plochá cívka, která excituje plazma bezprostředně pod víkem. Jelikož je plocha cívky poměrně velká, je plazma rozprostřeno homogenně a profil leptu tak nevykazuje žádné nebo pouze minimální naklánění (tedy na kraji waferu je profil leptu stejný jako uprostřed).

Hustota plazmatu je největší v bezprostřední blízkosti indukční cívky, vzdálenost mezi waferem a cívkou je tak co nejmenší. Z důvodu minimální vzdálenosti waferu a cívky, resp. generovaného plazmatu je však wafer nadměrně zatěžován, což může mít na výsledný profil leptu negativní vliv. Navíc je nutné použít vysoký výkon pro generování plazmatu, což má dopad na selektivitu a rychlost leptání. [1,63]

V druhém typu reaktoru, viz obr. 2.4(b), je cívka navinuta okolo velkého dielektrického jádra. Reakční plyny vstupují ve formě helikonu k waferu otvorem uprostřed jádra. Jelikož je excitované plazma relativně daleko od cívky, je v komoře rozprostřeno nehomogenně. Důsledkem jsou rozdílné profily leptu na krajích waferu vůči jeho středu. Aby se tento jev minimalizoval, je jádro s cívkou vůči waferu naddimenzované (jak je zobrazeno na obr. 2.4). Tento způsob řešení však nedosahuje vysokého měrného výkonu (typicky 0,5 až 1 W/cm<sup>2</sup>) a plyn je tak excitovaný pouze částečně. V konečném důsledku to znamená nevyužití velkého objemu reakčních plynů a tím pádem i nižší rychlost leptání. [1,66]



**Obr. 2.4:** Možné konfigurace zdrojů ICP (převzato z [1]): (a) zdroj ICP s plochou excitační cívkou; (b) zdroj ICP s excitační cívkou vinutou kolem velkého dielektrického jádra; (c) zdroj ICP s malým dielektrickým jádrem a kolimátorem

V posledním typu reaktoru, viz obr. 2.4(c), je z důvodu zvýšení měrného výkonu použito jádro s malým průměrem, měrný výkon tak dosahuje 20 až 50 W/cm<sup>2</sup>. Reakční plyny prostupují k waferu opět otvorem uprostřed tohoto jádra. Aby se zamezilo nehomogennímu rozprostření plazmatu, jsou použity buďto mechanické otvory, které plazma nasměrují a homogenizují, magnetické čočky a kolimátory, anebo kombinace obojího. Výhodou je, kromě vysoké leptací rychlosti až 50 μm/min a prakticky nulového naklánění profilu leptu, také malý objem generovaného plazmatu. Důsledkem je tedy i krátký rezidenční čas plazmatu – prerekvizita pro rychlý Bosch proces. [1]

## 2.3 RIE lag a ARDE

RIE lag je označení pro běžný jev, při kterém jsou široké struktury leptány hlouběji než struktury užší. Projevuje se při hloubce leptu ku jeho šířce přesahujícího poměr 1:1. [1,2]

ARDE, tedy leptání závislé na poměru stran, je podobný jev, při kterém jsou struktury s vyšším poměrem stran leptány pomaleji než ty s menším poměrem. ARDE je však oproti RIE lagu dynamický efekt – rychlost leptání se s rostoucím časem leptání snižuje. [1,2,67,68]

Oba jevy sdílejí stejnou příčinu. Dno leptané struktury je leptáno ionty, které však nemají přesně vertikální trajektorii. Před dopadem iontů na leptaný materiál dochází v atmosféře reaktoru ke kolizím mezi těmito ionty, což vychyluje jejich dráhy. V určité hloubce (obzvláště u úzkých struktur) tak může nastat jev, při kterém se leptání zcela zastaví, tedy žádné reaktanty nedorazí až ke dnu leptané struktury. U Bosch procesu může nastat tzv. inverzní RIE lag, při kterém je dno sice pasivováno, avšak není odleptáváno. Pasivační vrstva tak na dně roste. [1,2,53,68]

ARDE lze minimalizovat optimalizací procesu, resp. rozdělením procesu na několik etap, např. postupným snižováním tlaku komory a zvyšováním výkonu zdroje CCP, anebo přidáním kroku depasivace u Bosch procesu. RIE lag lze omezit pozměněním chemických procesů [2]. Minimalizováním těchto efektů lze dosáhnout mnohem hlubších struktur než u jednotného nastavení parametrů v rámci procesu. [58,68]

## 2.4 Efekt zatížení

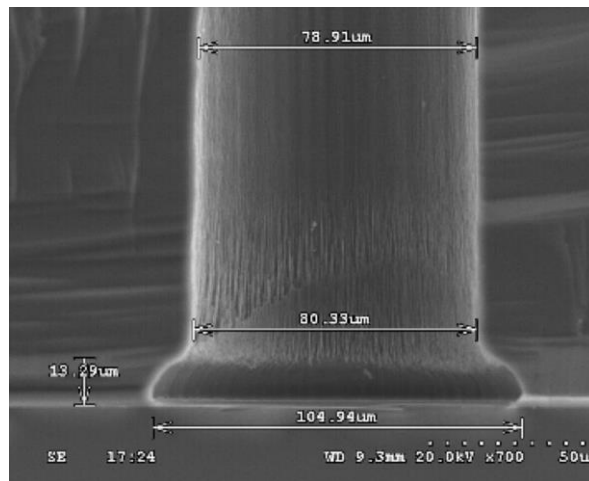
Efekt zatížení (z angl. „*loading effect*“) označuje závislost rychlosti leptání na leptané ploše. Tento jev se dále dělí na mikro- a makrozatížení, oba typy jsou však zapříčiněny deplecí fluoru. Leptaný materiál v podstatě funguje jako chemická pumpa, a tedy u velké leptané plochy dochází k nedostatečnému přísunu nových reaktantů a ke snížení rychlosti leptání. Efekt zatížení lze obejít dostatečně velkým průtokem reakčních plynů, avšak zvýšení průtoku může mít negativní vliv na profil leptu. [1,2,53,69]

Zatímco mikrozatížení je jev lokální a velmi závisí na tvaru leptané struktury, makrozatížení je jev globální a závisí pouze na relativní ploše leptaného materiálu vůči ploše maskované. Mikrozatížení není zcela pochopeno, ačkoliv byly provedeny pokusy o matematické modelování tohoto efektu (lze uvést např. [67]). [2,69]

Vysoká rychlost leptání DRIE systémů (~50  $\mu\text{m}/\text{min}$ ) byla dosažena právě na malých leptaných plochách (kupříkladu ~1 % celkové plochy waferu) [1]. Tento fakt se týká zejména monokrystalického křemíku, například leptání křemenného skla není výrazně závislé na efektu zatížení [1]. Lze také zmínit, že při nízkém tlaku reakční komory byl zaznamenán menší vliv tohoto efektu [53].

## 2.5 Efekt zařezávání

Efekt zařezávání (z angl. „*notching effect*“) se vyskytuje pouze u struktur, pod kterými se nachází dielektrická vrstva (např.  $\text{SiO}_2$ ). Proces leptání pak způsobí charakteristický zářez, viz obr. 2.5. [53]



**Obr. 2.5:** Efekt zařezávání na rozhraní Si/ $\text{SiO}_2$  (převzato z [53])

Při leptání se dielektrické dno nabíjí kladně nabitými dopadajícími ionty. Tento akumulovaný náboj způsobí vychýlení dalších iontů, což dále vede k leptání bočních stěn leptané struktury. Tento efekt je závažným problémem zejména při vytváření MEMS. Omezit lze například zvětšením tloušťky pasivační vrstvy u dna struktury. [1,53]

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této práce se zabývá sledováním vlivu nastavitelných parametrů a optimalizací kryogenního a Bosch DRIE procesu. Leptání vzorků probíhalo při optimalizaci obou procesů na zařízení PlasmaPro 100 Cobra<sup>®</sup> (Oxford Instruments, UK). Vzorky byly před samotným leptáním připevněny pomocí perfluoropolyetheru (PFPE) na podkladový 4" křemíkový wafer s vrstvou SiO<sub>2</sub>. PFPE slouží kromě fixování i k efektivnějšímu přenosu tepla, navíc je vůči plazmatu netaktní a nekompromituje tak proces leptání [70]. Před samotným leptáním byl vzorek čištěn pomocí kyslíkového plazmatu (~10 s) při výkonu zdroje ICP 1000 W.

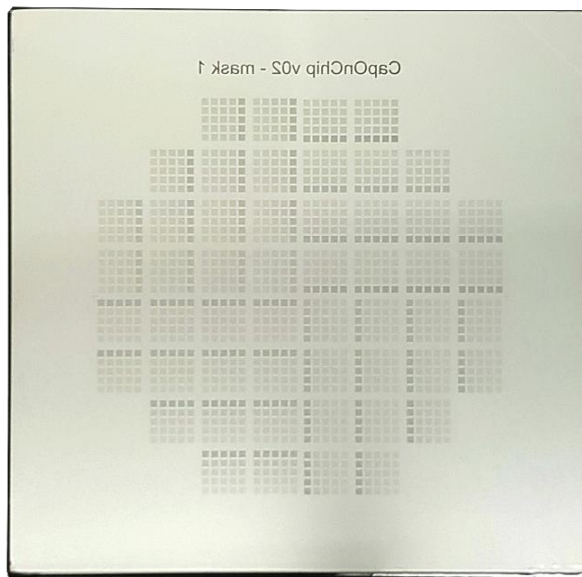
K měření profilu leptaných struktur byl u všech vzorků použit rastrovací elektronový mikroskop (SEM) Tescan Mira II (Tescan, ČR). Fotorezist leptaného vzorku nebyl před SEM analýzou stripován – důvodem této metodiky byla analýza zbylé tloušťky tohoto fotorezistu. Jak je ukázáno dále, tento postup byl vhodný zejména u Bosch procesu. Nevýhodou však bylo značné nabíjení povrchu zkoumaných vzorků, resp. fotorezistu.

K optimalizaci obou procesů byly použity křemíkové vzorky s rozměry přibližně 10×10 mm s motivem děr o průměrech 1 μm, 2 μm, 4 μm, 8 μm a 16 μm v hexagonálním uspořádání. Tyto vzorky bylo nejdříve nutné připravit, tedy nanést na 4" wafer fotorezist, vytvořit na něm motiv, a následně wafer rozřezat na jednotlivé vzorky.

### 3.1 Příprava vzorků k leptání

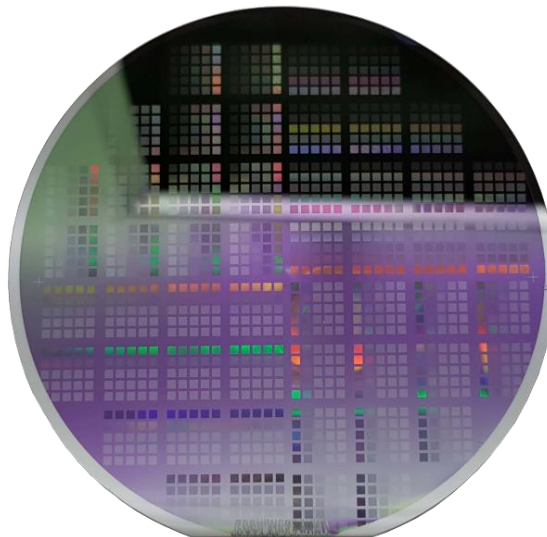
K přípravě motivu byl zvolen fotorezist AZ<sup>®</sup> 5214E (Merck, USA). Nanášení fotorezistu probíhalo na spin-coateru SÜSS RCD8 (SÜSS MicroTec, Německo). Použit byl ~525 μm tlustý 4" křemíkový wafer ⟨100⟩ s vodivostí typu P (Siegert Wafer, Německo). Z důvodu lepší adheze fotorezistu byl na substrát před samotným spin-coatováním aplikován hexamethyldisilazan (HMDS), který zabraňuje adsorpci molekul vody na povrchu substrátu. Spin-coatováním při 4000 ot/min byl vytvořen tenký film fotorezistu o tloušťce 1,4 μm. Fotorezist byl následně sušen na horké plotně v dusíkové atmosféře při teplotě 110 °C po dobu 50 s.

Vysušený fotorezist byl exponován UV zářením o vlnové délce 365 nm (i-line) konstantní dávkou energie 90 mJ/cm<sup>2</sup> pomocí zařízení SÜSS MA8/BA8 (SÜSS MicroTec, Německo). K vytvoření požadovaného motivu byla použita předpřipravená křemenná fotomaska s pozitivním motivem v tenké vrstvě chromu, tato fotomaska je zobrazena na obr. 3.1.



**Obr. 3.1:** Fotomaska použitá při exponování

K vyvolání motivu bylo opět použito zařízení SÜSS RCD8. Nanesená vývojka se na waferu nechala působit jemnými kmitavými pohyby po dobu ~20 s, načež byla očištěna proudem demineralizované vody. Následně se wafer sušil proudem dusíku. Připravený wafer s motivem byl následně opticky kontrolován za účelem vyhodnocení kvality exponování a vyvolání motivu. Výsledný wafer s motivem je zobrazený na obr. 3.2.

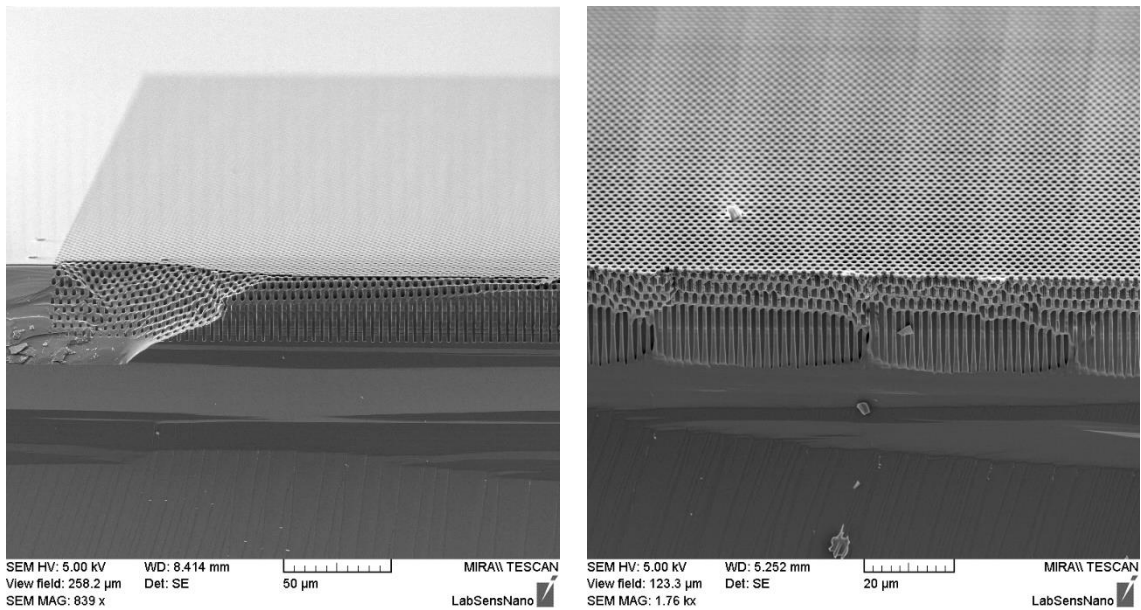


**Obr. 3.2:** Wafer s vyvolaným motivem v 1,4  $\mu\text{m}$  vrstvě AZ<sup>®</sup> 5214E

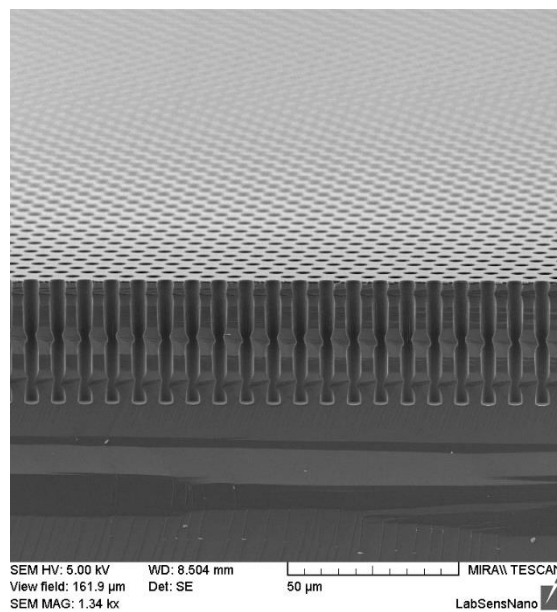
Takto připravený wafer byl diamantovým hrotem nařezán a nalámán na jednotlivé vzorky. Nalámané vzorky byly na závěr ofouknuty proudem dusíku za účelem odstranění částic uvolněných při lámání.

## 3.2 Příprava vzorků pro SEM analýzu

Před samotným rozebráním jednotlivých optimalizačních kroků u kryogenního a Bosch procesu jsou k ujasnění na obr. 3.3 a obr. 3.4 zobrazeny lomy leptaných vzorků. Jelikož byl použit křemíkový wafer s krystalografickou orientací  $\langle 100 \rangle$ , nebyl lom vždy zdařilý. Nicméně kromě estetického nedostatku neideální lom neskýtá žádnou nevýhodu.



**Obr. 3.3:** SEM snímky profilu leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  (vlevo) a 1  $\mu\text{m}$  (vpravo) zobrazující neideální lom substrátu



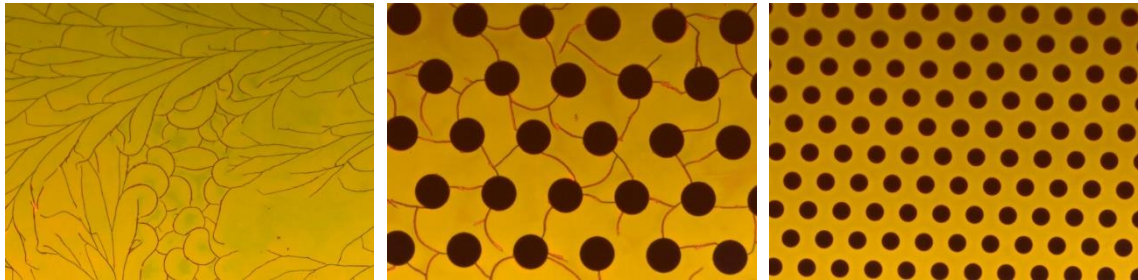
**Obr. 3.4:** SEM snímek profilu leptu děr s průměrem 4  $\mu\text{m}$  zobrazující ideální lom substrátu

### 3.3 Optimalizace kryogenního procesu

Při leptání všech vzorků byly u kryogenního procesu zvoleny konstantní parametry průtoku spodního chlazení héliem 10 sccm a nastavené teploty komory  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Je nutno podotknout, že teplota vzorku se od nastavené teploty může lišit až o  $\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vzhledem k tomu, že toto kolísání teploty je závislé na efektivní ploše čistého křemíku, a že tato plocha je v případě použitých vzorků velmi malá ( $\sim 1\%$ ), měla by se teplota vzorku shodovat s teplotou nastavenou. [53,69]

#### 3.3.1 Sledování vlivu teplotního šoku na kvalitu fotorezistu

U kryogenního DRIE procesu hrozí z důvodu teplotního šoku riziko popraskání polymerního fotorezistu. Bylo tak nutné ověřit, zda k tomuto jevu nedochází, v opačném případě by bylo nutné fotorezist vypéct (tzv. hard bake) nebo použít  $\text{SiO}_2$  rezist s teplotním koeficientem roztažnosti podobným tomu u křemíku [53].



**Obr. 3.5:** Sledování efektu popraskání fotorezistu AZ<sup>®</sup> 5214E: plocha bez děr (vlevo); 16  $\mu\text{m}$  díry (uprostřed), 8  $\mu\text{m}$  díry (vpravo)

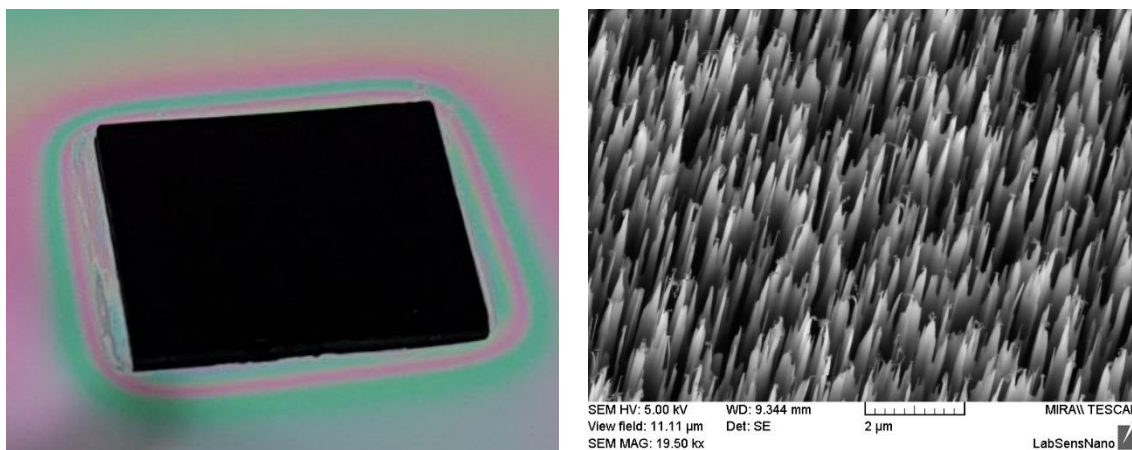
Z obr. 3.5 vyplývá, že k popraskání fotorezistu AZ<sup>®</sup> 5214E opravdu dochází. Je však nutné dodat, že k popraskání nedochází u děr s průměry 8  $\mu\text{m}$  nebo menšími. Jelikož se práce zabývá zejména optimalizací děr s průměry 2  $\mu\text{m}$ , nebylo nezbytné provádět opatření uvedená výše.

#### 3.3.2 Optimalizace výkonu zdroje CCP

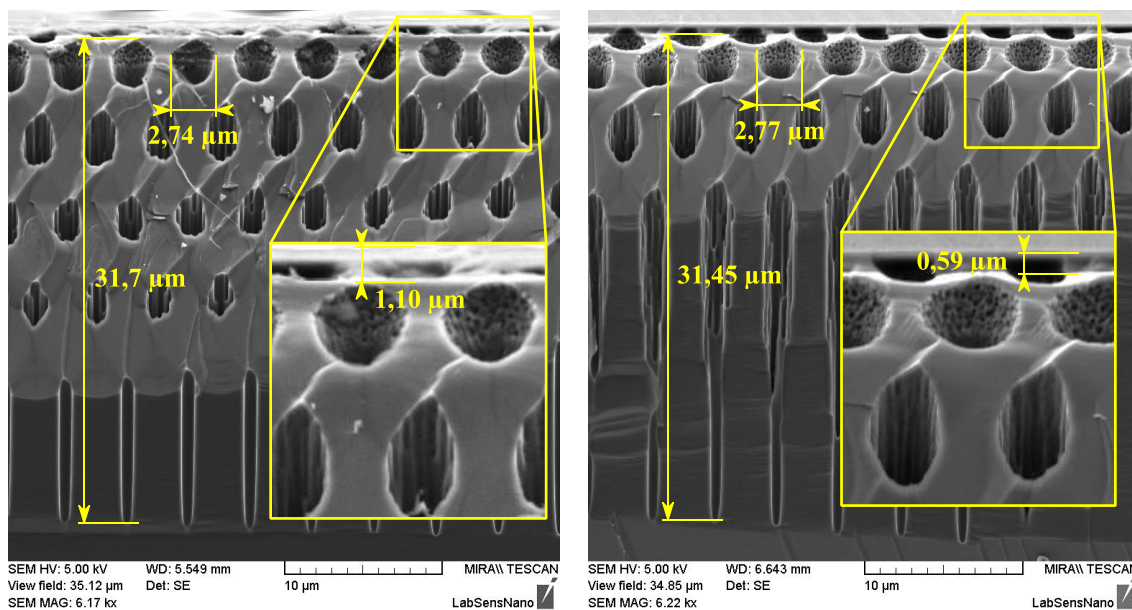
Prvním optimalizovaným parametrem byl výkon zdroje CCP. Při zvolených parametrech uvedených v tab. 3.1 byla zjištěna tvorba černého křemíku při výkonu zdroje CCP nad 7 W, viz obr. 3.6. Selektivita navíc klesla pod kritickou hodnotu, při které byl v daném čase proces odleptán veškerý fotorezist. SEM snímky profilů leptů děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  a s nastavenými výkony zdroje CCP 5 W, resp. 4 W jsou zobrazeny na obr. 3.7. Při nastaveném výkonu 3 W mají sice ionty dostatečnou kinetickou energii, avšak u použitého leptacího zařízení je tento výkon časově nestálý a po určité době klesne na nulovou hodnotu. Leptání se po snížení výkonu zdroje CCP na 0 W zastaví, jak je patrné z obr. 3.8.

**Tab. 3.1:** Parametry nastavené při sledování vlivu změny výkonu zdroje CCP

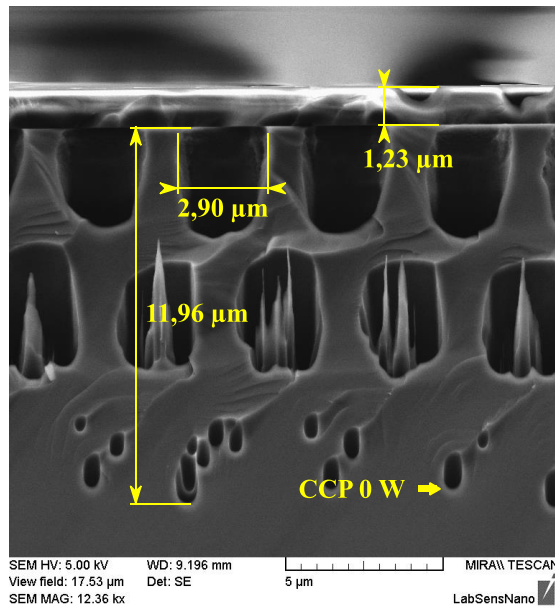
$t$	$p$	$P_{ICP}$	$Q_{SF_6}$	$Q_{O_2}$	$\vartheta$
30 min	12 mTorr	1000 W	50 sccm	7 sccm	-110 °C



**Obr. 3.6:** Černý křemík na povrchu leptaného vzorku (vlevo) a SEM snímek černého křemíku (vpravo)



**Obr. 3.7:** SEM snímky profilu leptu děr s průměrem 2 μm; nastavený výkon zdroje CCP: 4 W (vlevo); 5 W (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.1



**Obr. 3.8:** SEM snímek profilu leptu děr s průměrem 2 μm; nastavený výkon zdroje CCP 3 W; ostatní parametry viz tab. 3.1; v snímku je vyznačen bod, při kterém výkon zdroje klesl na 0 W

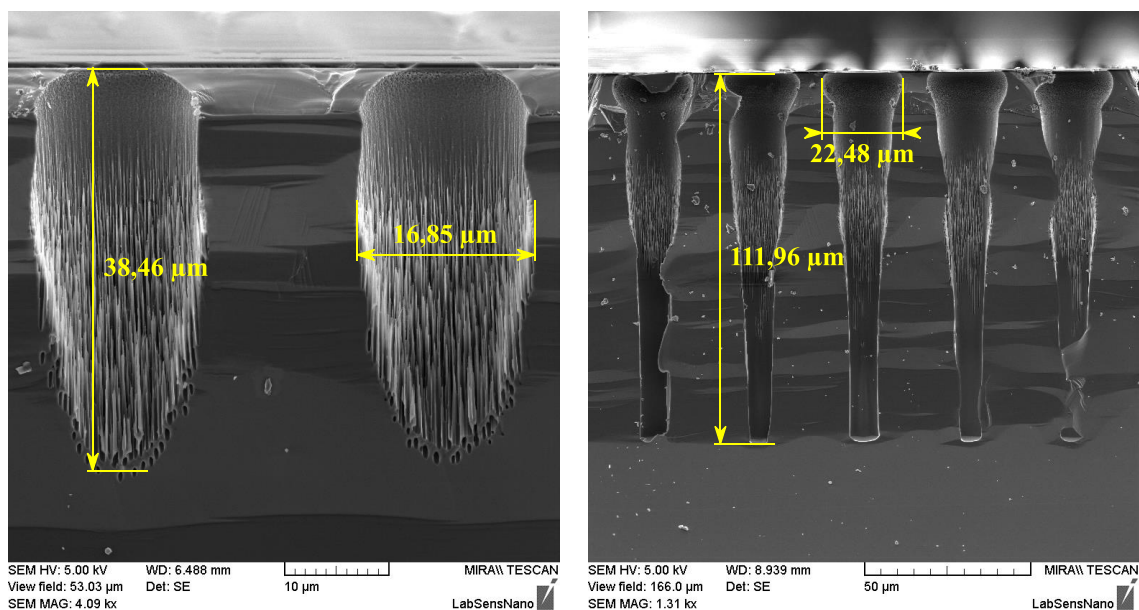
Z pozorování tloušťky zbylého fotorezistu leptaných vzorků vyplývá, že minimální možná hodnota výkonu zdroje CCP má za následek nejvyšší selektivitu fotorezistu, a tedy v konečném důsledku umožňuje leptání co nejhlubších struktur. Vliv výkonu zdroje CCP na profil leptu je ve sledovaném rozsahu 4–5 W minimální. V dalších optimalizačních krocích byl tedy volen výkon zdroje CCP 4 W.

### 3.3.3 Optimalizace celkového průtoku SF<sub>6</sub>+O<sub>2</sub>

V dalším kroku byl optimalizován celkový průtok směsi plynů SF<sub>6</sub>+O<sub>2</sub> při zachování stejného poměru těchto plynů. V tab. 3.2 jsou vypsány konstantní parametry procesu leptání. Sledován byl vliv u dvou rozdílných nastavení. Profily leptu děr s průměrem 16 μm a s nastavenými průtoky SF<sub>6</sub> 50 sccm + O<sub>2</sub> 7,1 sccm, resp. 70 sccm + O<sub>2</sub> 10 sccm jsou zobrazeny na obr. 3.9.

**Tab. 3.2:** Parametry nastavené při sledování změny průtoku plynů SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>

$t$	$p$	$P_{ICP}$	$P_{CCP}$	$Q_{SF_6}/Q_{O_2}$	$\theta$
30 min	12 mTorr	1000 W	4 W	~7	-110 °C



**Obr. 3.9:** SEM snímky profilu leptu děr s průměrem 16 µm; nastavený průtok SF<sub>6</sub>: 50 sccm (vlevo); 70 sccm (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.2

Kromě vyšší leptací rychlosti je u vzorku leptaného procesem s vyšším nastaveným průtokem patrná absence černého křemíku na dně leptané struktury, což je zapříčiněno deplecí kyslíku s rostoucí hloubkou leptu [55].

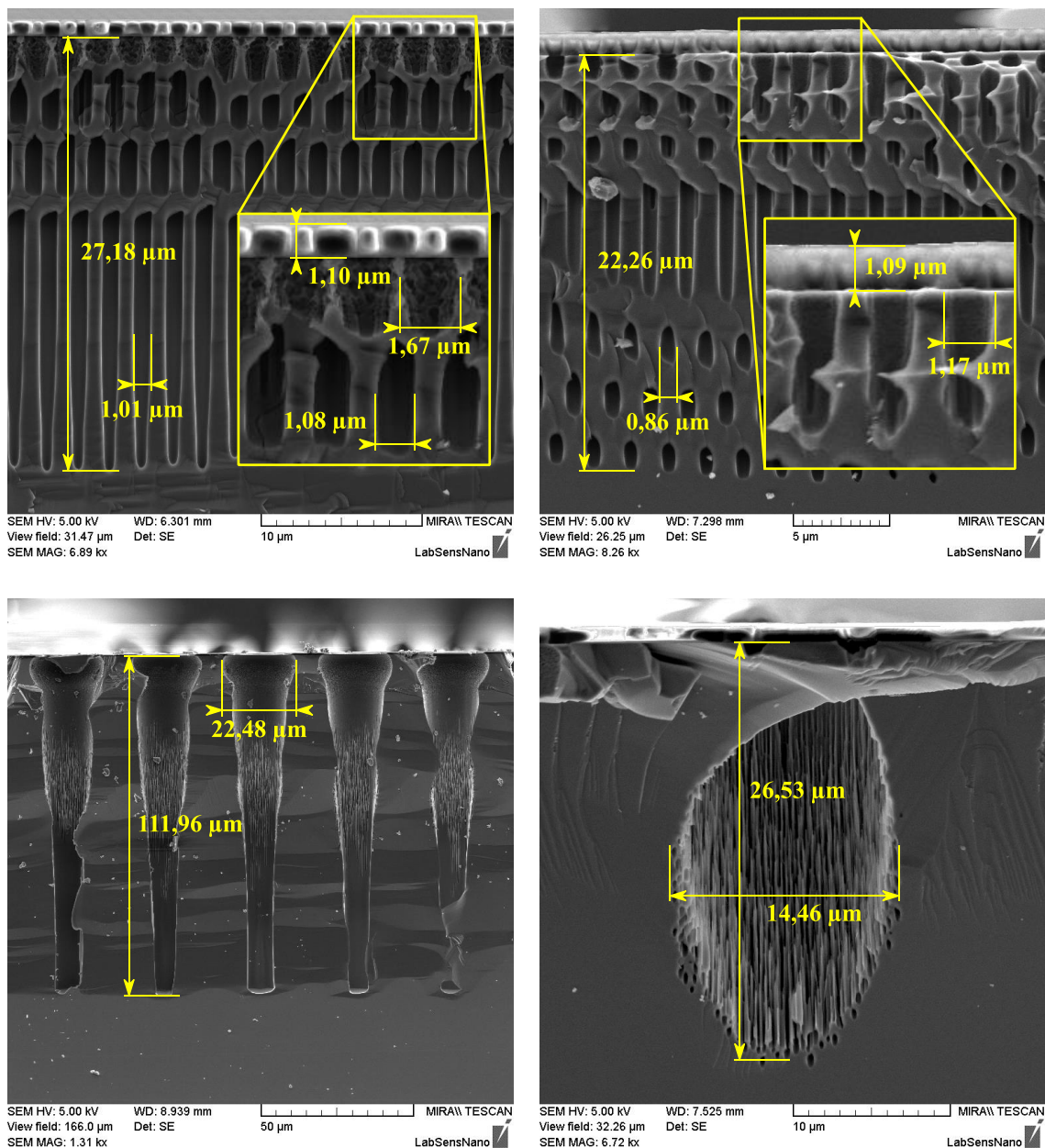
Dalším zvyšováním průtoku lze zvýšit rychlost leptání. S vyšším průtokem však také výrazně roste míra podleptání. Jelikož však rychlost leptání nebyla klíčová, byl v dalších krocích volen průtok SF<sub>6</sub> 70 sccm + O<sub>2</sub> 10 sccm – určitý kompromis mezi rychlostí leptání a podleptáváním.

### 3.3.4 Optimalizace výkonu zdroje ICP

Charakteristickým rysem DRIE je generace plazmatu zdrojem ICP. V tab. 3.3 jsou shrnuty konstantní parametry procesu při sledování změny výkonu tohoto zdroje. Sledovány byly výkony 1000 W, 800 W a 600 W, SEM snímky na obr. 3.10 zachycují profily leptu korespondující s krajními sledovanými hodnotami. Je patrná analogie mezi celkovým průtokem plynů sledovaným v podkapitole 3.3.3 a výkonem zdroje ICP – zvýšení průtoku je ekvivalentní zvýšení výkonu, alespoň v analýze profilu leptů pomocí SEM.

**Tab. 3.3:** Parametry nastavené při sledování změny výkonu zdroje ICP

$t$	$p$	$P_{CCP}$	$Q_{SF_6}$	$Q_{O_2}$	$\theta$
30 min	12 mTorr	4 W	70 sccm	10 sccm	-110 °C



**Obr. 3.10:** SEM snímky profilů leptu děr s průměrem 1 μm (nahore) a 16 μm (dole); nastavený výkon zdroje ICP: 1000 W (vlevo); 600 W (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.3

U děr s průměry 1 μm a 2 μm a s nastaveným výkonem zdroje ICP 1000 W v rámci procesu docházelo vlivem tzv. „bottling“ efektu (viz podkapitola 3.3.7) k výraznému podleptání stěn jednotlivých děr bezprostředně pod rozhraním fotorezist/substrát. Touto problematikou se blíže zabývá podkapitola 3.3.7. Naopak s nastaveným výkonem 600 W je patrný útlum „bottling“ efektu a omezené podleptání, nevýhodou je však nižší rychlost leptání. Opět – jelikož nebyla rychlost leptání prioritou, byl v dalších krocích volen výkon zdroje 600 W jakožto kompromis mezi jmenovanými charakteristikami leptu.

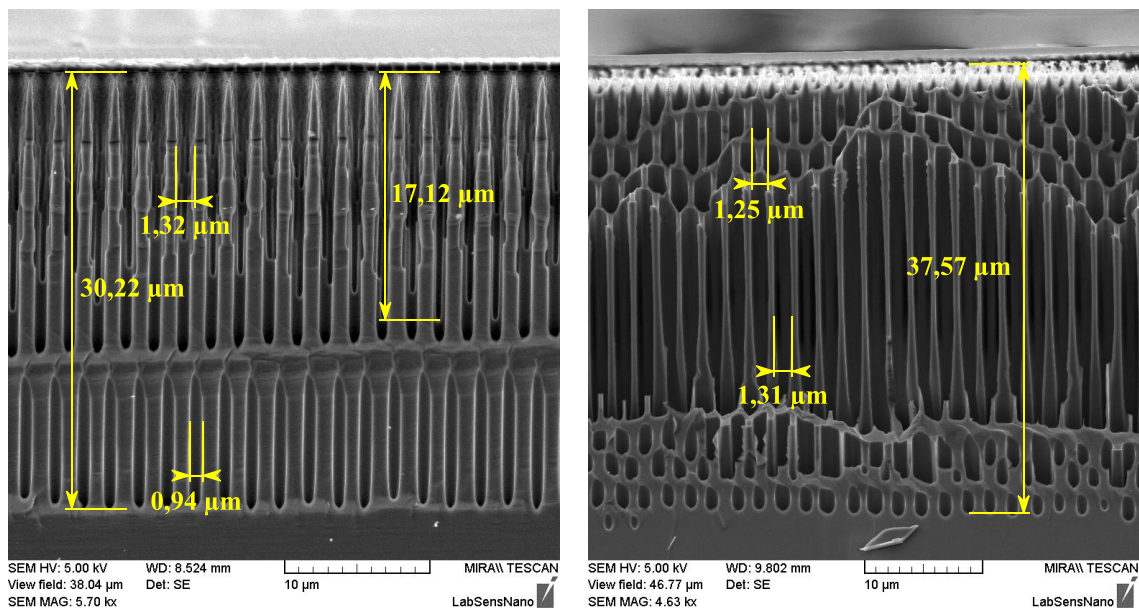
### 3.3.5 Optimalizace poměru plynů SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>

Jak již bylo popsáno v podkapitole 2.1.1, poměrem plynů SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> lze měnit profil leptu, tedy závislost šířky leptané struktury na hloubce, a výskyt černého křemíku. Optimální poměr kyslíku v plazmatu závisí mimo jiné také na rozměrech leptané struktury. Tedy ideální poměr plynů pro díry s průměrem 2 μm je odlišný s těmi pro ostatní průměry děr.

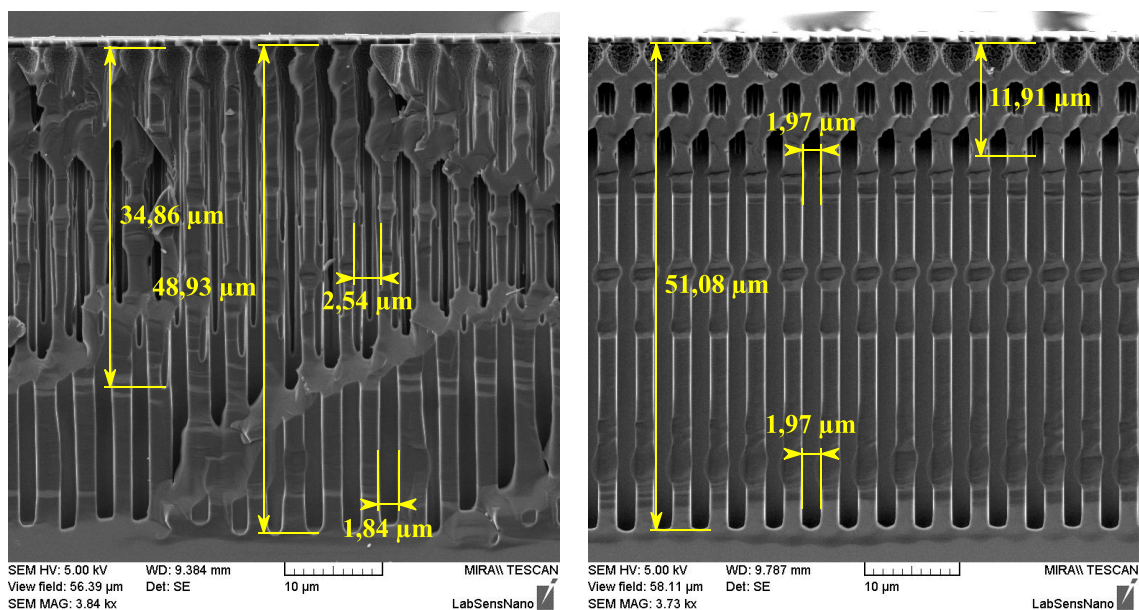
Konstantní parametry při sledování změny poměru jsou shrnuty v tab. 3.4. Aby bylo možné s jistotou posoudit, při jaké koncentraci kyslíku v plazmatu se přestává tvořit černý křemík v leptaných strukturách, byla nastavena celková doba leptání 60 minut. Zároveň je tak snazší určit, o jaký profil leptu se jedná (tedy jaký úhel svírají boční stěny leptaných struktur s povrchem substrátu). Na obr. 3.11 jsou zobrazeny profily leptu děr s průměrem 1 μm pro nastavené průtoky kyslíku 10 sccm a 8 sccm, na obr. 3.12 jsou pak zobrazeny profily leptu děr s průměrem 2 μm pro tytéž průtoky kyslíku.

**Tab. 3.4:** Parametry nastavené při sledování změny průtoku O<sub>2</sub> při konstantním průtoku SF<sub>6</sub>

$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF_6}$	$\vartheta$
60 min	12 mTorr	4 W	600 W	70 sccm	-110 °C



**Obr. 3.11:** SEM snímky profilů leptu děr s průměrem 1 μm; nastavený průtok kyslíku: 10 sccm (vlevo); 8 sccm (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.4; u snímku vlevo je vyznačena i hloubka, při níž se přestává tvořit černý křemík



**Obr. 3.12:** SEM snímky profilů leptu děr s průměrem 2 µm; nastavený průtok kyslíku: 10 sccm (vlevo); 8 sccm (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.4; vyznačeny jsou i hloubky, při nichž se přestává tvořit černý křemík

Z obr. 3.11, resp. obr. 3.12 je zřetelná závislost úhlu stěn leptaných struktur vůči substrátu a zároveň závislost tvorby černého křemíku na koncentraci kyslíku v plazmatu. Při nastaveném průtoku kyslíku 10 sccm se 1 µm i 2 µm díry s rostoucí hloubkou zužují (pozitivní profil). Z analýzy leptaných struktur také vyplývá, že se s klesající koncentrací přestává tvořit černý křemík. Při nastaveném průtoku kyslíku 8 sccm se již na stěnách děr s průměrem 1 µm netvoří černý křemík, na stěnách děr s průměrem 2 µm je tvorba omezena.

Z obou uvedených obrázků dále vyplývá patrná závislost na morfologii struktur, v tomto případě na průměru děr. Tedy u děr s průměrem 1 µm a nastaveném průtoku kyslíku 8 sccm se šířka struktur s rostoucí hloubkou zvyšuje (negativní profil), zatímco u 2 µm děr svírají boční stěny s povrchem substrátu kolmý úhel. Tento efekt souvisí jednak s ARDE efektem, jednak ale také s deplecí kyslíku [55]. U děr s průměrem 2 µm a nastaveným průtokem kyslíku 8 sccm se stále na stěnách vyskytuje černý křemík, další snižování koncentrace kyslíku však zapříčiní negativní profil leptu. Tímto problémem se dále zabývá podkapitola 3.3.6.

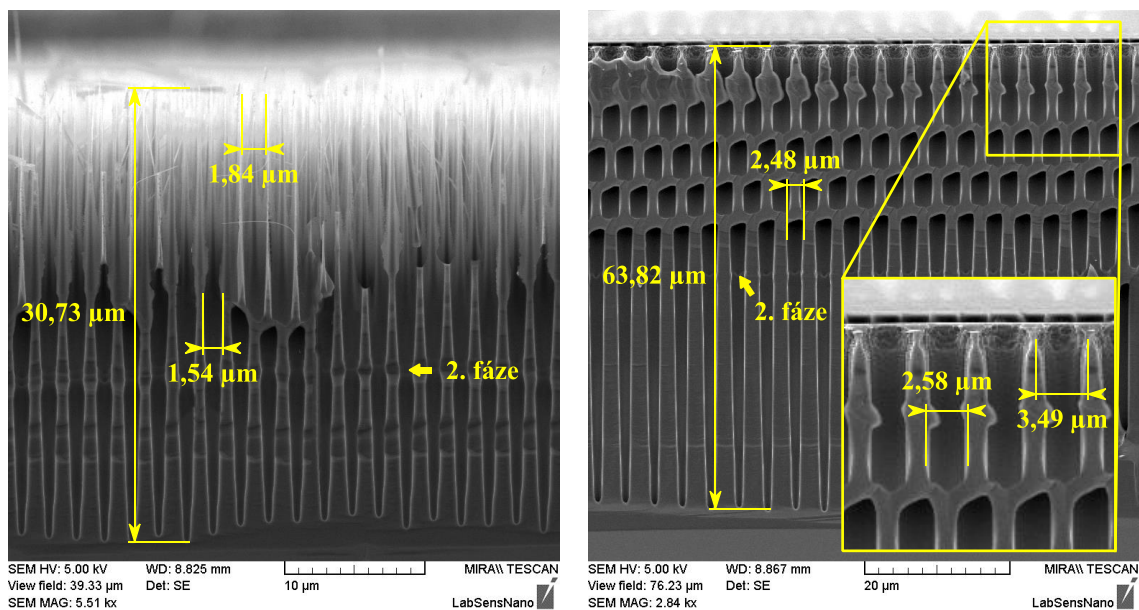
Mimoto z obr. 3.11, resp. obr. 3.12 vyplývá závislost „bottling“ efektu na sledované koncentraci. Se zvyšující se koncentrací kyslíku je „bottling“ efekt výraznější.

### 3.3.6 Rozdělení procesu na dvě fáze

Jak již bylo vyloženo v podkapitole 3.3.5, jednotným procesem lze u děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  získat buďto kolmé leptané struktury, avšak s výskytem černého křemíku, anebo struktury bez černého křemíku, avšak s negativním profilem leptu. Východiskem bylo rozdělení procesu na dvě jednotlivé fáze. V první fázi byla koncentrace kyslíku záměrně snížena tak, aby se ve struktuře netvořil černý křemík (průtok kyslíku 7 sccm). V další fázi pak byla koncentrace zvýšena (průtok kyslíku 8 sccm). Výsledné leptané díry s 1  $\mu\text{m}$  a se 2  $\mu\text{m}$  v průměru s vyznačeným místem přechodu fází jsou znázorněny na obr. 3.13, nastavené parametry jsou shrnuty v tab. 3.5.

**Tab. 3.5:** Výchozí parametry pro rozdělený kryogenní proces

Fáze	$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF_6}$	$Q_{O_2}$	$\vartheta$
1.	20 min	12 mTorr	4 W	600 W	70 sccm	7 sccm	-110 °C
2.	40 min	12 mTorr	4 W	600 W	70 sccm	8 sccm	-110 °C



**Obr. 3.13:** SEM snímky profilů leptu děr s průměrem 1  $\mu\text{m}$  (vlevo) a 2  $\mu\text{m}$  (vpravo) leptaných rozděleným procesem; vyznačeno je místo přechodu fází procesu

Profily leptu jsou v obou případech pozitivní (určité zkreslení je ovšem způsobeno neideálním lomem substrátu), dosažení kolmého leptu však nebylo podmínkou. Naopak – kolmý nebo negativní profil leptu ztěžuje další technologické kroky jako například metalizaci, při níž se ve strukturách mohou vytvořit dutiny.

Nadto jsou z obr. 3.13 patrné efekty ARDE a RIE lag. Ačkoliv první fáze trvala pouze jednu třetinu celkového času leptání, viditelný přechod fází je u 2  $\mu\text{m}$  děr v  $\sim 50\%$  a u 1  $\mu\text{m}$  děr v  $\sim 64\%$  dosažené hloubky leptu.

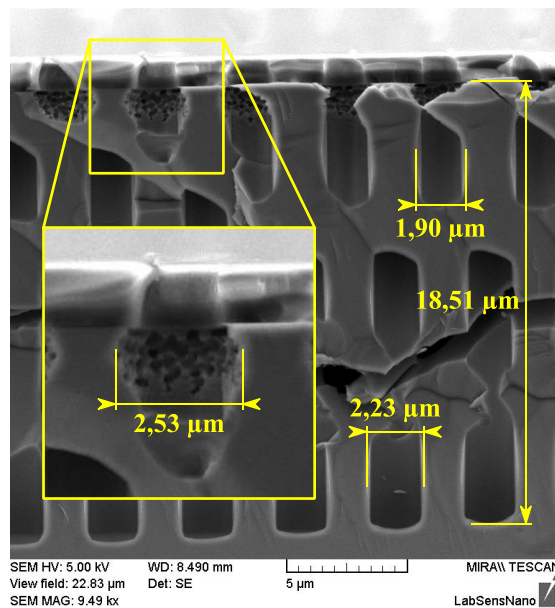
### 3.3.7 Omezení „bottling“ efektu

Doposud byl u všech leptaných struktur pozorován tzv. „bottling“ efekt (z angl. *bottle* – lahev), tedy charakteristické podleptání bezprostředně pod rozhraním fotorezist/substrát. Tento efekt může být nežádoucí při následných technologických krocích, jako například různé PVD nebo CVD techniky, zejména pak ALD. Snahou tohoto experimentu je buďto naprostá eliminace tohoto efektu, nebo alespoň částečné omezení.

K posouzení vlivu měněného parametru (nebo parametrů) byl nejprve leptán referenční vzorek. Parametry procesu nastavené při leptání referenčního vzorku jsou uvedeny v tab. 3.6, výsledný profil leptu je zobrazen na obr. 3.14.

**Tab. 3.6:** Parametry procesu leptání referenčního vzorku u potlačení „bottling“ efektu

$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF_6}$	$Q_{O_2}$	$\vartheta$
10 min	12 mTorr	4 W	600 W	70 sccm	7 sccm	-110 °C



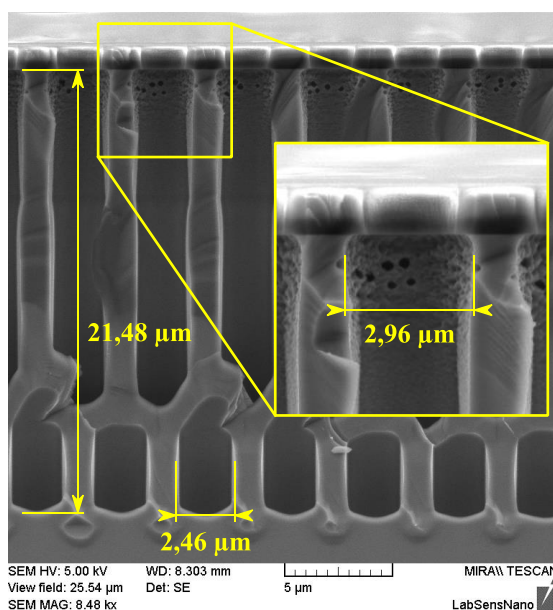
**Obr. 3.14:** SEM snímek profilu leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  leptaných procesem s referenčními parametry nastavenými dle tab. 3.6

Následné vzorky byly vždy leptány procesem rozděleným na dvě fáze. V první fázi trvající 5 minut byly zkoušeny různé postupy – snížení výkonu ICP, zvýšení výkonu CCP, snížení tlaku komory a přidání argonového plynu. Parametry druhé fáze pak byly totožné s těmi uvedenými v tab. 3.6. Parametry nastavené při první fázi jsou přehledně shrnuty v tab. 3.8. Tato nastavení vycházejí z literatury rozebrané z teoretické části, viz podkapitola 2.1.1, a z poznatků získaných z dosavadní optimalizace kryogenního procesu.

**Tab. 3.7:** Parametry nastavené při první fázi u potlačení „bottling“ efektu; uvedeny jsou pouze parametry rozdílné oproti parametrům uvedeným v tab. 3.6

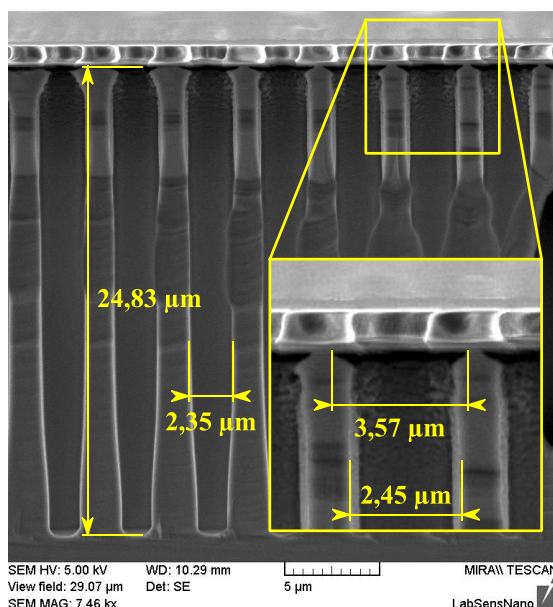
Vzorek č.	$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{O_2}$	$Q_{Ar}$
1	5 min	7 mTorr	10 W	350 W	9 sccm	–
2	5 min	7 mTorr	12 W	300 W	9 sccm	–
3	5 min	7 mTorr	–	300 W	9 sccm	–
4	5 min	7 mTorr	12 W	350 W	–	–
5	5 min	7 mTorr	12 W	350 W	6 sccm	–
6	5 min	7 mTorr	18 W	350 W	–	–
7	5 min	7 mTorr	12 W	350 W	–	5 sccm
8	5 min	7 mTorr	12 W	350 W	–	10 sccm

U všech testovaných procesů byl vliv na „bottling“ efekt minimální, nebo se profil leptu zhoršil, tj. docházelo k výraznějšímu podleptání, výskytu černého křemíku, anebo ke zhoršení míry „bottling“ efektu. Příklad takového zhoršení je zobrazen na obr. 3.15.



**Obr. 3.15:** SEM snímek profilu leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  leptaných procesem s parametry nastavenými dle tab. 3.8 (vzorek č. 6)

Nejlepšího, avšak stále nepřijatelného výsledku bylo dosaženo u vzorku č. 4, tedy u procesu se zvýšeným výkonem zdroje CCP, sníženým výkonem zdroje ICP a sníženým tlakem komory (vztaženo k parametrům uvedeným v tab. 3.6). Snímek profilu leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  tohoto vzorku je zobrazen na obr. 3.16. Nevýhodou tohoto nastavení procesu je výrazné podleptání bezprostředně pod rozhraním fotorezist/substrát – charakteristický zářez (viz detail na obr. 3.16).

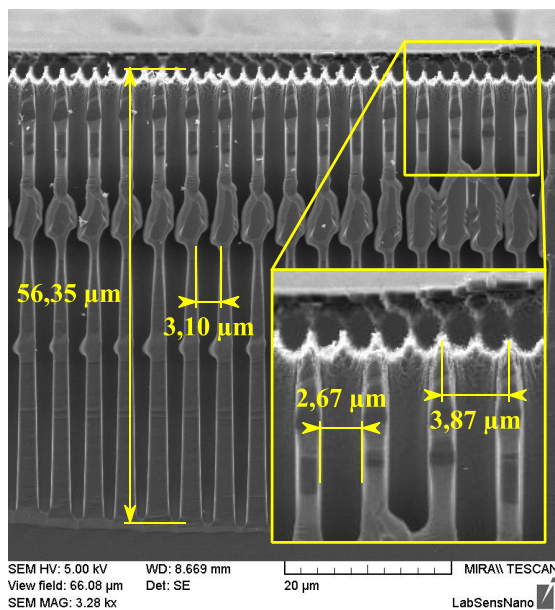


**Obr. 3.16:** SEM snímek profilu leptu  $2\ \mu\text{m}$  děr leptaných s parametry nastavenými dle tab. 3.8 (vzorek č. 4)

U všech zkoušených variant uvedených v tab. 3.7 byl nastavený tlak komory 7 mTorr. Z podkapitoly 2.1.1 vychází, že snížení tlaku má za následek omezení podleptávání a teoreticky tak i útlum „bottling“ efektu. Jelikož však měly změny uvedené v tab. 3.7 ponejvíce negativní vliv, byly parametry následujícího testovaného procesu totožné s těmi uvedenými v tab. 3.5 s výjimkou právě tlaku komory. Ten byl nastaven na 7 mTorr v průběhu celého procesu leptání. Parametry procesu se sníženým tlakem komory jsou k nahlédnutí v tab. 3.8, výsledný profil leptu je zobrazen na obr. 3.17.

**Tab. 3.8:** Parametry pro rozdělený kryogenní proces se sníženým tlakem komory

Fáze	$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF_6}$	$Q_{O_2}$	$\mathcal{B}$
1.	20 min	7 mTorr	4 W	600 W	70 sccm	7 sccm	-110 °C
2.	40 min	7 mTorr	4 W	600 W	70 sccm	8 sccm	-110 °C

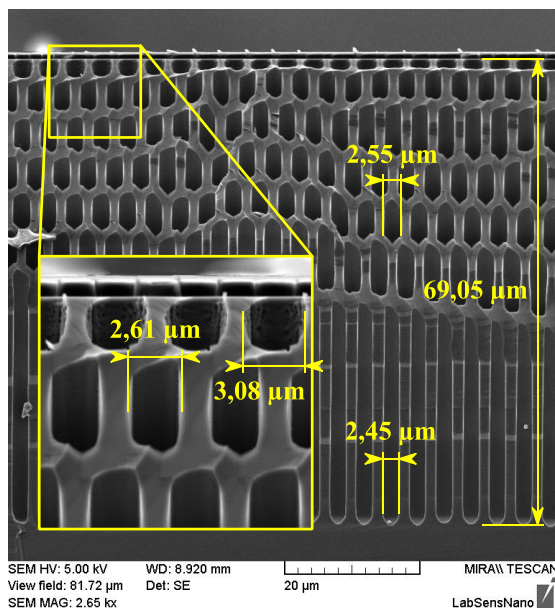


**Obr. 3.17:** SEM snímek profilu leptu 2  $\mu\text{m}$  děr leptaných rozděleným procesem se sníženým tlakem komory (7 mTorr); ostatní parametry jsou uvedeny v tab. 3.8

Oproti leptané struktuře zobrazené na obr. 3.13 je „bottling“ efekt na obr. 3.17 výraznější. Zkoušen byl tedy i opačný přístup, a to sice zvýšení tlaku komory (17 mTorr). Nastavené parametry jsou shrnuty v tab. 3.9, výsledný profil leptu je zobrazen na obr. 3.18.

**Tab. 3.9:** Parametry pro rozdělení kryogenní proces se zvýšeným tlakem komory

Fáze	$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF_6}$	$Q_{O_2}$	$\mathcal{I}$
1.	20 min	17 mTorr	4 W	600 W	70 sccm	7 sccm	-110 °C
2.	40 min	17 mTorr	4 W	600 W	70 sccm	8 sccm	-110 °C



**Obr. 3.18:** SEM snímek profilu leptu 2  $\mu\text{m}$  děr leptaných rozděleným procesem se zvýšeným tlakem komory (17 mTorr); ostatní parametry jsou uvedeny v tab. 3.9

Ze vzájemného porovnání obr. 3.13, obr. 3.17 a obr. 3.18 vyplývá, že zvýšení tlaku komory má, paradoxně, za následek potlačení „bottling“ efektu. Ten je při nastaveném tlaku 17 mTorr sice stále patrný, avšak nedochází k tak výraznému podleptání. Vedlejším efektem zvýšení tlaku je vyšší rychlost leptání, což je způsobeno vyšší koncentrací reaktantů v komoře [68].

Další zvyšování tlaku komory teoreticky zlepší profil leptu, zkoušeny byly tlaky komory 25 mTorr a 35 mTorr. U obou uvedených však již dochází k velmi častým kolizím mezi ionty, na substrát tak dopadají pod neideálním úhlem a proces leptání je více izotropní. Tento jev lze obejít zvýšením výkonu zdroje CCP, čímž však dochází ke snížení selektivity (viz podkapitola 3.3.2). Tento krok je tudíž kontraproduktivní.

### 3.3.8 Výsledný optimalizovaný proces

Optimalizace byla zaměřena na díry s průměrem 2  $\mu\text{m}$ . Vhodným nastavením výkonů zdrojů CCP a ICP, průtoku a poměrem plynů  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  a tlaku komory bylo dosaženo poměru šířky ku hloubce leptaných struktury  $\sim 28:1$ . Tento dosažený poměr je možné zvýšit, ovšem na úkor míry „bottling“ efektu. Zároveň byly učiněny kroky k potlačení „bottling“ efektu. Výsledné parametry procesu jsou shrnuty v tab. 3.9, SEM snímek struktur leptaných tímto nastavením je zobrazen na obr. 3.18.

### 3.4 Optimalizace Bosch procesu

Parametry nastavitelné u Bosch procesu mají analogický vliv těch u kryogenního procesu. Tyto parametry zahrnují tlak komory, výkony zdrojů CCP a ICP a celkový průtok plynů. Na rozdíl od kryogenního procesu však Bosch proces není kontinuální a dochází k časovému multiplexování kroků pasivace a leptání struktur, bylo tedy potřebné optimalizovat jednotlivé kroky. U tohoto procesu vzniká charakteristické vroubkování (viz podkapitola 2.1.2), snahou tedy byla, pokud možno, co největší redukce těchto vroubků.

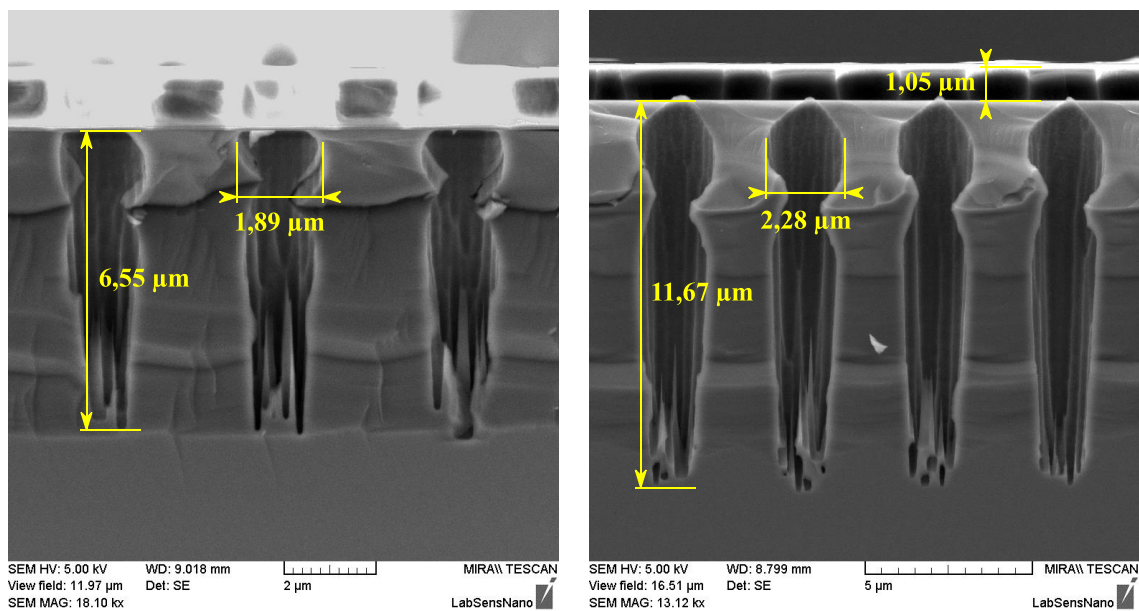
#### 3.4.1 Výchozí parametry procesu

Výchozí kroky s uvedenými parametry procesu s omezeným vroubkováním jsou shrnuty v tab. 3.10. Tyto kroky vychází z pokročilého Bosch procesu poskytnutého dodavatelem Oxford Instruments, který seskládá z kroků pasivace, depasivace a leptání (proces je schematicky znázorněn na obr. 2.3).

Díry s průměrem 2  $\mu\text{m}$  leptané s uvedeným nastavením a počtem cyklů (opakování kroků) 100 $\times$  a 200 $\times$  při teplotě komory 20  $^{\circ}\text{C}$  jsou zobrazeny na obr. 3.19.

**Tab. 3.10:** Jednotlivé kroky a parametry výchozího pokročilého Bosch procesu

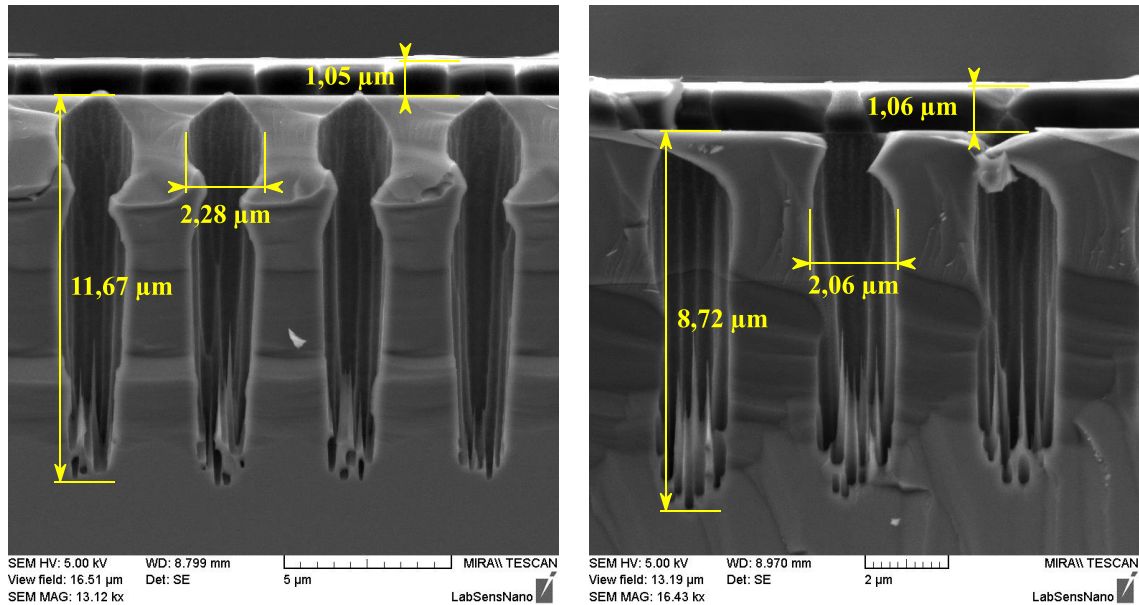
Krok	$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF_6}$	$Q_{C_4F_8}$
Pasivace	900 ms	50 mTorr	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
Depas. A	500 ms	30 mTorr	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
Depas. B	600 ms	30 mTorr	40 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
Leptání	500 ms	30 mTorr	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm



**Obr. 3.19:** SEM snímky profilu leptu 2  $\mu\text{m}$  děr s nastavenou teplotou komory 20  $^{\circ}\text{C}$  a počtem cyklů: 100 $\times$  (vlevo); 200 $\times$  (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.10

### 3.4.2 Vliv nastavené teploty komory

Při optimalizaci kryogenního procesu byla teplota komory stanovena hned na počátku a v rámci celého optimalizačního procesu nebyla měněna. U Bosch procesu byl volen opačný přístup a teplota byla prvním optimalizovaným parametrem. Zkoušeny byly teploty 20 °C, 10 °C a 0 °C, přičemž ostatní parametry procesu byly voleny dle tab. 3.10. Výsledné profily leptu děr s průměrem 2 μm jsou zobrazeny na obr. 3.20.



**Obr. 3.20:** SEM snímky profilu leptu 2 μm děr s 200 cykly procesu a nastavenou teplotou komory: 20 °C (vlevo); 0 °C (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.10

Ze SEM snímků uvedených na obr. 3.20 vyplývá jasná závislost profilu leptu a rychlosti leptání na nastavené teplotě substrátu. Nižší teplota inhibuje chemické procesy a rychlost leptání klesá. Vedlejším důsledkem je však i inhibice procesů na stěnách leptaných struktur, což má za následek omezení podleptání. Nižší teplota je tedy obecně vhodnější, pokud není prioritou vysoká rychlost leptání. Selektivita fotorezistu vůči substrátu zůstala při změně teploty nezměněna, nebo je změna zanedbatelná.

Z uvedených poznatků byla v dalších optimalizačních krocích volena teplota substrátu 0 °C.

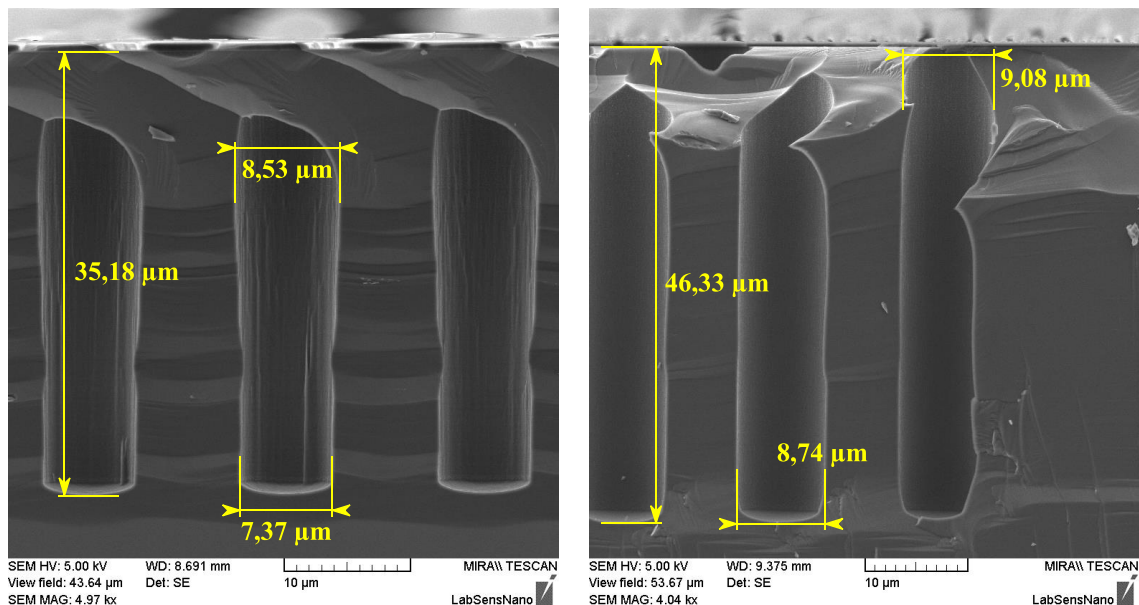
### 3.4.3 Optimalizace impedančního přizpůsobení

Bohužel nebyl u doposud leptaných vzorků optimalizován výkon zdroje CCP. V Bosch procesu se ukázalo být důležitým parametrem impedanční přizpůsobení, které vychází z nastavení fáze a amplitudy napětí relativně k proudu zdroje CCP. U kryogenního procesu nemá aparatura PlasmaPro 100 Cobra<sup>®</sup> potíže s automatickým laděním, neboť se jedná o kontinuální proces. V Bosch procesu se zdroj CCP spíná (v tomto případě) řádově na 100 ms, a tedy nastavená hodnota výkonu neodpovídá hodnotě reálné, resp. je nižší a obecně není v každém depasivačním kroku konstantní.

V rámci následujících procesů (a to včetně následujících podkapitol) proto byly vždy voleny konstantní parametry impedančního přizpůsobení. Tyto parametry nejsou v práci uvedeny, jelikož výsledným zkoumaným parametrem je vždy hodnota výkonu. Pro srovnání jsou na obr. 3.21 zobrazeny profily leptů před a po manuálním impedančním přizpůsobení pro parametry nastavené dle tab. 3.11. Voleno bylo 300 cyklů.

**Tab. 3.11:** Jednotlivé kroky a parametry Bosch procesu nastavené při optimalizaci impedančního přizpůsobení

Krok	$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF6}$	$Q_{CAF8}$
Pasivace	900 ms	50 mTorr	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
Depas. A	500 ms	30 mTorr	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
Depas. B	800 ms	30 mTorr	40 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
Leptání	500 ms	30 mTorr	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm



**Obr. 3.21:** SEM snímky profilu leptu 8 μm děr s impedančním přizpůsobením v rámci depasivačního kroku: automatickým (vlevo); manuálním (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.10

Jak již bylo zmíněno v úvodu této podkapitoly, u automatického impedančního přizpůsobení je reálný výkon zdroje CCP nižší nežli výkon nastavený. To sice vede k vyšší selektivitě fotorezistu vůči substrátu, avšak zároveň k nedostatečné depasivaci dna leptané struktury, jak je ostatně patrné z obr. 3.21. Manuální impedanční přizpůsobení umožnilo přesnější optimalizaci kroku depasivace, viz následující podkapitola.

#### 3.4.4 Optimalizace kroku depasivace

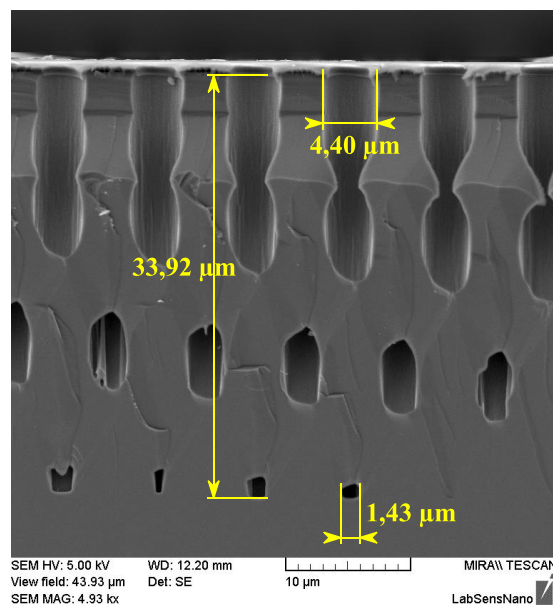
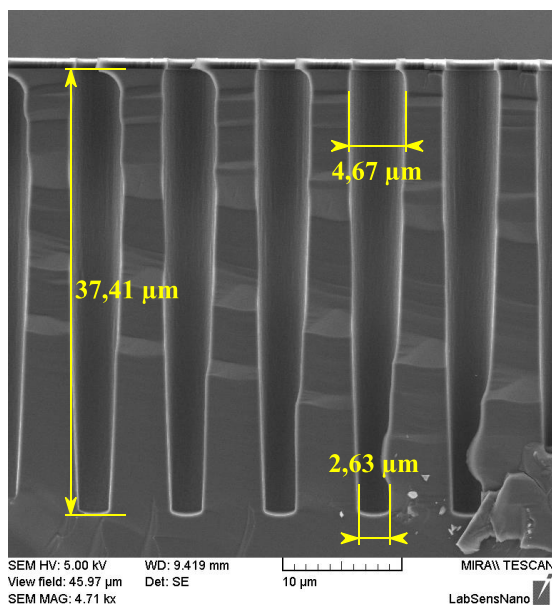
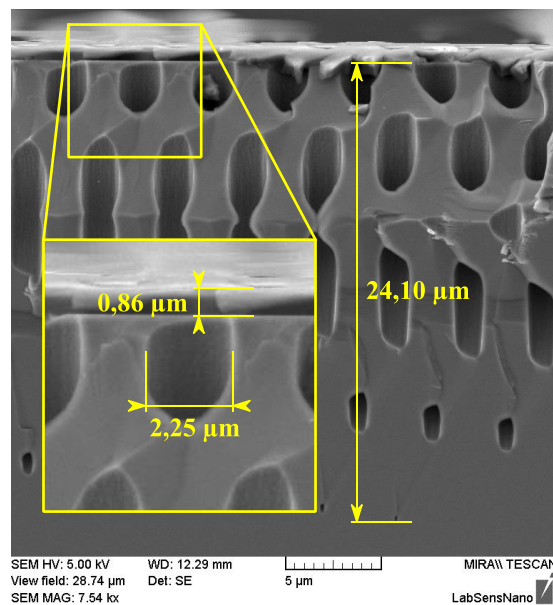
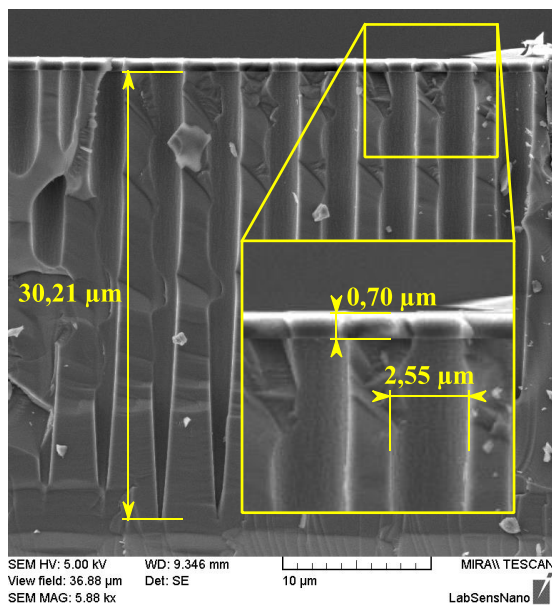
U některých dosavadních leptaných struktur se vyskytoval černý křemík. Z důvodu multiplexované povahy procesu však nelze tento defekt eliminovat tak jako u kryogenního procesu. Impedanční přizpůsobení zdroje CCP optimalizované v podkapitole 3.4.3 sice černý křemík eliminovalo, nyní byl ovšem výkon tohoto zdroje nepřiměřeně velký, což má negativní vliv na selektivitu fotorezistu vůči substrátu.

V rámci optimalizace kroku depasivace byl sledován výkon zdroje CCP a doba trvání tohoto kroku. Zkoušeny byly časy 600 ms, 700 ms a 800 ms a výkony 10 W, 20 W a 40 W v rámci druhého depasivačního kroku – depasivace B. Všechny parametry jsou přehledně shrnuty v tab. 3.12.

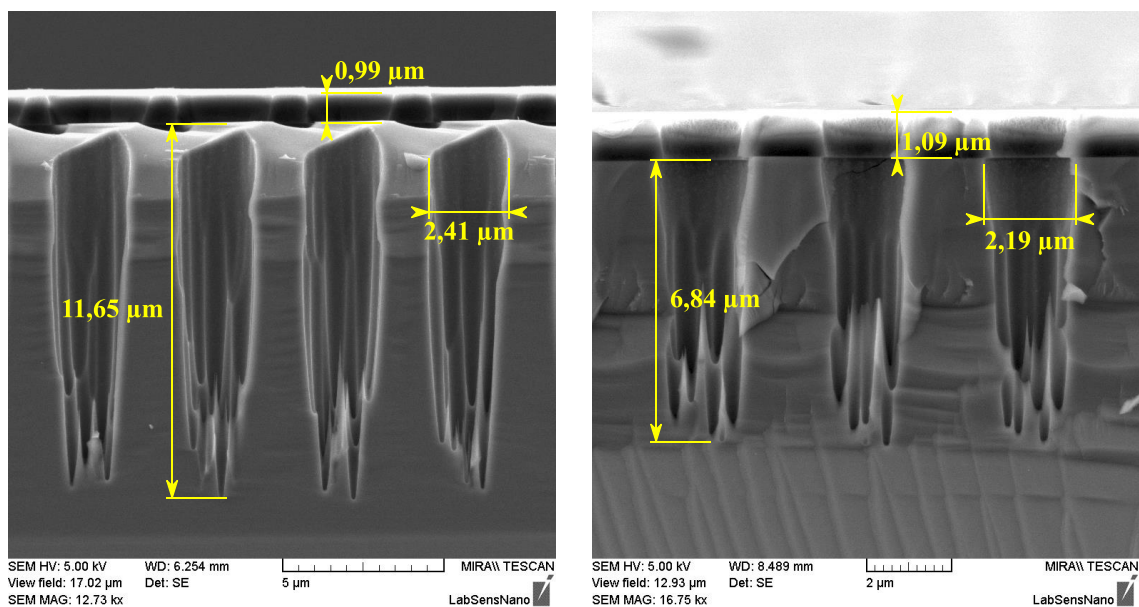
Krajní sledované hodnoty trvání kroku depasivace B (600 ms a 800 ms) pro nastavený výkon zdroje CCP 20 W u profilů leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  a 4  $\mu\text{m}$  jsou zobrazeny na obr. 3.22. Pro srovnání jsou na obr. 3.23 zobrazeny profily leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  pro nastavený výkon zdroje CCP 10 W a totožné doby depasivace.

**Tab. 3.12:** Jednotlivé kroky a parametry Bosch procesu nastavené při optimalizaci kroku depasivace B; volená teplota komory 0 °C; 300 cyklů

<b>Krok</b>	<b><i>t</i></b>	<b><i>p</i></b>	<b><i>P<sub>CCP</sub></i></b>	<b><i>P<sub>ICP</sub></i></b>	<b><i>Q<sub>SF6</sub></i></b>	<b><i>Q<sub>C4F8</sub></i></b>
<b>Pasivace</b>	900 ms	50 mTorr	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
<b>Depas. A</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
<b>Depas. B</b>	600–800 ms	30 mTorr	10–40 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
<b>Leptání</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm



**Obr. 3.22:** SEM snímky profilu leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  (nahore) a 4  $\mu\text{m}$  (dole) s nastaveným výkonem zdroje CCP 20 W a trváním kroku depasivace B: 800 ms (vlevo); 600 ms (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.12



**Obr. 3.23:** SEM snímky profilu leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$ , s nastaveným výkonem zdroje CCP 10 W a trváním kroku depasivace B: 800 ms (vlevo); 600 ms (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.12

Je patrné, že příliš nízký výkon zdroje CCP má sice kladný vliv na selektivitu, nedostačuje však k depasivaci dna. Důsledkem je tvorba černého křemíku a zastavení procesu v určité hloubce. U výkonu zdroje CCP 20 W dochází při nedostatečně dlouhém kroku depasivace k přílišnému zužování struktury. Trvání tohoto kroku bylo z důvodu zlepšení selektivity voleno záměrně nižší (600 ms) a proces byl rozdělen na dvě fáze, viz podkapitola 3.4.5.

### 3.4.5 Rozdělení procesu na dvě a více fází

U Bosch procesu je velice kritická selektivita fotorezistu vůči substrátu. Pro hluboký lept je selektivita velmi důležitým parametrem, bylo tedy snahou co nejvíce omezit odleptávání fotorezistu. Toho je možné dosáhnout například zvolením nižšího výkonu zdroje CCP v kroku depasivace B při zahájení procesu a graduálním zvyšováním v průběhu leptání. Změna v tomto kroku však vyžaduje změnu parametrů v kroku pasivace a leptání.

#### Rozdělení na dvě fáze

Při rozdělení procesu na dvě samostatné fáze bylo zkoušeno hned několik variant. Během první fáze byly parametry nastaveny dle tab. 3.13, ve fázi druhé pak byla měněna doba trvání a výkon zdroje CCP v rámci kroku depasivace B a doby trvání v rámci kroků pasivace a leptání. Ideální varianta pak byla zvolena k další optimalizaci, tedy rozdělení na tři a více fází, viz dále. Je nutno doplnit, že již v tomto stádiu je recept procesu relativně obsáhlý a jakékoli jmenování změn působí pouze zmatečně, pro přehlednost jsou zde uvedeny pouze klíčové poznatky.

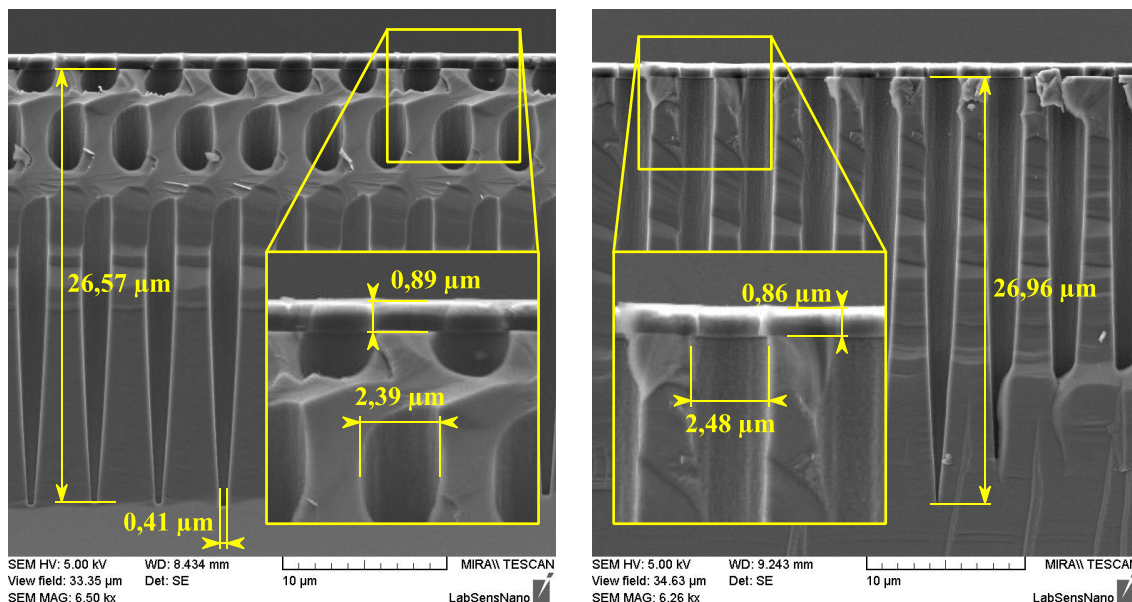
**Tab. 3.13:** Jednotlivé kroky a parametry Bosch procesu nastavené v první fázi dvoufázového procesu; volená teplota komory 0 °C; 100 cyklů

Krok	$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF_6}$	$Q_{C_4F_8}$
<b>Pasivace</b>	900 ms	50 mTorr	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
<b>Depas. A</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
<b>Depas. B</b>	600 ms	30 mTorr	20 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
<b>Leptání</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm

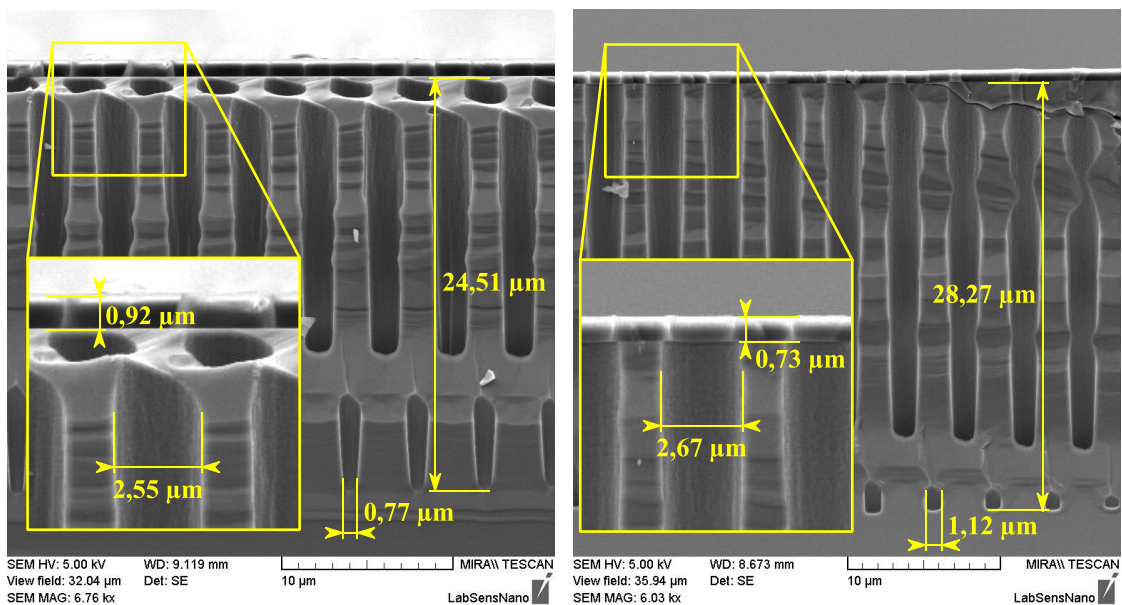
Na obr. 3.24 a obr. 3.25 jsou zobrazeny SEM snímky korespondující s procesy s rozdílnými dobami trvání kroku pasivace a leptání a výkonem zdroje CCP v rámci deparivace B (vztaženo k tab. 3.13). Nejpříjemnější profil vybraný k další optimalizaci je zobrazen na obr. 3.26. Druhá fáze procesu korespondující s tímto profilem leptu se vyznačuje vyšším výkonem zdroje CCP 30 W v kroku deparivace B, viz tab. 3.14.

**Tab. 3.14:** Jednotlivé kroky a parametry Bosch procesu nastavené v druhé fázi optimalizovaného dvoufázového procesu; volená teplota komory 0 °C; 200 cyklů

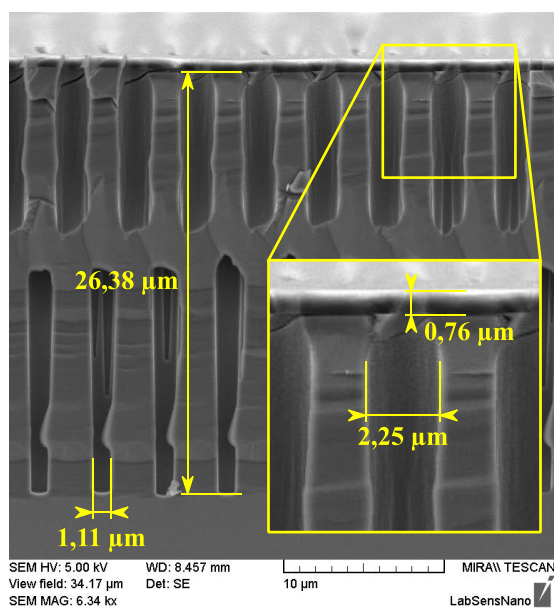
Krok	$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF_6}$	$Q_{C_4F_8}$
<b>Pasivace</b>	900 ms	50 mTorr	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
<b>Depas. A</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
<b>Depas. B</b>	600 ms	30 mTorr	30 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
<b>Leptání</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm



**Obr. 3.24:** SEM snímky profilu lepu děr s průměrem 2 μm a s dobou trvání: kroku deparivace 700 ms (vlevo); kroku leptání 700 ms (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.13



**Obr. 3.25:** SEM snímky profilu leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  a s dobou trvání: kroků depozice i leptání 700 ms (vlevo); kroku depozice 700 ms a kroku deparivace B 800 ms (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.13



**Obr. 3.26:** SEM snímky profilu leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  leptaných optimalizovaným dvoufázovým Bosch procesem

Rozdělení procesu na dvě samostatné fáze sloužilo výhradně k určení nuancí, které u jednotného procesu nebylo možné odhalit. Výsledný recept korespondující s profilem leptu na obr. 3.26 je dobrým kompromisem mezi selektivitou a profilem leptu – bylo omezeno zužování struktury. Nevýhodou tohoto nastavení je nicméně tvorba černého křemíku.

### Rozdělení procesu na tři fáze

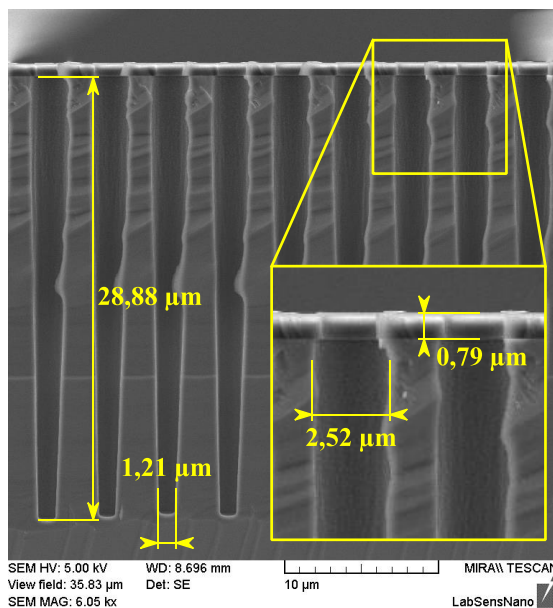
Navzdory snaze přizpůsobit proces pro co největší selektivitu a hloubku struktury, u dvoufázového procesu docházelo k tvorbě černého křemíku. Jelikož ve dvoufázovém procesu nebylo zasahováno do první fáze procesu, v této podkapitole je rozebrána důkladná optimalizace prvních dvou fází, navíc je však přidána fáze třetí. Ta je zároveň finální, což je dáno zejména zmiňovanou selektivitou – v určité části procesu není dále možné pokračovat z důvodu odleptání veškerého fotorezistu.

V rámci optimalizace bylo zkoušeno nepřeberně mnoho variant, které pro svoji obsáhlost nejsou uvedeny. Obdobně jako u dvoufázového procesu jsou tedy uvedeny pouze klíčové změny.

Nejdříve byl upraven proces uvedený v tab. 3.13 a tab. 3.14 zvýšením času depasivace B v druhé fázi a přidáním fáze třetí s delší dobou trvání leptání. Výsledný recept je shrnut v tab. 3.15. Profil leptu děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  leptaných tímto receptem je uveden na obr. 3.27.

**Tab. 3.15:** Jednotlivé fáze a parametry před optimalizací třífázového Bosch procesu; volená teplota komory 0 °C; 100 cyklů v každé fázi; tučně jsou zvýrazněny změny oproti optimalizovanému dvoufázovému procesu

Fáze	Krok	$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF6}$	$Q_{CAF8}$
1.	<b>Pasivace</b>	900 ms	50 mTorr	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
	<b>Depas. A</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Depas. B</b>	600 ms	30 mTorr	20 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Leptání</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm
2.	<b>Pasivace</b>	900 ms	50 mTorr	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
	<b>Depas. A</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Depas. B</b>	<b>700 ms</b>	30 mTorr	30 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Leptání</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm
3.	<b>Pasivace</b>	900 ms	50 mTorr	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
	<b>Depas. A</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Depas. B</b>	<b>700 ms</b>	30 mTorr	30 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Leptání</b>	<b>800 ms</b>	30 mTorr	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm



**Obr. 3.27:** SEM snímek profilu leptu 2  $\mu\text{m}$  děr leptaných neoptimalizovaným třífázovým Bosch procesem

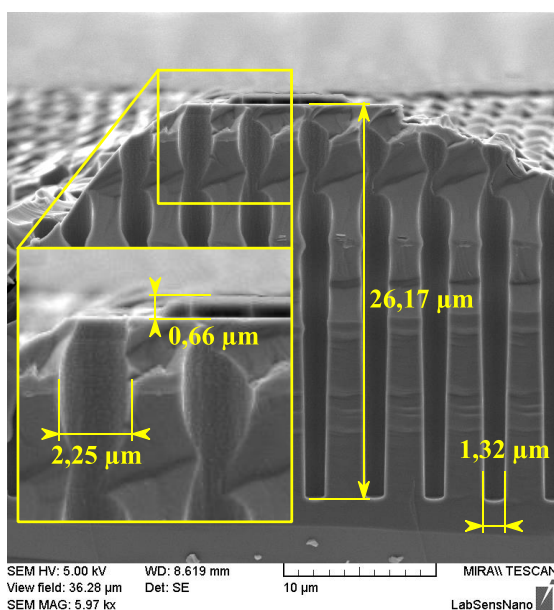
Jak je patrné, černý křemík byl eliminován, stále však dochází k nevyhovujícímu podleptání. Omezení tohoto podleptání bylo částečně dosaženo zvýšením tlaku komory v rámci pasivačního kroku. Teoreticky dojde při zvýšení tlaku k silnější pasivaci, bylo tak nutné zvýšit dobu trvání kroku depasivace B v první fázi procesu (700 ms – porovnej s tab. 3.15). Při zvýšení tlaku komory v rámci pasivačního kroku do sebe ionty prekurzoru častěji naráží, trajektorie iontů svírá se substrátem ostřejší úhel, a tedy s rostoucí hloubkou tloušťka pasivační vrstvy slábne. Tento efekt je též žádaný, jelikož doposud byl u všech leptaných struktur pozorován zužující se profil leptu. Slabší pasivační vrstva obecně vede vhodným nastavením kroku leptání k izotropnějším leptom, čímž zužování profilu leptom omezuje.

Zároveň byl upraven výkon CCP v druhé fázi a tlaky depasivačního i leptacího kroku ve třetí fázi. Důvod je analogický s tlakem v pasivačním kroku – dopadající ionty mají při nižším tlaku vůči substrátu kolmější trajektorii a efektivně tak leptají dno struktury, nikoli stěny.

Výsledný recept je shrnut v tab. 3.16, profil leptom je pak zobrazen na obr. 3.28.

**Tab. 3.16:** Jednotlivé fáze a parametry optimalizovaného třífázového Bosch procesu; volená teplota komory 0 °C; 100 cyklů v každé fázi; tučně jsou zvýrazněny změny oproti neoptimalizovanému třífázovému procesu

Fáze	Krok	$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{SF6}$	$Q_{CAF8}$
1.	<b>Pasivace</b>	900 ms	<b>65 mTorr</b>	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
	<b>Depas. A</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Depas. B</b>	<b>700 ms</b>	30 mTorr	20 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Leptání</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm
2.	<b>Pasivace</b>	900 ms	<b>60 mTorr</b>	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
	<b>Depas. A</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Depas. B</b>	700 ms	30 mTorr	<b>25 W</b>	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Leptání</b>	500 ms	30 mTorr	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm
3.	<b>Pasivace</b>	900 ms	<b>55 mTorr</b>	0 W	1750 W	10 sccm	200 sccm
	<b>Depas. A</b>	500 ms	<b>25 mTorr</b>	0 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Depas. B</b>	700 ms	<b>25 mTorr</b>	30 W	2000 W	200 sccm	10 sccm
	<b>Leptání</b>	800 ms	<b>25 mTorr</b>	0 W	1800 W	200 sccm	10 sccm



**Obr. 3.28:** SEM snímek profilu lepu 2 µm děr leptaných optimalizovaným třífázovým Bosch procesem

Zkoušeny byly i vyšší tlaky v kroku pasivace. Nicméně experimentálně bylo zjištěno, že existuje jistá maximální hranice, nad níž již přestává mít tlak v pasivačním kroku vliv na podleptávání. Toto maximum bylo empiricky stanoveno na hodnotu ~70 mTorr.

### 3.4.6 Výsledný optimalizovaný proces

Optimalizace byla zaměřena na díry s průměrem 2  $\mu\text{m}$ . Vhodným nastavením teploty komory, rozdělením procesu na jednotlivé kroky pasivace, depasivace a leptání, impedančního přizpůsobení a graduální změny časů, výkonů a tlaků jednotlivých kroků bylo dosaženo poměru šířky ku hloubce leptaných struktury  $\sim 14:1$ . Výsledné parametry procesu jsou shrnuty tab. 3.16. SEM snímek struktur leptaných tímto nastavením je zobrazen na obr. 3.28.

Tento proces je vhodné dále upravit přidáním další fáze s výkonem CCP  $\sim 40$  W, ostatní parametry totožné s těmi ve třetí fázi. Docílí se tak kýženého profilu a vyššího poměru leptu. Snahou optimalizačních kroků bylo zachování dobré selektivity fotorezistu vůči substrátu. Nicméně u Bosch procesu je v určité hloubce požadován dostatečný (tj. vyšší) výkon zdroje CCP. Předpokládá se tak naprosté odleptání fotorezistu, čímž je samozřejmě limitován dosažitelný poměr hloubky leptu ku jeho šířce. K této fázi experimentů nakonec nedošlo z důvodu dlouhodobé poruchy zařízení, a proto se jimi tato práce dále nezabývá.

## 3.5 Analýza uniformnosti povrchu leptaných struktur

Vybrané leptané struktury byly analyzovány za účelem zjištění uniformnosti struktur. V mnoha případech je u leptaných struktur důležité stanovit parametry jako například drsnost nebo procentuální množství povrchových reziduí. Z tohoto důvodu byly oba uvedené parametry analyzovány mikroskopem atomárních sil (AFM) za účelem určení drsnosti povrchu stěn leptaných struktur a rentgenovým fotoelektronovým spektroskopem (XPS) za účelem stanovení poměrného množství reziduí fluoru. V následujících podkapitolách jsou jednotlivě rozebrány oba typy analýz pro struktury leptané jak kryogenním, tak Bosch procesem.

### 3.5.1 Analýza drsnosti povrchu struktur pomocí AFM

U leptaných vzorků byla měřena drsnost povrchu stěn pomocí mikroskopu atomárních sil v režimu oscilace (tapping mode). Princip této metody spočívá v rozkmitání pružného držáku hrotu, tzv. cantileveru, na rezonanční kmitočet a rastrování analyzovaného vzorku takto rozkmitaným cantileverem. Elektrostatická síla, kterou působí povrch materiálu na sondu, způsobí posun rezonanční frekvence. Zpětnovazební piezo systém následně upraví vzdálenost mezi hrotem a vzorkem tak, že se rezonanční frekvence opět nastaví na původní hodnotu. Deformace cantileveru se detekují systémem kvadrantové fotodiody a laserového svazku. Tímto způsobem lze získat topografii s nanometrovým rozlišením. [71-73]

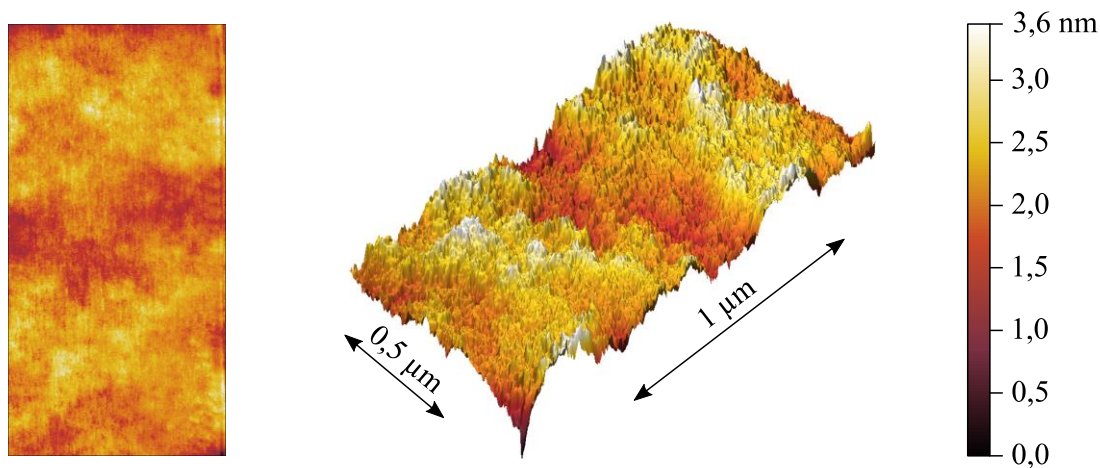
K analýze bylo využito zařízení Dimension Icon (Bruker, USA) s hrotem Scanasyst®-AIR ( $f_0 = 70 \text{ kHz}$ ,  $k = 0,4 \text{ Nm}^{-1}$ ; Bruker, USA). U děr s průměrem  $1 \mu\text{m}$  byla zkoumána plocha  $1 \times 0,5 \mu\text{m}$ , u děr s průměrem  $2 \mu\text{m}$  nebo větším pak plocha  $2 \times 1 \mu\text{m}$ , přičemž delší strana vždy odpovídala směru leptu. Rozlišení však bylo voleno vždy  $1024 \times 512$  bodů. Získaná topografická data byla následně vyhodnocována pomocí volně dostupného softwaru Gwyddion.

### Drsnost povrchu struktur připravených kryogenním procesem

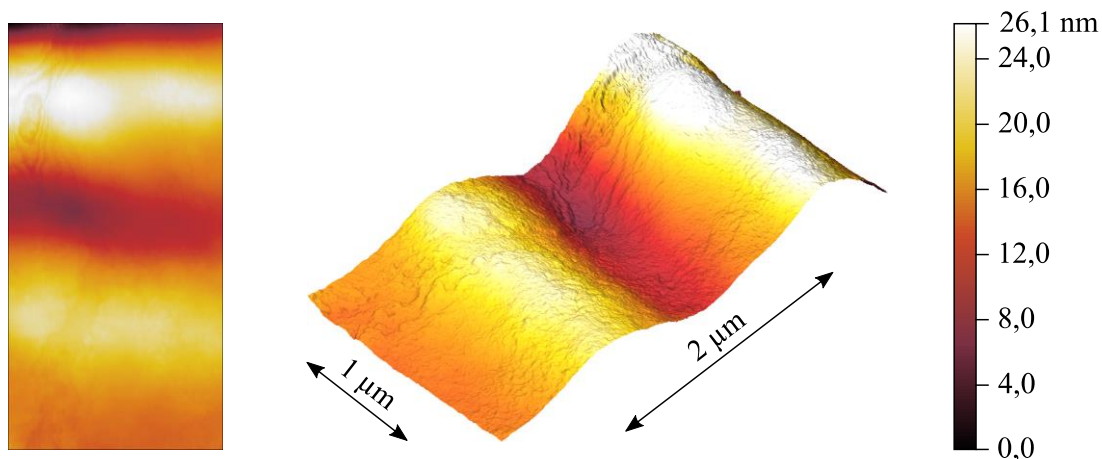
Výsledky měření drsností pro  $1\text{--}4 \mu\text{m}$  díry leptané optimalizovaným kryogenním procesem jsou shrnuty v tab. 3.17. Topografie stěn děr s průměry  $1 \mu\text{m}$ , resp.  $2 \mu\text{m}$  jsou zobrazeny na obr. 3.29, resp. obr. 3.30.

**Tab. 3.17:** Povrchové drsnosti stěn  $S_A$  a odpovídající směrodatné odchytky u děr s průměry  $1\text{--}4 \mu\text{m}$  leptaných kryogenním procesem

Průměr díry	$S_A$	$\sigma$
$1 \mu\text{m}$	$\sim 370 \text{ pm}$	$43 \text{ pm}$
$2 \mu\text{m}$	$\sim 1500 \text{ pm}$	$1383 \text{ pm}$
$4 \mu\text{m}$	$\sim 2000 \text{ pm}$	$1703 \text{ pm}$



**Obr. 3.29:** AFM analýza povrchu stěny díry s průměrem  $1 \mu\text{m}$  leptané kryogenním procesem; delší strana koresponduje se směrem leptu



**Obr. 3.30:** AFM analýza povrchu stěny díry s průměrem 2  $\mu\text{m}$  leptané kryogenním procesem; delší strana koresponduje se směrem leptu

U všech měřených povrchů bylo pozorováno charakteristické zvlnění (viz obr. 3.29 a obr. 3.30). Tento jev naznačuje určité procesy, které vedou k periodickému střídání tloušťky pasivační vrstvy, a to i přestože je kryogenní proces kontinuální. Dalším pozoruhodným efektem tohoto zvlnění je korelace mezi drsností a průměrem díry, tedy s rostoucím průměrem roste míra zvlnění, a tím pádem i drsnost povrchu. U děr s průměry 2  $\mu\text{m}$  nebo většími je však i větší rozptyl hodnot drsností – byly naměřeny jak místa s malým zvlněním, tak s velkým. Naproti tomu u děr s průměrem 1  $\mu\text{m}$  byly naměřené hodnoty drsností konzistentní.

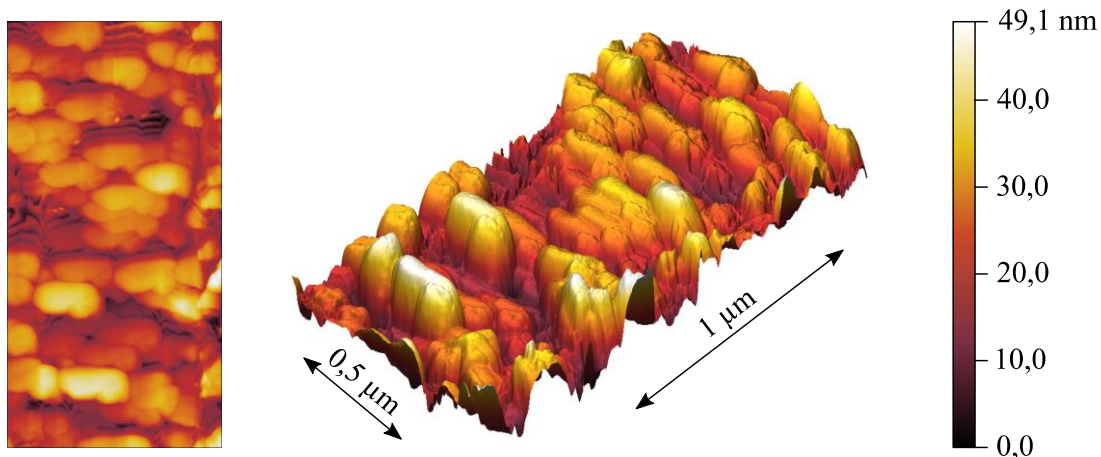
Z uvedených poznatků lze vyvodit, že toto zvlnění souvisí s RIE lag a ARDE efekty. Chemicko-fyzikální příčina tohoto jevu však objasněna nebyla. Dalším vyvozeným závěrem je nízká reprodukovatelnost drsnosti u děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  nebo vyšším.

### **Drsnost povrchu struktur připravených Bosch procesem**

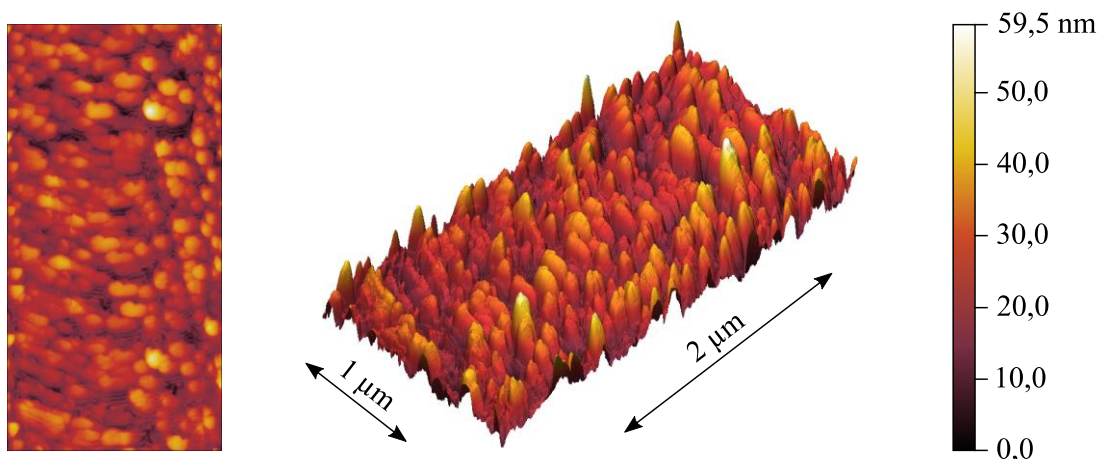
Výsledky měření drsností pro 1–4  $\mu\text{m}$  díry leptané optimalizovaným Bosch procesem jsou shrnuty v tab. 3.18. Topografie stěn děr s průměry 1  $\mu\text{m}$ , resp. 2  $\mu\text{m}$  jsou zobrazeny na obr. 3.31, resp. obr. 3.32.

**Tab. 3.18:** Povrchové drsnosti stěn  $S_A$  a odpovídající směrodatné odchytky u děr s průměry 1–4  $\mu\text{m}$  leptaných Bosch procesem

Průměr díry	$S_A$	$\sigma$
1 $\mu\text{m}$	~4700 pm	1436 pm
2 $\mu\text{m}$	~5200 pm	533 pm
4 $\mu\text{m}$	~2900 pm	1019 pm



**Obr. 3.31:** AFM analýza povrchu stěny díry s průměrem 1  $\mu\text{m}$  leptané Bosch procesem; delší strana koresponduje se směrem leptu



**Obr. 3.32:** AFM analýza povrchu stěny díry s průměrem 2  $\mu\text{m}$  leptané Bosch procesem; delší strana koresponduje se směrem leptu

U všech analyzovaných vzorků byly pozorovány výstupky, nejedná se však o charakteristické vroubkování příkladné pro Bosch proces (toto vroubkování je nicméně patrné na kolmém pohledu – viz obr. 3.31 vlevo). Lze tedy usoudit, že jsou tyto útvary tvořeny akumulovaným pasivačním polymerem.

Rozptyl drsností stěn je u děr se všemi analyzovanými průměry markantní, výstupky však byly pozorovány za každých okolností. Četnost výstupků, potažmo drsnost s rostoucí hloubkou struktury klesá. Korelace mezi drsností stěn a průměrem díry není na rozdíl od analýzy vzorků leptaných kryogenním procesem zřejmá. Určitou výhodou Bosch procesu je však nižší rozptyl hodnot drsností děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  nebo vyšším – tento proces poskytuje oproti kryogennímu procesu konzistentnější uniformnost leptaných struktur.

### 3.5.2 Prvková analýza povrchu struktur pomocí XPS

U leptaných vzorků bylo měřeno poměrné atomové zastoupení fluorových reziduí vztažené k celkovému atomovému zastoupení prvků Si, F, O, N a C pomocí rentgenové fotoelektronové spektroskopie. Tato metoda spočívá v ozařování analyzovaného povrchu svazkem rentgenového záření, který po kontaktu s povrchem emituje elektrony s energií rovnou rozdílu energie rentgenového záření a vazební energie. Tyto elektrony jsou poté selektovány elektrickým polem. Velmi žádanou výhodou XPS je analýza povrchu vzorků do hloubky pouze několika nanometrů, a tedy je velmi vhodná pro analýzu fluorových reziduí s očekávanou tloušťkou právě v tomto řádu. [74,75]

K analýze bylo využito zařízení AXIS Supra (Kratos, UK). Vždy byla provedena nejprve spektroskopie v celém dostupném spektru, tedy 0 eV až 1200 eV (emisní proud 12 mA). Dále byly analyzovány jednotlivé prvky s nastaveným vyšším rozlišením. Vyhodnocení relativního atomového zastoupení probíhalo pomocí softwaru ESCApe™ poskytovaného dodavatelem Kratos. Zkoumán byl povrch leptaného i neleptaného fotorezistu v místech otvorů děr a povrch leptaného i neleptaného křemíku bez fotorezistu. Z rozlišovacích omezení zařízení však nebylo možné analyzovat samotný profil leptu. Na každém vybraném vzorku byly provedeny celkem tři měření, vždy na rozdílných místech.

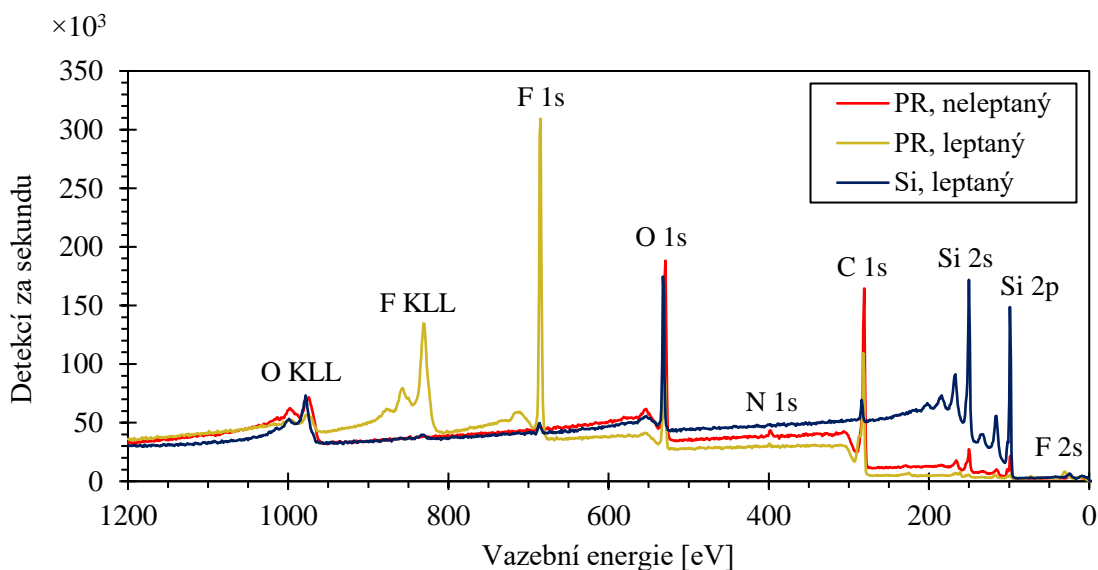
#### XPS struktur připravených kryogenním procesem

Výsledky měření pro vzorky leptané kryogenním procesem jsou shrnuty v tab. 3.19. Na obr. 3.33 jsou zobrazena typická spektra neleptaného a leptaného fotorezistu a leptaného čistého křemíku s vyznačenými příslušnými prvky. Detaily spekter F 1s jsou pak zobrazeny na obr. 3.34. Pro přehlednost nejsou na těchto obrázcích zobrazena spektra neleptaného křemíku.

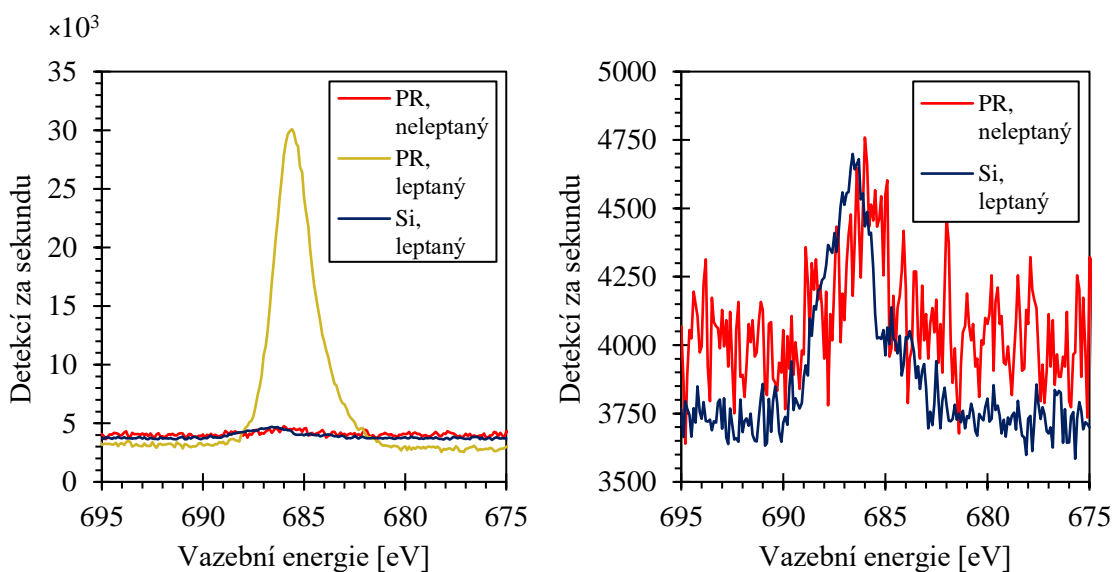
**Tab. 3.19:** Poměrné atomové zastoupení fluoru vztažené k celkovému atomovému zastoupení prvků Si, F, O, N a C u referenčních vzorků a vzorků leptaných kryogenním procesem

Vzorek	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka
PR, neleptaný	0,776 %	0,915 %
PR, leptaný	49,8 %	12,6 %
Si, neleptaný	~0 %	–
Si, leptaný	2,62 %	1,16 %

Je patrný nárůst koncentrace reziduí u leptaného čistého křemíku, přestože se u kryogenního procesu předpokládá volatilita  $\text{SiO}_x\text{F}_y$  molekul. Z výsledků analýzy tedy vyplývá vznik vedlejších produktů chemických reakcí při procesu leptání, není vyloučena ani kontaminace samotnou komorou DRIE aparatury. Je však nutné dodat, že stopové množství fluoru bylo změřeno i u neleptaného fotorezistu. Kontaminace fluorem je běžným jevem [76], není ovšem vyloučená možná kontaminace komory XPS.



**Obr. 3.33:** Typická XPS spektra leptaného i neleptaného fotorezistu (PR) a křemíku leptaného kryogenním procesem



**Obr. 3.34:** F 1s píky u vzorku leptaného kryogenním procesem: leptaný a neleptaný fotorezist (PR) a leptaný křemík (vlevo); detail neleptaného fotorezistu (PR) a leptaného křemíku (vpravo)

U leptaného fotorezistu je nárůst reziduí značný, tento fakt je pravděpodobně způsoben reakcí fluoru s polymerním fotorezistem za vzniku nevolatilních molekul. Je důvodné předpokládat vznik „bottling“ efektu mimo jiné právě kvůli těmto nevolatilním molekulám, které kompromitují chemické procesy bezprostředně pod rozhraním substrát/fotorezist.

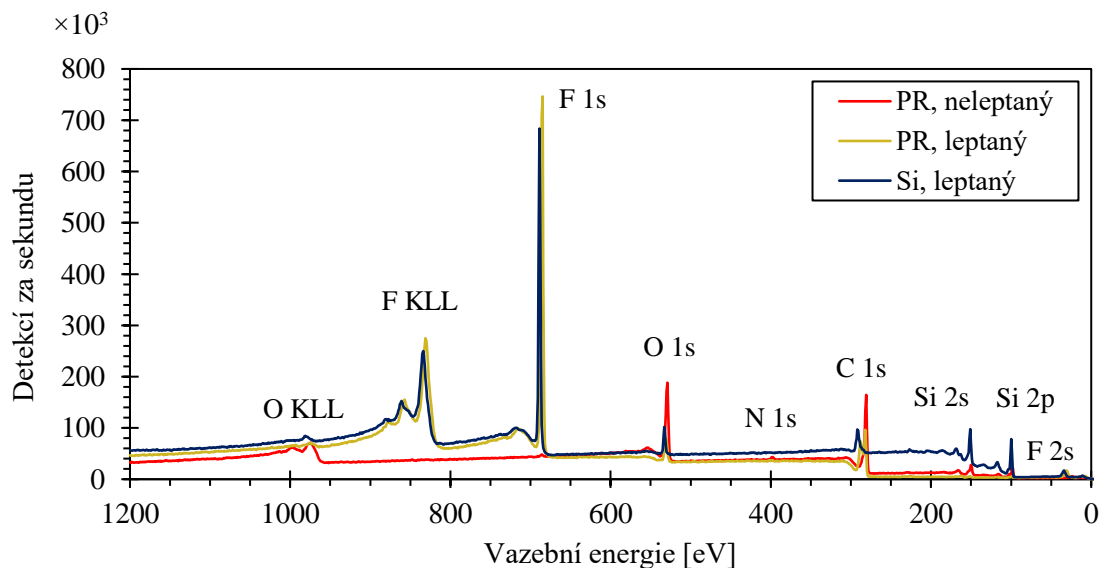
### XPS struktur připravených Bosch procesem

Výsledky měření pro vzorky leptané Bosch procesem jsou shrnuty v tab. 3.20. Na obr. 3.35 jsou zobrazena typická spektra neleptaného a leptaného fotorezistu a leptaného čistého křemíku s vyznačenými příslušnými prvky. Detaily spekter F 1s jsou pak zobrazeny na obr. 3.36. Pro přehlednost nejsou na těchto obrázcích zobrazena spektra neleptaného křemíku.

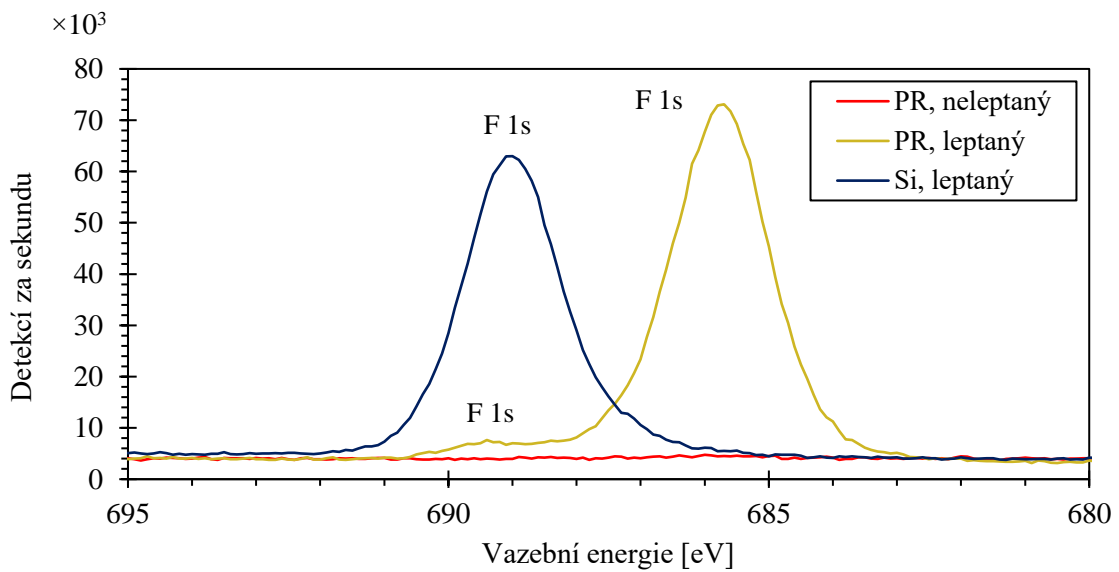
**Tab. 3.20:** Poměrné atomové zastoupení fluoru vztahované k celkovému atomovému zastoupení prvků Si, F, O, N a C u referenčních vzorků a vzorků leptaných Bosch procesem

Vzorek	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka
PR, neleptaný	0,776 %	0,915 %
PR, leptaný	48,2 %	1,60 %
Si, neleptaný	~0 %	–
Si, leptaný	48,4 %	1,02 %

U Bosch procesu není pasivační polymerní vrstva volatilní, čemuž odpovídají naměřená data koncentrací fluorových reziduí na povrchu leptaných vzorků. Nárůst téměř 50 % je výrazný, před dalšími technologickými kroky je tedy doporučeno čištění kyslíkovým plazmatem.



**Obr. 3.35:** Typická XPS spektra leptaného i neleptaného fotorezistu (PR) a křemíku leptaného Bosch procesem



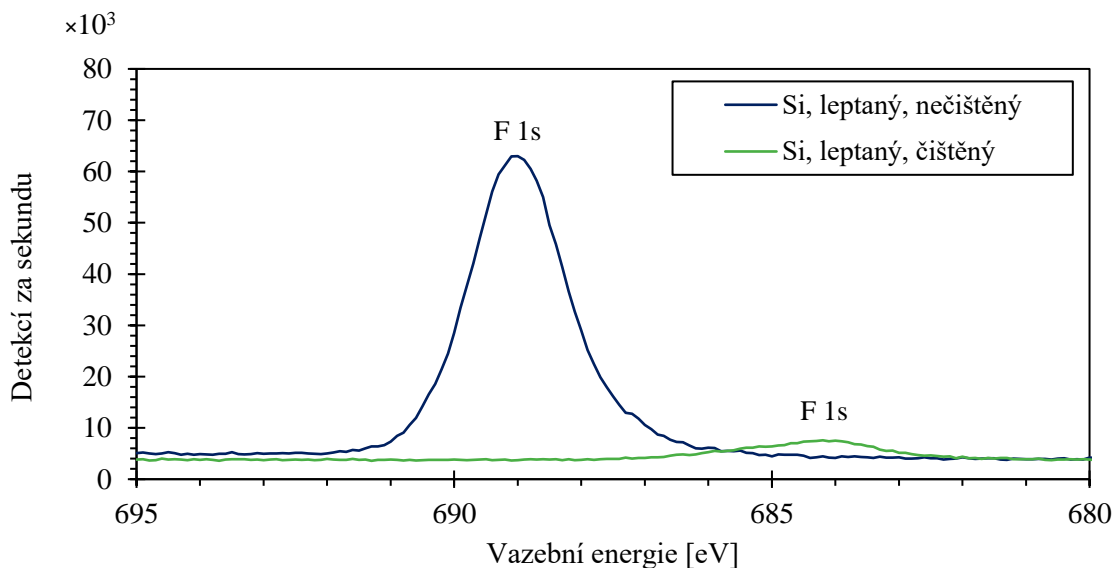
**Obr. 3.36:** F 1s píky povrchu leptaného a neleptaného fotorezistu (PR) a křemíku leptaného Bosch procesem

Z obr. 3.36 je patrný posun dominantního píku F 1s leptaného fotorezistu oproti leptanému křemíku. Tento posun obecně značí jiné chemické vazby, což se dá vzhledem k rozdílné kompozici materiálů předpokládat. U leptaného fotorezistu je z tohoto obrázku dále patrný vedlejší pík s maximem v  $\sim 689,5$  eV, plazma tedy s fotorezistem AZ<sup>®</sup> 5214E reaguje za vzniku nejméně dvou různorodých nevolatilních produktů. Chemické složení povrchu leptaného fotorezistu však stanovováno nebylo.

Z důvodu vysoké kontaminace povrchu fluorem byly zjišťovány spektra i leptaných čištěných vzorků. Čištění probíhalo v komoře DRIE bezprostředně po leptání. Parametry procesu čištění jsou uvedeny v tab. 3.21 (použit byl zkrácený proces leptání, poměr času leptání a času čištění 1:1). Výsledná F 1s spektra nečištěného a čištěného křemíku jsou porovnána na obr. 3.37. Obdobně jako u předešlých XPS analýz, ani zde nebylo možné měřit přímo povrchy leptaných struktur. Naměřená data tedy pouze přibližují efekt kyslíkového plazmatu, neodpovídají však reálným kontaminacím na stěnách leptaných struktur (zejména pak dna).

**Tab. 3.21:** Parametry nastavené během plazmatického čištění leptaného křemíku

$t$	$p$	$P_{CCP}$	$P_{ICP}$	$Q_{O_2}$	$\vartheta$
5 min	15 mTorr	50 W	1500 W	50 sccm	0 °C



**Obr. 3.37:** F 1s píky povrchu křemíku leptaného Bosch procesem bez a s následným čištěním kyslíkovým plazmatem

Z obr. 3.37 je evidentní, že kyslíkové plazma účinně odstraňuje fluorová rezidua z povrchu leptaných vzorků. Zatímco bez čištění tímto plazmatem dosahovalo poměrné atomové zastoupení fluoru na povrchu vzorků 48,4 % ( $\sigma = 1,02$  %), po pětiminutovém působení plazmatu byla koncentrace snížena na 5,80 % ( $\sigma = 2,35$  %). Rezidua nebyla odstraněna kompletně, nicméně delším procesem lze očekávat výraznější snížení koncentrace fluoru.

Mimo eliminaci většinového podílu reziduí je pozoruhodný také posun píky F 1s, což opět značí rozdílnou chemickou vazbu oproti fluoru v leptaném, nečištěném křemíku. Fluor pravděpodobně reaguje s kyslíkem za vzniku nevolatilních produktů, exaktní kompozice však stanovena nebyla.

## 4 ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byly přiblíženy procesy přípravy křemíkových mikrostruktur zahrnující litografické metody a metody leptání. Zvláštní pozornost byla věnována kryogennímu procesu a Bosch procesu hloubkového reaktivního iontového leptání (DRIE), přičemž praktická část práce se zabývala optimalizací obou jmenovaných procesů pro dosažení nejvyššího možného poměru hloubky ku šířce leptané struktury. Tato optimalizace byla zaměřena zejména na díry s průměrem 2  $\mu\text{m}$ .

U kryogenního procesu bylo u děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  dosaženo poměru hloubky ku šířce  $\sim 28:1$ . Pozoruhodným výsledkem popírající teoretické úsudky bylo omezení tvorby tzv. „bottling“ efektu zvýšením tlaku komory. Zároveň bylo dokázáno, že nižší výkon zdroje CCP přispívá k selektivě fotorezistu vůči substrátu a k omezení podleptávání. Navzdory tomu nebyl v této práci použit nejnižší možný výkon, jelikož je u použité leptací aparatury PlasmaPro 100 Cobra<sup>®</sup> tento minimální výkon časově stálý a po určité době klesne na nulovou hodnotu.

Důležitým optimalizovaným parametrem u kryogenního procesu byl poměr plynů SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>. Optimální koncentrace výrazně závisí na morfologii leptané struktury a efektech RIE lag a ARDE. Vzhledem k působení ARDE efektu a zejména k depleci kyslíku byl proces rozdělen na dvě samostatné fáze, přičemž ve fázi druhé byla koncentrace O<sub>2</sub> záměrně zvýšena za účelem zachování kolmosti stěn leptaných struktur.

Praktickou nevýhodou kryogenního procesu je nutnost chlazení substrátu na teploty okolo -100 °C. Poněkud zavádějící nevýhodou může být popraskání fotorezistu způsobené teplotním šokem. V případě této práce, tedy děr s průměry 1–16  $\mu\text{m}$  v hexagonálním uspořádání a fotorezistu AZ<sup>®</sup> 5214E k popraskání dochází pouze u děr s průměrem 8  $\mu\text{m}$  nebo vyšším. Toto popraskání lze kompletně obejít například použitím oxidové nebo metalické masky.

U Bosch procesu bylo u děr s průměrem 2  $\mu\text{m}$  dosaženo poměru hloubky ku šířce  $\sim 14:1$ . Tento maximální poměr byl limitován selektivitou a výchozí tloušťkou použitého fotorezistu. Jak bylo experimentálně ověřeno, selektivita je u Bosch procesu kritickým parametrem a oproti kryogennímu procesu tak skýtá značnou nevýhodu.

Nespornou výhodou Bosch procesu je však možnost leptání při pokojové teplotě a absence „bottling“ efektu charakteristického pro kryogenní proces. Vroubkování, které je pro Bosch proces příkladné, lze výrazně omezit zkrácením jednotlivých kroků pasivace a leptání. Obecně tyto kroky trvají řádově jednotky sekund. Snížením časů na řádově stovky milisekund nebylo v leptaných strukturách vroubkování pozorováno.

Na rozdíl od kryogenního procesu byl Bosch proces rozdělen na čtyři samostatné fáze s graduální změnou parametrů tlaku komory, výkonu zdroje CCP a dob trvání jednotlivých kroků. V rámci optimalizace Bosch procesu byl úspěšně eliminován problém s impedančním přizpůsobením zdroje CCP, kdy použitá leptací aparatura Oxford Instruments PlasmaPro 100 Cobra<sup>®</sup> neposkytuje dostatečně rychlou automatickou odezvu, což ústí

v nekonzistentní profily leptu. Manuální impedanční přizpůsobení tuto nekonzistentnost eliminovalo.

V rámci analýzy uniformnosti leptaných struktur byly provedeny analýzy drsnosti pomocí mikroskopie atomárních sil (AFM) a analýzy reziduí fluoru pomocí rentgenové fotoelektronové spektroskopie (XPS).

AFM analýza struktur leptaných kryogenním procesem odhalila nečekaný jev, kterým je zvlnění povrchu stěn těchto struktur. Očekávanou příčinou je periodicky se měnící tloušťka pasivační vrstvy, vzhledem ke kontinuální povaze kryogenního procesu však tento mechanismus objasněn nebyl. Dále byla dokázána korelace tohoto zvlnění s morfologií struktur, v tomto případě s průměrem děr. Dá se tedy předpokládat, že tento jev souvisí s efekty RIE lag a ARDE.

U AFM analýzy struktur leptaných Bosch procesem byly pozorovány útvary připomínající výčnělky u všech zkoumaných vzorků. Tyto útvary jsou pravděpodobně tvořeny akumulovaným pasivačním polymerem, nejedná se tedy o charakteristické vroubkování příkladné pro Bosch proces. Mimoto byla zjištěná klesající četnost výskytu těchto výstupků s rostoucí hloubkou leptu. Průměrná povrchová drsnost stěn struktur leptaných Bosch procesem je nezanedbatelně vyšší nežli u struktur leptaných kryogenním procesem. Je však doporučeno vystavit struktury leptané Bosch procesem kyslíkovému plazmatu, které tyto útvary odstraní. Lze tak očekávat snížení drsnosti.

XPS analýza odhalila nespornou výhodu kryogenního procesu. Jelikož jsou při leptání křemíku kryogenním procesem produkty reakcí volatilní, nedochází ke kontaminaci povrchu leptaných struktur fluorem. Stopové množství fluoru bylo i přesto naměřeno, není tak vyloučená kontaminace jinými zdroji, například samotnou komorou DRIE nebo XPS.

Naproti tomu u Bosch procesu nejsou při standardním tlaku a teplotě produkty chemických reakcí volatilní. Po procesu leptání vykazovaly povrchy leptaných struktur kontaminaci fluorem bezmála 50 %. Tyto rezidua lze odstranit kyslíkovým plazmatem buzeným dostatečným výkonem po dostatečně dlouhou dobu. Při čištění tímto plazmatem po dobu 5 minut bylo relativní atomové zastoupení fluoru na analyzovaném povrchu redukováno na 5,8 %. Při delším procesu lze očekávat další snížení reziduí.

Navázáním této bakalářské práce se vřele doporučuje použití oxidové nebo metalické masky jak u kryogenního, tak u Bosch procesu. Materiál masky má u kryogenního procesu vliv na zmiňovaný „bottling“ efekt, dalším logickým krokem je tedy použití anorganické masky, experimentální ověření a eliminace tohoto efektu. U Bosch procesu je příčina odlišná. Jak již bylo uvedeno, selektivita je u Bosch procesu kritickým parametrem a anorganické masky se obecně hůře leptají, tedy mají lepší selektivitu. To umožňuje použití mnohem vyššího výkonu zdroje CCP, které jednak omezí podleptávání leptaných struktur, ale hlavně dovolí dosažení výrazně vyššího poměru hloubky leptu ku jeho šířce. Je vhodné dodat, že vysoký poměr šířky ku hloubce udávaný v literatuře (>100:1) byl dosažen právě na anorganických maskách s tloušťkami až několik  $\mu\text{m}$ .

## REFERENCE

- [1] LÄRMER, F. et al. Chapter 21 - Deep Reactive Ion Etching. *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies, 2nd edition*. Lontoo: Elsevier, 2015, s. 444-469 [cit. 2018-10-27]. DOI: 10.1016/B978-0-323-29965-7.00021-X. ISBN 978-0-323-29965-7.
- [2] HENRI, J. et al. A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1996, 6(1), s. 14-28 [cit. 2018-10-28]. DOI: 10.1088/0960-1317/6/1/002. ISSN 0960-1317.
- [3] MARTY, F. et al. Advanced etching of silicon based on deep reactive ion etching for silicon high aspect ratio microstructures and three-dimensional micro- and nanostructures. *Microelectronics Journal*, 2005, 36(7), s. 673-677 [cit. 2018-10-29]. DOI: 10.1016/j.mejo.2005.04.039. ISSN 0026-2692.
- [4] ELWENSPOEK, M. a JANSEN, H. V. *Silicon micromachining*. Cambridge University Press, 2004 [cit. 2018-10-28]. ISBN 0521607671.
- [5] SAINIEMI, L. *Cryogenic deep reactive ion etching of silicon micro and nanostructures*. Helsinki, 2009. ISBN 978-951-22-9867-9. Dostupné z: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-22-9867-9>. Disertace. Helsinki University of Technology.
- [6] HALL, D. B. et al. Spin coating of thin and ultrathin polymer films. *Polymer Engineering & Science*, 1998, 38(12), s. 2039-2045 [cit. 2018-11-11]. DOI: 10.1002/pen.10373.
- [7] DANGLAD-FLORES, J. et al. Deposition of polymer films by spin casting: A quantitative analysis. *Chemical Engineering Science*, 2018, 179, s. 257-264 [cit. 2018-11-11]. DOI: 10.1016/j.ces.2018.01.012. ISSN 0009-2509.
- [8] SMITH, B. W. a SUZUKI, K. *Microlithography: science and technology, 2nd edition*. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.). Boca Raton: CRC press, 2007 [cit. 2018-11-11]. 864 s. ISBN 978-082-4790-240.
- [9] CHUNG-HAO, T. et al. Microlens Array Fabricated by Excimer Laser Micromachining with Gray-tone Photolithography. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(3R), s. 1280 [cit. 2018-11-11]. ISSN 1347-4065.
- [10] ITO, T. a OKAZAKI, S. Pushing the limits of lithography. *Nature*, 2000, 406, s. 1027 [cit. 2018-11-11]. DOI: 10.1038/35023233.
- [11] STARÝ, J. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno: VUT v Brně, 2016 [cit. 2018-11-16]. 310 s. ISBN 80-214-1499-5.

- [12] FRANSILLA, S. *Introduction to microfabrication*. John Wiley & Sons, 2010 [cit. 2018-11-11]. ISBN 1119991897.
- [13] SMITH, B. W. a SUZUKI, K. *Microlithography: science and technology*. CRC press, 2007 [cit. 2018-12-13]. ISBN 1420051539.
- [14] SCHOOT, J. V. et al. EUV lithography scanner for sub-8nm resolution. *SPIE Advanced Lithography* [online]. San Jose: SPIE, 2015 [cit. 2018-12-13].
- [15] VIEU, C. et al. Electron beam lithography: resolution limits and applications. *Applied Surface Science*, 2000, 164(1), s. 111-117 [cit. 2018-11-12]. DOI: 10.1016/S0169-4332(00)00352-4. ISSN 0169-4332.
- [16] PEASE, R. F. W. Electron beam lithography. *Contemporary Physics*, 1981, 22(3), s. 265-290 [cit. 2018-11-12]. DOI: 10.1080/00107518108231531. ISSN 0010-7514.
- [17] TSENG, A. A. et al. Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2003, 26(2), s. 141-149 [cit. 2018-11-12]. DOI: 10.1109/TEPM.2003.817714. ISSN 1521-334X.
- [18] HARRIOTT, L. R. Scattering with angular limitation projection electron beam lithography for suboptical lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1997, 15(6), s. 2130-2135 [cit. 2018-11-12]. DOI: 10.1116/1.589339.
- [19] NAKAYAMA, Y. et al. Electron - beam cell projection lithography: A new high - throughput electron - beam direct - writing technology using a specially tailored Si aperture. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena*, 1990, 8(6), s. 1836-1840 [cit. 2018-11-12]. DOI: 10.1116/1.585169.
- [20] CHOU, S. Y. et al. Imprint of sub - 25 nm vias and trenches in polymers. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(21), s. 3114-3116 [cit. 2018-11-19]. DOI: 10.1063/1.114851.
- [21] CHOU, S. Y. et al. Imprint lithography with 25-nanometer resolution. *Science*, 1996, 272(5258), s. 85-87 [cit. 2018-11-19]. DOI: 10.1126/science.272.5258.85.
- [22] SCHIFT, H. Nanoimprint lithography: An old story in modern times? A review. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2008, 26(2), s. 458-480 [cit. 2018-11-21]. DOI: 10.1116/1.2890972.
- [23] DECKMAN, H. W. a DUNSMUIR, J. H. Natural lithography. *Applied Physics Letters*, 1982, 41(4), s. 377-379 [cit. 2018-11-21]. DOI: 10.1063/1.93501.

- [24] HAYNES, C. L. a VAN DUYNE, R. P. Nanosphere Lithography: A Versatile Nanofabrication Tool for Studies of Size-Dependent Nanoparticle Optics. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2001, 105(24), s. 5599-5611 [cit. 2018-11-21]. DOI: 10.1021/jp010657m. ISSN 1520-6106.
- [25] RING, W. et al. Source-based nomenclature for copolymers (Recommendations 1985). *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57(10), s. 1427-1440 [cit. 2018-11-22]. DOI: 10.1351/pac198557101427. ISSN 00334545.
- [26] BATES, C. M. et al. Block Copolymer Lithography. *Macromolecules*, 2014, 47(1), s. 2-12 [cit. 2018-11-22]. DOI: 10.1021/ma401762n. ISSN 0024-9297.
- [27] PARK, M. et al. Block copolymer lithography: periodic arrays of ~ 1011 holes in 1 square centimeter. *Science*, 1997, 276(5317), s. 1401-1404 [cit. 2018-11-22]. ISSN 0036-8075.
- [28] GOWRISHANKAR, V. et al. Fabrication of densely packed, well-ordered, high-aspect-ratio silicon nanopillars over large areas using block copolymer lithography. *Thin Solid Films*, 2006, 513(1), s. 289-294 [cit. 2018-11-22]. DOI: 10.1016/j.tsf.2006.01.064. ISSN 0040-6090.
- [29] SEIDEL, H. et al. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions. *Journal of The Electrochemical Society*, 1990, 137(11), s. 3612-3626 [cit. 2018-11-23]. DOI: 10.1149/1.2086277.
- [30] TABATA, O. et al. Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1992, 34(1), s. 51-57 [cit. 2018-11-23]. DOI: 10.1016/0924-4247(92)80139-T. ISSN 0924-4247.
- [31] BEAN, K. E. Anisotropic etching of silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1978, 25(10), s. 1185-1193 [cit. 2018-11-23]. DOI: 10.1109/T-ED.1978.19250. ISSN 0018-9383.
- [32] GOSÁLVEZ, M. A. et al. Chapter 22 - Wet Etching of Silicon. TILLI, M., et al. *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*, 2nd edition. Boston: William Andrew Publishing, 2015, s. 470-502 [cit. 2018-11-01]. DOI: 10.1016/B978-0-323-29965-7.00022-1. ISBN 978-0-323-29965-7.
- [33] TAN, S. et al. Effects of mask misalignment and wafer misorientation on silicon V-groove etching. *Sensors and Materials*, 2003, 15(2), s. 101-112 [cit. 2018-11-24].
- [34] COLLINS, S. D. Etch Stop Techniques for Micromachining. *Journal of The Electrochemical Society*, 1997, 144(6), s. 2242-2262 [cit. 2018-11-24]. DOI: 10.1149/1.1837773.

- [35] LANG, W. Silicon microstructuring technology. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 1996, 17(1), s. 1-55 [cit. 2018-11-25]. DOI: 10.1016/0927-796X(96)00190-8. ISSN 0927-796X.
- [36] ASHRUF, C. M. A. et al. Electrochemical etch stop engineering for bulk micromachining. *Mechatronics*, 1998, 8(5), s. 595-612 [cit. 2018-11-24]. DOI: 10.1016/S0957-4158(98)00017-8. ISSN 0957-4158.
- [37] SEIDEL, H. et al. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions - II. Influence of Dopants. *Journal of The Electrochemical Society*, 1990, 137(11), s. 3626-3632 [cit. 2018-11-24]. DOI: 10.1149/1.2086278.
- [38] HINES, M. A. In Search of Perfection: Understanding the Highly Defect-Selective Chemistry of Anisotropic Etching. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2003, 54(1), s. 29-56 [cit. 2018-11-24]. DOI: 10.1146/annurev.physchem.54.011002.103849.
- [39] SANGJUN PARK et al. Mesa-supported, Single-crystal Microstructures Fabricated by the Surface/Bulk Micromachining Process. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, 38(7R), s. 4244 [cit. 2018-11-24]. ISSN 1347-4065.
- [40] CHU, P. B. et al. Controlled pulse-etching with xenon difluoride. *Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97)* [online]. Chicago: IEEE, 1997 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <http://doi.org/10.1109/SENSOR.1997.613739>
- [41] LEONEL, R. A. et al. Isotropic etching of silicon in fluorine gas for MEMS micromachining. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(2), s. 384 [cit. 2018-12-13]. ISSN 0960-1317.
- [42] IBBOTSON, D. E. et al. Plasmaless dry etching of silicon with fluorine - containing compounds. *Journal of Applied Physics*, 1984, 56(10), s. 2939-2942 [cit. 2018-10-28]. DOI: 10.1063/1.333834.
- [43] CHANG, F. I. et al. Gas-phase silicon micromachining with xenon difluoride. *Micromachining and Microfabrication* [online]. Austin: SPIE, 1995 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <http://doi.org/10.1117/12.220933>
- [44] Chlorine Trifluoride. *PubChem Compound Database* [online]. Rockville Pike: National Center for Biotechnology Information, 2004 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24637>
- [45] SAITO, Y. et al. Plasmaless etching of silicon using chlorine trifluoride. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1991, 9(5), s. 2503-2506 [cit. 2018-10-29]. DOI: 10.1116/1.585682.

- [46] SAITO, Y. Characteristics of plasmaless dry etching of silicon-related materials using chlorine trifluoride gas. *Sens. Mater.*, 2002, 14(5), s. 231-237 [cit. 2018-11-01].
- [47] COBURN, J. W. a WINTERS, H. F. Ion - and electron - assisted gas - surface chemistry—An important effect in plasma etching. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(5), s. 3189-3196 [cit. 2018-12-13]. DOI: 10.1063/1.326355.
- [48] GAO, J. X. et al. Antistick postpassivation of high-aspect ratio silicon molds fabricated by deep-reactive ion etching. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(1), s. 84-93 [cit. 2018-10-28]. DOI: 10.1109/JMEMS.2005.863795. ISSN 1057-7157.
- [49] TIAN, W. C. et al. Comparison of Cl<sub>2</sub> and F-based dry etching for high aspect ratio Si microstructures etched with an inductively coupled plasma source. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2000, 18(4), s. 1890-1896 [cit. 2018-10-31]. DOI: 10.1116/1.1306303. ISSN 1071-1023.
- [50] LEAKE, J. W. Electron Mobility. *Kaye & Laby* [online]. London: National Physical Laboratory, ©2018 [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: [http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic\\_and\\_nuclear\\_physics/4\\_4/4\\_4\\_2.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_4/4_4_2.html)
- [51] MOGAB, C. J. et al. Plasma etching of Si and SiO<sub>2</sub>—The effect of oxygen additions to CF<sub>4</sub> plasmas. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(7), s. 3796-3803 [cit. 2018-10-29]. DOI: 10.1063/1.325382.
- [52] Reactive Ion Etching (RIE). *Oxford Instruments* [online]. Wallingford: Miramar, ©2018 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://plasma.oxinst.com/campaigns/technology/reactive-ion-etching>
- [53] WU, B. et al. High aspect ratio silicon etch: A review. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(5), s. 051101 [cit. 2018-11-01]. DOI: 10.1063/1.3474652.
- [54] TACHI, S. et al. Low - temperature reactive ion etching and microwave plasma etching of silicon. *Applied Physics Letters*, 1988, 52(8), s. 616-618 [cit. 2018-12-02]. DOI: 10.1063/1.99382.
- [55] BOER, M. J. D. et al. Guidelines for etching silicon MEMS structures using fluorine high-density plasmas at cryogenic temperatures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(4), s. 385-401 [cit. 2018-12-03]. DOI: 10.1109/JMEMS.2002.800928. ISSN 1057-7157.
- [56] SÖKMEN, Ü. et al. Shallow and deep dry etching of silicon using ICP cryogenic reactive ion etching process. *Microsystem Technologies*, 2010, 16(5), s. 863-870 [cit. 2018-12-01]. DOI: 10.1007/s00542-010-1035-7. ISSN 1432-1858.

- [57] Robert Bosch GmbH. *Method for anisotropically etching silicon*. WO1994014187A1. Uděleno 23. 6. 1994.
- [58] ABDOLVAND, R. a AYZAZI, F. An advanced reactive ion etching process for very high aspect-ratio sub-micron wide trenches in silicon. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 144(1), s. 109-116 [cit. 2018-11-02]. DOI: doi.org/10.1016/j.sna.2007.12.026. ISSN 0924-4247.
- [59] KUO-SHEN, C. et al. Effect of process parameters on the surface morphology and mechanical performance of silicon structures after deep reactive ion etching (DRIE). *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(3), s. 264-275 [cit. 2018-12-10]. DOI: 10.1109/JMEMS.2002.1007405. ISSN 1057-7157.
- [60] XU, T. et al. Effects of deep reactive ion etching parameters on etching rate and surface morphology in extremely deep silicon etch process with high aspect ratio. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(12), s. 19 [cit. 2018-12-10]. DOI: 10.1177/1687814017738152.
- [61] AYÓN, A. A. et al. Characterization of a time multiplexed inductively coupled plasma etcher. *Journal of The Electrochemical Society*, 1999, 146(1), s. 339-349 [cit. 2018-12-10]. DOI: 10.1149/1.1391611. ISSN 0013-4651.
- [62] SYED MOHAMMED, Z. A. et al. Smoothing of scalloped DRIE trench walls. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, 63, s. 83-89 [cit. 2018-12-10]. DOI: doi.org/10.1016/j.mssp.2017.02.006. ISSN 1369-8001.
- [63] FORSTER, J. C. a KELLER, J. H. 2 - Planar Inductive Sources. POPOV, O.A. *High Density Plasma Sources*. Park Ridge, NJ: William Andrew Publishing, 1995, s. 76-99 [cit. 2018-11-27]. DOI: 10.1016/B978-081551377-3.50004-9. ISBN 978-0-8155-1377-3.
- [64] KEITH, J. M. et al. Wafer-scale patterning of sub-40 nm diameter and high aspect ratio (>50:1) silicon pillar arrays by nanoimprint and etching. *Nanotechnology*, 2008, 19(34), s. 345301 [cit. 2018-10-27]. ISSN 0957-4484.
- [65] VARGAFTIK, N. B. *Handbook of thermal conductivity of liquids and gases*. CRC press, 1993 [cit. 2018-11-25]. 368 s. ISBN 0849393450.
- [66] CHEN, F. F. 1 - Helicon Plasma Sources. POPOV, O.A. *High Density Plasma Sources*. Park Ridge, NJ: William Andrew Publishing, 1995, s. 1-75 [cit. 2018-11-27]. DOI: 10.1016/B978-081551377-3.50003-7. ISBN 978-0-8155-1377-3.
- [67] YEOM, J. et al. Maximum achievable aspect ratio in deep reactive ion etching of silicon due to aspect ratio dependent transport and the microloading effect. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2005, 23(6), s. 2319-2329 [cit. 2018-12-04]. DOI: 10.1116/1.2101678.

- [68] OWEN, K. J. et al. High aspect ratio deep silicon etching. *2012 IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* [online], 2012 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6170138>
- [69] JANSEN, H. V. et al. Black silicon method: X. A review on high speed and selective plasma etching of silicon with profile control: an in-depth comparison between Bosch and cryostat DRIE processes as a roadmap to next generation equipment. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(3), s. 033001 [cit. 2019-04-28]. DOI: 10.1088/0960-1317/19/3/033001. ISSN 0960-1317 (1361-6439).
- [70] Plasma surface treatment of polymers, metals, and ceramics. *PVA TePla America* [online]. Corona, CA: PVA TePla America, [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.pvateplaamerica.com/materials/polymers-Perfluoropolyether.php>
- [71] SEBASTIAN, A. et al. Harmonic and power balance tools for tapping-mode atomic force microscope. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(11), s. 6473-6480 [cit. 2019-04-29]. DOI: 10.1063/1.1365440.
- [72] PAULO, Á. S. a GARCÍA, R. Tip-surface forces, amplitude, and energy dissipation in amplitude-modulation (tapping mode) force microscopy. *Physical Review B*, 2001, 64(19), s. 193411 [cit. 2019-04-29]. DOI: 10.1103/PhysRevB.64.193411.
- [73] MORENO-HERRERO, F. et al. Atomic force microscopy contact, tapping, and jumping modes for imaging biological samples in liquids. *Physical Review E*, 2004, 69(3), s. 031915 [cit. 2019-04-29]. DOI: 10.1103/PhysRevE.69.031915.
- [74] ZAMBONIN, P. G. a DESIMONI, E. X-Ray Photoelectron Spectroscopy: Principles, Instrumentation, Data Processing and Molten Salt Applications. MAMANTOV, G. a MARASSI, R. *Molten Salt Chemistry: An Introduction and Selected Applications*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1987, s. 425-445 [cit. 2019-04-28]. DOI: 10.1007/978-94-009-3863-2\_21. ISBN 978-94-009-3863-2.
- [75] TILININ, I. S. et al. Quantitative surface analysis by Auger and x-ray photoelectron spectroscopy. *Progress in Surface Science*, 1996, 52(4), s. 193-335 [cit. 2019-04-28]. DOI: 10.1016/0079-6816(96)00008-1. ISSN 0079-6816.
- [76] Fluorine. *ThermoScientific XPS* [online]. ThermoScientific XPS, [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://xpssimplified.com/elements/fluorine.php>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Ilustrace izotropního a anizotropního profilu leptu (převzato z [5]): (a) izotropní lept; (b) anizotropní lept se šikmými bočními stěnami; (c) anizotropní lept s kolmými bočními stěnami. ....	2
Obr. 1.2:	UV litografie (převzato z [5]): (a) expozice UV zářením; (b) pozitivní fotorezist po aplikaci vývojky.....	3
Obr. 1.3:	Spektrum záření rtuťové výbojky (převzato z [8]) .....	3
Obr. 1.4:	Projekční litografická metoda SCALPEL <sup>®</sup> (převzato z [18]).....	4
Obr. 1.5:	Proces litografie nanootiskem (Převzato z [5]): (a–b) zahřáté razítko je přitlačeno k zahřátému termoplastickému polymeru na substrátu; (c) po vychladnutí je razítko odděleno; (d) výsledná maska po odstranění zbylého nežádoucího filmu polymeru kyslíkovým plazmatem .....	5
Obr. 1.6:	Anizotropní mokré leptání (převzato z [32]): (a) diafragma a (b) V-žlábek na Si<100>; (c) vertikální drážky na Si<110>.....	7
Obr. 1.7:	Základní schéma RIE aparatury (podle [1,52]).....	13
Obr. 2.1:	Vliv nastavených parametrů na rychlost leptání, selektivitu a anizotropii u kryogenního DRIE procesu (převzato z [5]).....	16
Obr. 2.2:	Charakteristické vroubkování stěn u Bosch procesu (převzato z [1]) .....	17
Obr. 2.3:	Diagram Bosch procesu (převzato z [58]): základní (vlevo); pokročilý (vpravo).....	18
Obr. 2.4:	Možné konfigurace zdrojů ICP (převzato z [1]): (a) zdroj ICP s plochou excitační cívkou; (b) zdroj ICP s excitační cívkou vinutou kolem velkého dielektrického jádra; (c) zdroj ICP s malým dielektrickým jádrem a kolimátorem .....	20
Obr. 2.5:	Efekt zařezávání na rozhraní Si/SiO <sub>2</sub> (převzato z [53]).....	22
Obr. 3.1:	Fotomaska použitá při exponování .....	24
Obr. 3.2:	Wafer s vyvolaným motivem v 1,4 μm vrstvě AZ <sup>®</sup> 5214E.....	24
Obr. 3.3:	SEM snímky profilu leptu děr s průměrem 2 μm (vlevo) a 1 μm (vpravo) zobrazující neideální lom substrátu.....	25
Obr. 3.4:	SEM snímek profilu leptu děr s průměrem 4 μm zobrazující ideální lom substrátu .....	25
Obr. 3.5:	Sledování efektu popraskání fotorezistu AZ <sup>®</sup> 5214E: plocha bez děr (vlevo); 16 μm díry (uprostřed), 8 μm díry (vpravo).....	26

Obr. 3.6:	Černý křemík na povrchu leptaného vzorku (vlevo) a SEM snímek černého křemíku (vpravo).....	27
Obr. 3.7:	SEM snímky profilu leptu děr s průměrem 2 μm; nastavený výkon zdroje CCP: 4 W (vlevo); 5 W (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.1 .....	27
Obr. 3.8:	SEM snímek profilu leptu děr s průměrem 2 μm; nastavený výkon zdroje CCP 3 W; ostatní parametry viz tab. 3.1; v snímku je vyznačen bod, při kterém výkon zdroje klesl na 0 W .....	28
Obr. 3.9:	SEM snímky profilu leptu děr s průměrem 16 μm; nastavený průtok SF <sub>6</sub> : 50 sccm (vlevo); 70 sccm (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.2 .....	29
Obr. 3.10:	SEM snímky profilů leptu děr s průměrem 1 μm (nahore) a 16 μm (dole); nastavený výkon zdroje ICP: 1000 W (vlevo); 600 W (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.3.....	30
Obr. 3.11:	SEM snímky profilů leptu děr s průměrem 1 μm; nastavený průtok kyslíku: 10 sccm (vlevo); 8 sccm (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.4; u snímku vlevo je vyznačena i hloubka, při níž se přestává tvořit černý křemík .....	31
Obr. 3.12:	SEM snímky profilů leptu děr s průměrem 2 μm; nastavený průtok kyslíku: 10 sccm (vlevo); 8 sccm (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.4; vyznačeny jsou i hloubky, při nichž se přestává tvořit černý křemík .....	32
Obr. 3.13:	SEM snímky profilů leptu děr s průměrem 1 μm (vlevo) a 2 μm (vpravo) leptaných rozděleným procesem; vyznačeno je místo přechodu fází procesu .....	33
Obr. 3.14:	SEM snímek profilu leptu děr s průměrem 2 μm leptaných procesem s referenčními parametry nastavenými dle tab. 3.6 .....	34
Obr. 3.15:	SEM snímek profilu leptu děr s průměrem 2 μm leptaných procesem s parametry nastavenými dle tab. 3.8 (vzorek č. 6).....	35
Obr. 3.16:	SEM snímek profilu leptu 2 μm děr leptaných s parametry nastavenými dle tab. 3.8 (vzorek č. 4).....	36
Obr. 3.17:	SEM snímek profilu leptu 2 μm děr leptaných rozděleným procesem se sníženým tlakem komory (7 mTorr); ostatní parametry jsou uvedeny v tab. 3.8.....	37
Obr. 3.18:	SEM snímek profilu leptu 2 μm děr leptaných rozděleným procesem se zvýšeným tlakem komory (17 mTorr); ostatní parametry jsou uvedeny v tab. 3.9.....	38

Obr. 3.19:	SEM snímky profilu lepu 2 $\mu\text{m}$ děr s nastavenou teplotou komory 20 °C a počtem cyklů: 100 $\times$ (vlevo); 200 $\times$ (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.10.....	39
Obr. 3.20:	SEM snímky profilu lepu 2 $\mu\text{m}$ děr s 200 cykly procesu a nastavenou teplotou komory: 20 °C (vlevo); 0 °C (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.10.....	40
Obr. 3.21:	SEM snímky profilu lepu 8 $\mu\text{m}$ děr s impedančním přizpůsobením v rámci depasivačního kroku: automatickým (vlevo); manuálním (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.10 .....	41
Obr. 3.22:	SEM snímky profilu lepu děr s průměrem 2 $\mu\text{m}$ (nahore) a 4 $\mu\text{m}$ (dole) s nastaveným výkonem zdroje CCP 20 W a trváním kroku depasivace B: 800 ms (vlevo); 600 ms (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.12 .....	43
Obr. 3.23:	SEM snímky profilu lepu děr s průměrem 2 $\mu\text{m}$ , s nastaveným výkonem zdroje CCP 10 W a trváním kroku depasivace B: 800 ms (vlevo); 600 ms (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.12 .....	44
Obr. 3.24:	SEM snímky profilu lepu děr s průměrem 2 $\mu\text{m}$ a s dobou trvání: kroku depozice 700 ms (vlevo); kroku leptání 700 ms (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.13.....	45
Obr. 3.25:	SEM snímky profilu lepu děr s průměrem 2 $\mu\text{m}$ a s dobou trvání: kroků depozice i leptání 700 ms (vlevo); kroku depozice 700 ms a kroku depasivace B 800 ms (vpravo); ostatní parametry viz tab. 3.13 .....	46
Obr. 3.26:	SEM snímky profilu lepu děr s průměrem 2 $\mu\text{m}$ leptaných optimalizovaným dvoufázovým Bosch procesem .....	46
Obr. 3.27:	SEM snímek profilu lepu 2 $\mu\text{m}$ děr leptaných neoptimalizovaným třífázovým Bosch procesem.....	48
Obr. 3.28:	SEM snímek profilu lepu 2 $\mu\text{m}$ děr leptaných optimalizovaným třífázovým Bosch procesem.....	49
Obr. 3.29:	AFM analýza povrchu stěny díry s průměrem 1 $\mu\text{m}$ leptané kryogenním procesem; delší strana koresponduje se směrem lepu.....	51
Obr. 3.30:	AFM analýza povrchu stěny díry s průměrem 2 $\mu\text{m}$ leptané kryogenním procesem; delší strana koresponduje se směrem lepu.....	52
Obr. 3.31:	AFM analýza povrchu stěny díry s průměrem 1 $\mu\text{m}$ leptané Bosch procesem; delší strana koresponduje se směrem lepu.....	53
Obr. 3.32:	AFM analýza povrchu stěny díry s průměrem 2 $\mu\text{m}$ leptané Bosch procesem; delší strana koresponduje se směrem lepu.....	53

Obr. 3.33:	Typická XPS spektra leptaného i neleptaného fotorezistu (PR) a křemíku leptaného kryogenním procesem .....	55
Obr. 3.34:	F 1s píky u vzorku leptaného kryogenním procesem: leptaný a neleptaný fotorezist (PR) a leptaný křemík (vlevo); detail neleptaného fotorezistu (PR) a leptaného křemíku (vpravo).....	55
Obr. 3.35:	Typická XPS spektra leptaného i neleptaného fotorezistu (PR) a křemíku leptaného Bosch procesem.....	56
Obr. 3.36:	F 1s píky povrchu leptaného a neleptaného fotorezistu (PR) a křemíku leptaného Bosch procesem.....	57
Obr. 3.37:	F 1s píky povrchu křemíku leptaného Bosch procesem bez a s následným čištěním kyslíkovým plazmatem.....	58

## SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1:	Parametry nastavené při sledování vlivu změny výkonu zdroje CCP .....	27
Tab. 3.2:	Parametry nastavené při sledování změny průtoku plynů SF <sub>6</sub> /O <sub>2</sub> .....	28
Tab. 3.3:	Parametry nastavené při sledování změny výkonu zdroje ICP .....	29
Tab. 3.4:	Parametry nastavené při sledování změny průtoku O <sub>2</sub> při konstantním průtoku SF <sub>6</sub> .....	31
Tab. 3.5:	Výchozí parametry pro rozdělený kryogenní proces .....	33
Tab. 3.6:	Parametry procesu leptání referenčního vzorku u potlačení „bottling“ efektu .....	34
Tab. 3.7:	Parametry nastavené při první fázi u potlačení „bottling“ efektu; uvedeny jsou pouze parametry rozdílné oproti parametrům uvedeným v tab. 3.6... 35	35
Tab. 3.8:	Parametry pro rozdělený kryogenní proces se sníženým tlakem komory . 36	36
Tab. 3.9:	Parametry pro rozdělený kryogenní proces se zvýšeným tlakem komory. 37	37
Tab. 3.10:	Jednotlivé kroky a parametry výchozího pokročilého Bosch procesu..... 39	39
Tab. 3.11:	Jednotlivé kroky a parametry Bosch procesu nastavené při optimalizaci imedančního přizpůsobení .....	41
Tab. 3.12:	Jednotlivé kroky a parametry Bosch procesu nastavené při optimalizaci kroku depasivace B; volená teplota komory 0 °C; 300 cyklů..... 42	42
Tab. 3.13:	Jednotlivé kroky a parametry Bosch procesu nastavené v první fázi dvoufázového procesu; volená teplota komory 0 °C; 100 cyklů .....	45
Tab. 3.14:	Jednotlivé kroky a parametry Bosch procesu nastavené v druhé fázi optimalizovaného dvoufázového procesu; volená teplota komory 0 °C; 200 cyklů..... 45	45
Tab. 3.15:	Jednotlivé fáze a parametry před optimalizací třífázového Bosch procesu; volená teplota komory 0 °C; 100 cyklů v každé fázi; tučně jsou zvýrazněny změny oproti optimalizovanému dvoufázovému procesu .....	47
Tab. 3.16:	Jednotlivé fáze a parametry optimalizovaného třífázového Bosch procesu; volená teplota komory 0 °C; 100 cyklů v každé fázi; tučně jsou zvýrazněny změny oproti neoptimalizovanému třífázovému procesu..... 49	49
Tab. 3.17:	Povrchové drsnosti stěn S <sub>A</sub> a odpovídající směrodatné odchylky u děr s průměry 1–4 μm leptaných kryogenním procesem .....	51
Tab. 3.18:	Povrchové drsnosti stěn S <sub>A</sub> a odpovídající směrodatné odchylky u děr s průměry 1–4 μm leptaných Bosch procesem .....	52

Tab. 3.19:	Poměrné atomové zastoupení fluoru vztažené k celkovému atomovému zastoupení prvků Si, F, O, N a C u referenčních vzorků a vzorků leptaných kryogenním procesem .....	54
Tab. 3.20:	Poměrné atomové zastoupení fluoru vztažené k celkovému atomovému zastoupení prvků Si, F, O, N a C u referenčních vzorků a vzorků leptaných Bosch procesem.....	56
Tab. 3.21:	Parametry nastavené během plazmatického čištění leptaného křemíku ....	57

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

AFM	Mikroskopie atomárních sil (Atomic Force Microscopy)
AFM	Depozice atomárních vrstev (Atomic Layer Deposition)
ARDE	Leptání závislé na poměru stran (Aspect Ratio Dependent Etching)
CAIBE	Chemicky doprovázené leptání iontovým svazkem (Chemically Assisted Ion Beam Etching)
CCP	Kapacitně vázané plazma (Capacitively Coupled Plasma)
CVD	Chemická depozice z plynné fáze (Chemical Vapor Deposition)
DRIE	Hlubkové reaktivní iontové leptání (Deep Reactive Ion Etching)
EBL	Litografie elektronovým svazkem (Electron Beam Litography)
EDP/EDA	Ethylendiamin pyrokatechol (EthyleneDiamine Pyrocatechol / EthyleneDiAmine pyrocatechol)
HMDS	Hexamethyldisilazan
IBE	Leptání iontovým svazkem (Ion Beam Etching)
ICP	Indukčně vázané plazma (Inductively Coupled Plasma)
MEMS	Mikroelektromechanické systémy (MicroElectroMechanical Systems)
NIL	Litografie nanootiskem (NanoImprint Litography)
PFPE	Perfluoropolyether
PMMA	Polymethylmethakrylát

PVD	Fyzikální depozice z plynné fáze (Physical Vapor Deposition)
RF	Radiová frekvence
RIE	Reaktivní iontové leptání (Reactive Ion Etching)
SEM	Rastrovací elektronová mikroskopie (Scanning Electron Microscopy)
TMAH	Hydroxid tetramethylamonný (TetraMethylAmmonium Hydroxide)
TMDE	Časově multiplexované hloubkové leptání (Time Multiplexed Deep Etching)
XPS	Rentgenová fotoelektronová spektroskopie (X-ray Photoelectron Spectroscopy)

### **Symboly:**

$f_0$	Rezonanční frekvence	[Hz]
$k$	Tuhost pružiny	[Nm <sup>-1</sup> ]
$p$	Tlak komory reaktoru	[Pa]
$P_{CCP}$	Výkon zdroje CCP	[W]
$P_{ICP}$	Výkon zdroje ICP	[W]
$Q$	Objemový průtok	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$S_A$	Průměrná plošná drsnost	[m]
$t$	Čas leptání	[s]
$T_G$	Teplota skelného přechodu	[°C]
$\tau$	Rezidenční čas	[s]
$\vartheta$	Nastavená teplota reaktoru	[°C]
$V$	Objem reaktoru	[m <sup>3</sup> ]