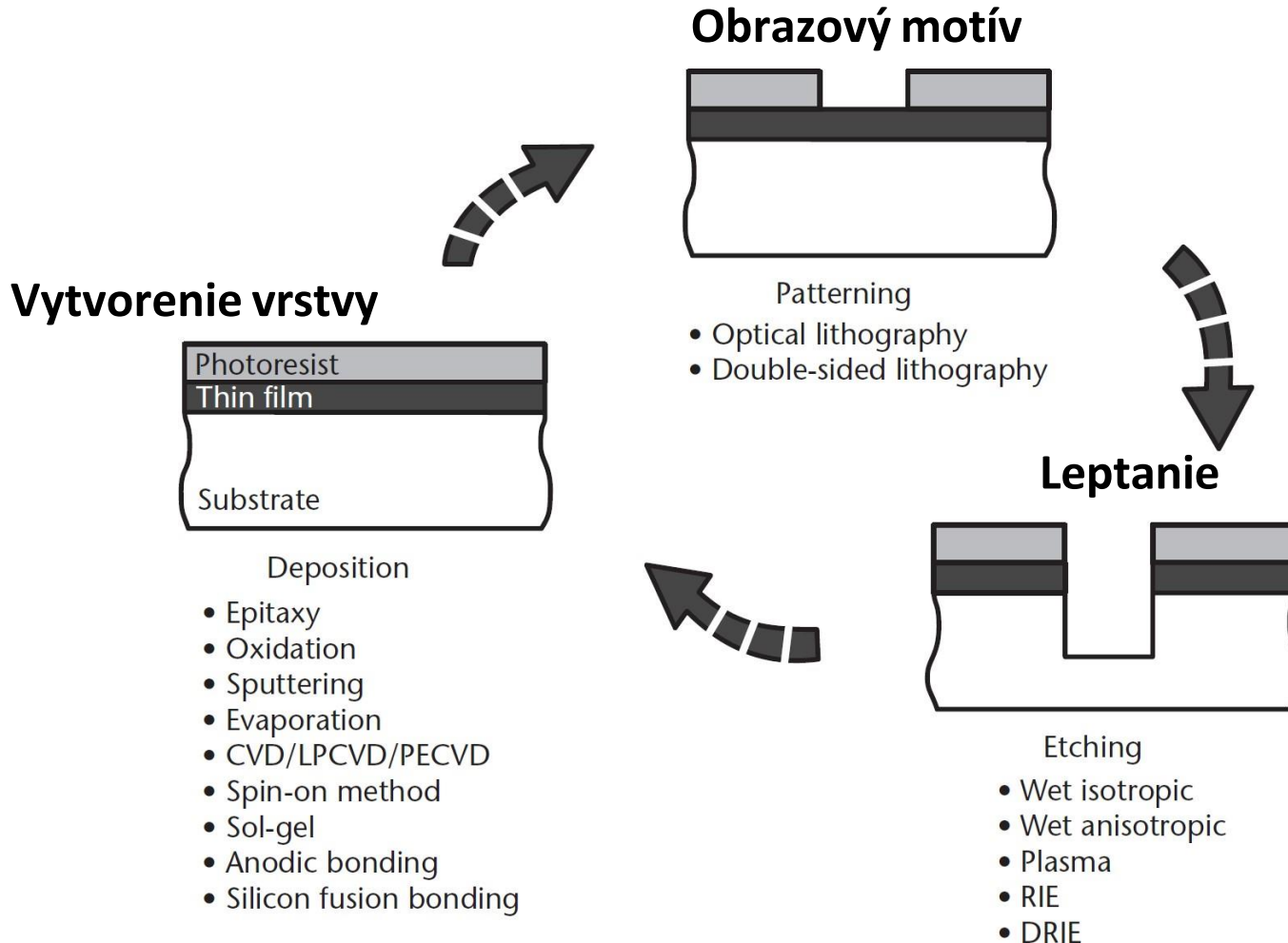


Lekcia 5

Leptanie a lepenie

Základné procesy mikroobrábania

vid'. F3370



Základný vývojový diagram procesov pri mikroobrábaní: Prebehne depozícia vrstiev; Na fotorezist sa litograficky vytvorí motív ktorý slúži ako maska pri leptaní podkladového materiálu. Proces sa opakuje až kým nedôjde k dokončeniu požadovanej mikroštruktúry.

Odoberanie materiálu

- Mokré a suché (plazmové) leptanie
- Leštenie
- Frézovanie (*milling*)

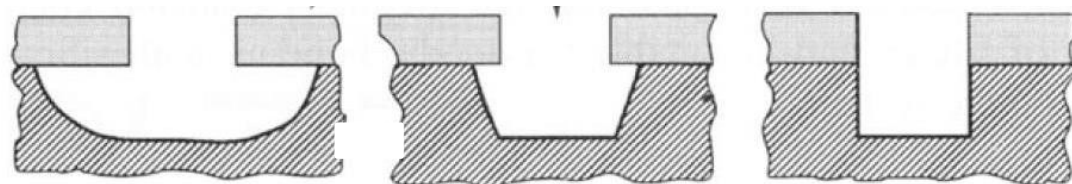
Leptanie – Je to alebo chemický proces, pri ktorom je materiál odstraňovaný pomocou chemických reakcií medzi leptadlami a materiálmi, ktoré majú byť leptané, alebo fyzikálny proces, keď sa materiál odstraňuje vysokoenergetickými časticami.

- **Selektívnosť**

Leptaním chceme odstrániť materiál skrz otvory v maske. Preto je dôležité, aby bola samotná maska leptaná oveľa pomalšie ako substrát. Vysoká selektivita znamená malé straty masky.

- **Anizotropnosť**

Ideál je obraz masky dokonale prenesený na substrát. Rôzna rýchlosť leptania v jednotlivých smeroch robí leptanie anizotropné.



(a) Isotropic

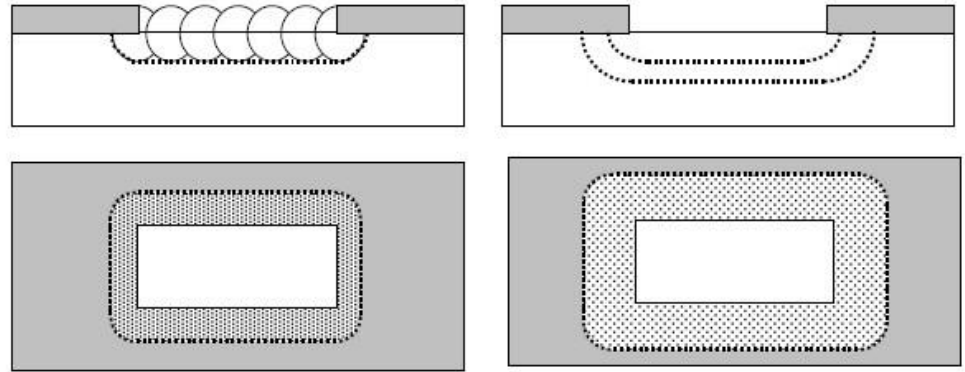
(b) Partially anisotropic

(c) Completely anisotropic

- **Leptacia rýchlosť**

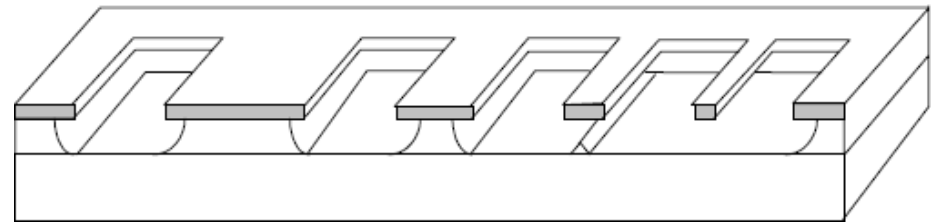
Leptacia rýchlosť je definovaná ako hrúbka odleptaného materiálu za jednotku času.

Mokr  leptanie



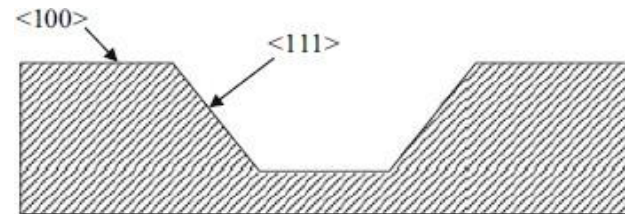
Mokr  leptania je obvykle izotrópne,  rierie leptania je možno popísať sférickou vlnou.

Podlept vanie pri izotr pnom leptan  sa s výhodou vyu iva pri MEMS pre tzv *undercutting*.

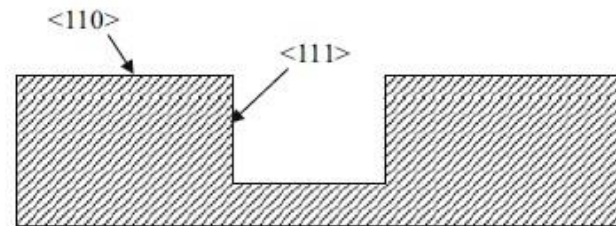


Anizotr pne leptanie je typick  pre kremík leptan  zásadami, kde rýchlosť leptania závisí od kryštalického smeru.

Leptanie prebieha: v tanku (kúpeli, lázni), sprejovaním( etr  náklady) alebo jednostranne na odstredivke (*spin coater*). Typick  je prevádzka pri vyššej teplote.



(a)



(b)

Chemizmus

Typy mokrého leptanie možno z chemického hľadiska rozdeliť na dve hlavné triedy:

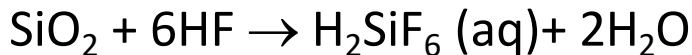
Leptanie kovov:

elektrónový transfer



Leptanie izolantov:

acido-bázická reakcia



(Metalografia, keramografia =
materiálografia)

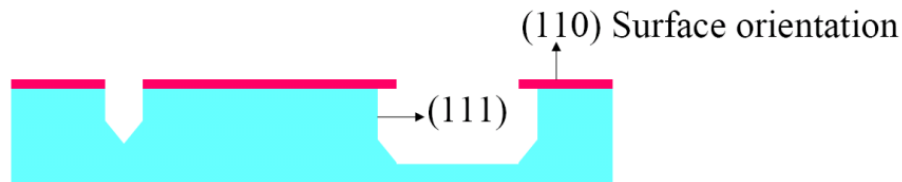
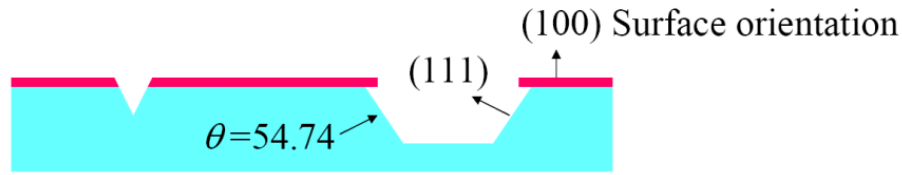
Table 11.1 Wet etchants for photoresist masked etching

SiO ₂	NH ₄ F:HF (7:1) BHF, 35 °C
SiO ₂	NH ₄ F:CH ₃ COOH:C ₂ H ₆ O ₂ (ethylene glycol):H ₂ O (14:32:4:50)
poly-Si	HF:HNO ₃ :H ₂ O (6:10:40)
Al	H ₃ PO ₄ :HNO ₃ :H ₂ O (80:4:16), water can be changed to acetic acid
Mo	H ₃ PO ₄ :HNO ₃ :H ₂ O (80:4:16)
W, TiW	H ₂ O ₂ :H ₂ O (1:1)
Cr	Ce(NH ₄)NO ₃ : HNO ₃ :H ₂ O (1:1:1)
Cu	HNO ₃ :H ₂ O (1:1)
Ni	HNO ₃ :CH ₃ COOH:H ₂ SO ₄ (5:5:2)
Ti	HF:H ₂ O ₂
Au	KI:I ₂ :H ₂ O; KCN:H ₂ O

Table 11.2 Wet etchants for other applications

SiO ₂ , PSG	HF (49%) sacrificial layer removal (> 1 μm/min)
SiO ₂	DHF, dilute HF, usually 1%, for removing native oxide (ca. 10 nm/min)
<Si>	KOH (10–50%) anisotropic crystal plane-dependent etch
Nitride	H ₃ PO ₄ boiling at 160 – 180 °C, CVD oxide mask
Si	HNO ₃ :HF:CH ₃ COOH various compositions, rate > 10 μm/min possible
Pt, Au	HNO ₃ :HCl (1:3) 'aqua regia'

Anizotrópne mokré leptanie

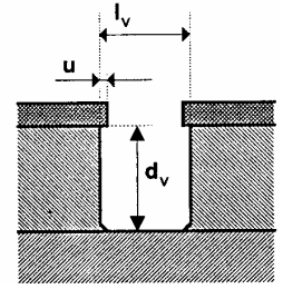


Formulation	Temp °C	Etch Rate (μm/min)	(100)/(111) Etch Ratio	Masking Films (etch rate)
KOH (44 g) Water, Isopropanol (100 ml)	85	1.4	400:1	SiO ₂ (1.4 nm/min) Si ₃ N ₄ (negligible)
KOH (50 g) Water, Isopropanol (100 ml)	50	1.0	400:1	approx. as above
KOH (10 g) Water (100 ml)	65	0.25 to 1.0	-	SiO ₂ (0.7 nm/min) Si ₃ N ₄ (negligible)

$$A = 1 - R_{\text{horiz}} / R_{\text{vertik}}$$

A = 1 čisto anizotrópny profil, $0 \leq A \leq 1$

R – zložky leptacej rýchlosti



Leptacia rýchlosť

- definovaná ako hrúbka odleptaného materiálu za jednotku času

Materiál	Zloženie leptadla	Leptacia rýchlosť [nm/min]
Si	3 ml HF + 5 ml HNO ₃	$3,5 \times 10^4$
GaAs	8 ml H ₂ SO ₄ + 1 ml H ₂ O ₂ + 1 ml H ₂ O	$0,8 \times 10^4$
SiO ₂	15 ml HF + 10 ml HNO ₃ + 300 ml H ₂ O	120
Si ₃ N ₄	HF alebo H ₃ PO ₄	5 alebo 100
Al	1 ml HNO ₃ + 4 ml CH ₃ COOH + 4 ml H ₃ PO ₄ + 1 ml H ₂ O	350
Au	4 g KI + 1 g I ₂ + 40 ml H ₂ O	1×10^4

Tvrdá maska / *hard mask*

Chemická odolnosť fotorezistu nemusí byť vždy kompatibilná s potrebnou leptacou látkou. Substrát sa preto pokryje odolnou vrstvou, na ktorej sa pomocou fotorezistu vytvorí tzv. *tvrdá maska*.

Napr. Si_3N_4 leptá kyselina fosforečná (H_3PO_4) pri $180\text{ }^\circ\text{C}$. To žiadny fotorezist nevydrží. Preto sa pomocou CVD naniesie na nitrid nová oxidová vrstva, ktorá sa fotorezitom a HF vymaskuje. Oxidová vrstva slúži jako odolná maska

Iné:

Si / KOH – SiO_2 je maska

Sklo / 49%HF – Ni, Cu, amorfný kremík

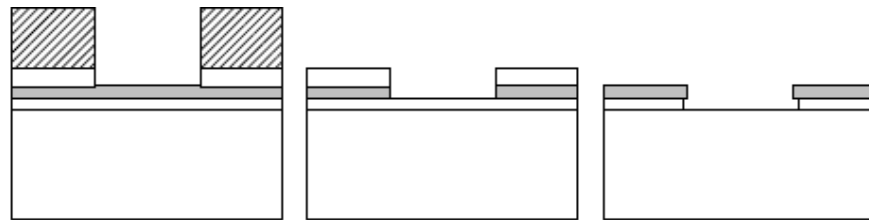


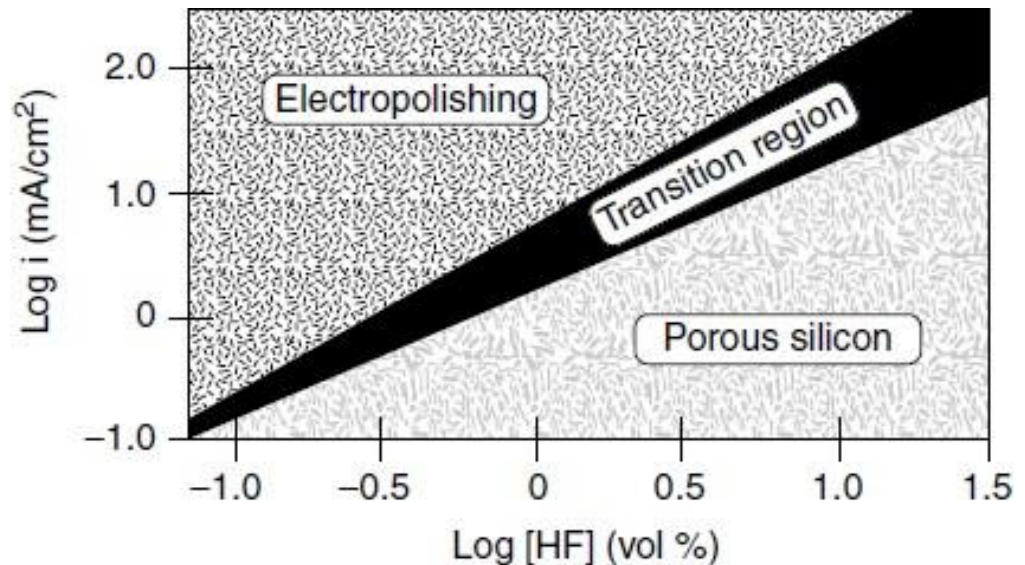
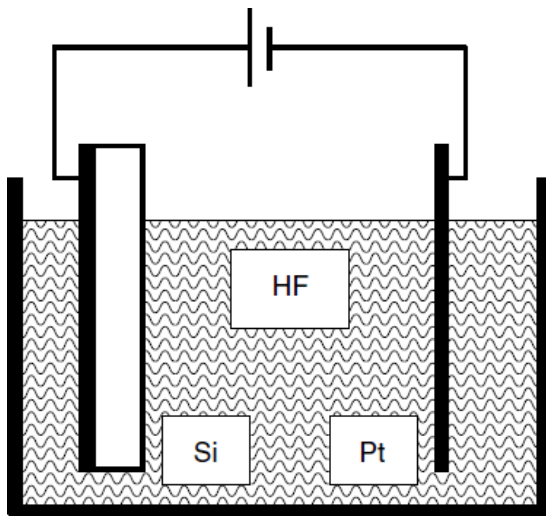
Figure 11.4 Wet etching an oxide/nitride stack: CVD oxide hard mask is etched by HF with resist mask; nitride is etched by H_3PO_4 , and oxide (both bottom oxide and mask oxide) are etched by HF

Elektrochemické leptanie

Kremík sa v HF neleptá, ale ak ho pripojíme do elektrického obvodu ako anódu, pozorujeme leptanie na úrovni $1\mu\text{m}/\text{min}$. Podľa veľkosti prúdu pozorujeme vertikálne porézne leptanie (malý prúd), alebo rovnomerné leptanie (elektroleštenie).

Nevýhodou tohto leptania je potreba elektrického kontaktu na celej ploche Si.

Bola overená možnosť elektrochemicky leptať s AFM aj STM hrotom, zapojeným v roztoku HF ako anóda.



Plazmové (suché) leptanie

Metóda je založená na premene materiálu leptaného substrátu na prchavú (těkavú) látku.

Plazma vytvorí v pracovnom plyne atomárne radikály (halogény, kyslík), ktoré následne chemicky reagujú so substrátom. Plazmu tvoria navyše elektróny a kladné ióny, ktoré bombardujú prítomné povrchy.

Materials to be etched	Chemical gases (multi choices)
Single-crystal silicon	CF ₃ Br, HBr/NF ₃ , SF ₆ /O ₂
Polysilicon	SiCl ₄ /Cl ₂ , BCl ₃ /Cl ₂ , HBr/Cl ₂ /O ₂ , HBr/O ₂ , Br ₂ /SF ₆
Al	SiCl ₄ /Cl ₂ , BCl ₃ /Cl ₂ , HBr/Cl ₂
Al-Si-Cu, Al-Cu	BCl ₃ /Cl ₂ + N ₂
W	SF ₆ , NF ₃ /Cl ₂
TiW	SF ₆
WSi ₂ , TiSi ₂ , CoSi ₂	CCl ₂ F ₂ /NF ₃ , CF ₄ /Cl ₂
SiO ₂	CCl ₂ F ₂ , CHF ₃ /CF ₄ , CHF ₃ /O ₂ , CH ₃ CHF ₂
Si ₃ N ₄	CF ₄ /O ₂ , CF ₄ /H ₂ , CHF ₃ , CH ₃ CHF ₂
GaAs	SiCl ₄ /SF ₆ , SiCl ₄ /NF ₃ , SiCl ₄ /CF ₄
InP	CH ₄ /H ₂
Photoresists	O ₂

Klasifikácia plazmatických procesov leptania

Rozdelenie na základe charakteru mechanizmu leptacieho procesu a zúčastňujúcich sa častíc na reakciách na rozhraní plazma-povrch:

Fyzikálne leptanie

- Ióny sú urýchľované rozdielom potenciálov medzi plazmou a elektródou
- Pri dopade na povrch tuhej látky odovzdávajú impulz povrchovým atómom a erodujú povrch rozprašovaním atómov z neho
- Je vysokosmerové, ale nedostatočne selektívne

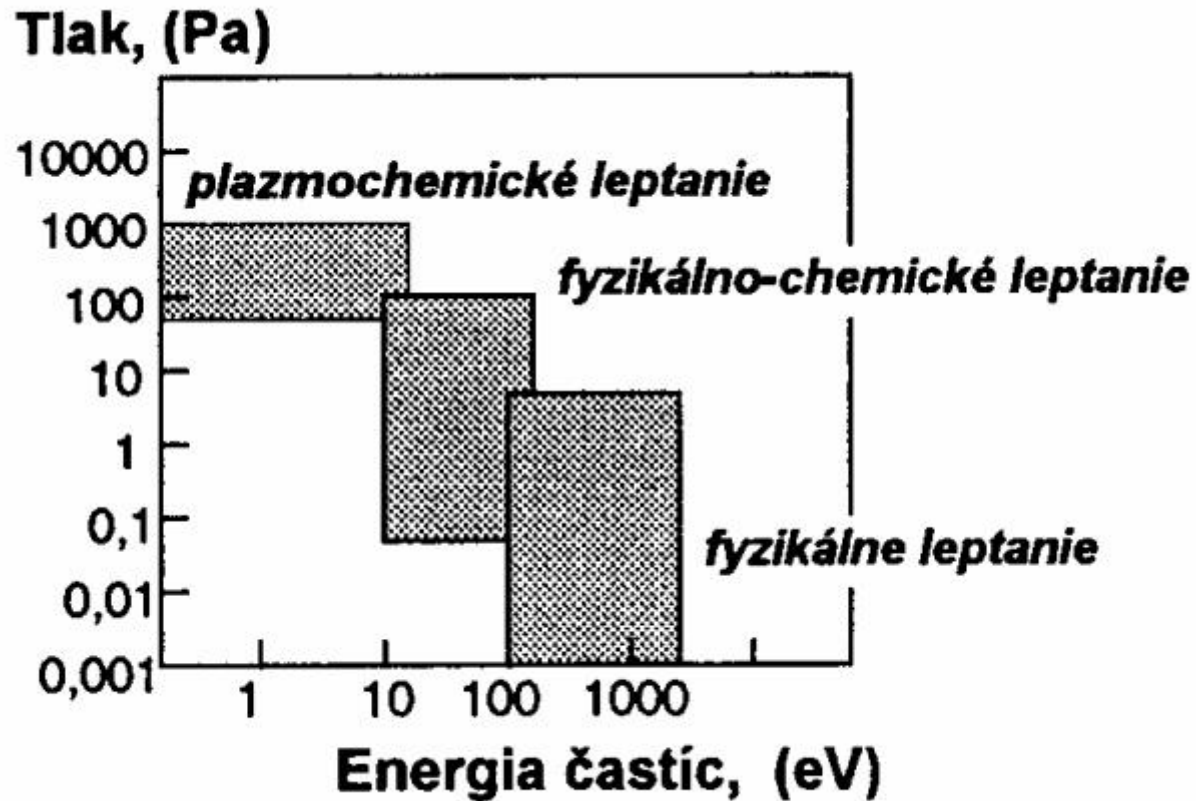
Plazmochemické leptanie

- Využíva namiesto inertného plynu chemicky reaktívne plyny
- Plazma slúži ako zdroj chemicky vysokoreaktívnych častíc (radikálov a iných excitovaných neutrálnych častíc), ktoré sa zúčastňujú reakcií na povrchu, pričom vznikajú prchavé produkty
- Leptanie je izotrópne a je vysokoselektívne

Fyzikálno-chemické leptanie

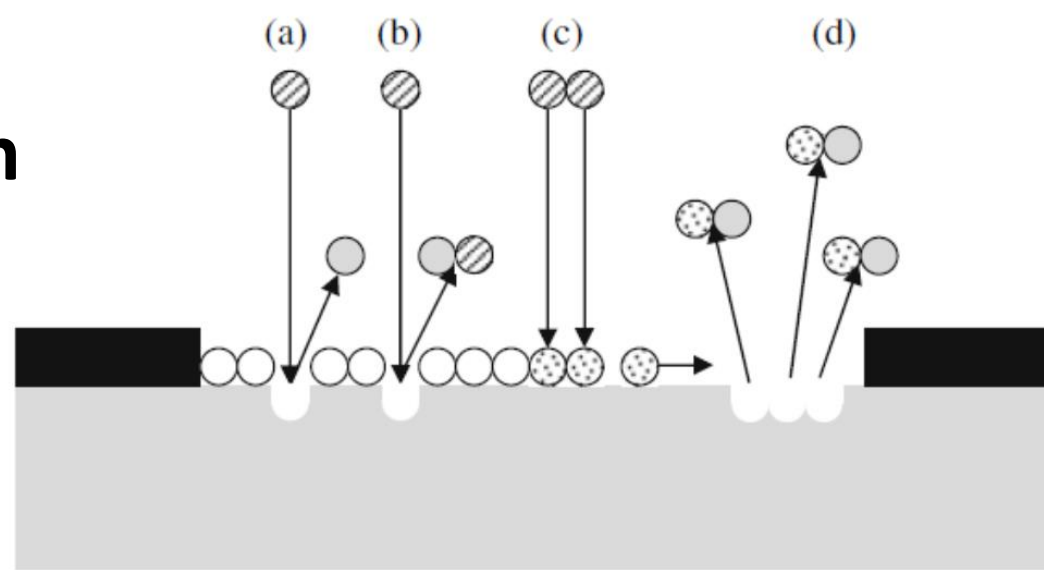
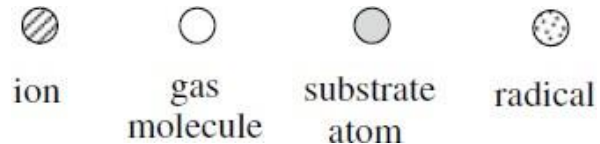
- Využíva súčasne fyzikálnu i chemickú interakciu aktívnych častíc (radikály, ióny, reaktívne ióny) s leptaným povrchom
- V dôsledku chemisorpcie radikálov na povrchu sa oslabujú väzby povrchových atómov, ktoré sú nasledovne ľahšie odprašované dopadajúcimi iónmi
- V dôsledku fyzikálnej erózie povrchu sa môže zvyšovať pravdepodobnosť chemických reakcií v porovnaní s neexponovaným povrchom
- Iónové bombardovanie zabezpečuje energiu potrebnú pre chemické reakcie, ktoré môžu priamo reagovať s povrchom
- Pri vhodnom výbere pracovného plynu je dostatočne selektívne a anizotrópne

Klasifikácia plazmatických procesov leptania



Oblasti technologických parametrov v jednotlivých typov leptania

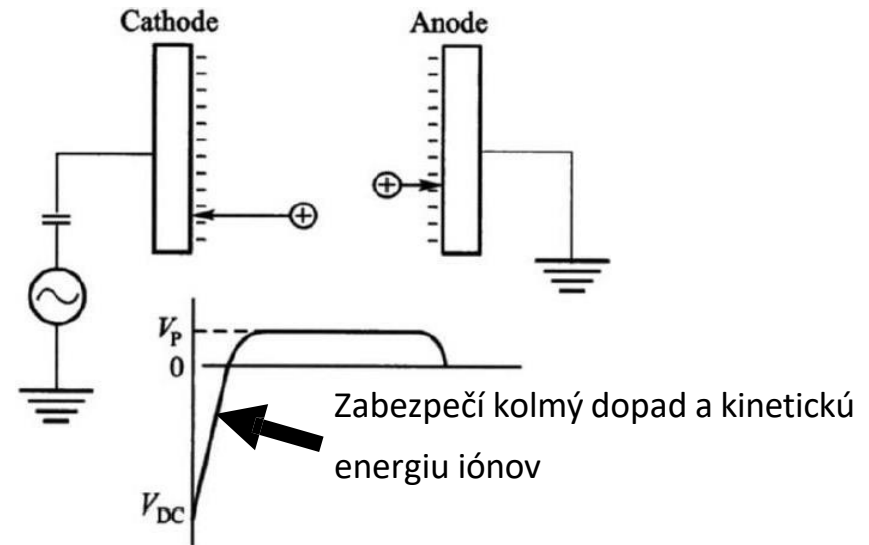
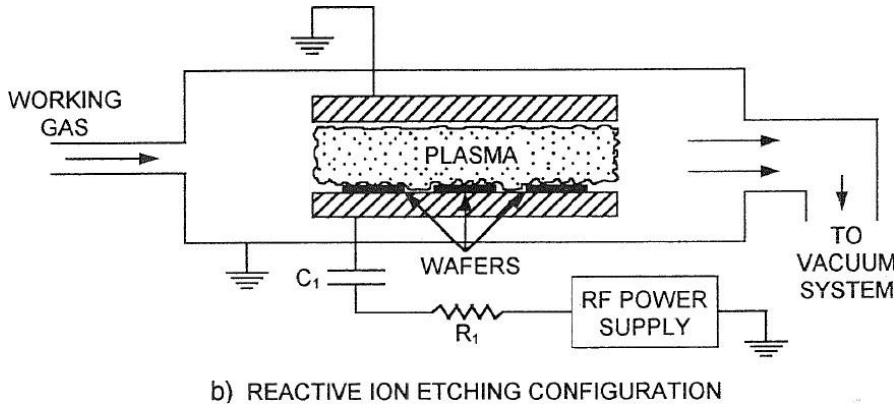
Interakcie s povrchom



- (a) Ióny odprašujú povrch, najprv CH a O kontamináciu, potom vlastný substrát.
- (b) Ióny, ak sú chemicky aktívne, priamo reagujú so substrátom za vzniku prchavej molekuly.
- (c) Molekula na povrchu disociuje, čím vznikne na povrchu substrátu atomárny radikál
- (d) Radikál z plazmy alebo radikál difundujúci po povrchu reagujú so substrátom, za vzniku prchavej molekuly.

RIE (*reactive ion etching*) usporiadanie s výhodou využíva všetky štyri popísané interakčné mechanizmy.

RIE plazmový reaktor



Kontrola RIE je výrazne experimentátorská a empirická záležitosť.

Prietok reaktívnych plynov – ak veľký = nestihnú disociovať; ak malý = pomalé leptanie.

RF príkon – vyšší príkon zvýši ionizáciu v plazme a tým aj rýchlosť leptania. Súčasne však zvýši aj podiel neselektívneho iónového odprašovania.

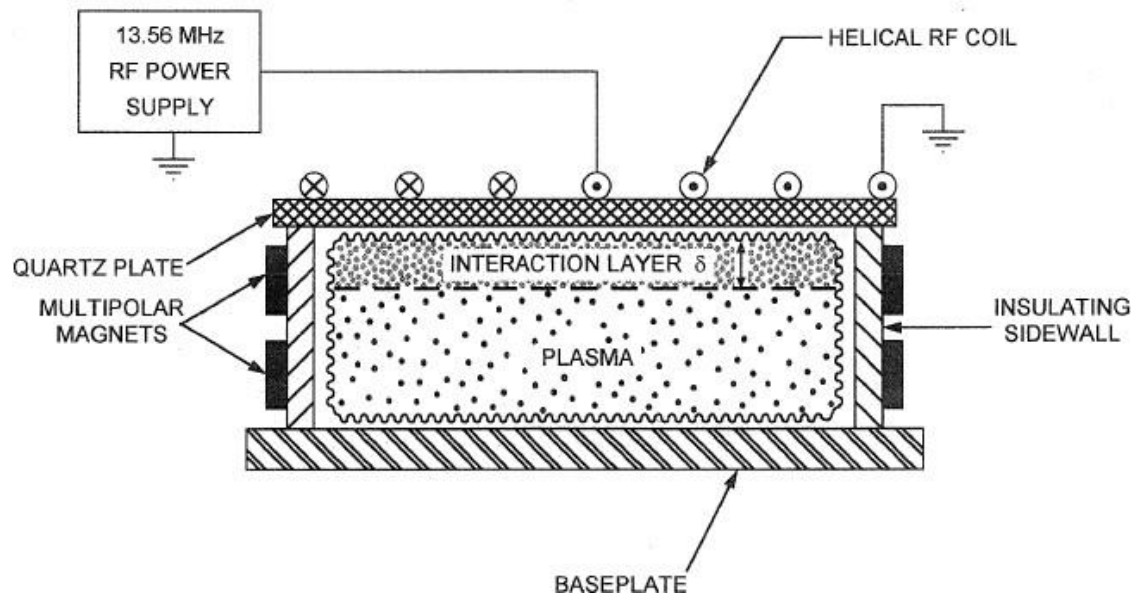
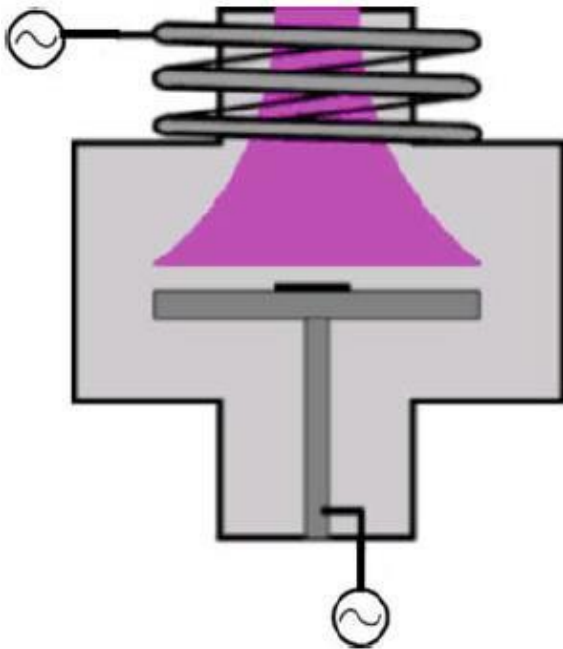
Pracovný tlak – 1-100 Pa. Nízky tlak znamená vyššiu energiu iónov, vyššiu anizotropnosť leptania (v plazme je anizotropný synonymom pre vertikálny), menší podiel chemických reakcií (dominuje odprašovanie). Nízky tlak ale znamená aj drahšie zariadenie a problémy so zapálením a udrжанím horenia plazmy.

Prímesi – 10% O₂ v CF₄ zvýši až 10x leptáciu rýchlosť, tým že podporí tvorbu F.

RIE s indukčívne viazaným výbojom / ICP

Rieši dilemu vysokého stupňa ionizácie plazmy bez privysokého napätia v stenovej vrstve tak, že plazmu zapáli mimo leptacej komory.

S takýmto zdrojom plazmy je možné uskupočniť *deep RIE* (DRIE) – leptanie s veľkým aspektom.



Konfigurácia s planárnou cievkou

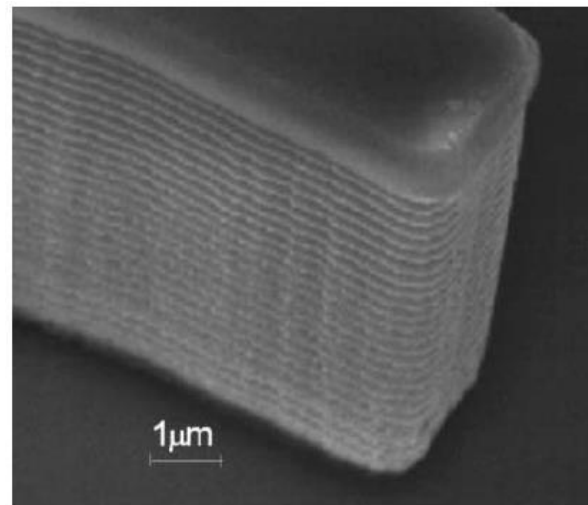
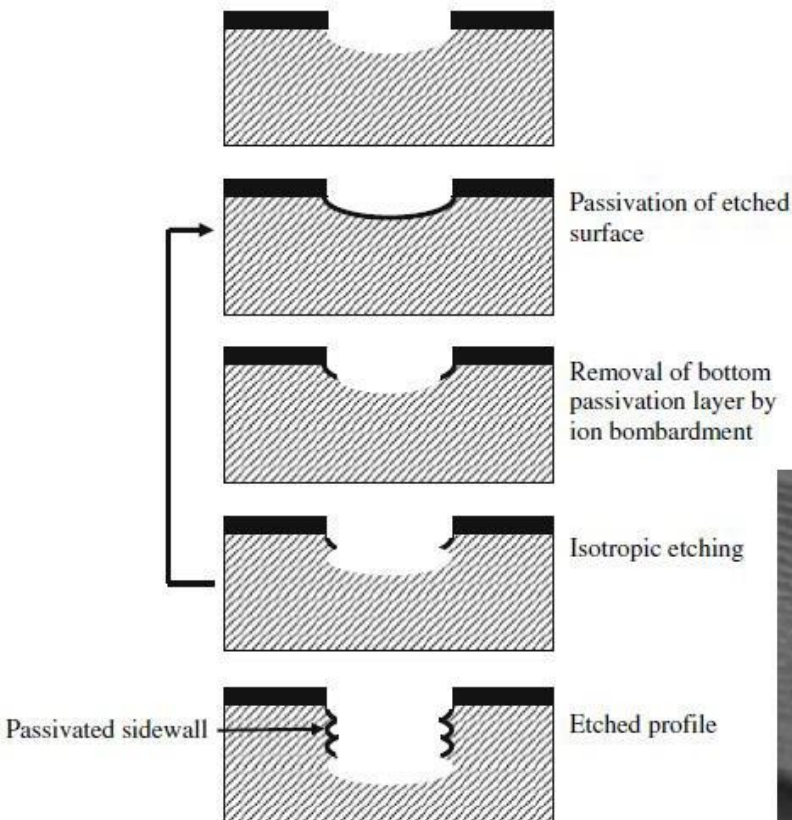
DRIE – tzv. *Bosch process*

Pre zaistenie čo najvyššej vertikálnosti/anizotropicity leptania vyvinuli v Bosch GmbH proces prepínania pracovných plynov, ktorými sa zámerne pasivujú bočné steny s cieľom potlačiť laterálne leptanie.

Table 6.4 Typical “Bosch” process conditions

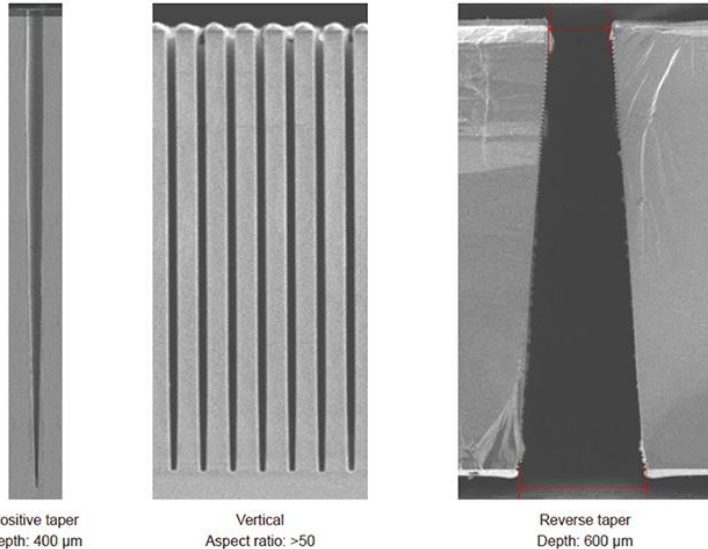
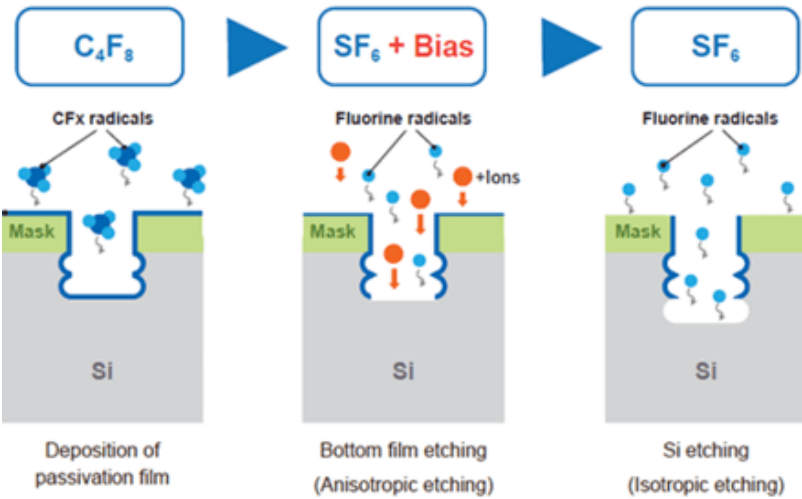
Process parameters	Passivation	Etching
C_4F_8	85 sccm	0 sccm
SF_6	0 sccm	130 sccm
RF power at stage	0 W	12 W
RF power from coil	600 W	600 W
Cycle time	7.0 s	9.0 s
Delay time	0.5 s	0.5 s
Etch rate		1.5–3 $\mu\text{m min}^{-1}$

sccm: standard cubic centimeter per minute



Zúbkovanie - *scalloping effect* :
Rieši sa optimalizáciou procedúry alebo kryoleptaním.

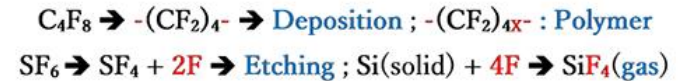
Bosch process



Chemical Reaction Notes for Cycle Steps (1) and (3)

Step 1: Deposition process of passivation film. (C_4F_8 chemical reaction)	Step 3: Silicon etching process. (SF_6 chemical reaction)
<p>1. $C_4F_8 \rightarrow -(CF_2 CF_2 CF_2 CF_2)-$ Cyclic C_4F_8 is ring-opened with plasma and both ends become activated.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p>C_4F_8 Octafluorocyclobutane (RC318) CAS Number : 115-25-3 UN1976</p> </div> <p>2. $X-(CF_2)_4- \rightarrow -(CF_2)_{4X}-$: Polymer \downarrow A CF_2 polymer is generated when the ring-opened C_4F_8 molecules react with each other. The passivation film is formed when CF_2 polymers are deposited on the surface.</p>	<p>1. $SF_6 \rightarrow SF_4 + 2F$ or $SF_6 \rightarrow SF_2 + 2F$ SF_6 is split into chemically metastable SF_4 and two individual fluorine atoms.</p> <p>2. $Si(\text{solid}) + 4F \rightarrow SiF_4$: Gas \uparrow Fluorine atoms react with the silicon. This is isotropic (side) etching.</p>

1. Chemical reaction of each gas:



2. Chemical reaction of both gases combined:



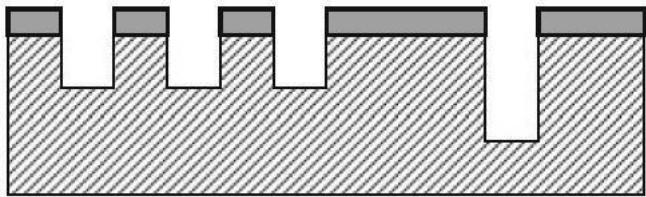
- Deposition cannot proceed because the fluorine radicals from dissociation of SF_6 react with the $-(CF_2)_4-$ open chain and terminate the polymerization reaction.
- Etching of silicon cannot proceed because the competing fluorine and $-(CF_2)_4-$ reactions dominate.



Gas switching is necessary to separate the C_4F_8 and SF_6 gases from each other.

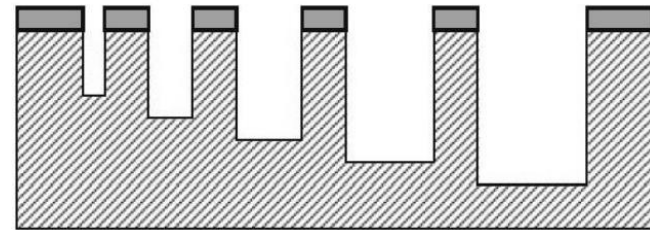
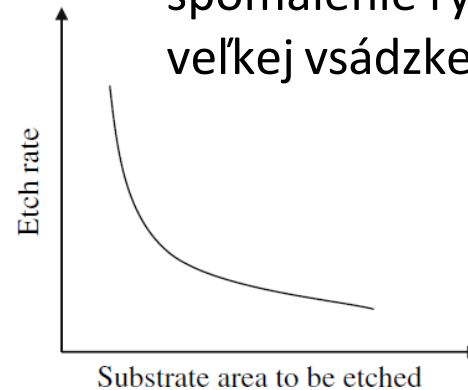
Kritické problémy RIE

Loading (vsádzkový) effect – nerovnomerné leptanie vďaka nedostatočnému prísunu reaktívnych radikálov na leptaný povrch.



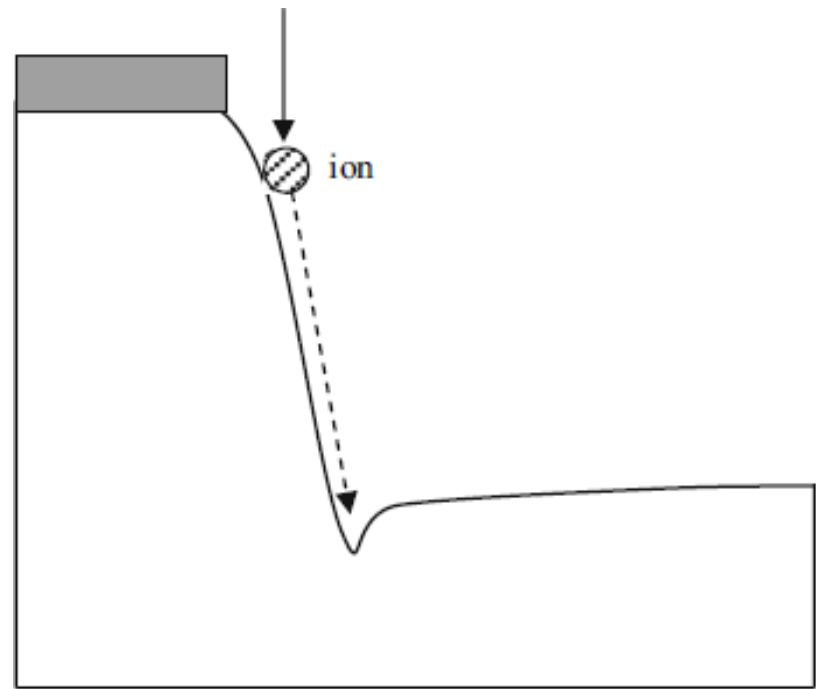
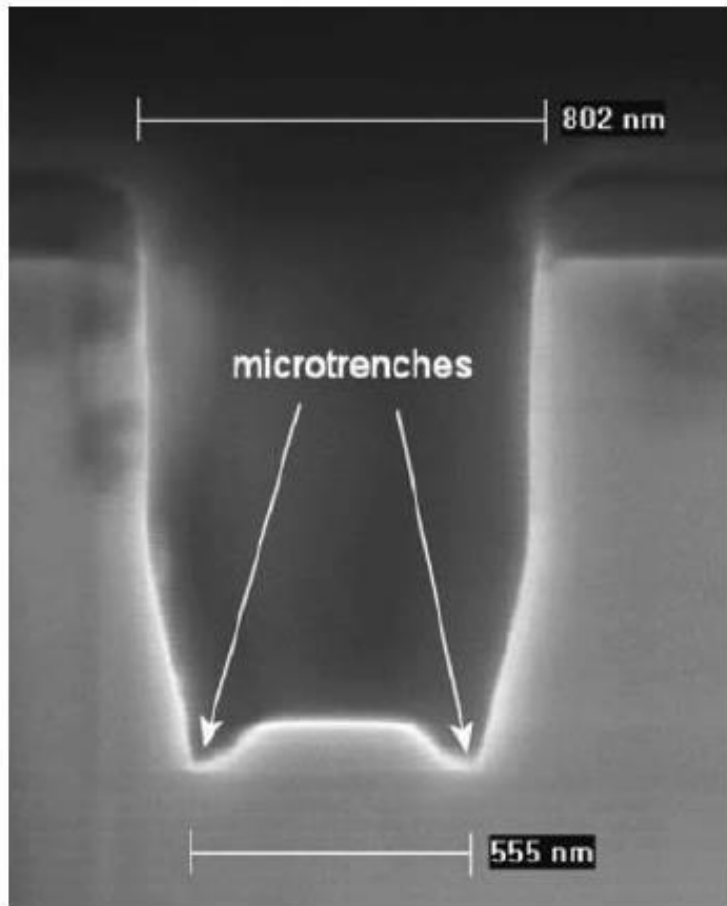
Microloading – lokálne vyčerpanie radikálov, napr. v oblastiach v vysokou hustotou leptaného motívu.

Macroloading – celkové spomalenie rýchlosti leptania pri veľkej vsádzke.

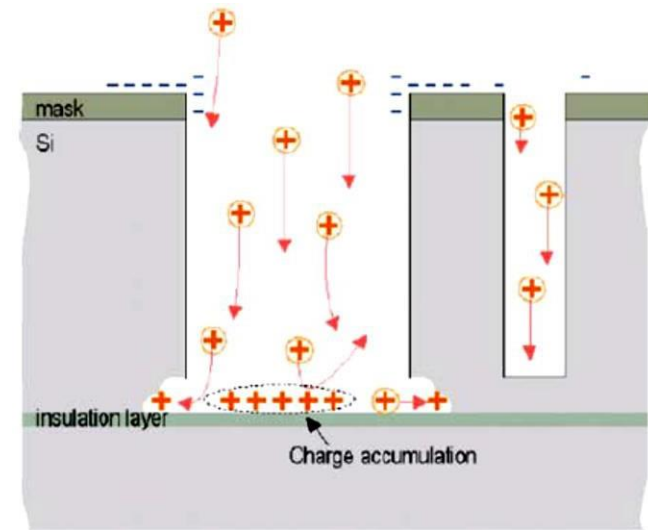
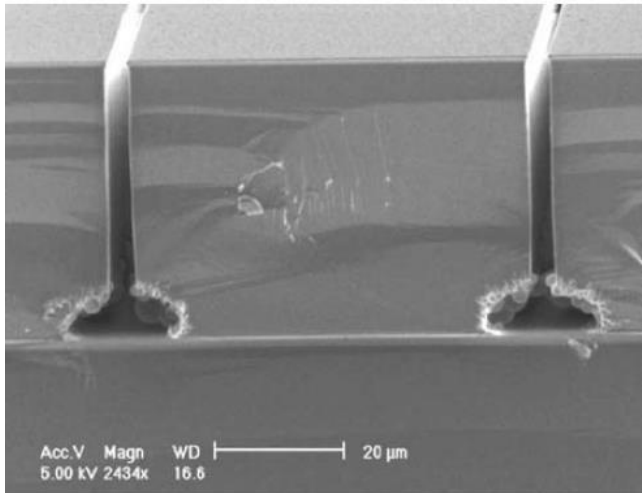


ADRE – Aspect ratio dependent etching – minimálne **8 rôznych** mechanizmov spôsobuje rozdielnu rýchlosť leptania v závislosti od rozmerov motívu.

Microtrenching effect – rýchlejšie leptanie v blízkosti stien. Vysvetľuje sa odrazom iónov dopadajúcim na stenu pod uhlom $>80^\circ$. Čím hlbšia drážka, tým je jav prominentnejší (väčšia plocha pre odraz).



Notching effect – podrezávanie, laterálne leptanie na dne leptanej štruktúry v kontakte s odolným materiálom (napr. SOI – Si na SiO₂). Vysvetľuje sa hromadením kladného náboja na dielektrickom dne, ktorý následne odkláňa nové dopadajúce ióny.



Poškodenie iónmi – napriek tomu že energia iónov pri leptaní je relatívne malá (5-500 eV), ióny môžu preniknúť až do hĺbky 100 nm. Tvorba defektov v mriežke siaha ešte hlbšie. Čiastočne možno riešiť následným ohrevom (*annealing*, existuje však T_{\max}), alebo znížením kinetickej energie iónov.

Porovnanie mokrého, anizotrópne mokrého a plazmového leptania

Pre mnohé aplikácie je voľba leptacej metódy určená iba jej zložitosťou – prednosť dostane metóda pre ktorú máme hardware, alebo pre ktorú existuje jednoduchý maskovací materiál.

Keď potrebujeme šikmé steny, alebo podleptanie = *izotrópne leptanie*.

Hlboké leptanie sa robí *mokrým anizotrópnym* alebo *DRIE leptaním*.

Pre komplexné štruktúry (napr. MEMS) sa suché aj mokré leptacie postupy kombinujú.

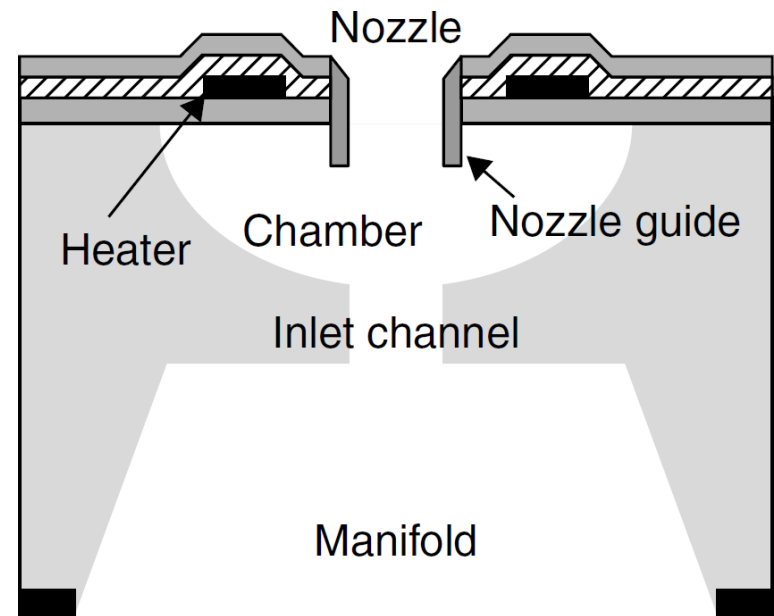
Tryska atramentovej (inkoustovej) tlačiarne:

Manifold - anisotropic wet etching

Inlet channel - DRIE,

Chamber - isotropic wet etching

Nozzle guides - anisotropic plasma etching



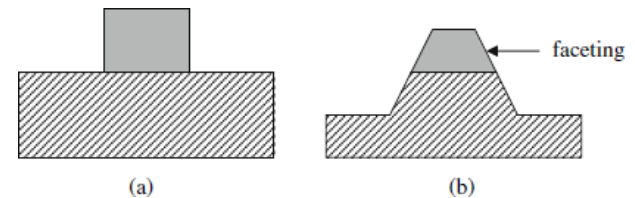
Iónové frézovanie / *Ion milling*

Iónové frézovanie je čisto fyzikálny postup založený na odprašovaní.

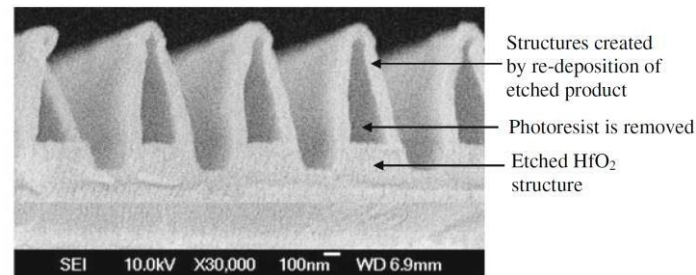
Používa sa na materiály, ktoré nie je možné chemicky odstrániť pomocou RIE. Bežné ióny Ar^+ s energiami 10-5 000 eV (väčšia energia by viedla k implantácii iónov). Na rozdiel od reaktorov RIE vznikajú ióny oddelene od substrátu a následne sú urýchlené.

Problémy:

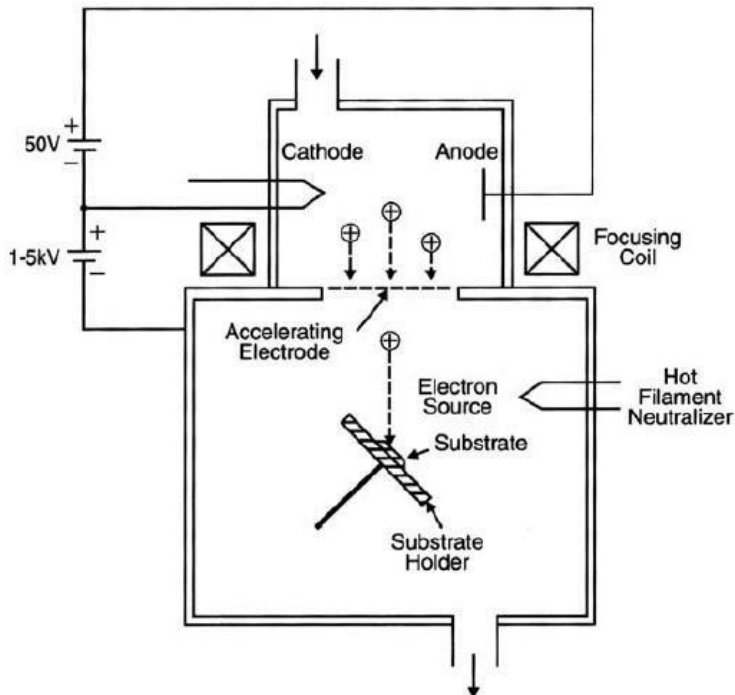
- Nízka selektivita fyzikálneho odprašovania komplikuje výber vhodnej masky, a vedie k vzniku faziet.



- Odprašené materiály nie sú prchavé a preto sa ukladajú na blízke povrchy (redepozícia).



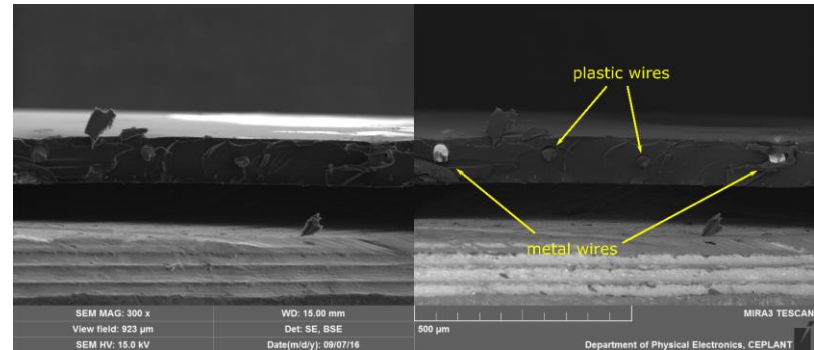
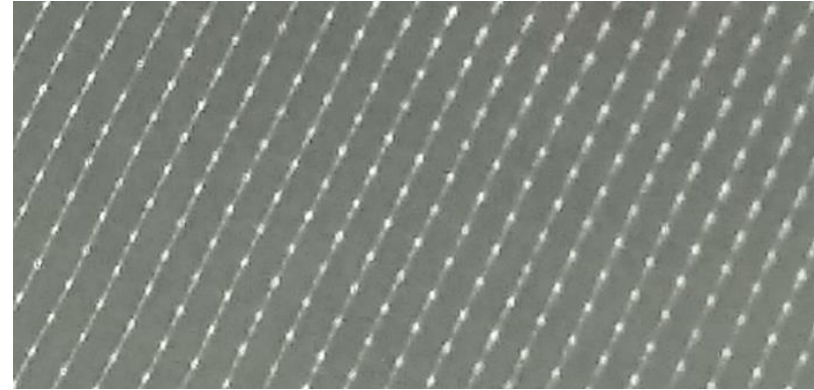
6.41 Redeposition in ion milling of hafnium oxide



Selective plasma etching at atmospheric pressure

Flexible transparent composite PMMA-based polymer film/Ag-coated Cu metal wire mesh substrates with conductive connection sites

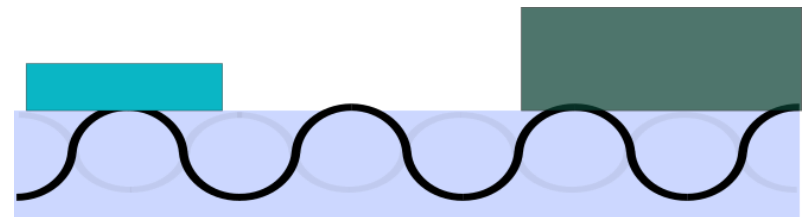
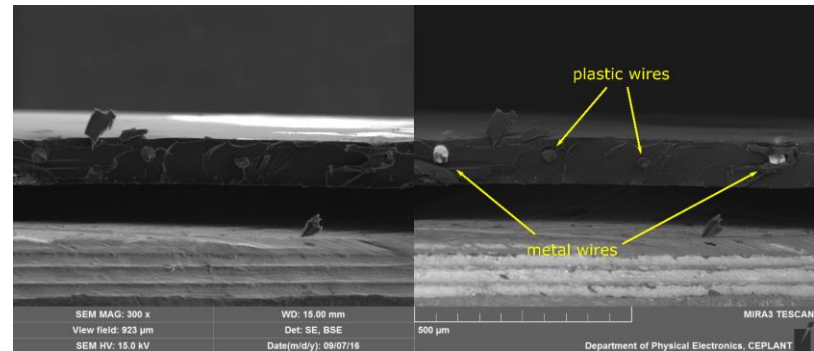
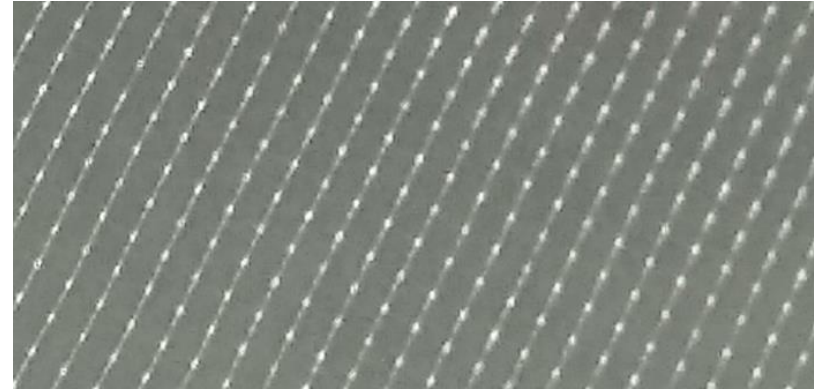
Selective removal of thin ($\sim 10\text{-}100\text{ nm}$) surface PMMA layer



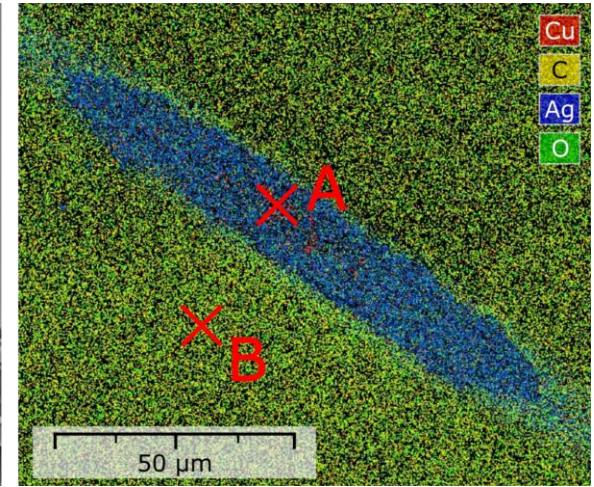
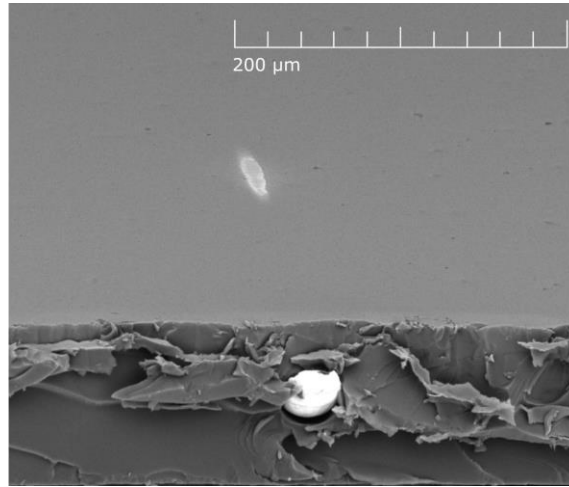
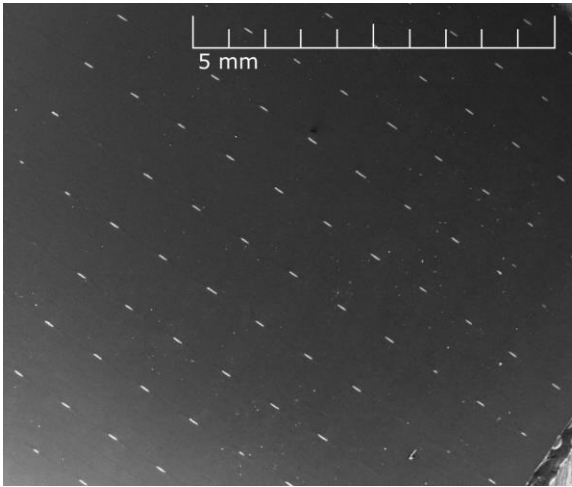
Selective plasma etching at atmospheric pressure

Flexible transparent composite PMMA-based polymer film/Ag-coated Cu metal wire mesh substrates with conductive connection sites

Selective removal of thin ($\sim 10\text{-}100\text{ nm}$) surface PMMA layer

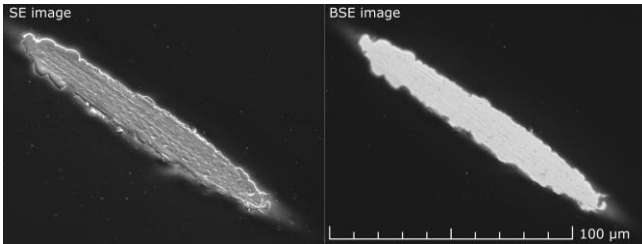


Selective plasma etching at atmospheric pressure

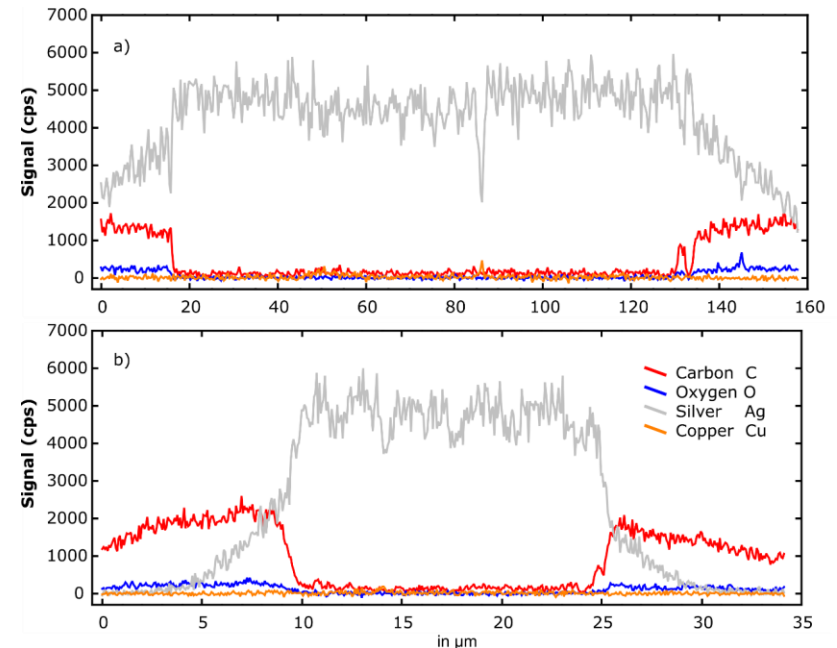


Top view on TCS and a detail on exposed wire top.

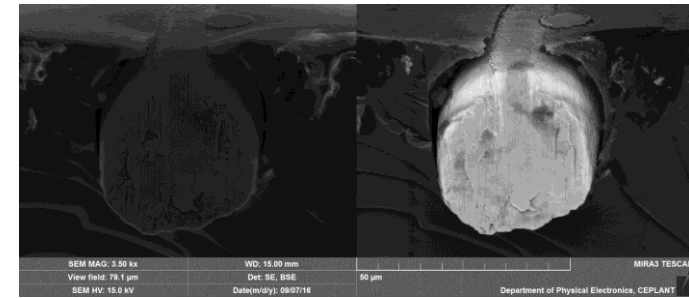
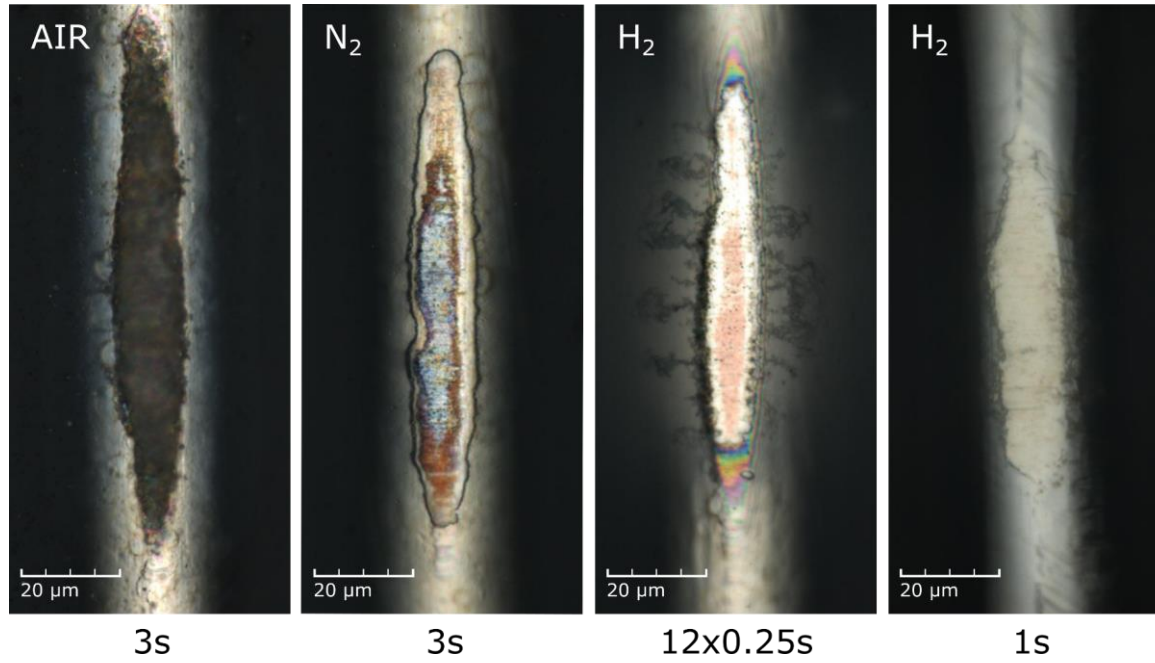
Composite element map of top of single uncovered wire (A). Distance 0.35 mm, treatment 1s



Element		Concentration (at.%)	
		A	B
C	Carbon	34.5	92
O	Oxygen	6.5	8
Ag	Silver	58.5	0
Cu	Copper	0.5	0



Selective plasma etching at atmospheric pressure



Exposed tops of metal wires after the etching in ambient air, nitrogen and hydrogen plasma.

Chemicko-mechanické leštenie

Brúsenie – abrazívne častice 1-100 μm pripevnené rezínom k brusnému nástroju, „odpraskávajú“ kúsky brúseného materiálu, ktorý následne unášajú. Rýchla a hrubá metóda, ktorá ale zanecháva na povrchu ryhy (drsnosť~100nm).

Leštenie - jemnejšie častice 10-300 nm rozmiešané v kvapaline (pasta), pričom proces odstraňovania materiálu na je v úrovni individuálnych atómov (drsnosť~1nm).

Režimy:

-*Priamy kontakt* (maximálny tlak, abrazívne častice sa o povrch trú)

-*Valivý kontakt* (nižšie abrazívne častice sa po povrchu kotúľajú)

-*Bez-kontaktne* (častice v paste sú unášané hydrodynamicky)

MRF – Magnetorheological finishing, leštiaca pasta z ferokvapaliny umožňuje intenzitou magnetického poľa regulovať režim leštenia.

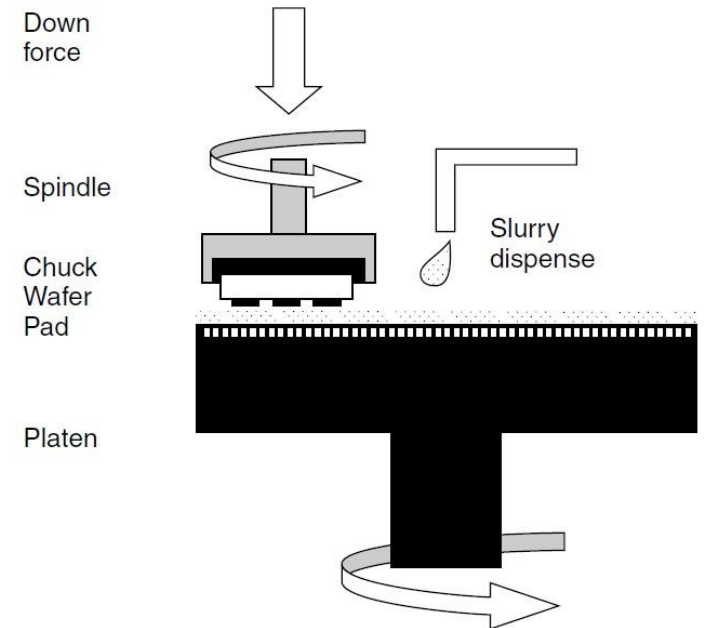


Figure 16.2 Schematic structure of a rotary CMP equipment

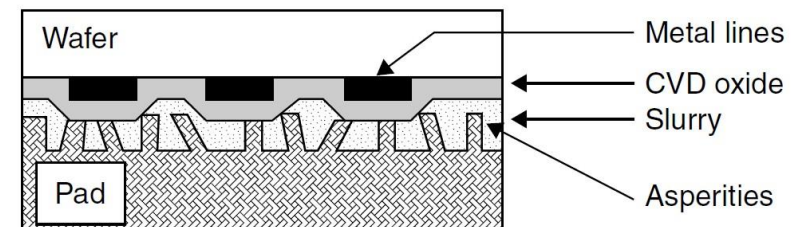
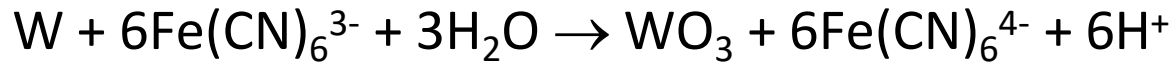


Figure 16.3 Close-up of CMP set-up: wafer, upside down, is pressed against the pad with slurry in between. Pad asperities make contact with the wafer

Chémia ChML / CMP – chemical-mechanical polishing

Pri chemicko-mechanickom leštení sa k mechanickým účinkom trecích síl pridá aj chemické leptanie. Jednoduchým príkladom je leštenie wolframu:



Oxid wolframový má dve úlohy. Chráni **W** pred ďalším leptaním, súčasne sa však ľahšie mechanicky odstraňuje. Podobne pre **Cu**, kde **Cu₂O** sa ľahko odstraňuje.

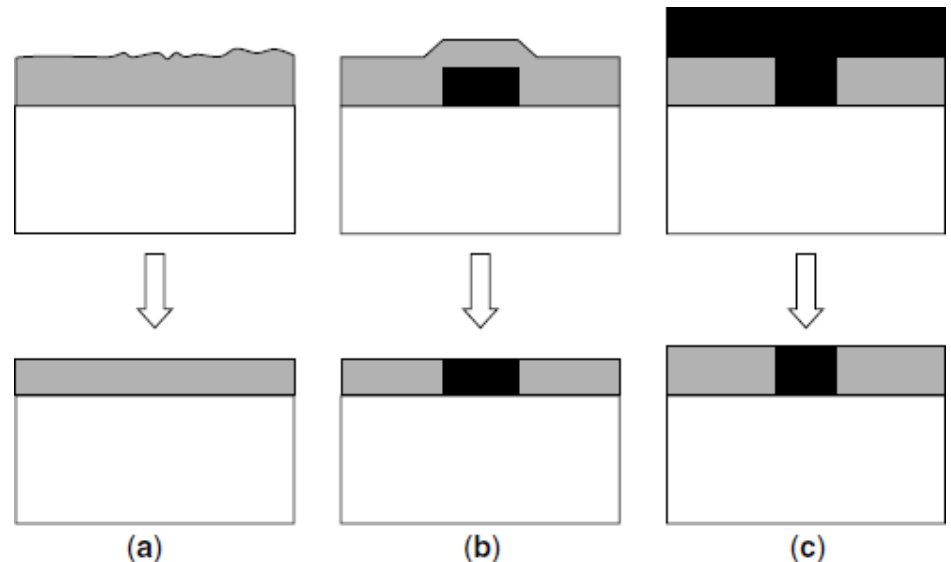
Využitie leštenia

(a) Vyhladenie

(b) Rovinnosť

(c) Damaškovanie

(plnenie dutín kovom, hlavne Cu)



Po použití leštenia je mimoriadne dôležité dokonalé očistenie vyleštenej plochy !

Infračervený fotonický kryštál, vyrobený pomocou ChML, ktoré planarizovalo deponovaný poly-Si (damaškovanie).

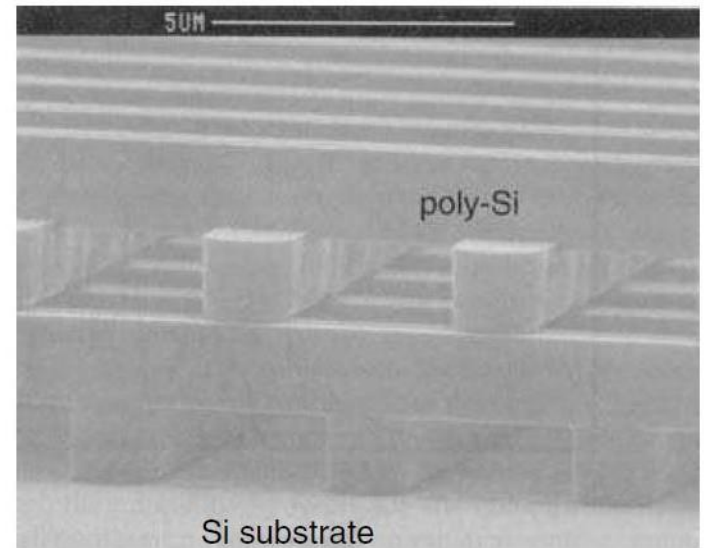
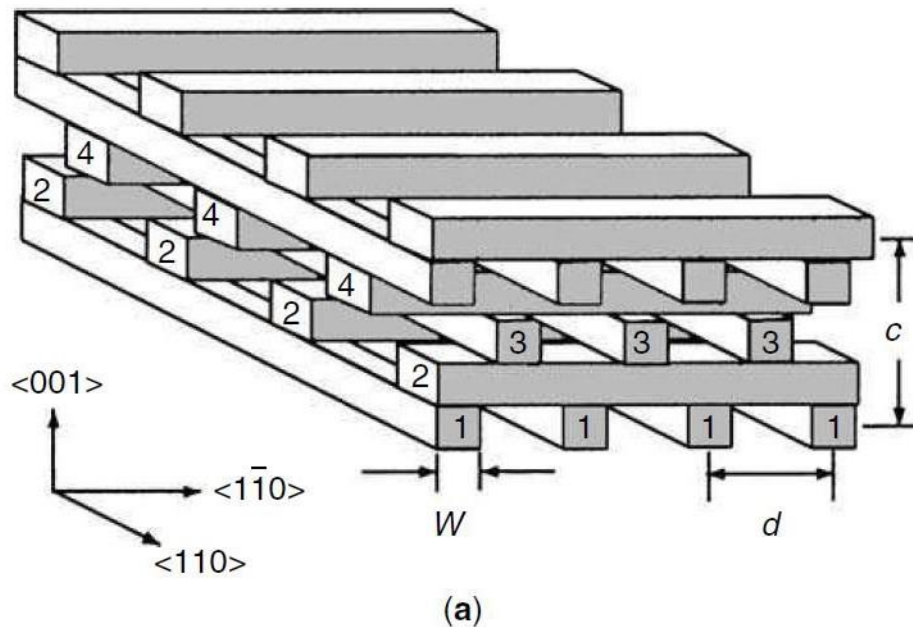


Figure 16.8 Infrared wavelength selective photonic lattice has been made with the help of CMP: oxide deposition, oxide trench etching, polysilicon LPCVD trench filling and polysilicon CMP have been repeated five times to create the lattice. As the last step, all oxide has been etched away in HF. Reproduced from Lin, S.Y. *et al.* (1998), by permission of Nature

Lepenie

Lepenie mikrokomponentov umožňuje jednoduchšiu výrobu komplexných štruktúr, ale aj manipuláciu s jemnými dielmi.

- Priame lepenie
- Nepriame lepenie prostredníctvom nanesenej medzivrstvy („lepidla“)

Teoreticky je možné spojiť akékoľvek dva veľmi hladké povrchy prostredníctvom van der Waalsových síl (tzv. studené zváranie, slinutie).

Silnejšiu chemickú väzbu je možné v prípade Si zaistiť týmito technikami:

Table 17.1 Bonding techniques

• Fusion bonding (FB)	Si/Si, SiO ₂ /Si, glass/glass
• Anodic bonding (AB)	Si/glass, glass/Si/glass
• Thermo-compression bonding (TCB)	Si/glass frit; metal/metal
• Adhesive bonding	Si/polymer/Si

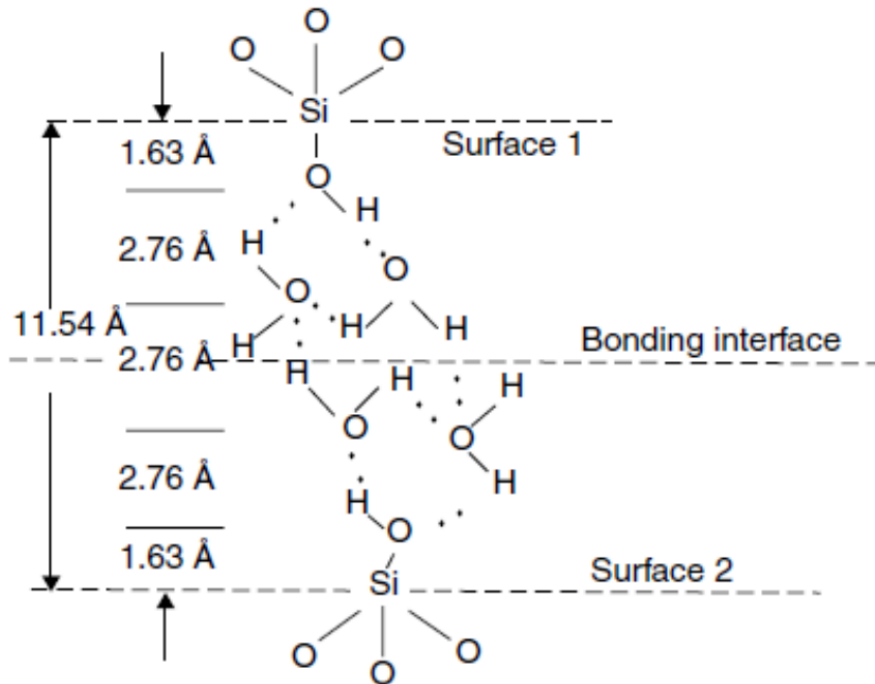
Silicon fusion bonding

Silanoly (Si-OH) na špeciálne ošetrovanom a hladkom povrchu waferov (RCA-1 = $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$) vytvoria pri priblížení väzby vodíkovými mostíkmi.

Žíhaním pri vysokej teplote potom vzniknú pevné siloxánové (Si-O-Si) väzby.

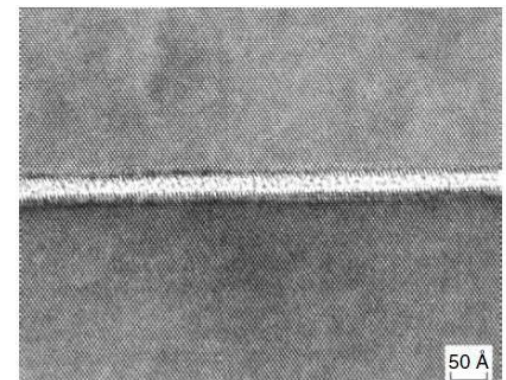
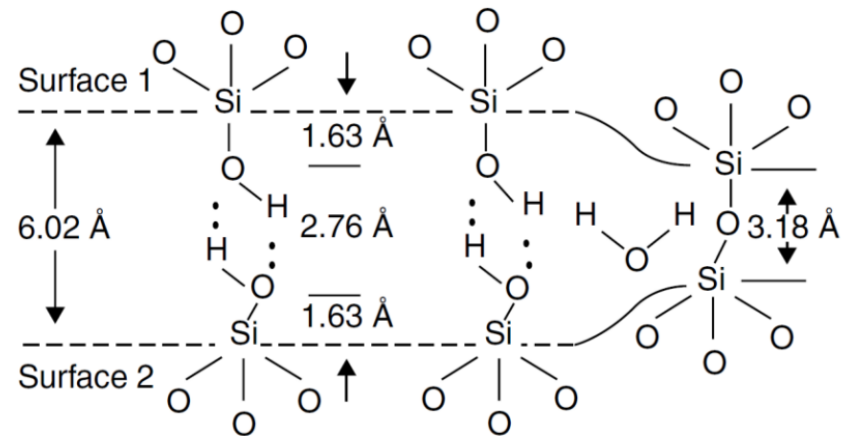


Pri 800°C začne Si tiecť, čo ďalej zlepšuje spoj.



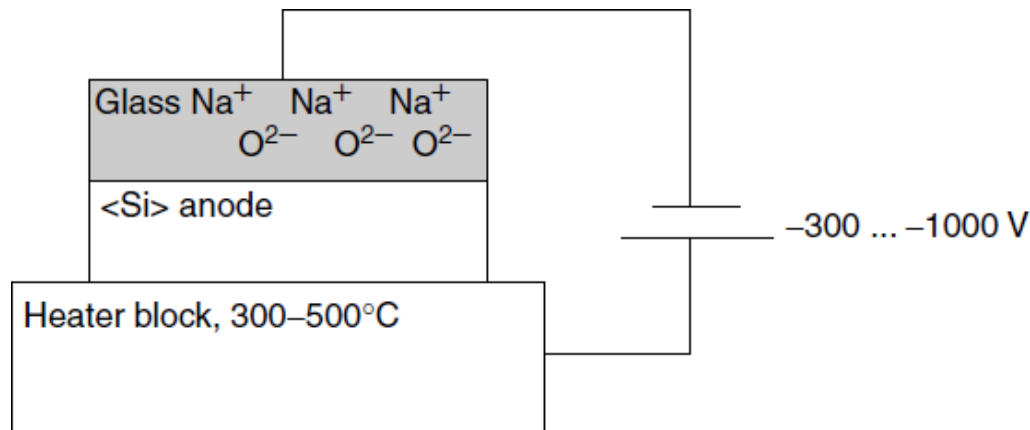
Uvoľnená H_2O oxiduje Si ďalej na SiO_2 (mokrú oxidáciu)

Žíhanie (annealing)



Anodické spájanie

Hlavne pre spájanie Si so sklom, limitom je kompatibilná teplotná rozťažnosť. Pri ohreve skla nad 400°C sa oxid sodný Na_2O rozkladá na Na^+ a O^{2-} . Priložené napätie (300-1000V) bude pri správnej polarite hnať Na^+ do vnútra skla a O^{2-} na povrch, smerom k Si. Na rozhraní prebehne reakcia:

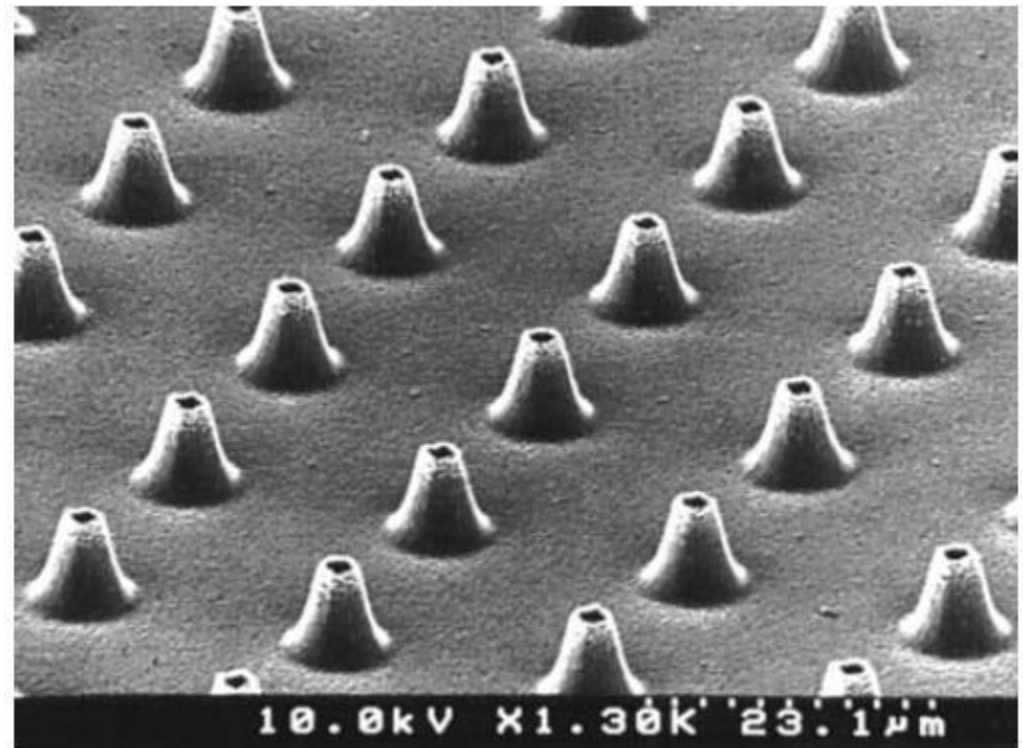
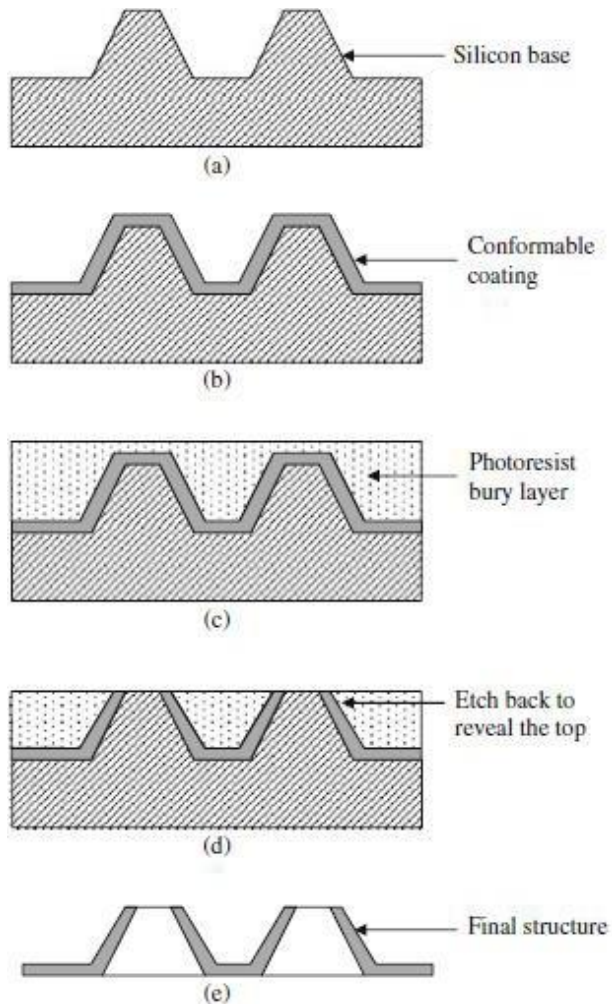


Katióny aj elektróny vytvoria silnú príťažlivú silu. Mimo vákua je potrebné spájanie iniciovať tlakom.

Aby bolo možné anodicky spájať Si-Si alebo sklo-sklo, deponuje sa na jeden povrch tenká vrstvička z vhodného materiálu (napr. pyrex, SiN, SiC).

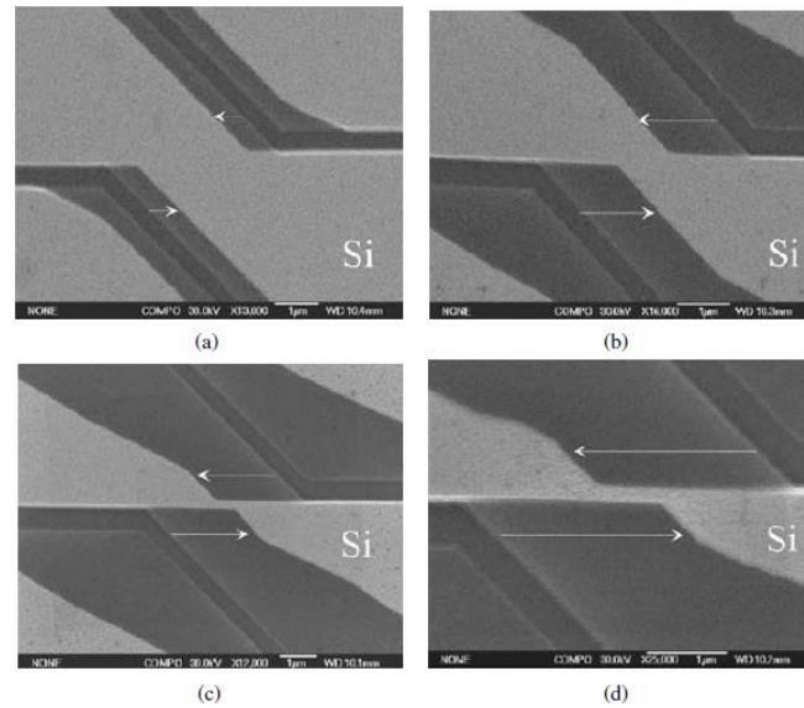
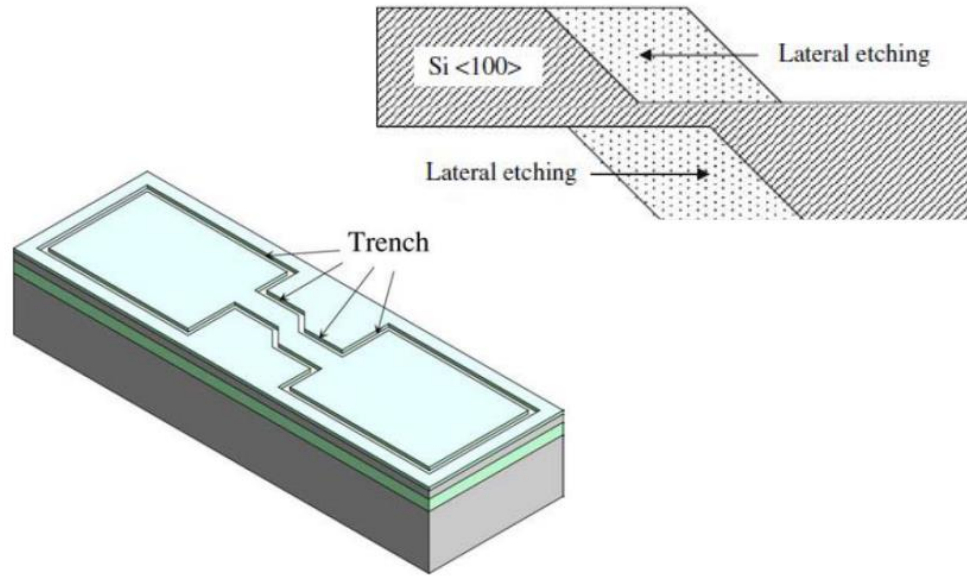
Nepriama nanofabrikácia

Sidewall lithography:



Sústava tenkostenných trysiek

Laterálne uberanie hmoty



- Podleptávaním v Si <100> vyrobili Si nanodrôty (tu: 40nm x 700 nm)

- Oxidačné ostrenie hrotov

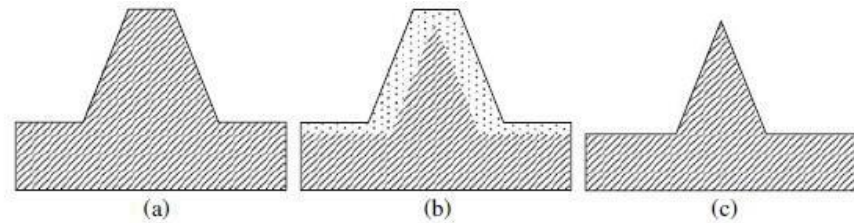


Fig. 7.9 Schematic of oxidation sharpening process. (a) Initial tip geometry, (b) oxidation, (c) final tip geometry after removal of oxide layer

Literatúra

Zheng Cui: *Nanofabrication Principles, Capabilities and Limits*, Springer Science & Business Media, 2008

Sami Fransilla: *Introduction to Microfabrication*, Wiley; 2nd Edition 2010

J Reece Roth: *Industrial Plasma Engineering*, Vol.2, IoP London, 2001