

**Framleiðsla smárása:**

# **Æting**

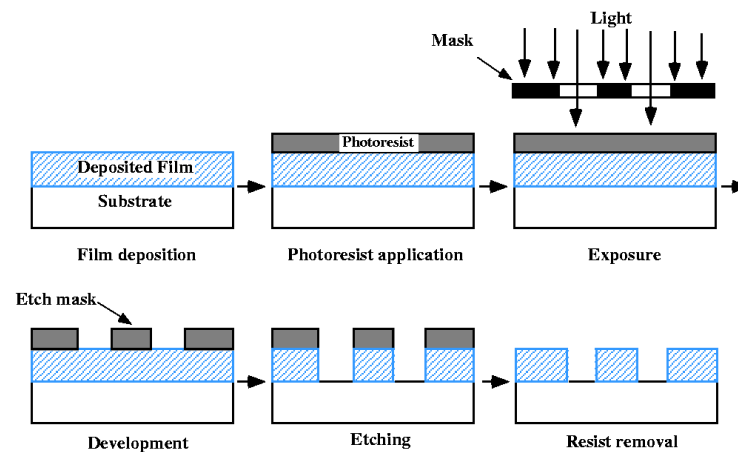
## **Kaflí 21**

**Jón Tómas Guðmundsson**

**tumi@hi.is**

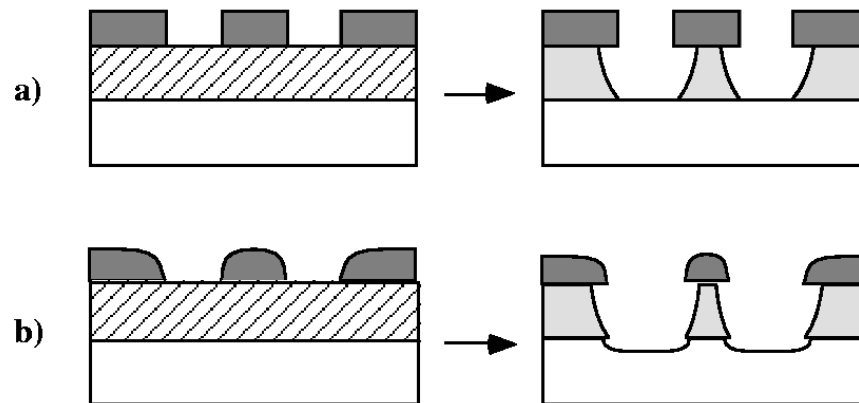
**13. vika haust 2018**

# Inngangur



- Æting þunnra húða og stundum kísilundirlagsins eru afar algeng framleiðsluskref við framleiðslu smárása
- Valvísi (e. selectivity) og ætingarstefna skipta þá verulegu máli
- Valvísi ræðst af efnafræðinni en stefnuvirkni ræðst að mestu af physical processes
- Í nútíma ætingartólum er reynt að besta hvorutveggja

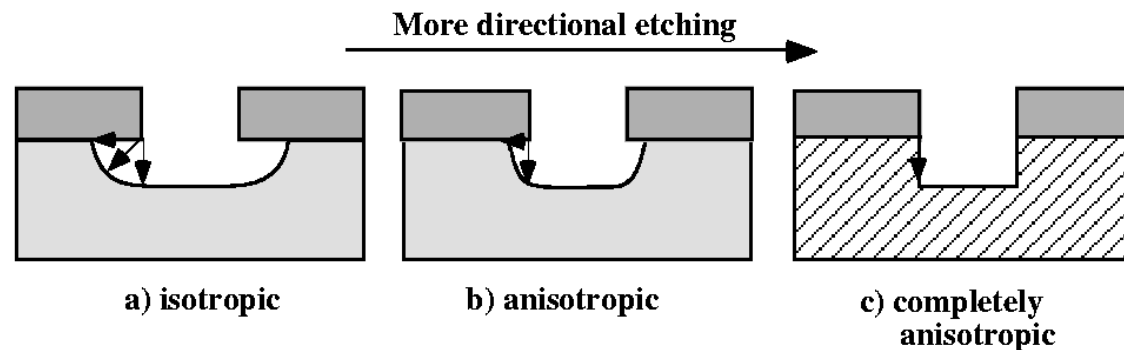
# Inngangur



- Dæmi um (a) hvernig æting verður undir grímu og (b) hvernig valvísi skiptir máli þegar æta á þunna húð ofan af undirlagi
- Venjulega er krafist stefnuefni og valvísi (hlutfalli upp á 25 – 50) en því er erfitt að ná samtímis fyrir bæði stefnuefni og valvísi samtímis

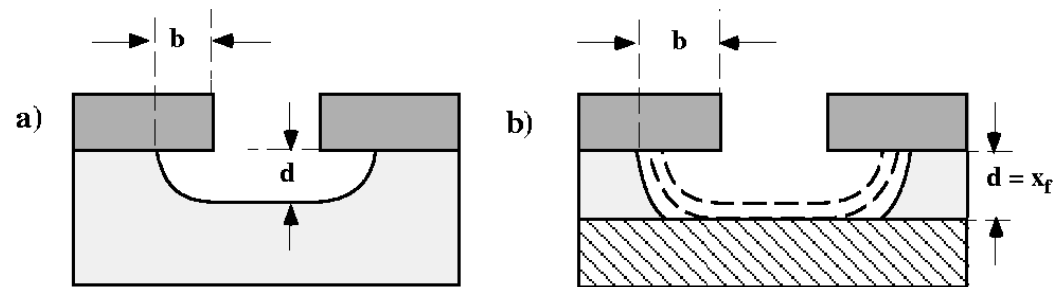
⇒ Dæmi 21.1.

# Inngangur



- Almennt er í ætingu reynt að fá
  - æskilegt þversnið
  - sem minnsta ætingu undir grímu
  - valvísi á aðrar húðir og ljósviðnámslag
  - einsleitni og endurtakanleika
  - sem minnstar skemmdir á yfirborð og í rás
  - hreinleika, hagkvæmni og öryggi

# Inngangur



- Það eru tvær megin aðferðir til ætingar við framleiðslu smárása
  - vot æting
  - þurr æting
- Þurr æting eða rafgas æting er ráðandi í dag

## Vot æting

- Vot efnaæting er mikið notuð í framleiðslu smárása
- Eftir að skífan er söguð af hleifnum er efnaæting notuð við slípun yfirborðins þannig að það verði flatt og óskemmt
- Fyrir varmaoxun eða lagvöxt er yfirborð skífunnar ætt til að fjarlægja óhreinindi

## Vot æting

- Vot efnaæting felur í sér þrjú skref
  - flutningur hvarfefna til yfirborðs með sveimi
  - efnahvörf við yfirborð
  - flutningur hvarfefna frá yfirborði með sveimi
- Við efnaætingu er einsleitni ætingar afar mikilvæg
- Vot efnaæting fer fram með
  - niðurdýfingu (e. immersion)
  - úðun (e. spraying)

## Vot æting

- Fyrir framleiðsluferli er einsleitni ætingarhraða afar mikilvæg
- Ætingarhraði verður að vera einsleitur yfir alla skífuna og sá sami frá skífu til skífu og frá keyrslu til keyrslu
- Einsleitni ætingar er skilgreind sem

$$\frac{\text{mesti ætingarhraði} - \text{minnsti ætingarhraði}}{\text{mesti ætingarhraði} + \text{minnsti ætingarhraði}} \times 100\%$$

- Við vota efnaætingu á hálfleiðurum er yfirleitt byrjað með oxun og síðan er oxíðið leyst upp með efnahvarfi
- Fyrir kísilætingu er algengast að nota blöndur af
  - saltpéturssýru (e. nitric acid)  $\text{HNO}_3$
  - flúrsýru (e. hydrofluoric acid)  $\text{HF}$í vatni eða ediksýru (e. acetic acid)  $\text{CH}_3\text{COOH}$



## Vot æting - kísill

- Saltpéturssýra oxar kísilinn og myndar SiO<sub>2</sub> lag

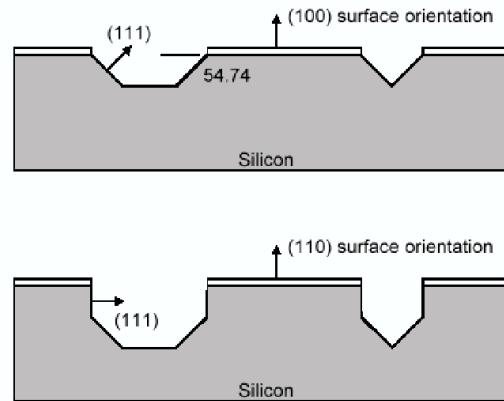


- Flúrsýra er þá notuð til að leysa upp SiO<sub>2</sub> lagið



- Vatn má nota til að þynna ætilausnina en betra er að nota ediksýru
- Sumar ætilausnir æta gefin kristallaplön einkristallaðs kísils mun hraðar en önnur – ætingin er stefnuháð
- Í kristallagrind hefur (111)-planið fleiri tengi á einingarflöt en (110)- og (100)-plönin og þess vegna er ætingarhraðinn hægari fyrir (111)

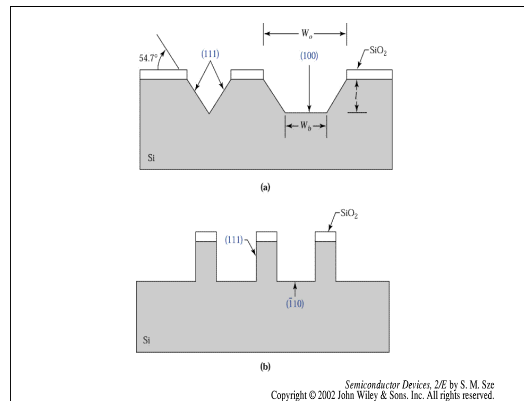
## Vot æting - kísill



- Algeng stefnuháð ætillausn fyrir kísil samanstendur af KOH í vatni og isopropyl alcohol
- Lausn með 19% KOH í afjónuðu (DI) vatni við 80°C gefur ætingarhraða í hlutföllunum

(100) : (110) : (111) sem 100 : 16 : 1

## Vot æting - kísill



- Stefnuháð æting á  $\langle 100 \rangle$  kísli um kísiloxíð grímu gefur V-laga gróp (e. groove) með brúnir sem eru (111)-plön undir  $54.7^\circ$  horni eða U-laga með botnbreidd

$$W_b = W_o - 2l \cot 54.7^\circ = W_o - \sqrt{2}l$$

þar sem  $W_o$  er breidd glugga í grímu og  $l$  er dýpt ætingar

- Ef ætt er í  $\langle \bar{1}10 \rangle$  - kísil fást lóðréttir veggir úr (111)-plönunum

## Vot æting - SiO<sub>2</sub>

- SiO<sub>2</sub> er gjarnan ætt í þynntri HF lausn
- Ef NH<sub>4</sub>F er bætt í lausnina er hún sögð buffered HF (BHF)

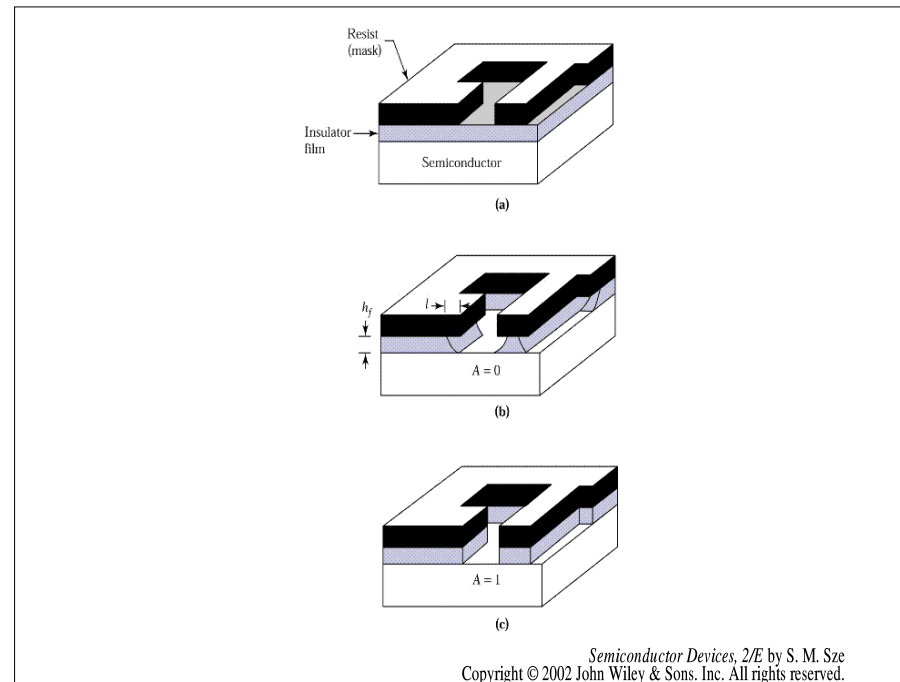
## Vot æting - kísilnítíð

- Kísilnítíð er gjarnan ætt í HF eða BHF lausn við stofuhita eða sjóðandi H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

## Vot æting - poly Si

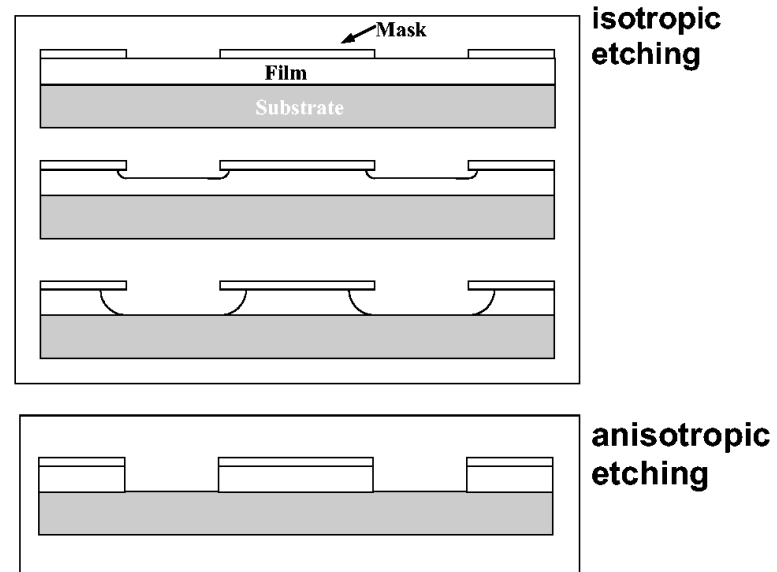
- Að æta fjölkristallaðan kísil er svipað og að æta einkristallaðan kísil nema ætingarhraði er mun hærri

# Stefnuvirkni



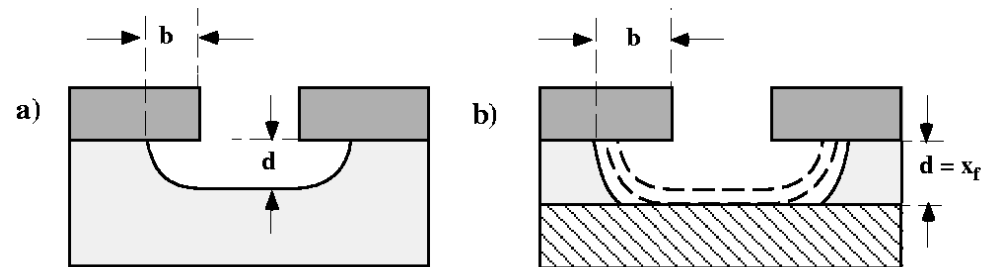
- Við mynsturflutning er mynstrið í ljósviðnámslaginu gríma fyrir ætingu á undirliggjandi lagi

# Stefnurvirkni



- Flest laganna (t.d.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  og málmar) eru myndlausar eða fjölkristallaðar húðir
- Ef þau eru ætt með votri efnaætingu er ætingarhraðinn stefnusnauður (e. isotropic)

## Stefnuvirkni

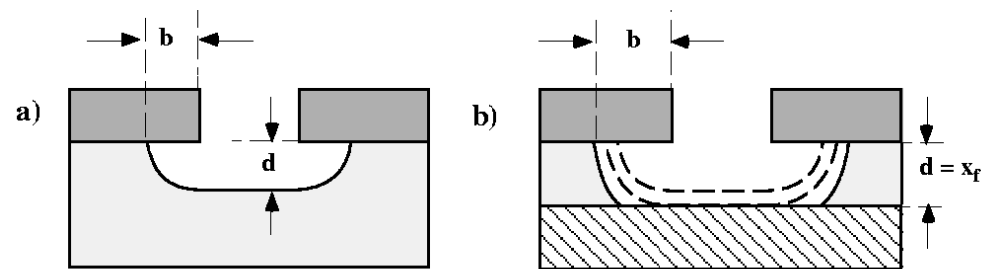


- Ef  $h_f$  er þykkt lagsins og  $\ell$  er lateral vegalengd sem ætt er niður fyrir ljósviðnámsgrímuna þá má skilgreina stefnuvirkni (e. anisotropy) sem

$$A_f \equiv 1 - \frac{1}{h_f} = 1 - \frac{R_\ell t}{R_v t} = 1 - \frac{R_\ell}{R_v} = 1 - \frac{b}{d}$$

þar sem  $t$  er tími og  $R_\ell$  og  $R_v$  eru láréttir og lóðréttir ætingahraðar

## Stefnuvirkni



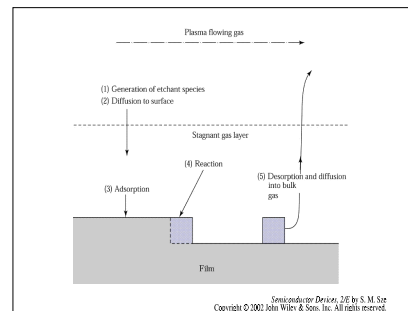
- Meginókostur votrar efnaætingar fyrir mynsturflutning er æting lárétt undir grímuna, sem veldur minni upplausn ætingarinnar
- Fyrir stefnusnauða ætingu þarf þykkt húðar að vera  $1/3$  eða minna af upplausninni sem krafist er



## Þurr æting

- Þurr æting eða rafgasæting var þróuð til að fá fram
  - hraðari og einfaldari ætingu
  - meiri stefnuefni
- Ef fá á mynstur með upplausn sem er mun minni er þykkt húðar þá þarf stefnuháða ætingu ( $1 \geq A_f \geq 0$ ), í raun þarf  $A_f \approx 1$
- Með þurri ætingu í rafgasi má ná fram þessum eiginleikum með lágþrýstum afhleðslum
- Við rafgasætingu er húð fjarlægð með yfirborðsefnahvarfi hlutlausra agna í grunnástandi eða örvaðra hlutlausra agna
- Orkumiklar jónir rafgassins hafa einnig áhrif á ætingarferlið

# Purr æting



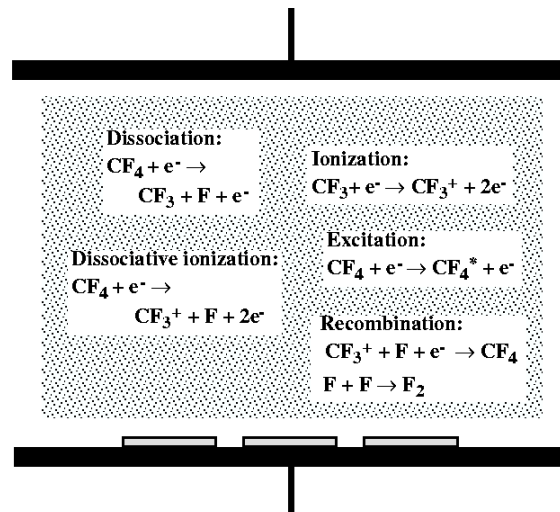
- Rafgasæting á sér stað í fimm skrefum
  - hvarfagnir myndaðar í rafgasinu
  - hvarfagnir flytjast með sveimi að yfirborðinu
  - hvarfagnir aðloðast yfirborðinu
  - efnahvarf verður með hjálp jónahríðar og roksgjarnt samband myndast
  - efnasambandið losnar frá yfirborðinu og sveimar út í rafgasið og er pumpað út

## Þurr æting

- Rafgasæting er gjarnan framkvæmd í lágþrýstu rafgasi
- Tveimur megin aðferðum er beitt
  - æting með spætun
  - efnaæting
- Efnaæting og æting með spætun hafa ólíka eiginleika
- Efnaæting hefur mikinn ætingarhraða og góða valvísi (e. selectivity) en gefur stefnusnautt snið
- Spætun gefur stefnuháð snið en hefur litla valvísi auk þess sem jónahríðin getur skemmt yfirborðið
- Saman gefa þessar tvær aðferðir, stefnuháð snið, þokkalega valvísi og hæfilega óskemmd yfirborð

## Purr æting

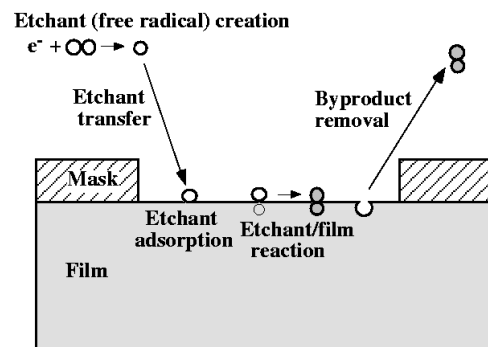
- Æting fer fram með gösum eins og  $\text{CF}_4$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{Cl}_2$  og  $\text{HBr}$  sem oft eru þynnt með  $\text{O}_2$
- Dæmigerð hvörf fyrir slíka afhleðslu:



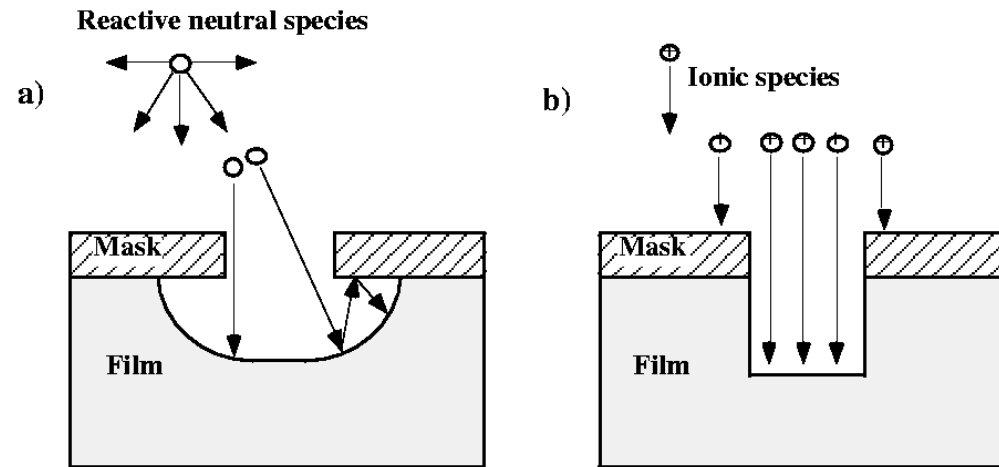
- Þéttleiki hlutlausra agna er  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  þar sem 1 – 10 % eru hvarfagnir og jóna- og rafeindapéttleiki er  $10^8 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

## Purr æting

- Efnaætingin fer fram með hvarfgjörnum hlutlausum ögnum t.d. F eða  $\text{CF}_3$
- Ef  $\text{O}_2$  er blandað í gasið hvarfast það við  $\text{CF}_3$  sem dregur úr sumruna  $\text{CF}_3 + \text{F}$  sem leiðir til hærri ætingarhraða
- Þessi ferli eru efnafræðileg og þess vegna stefnusnauð eins og vot æting



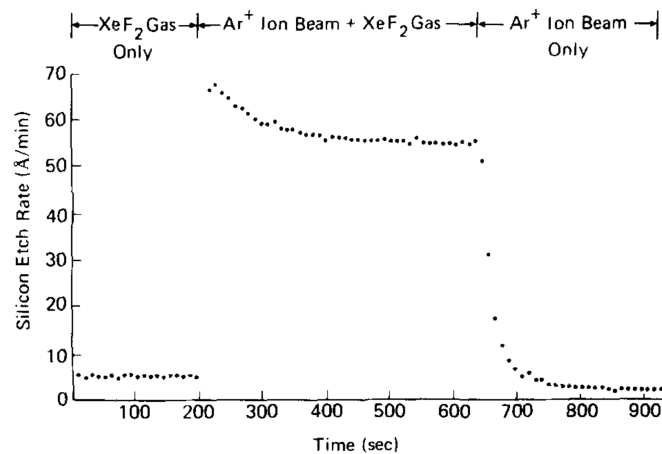
# Þurr æting



- Jónaæting er stefnuháðari
- Ætingin fer fram með því að jónir eins og  $\text{CF}_4^+$  og  $\text{Ar}^+$  fjarlægja efnið með spætun
- Valvísi er léleg í þessu ferli og skemmdir geta orðið á yfirborðum

## Þurr æting

- Það er vel þekkt að efnahvarf hlutlausra agna sem og jónirnar frá rafgasinu spila saman í ætingunni



Frá Coburn and Winters (1979)

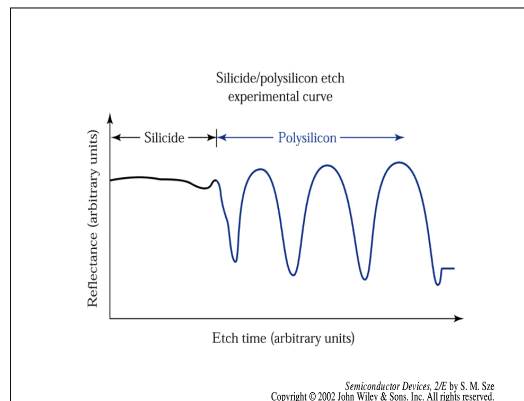
- Ætingarhraði kísils í XeF<sub>2</sub> gasi og þegar Ar<sup>+</sup> jónum er beint að yfirborðinu
- Aðeins þegar hvorutveggja er fyrir hendi er ætingarhraðinn ásættanlegur

## Þurr æting

- Rafgas geislar út ljósi á bylgjulengdum frá innrauðu til útfjólublás
- Litrófsgreining á þessari útgeislun gefur upplýsingar um hvaða hlutlausar agnir og jónir séu til staðar í rafgasinu
- Við þurra ætingu er valvísi takmörkuð
- Þess vegna er samliðumælingu (e. interferometry) beitt samfelld á yfirborði skífunnar til að meta ætingarhraða og ákvarða endapunkt
- Á meðan á ætingu stendur sveiflast styrkur ljóssins sem speglað er af yfirborðum þunnra húða
- Þetta er vegna víxverkunar fasa milli ljóss sem endurkastast frá ytri- og innri samskeytum hins ætta lags
- Húðin verður þess vegna að vera gegnsæ eða hálfgegnsæ



# Þurr æting



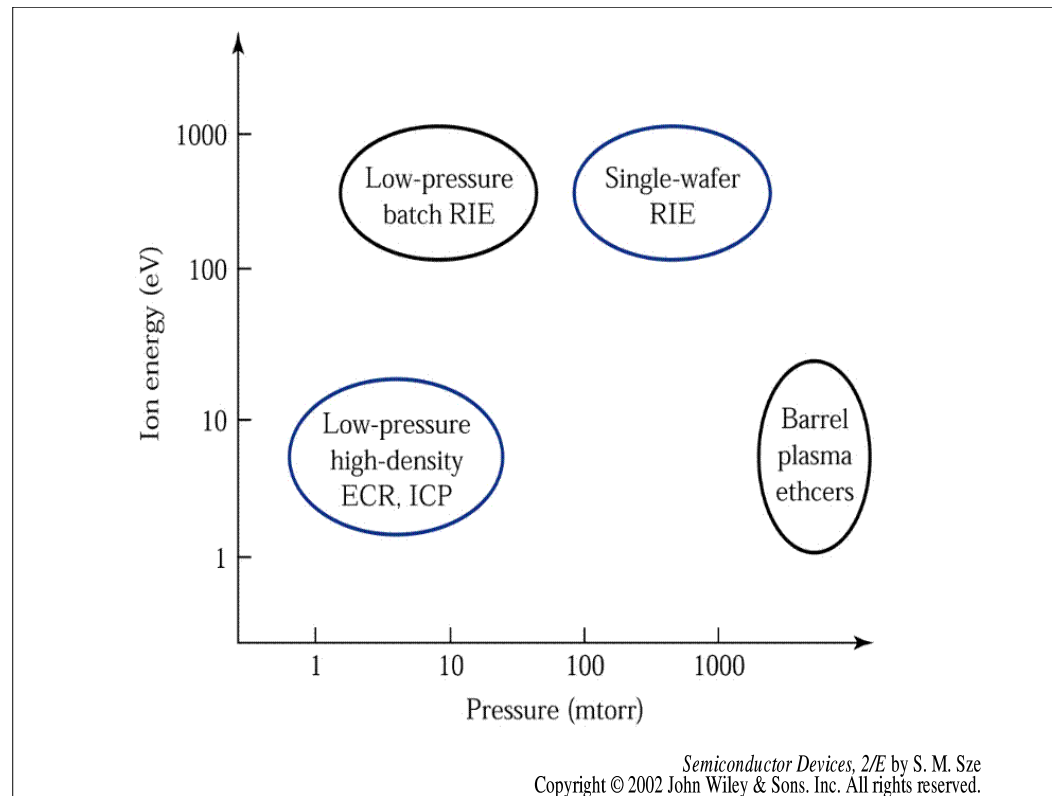
- Myndin sýnir dæmigert merki frá silicide/poly-Si ætingu
- Lota sveiflanna er tengd þykkt húðarinnar

$$\Delta d = \lambda / 2\bar{n}$$

þar sem  $\Delta d$  er breyting í þykkt húðar fyrir eina lotu,  $\lambda$  er bylgjulengd ljóssins og  $\bar{n}$  er brotstuðull ætta lagsins

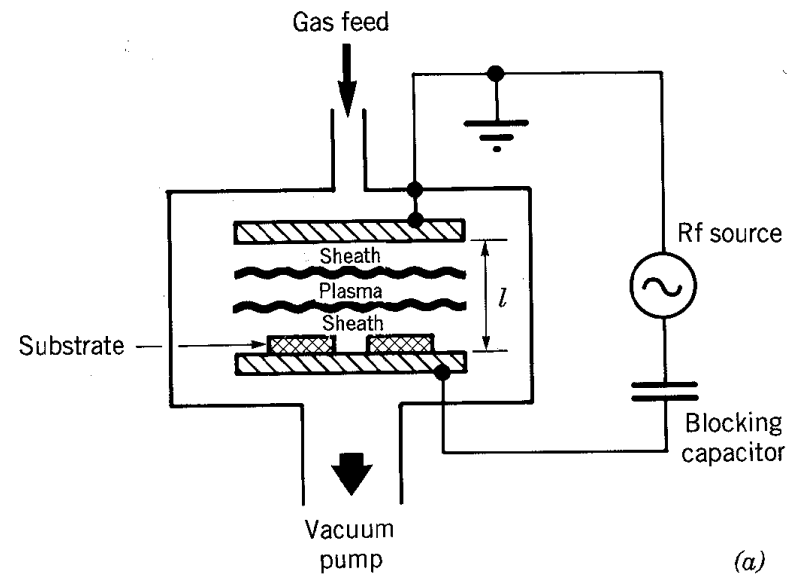
- Endapunktur þekkist á því að speglunarsveiflurnar hverfa

# Þurr æting



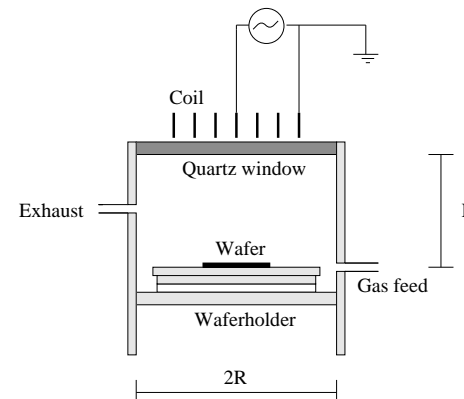
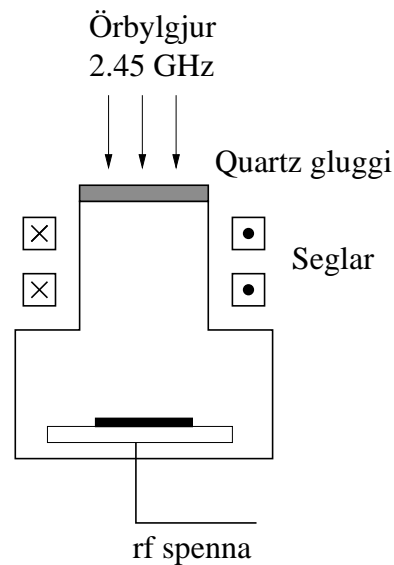
- Samanburður á vinnuþrýstingi og hröðunarorku jóna fyrir algengar afhleðslur

# Þurr æting



- Rýmdarafhleðsla var notuð í áratugi og stundum nefnd Reactive Ion Etcher (RIE)
- Þá er notuð rf drifspenna við 13.56 MHz

# Þurr æting

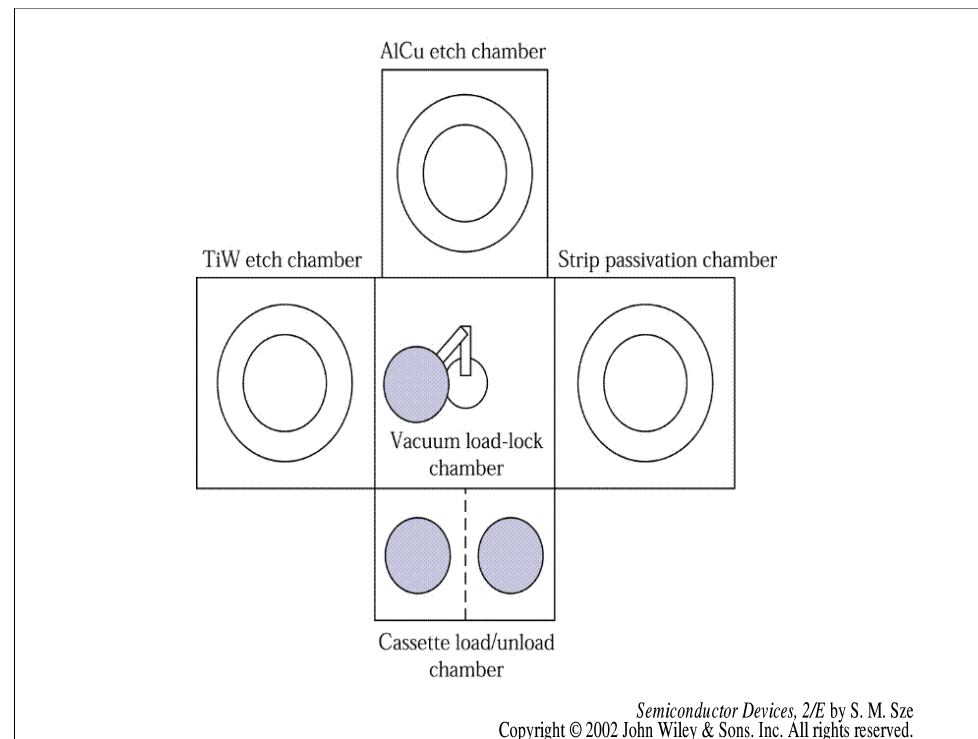


- Í hringhraðalafhleðslu (e. electron cyclotron resonance (ECR)) er örbylgjuafli notað til að mynda rafgas
- Flöt spanafhleðsla er drifin á 13.56 MHz
- Báðar þessar aðferðir til að mynda rafgasið gefa færi á óháðri stýringu á þéttleika rafgass og orku jóna

## Þurr æting

- Hálfleiðaraskífur eru framleiddar í hreinherbergjum til að sem minnst snerting sé við andrúmsloft
- Með smækkandi tólum er hreinlæti enn meira áríðandi
- Til að draga úr snertingu skífa við umhverfið og líkum á mögulegri mengun eru nú gjarna settar upp þyrpingar af rafgastólum og skífurnar ferðast á milli rafgasklefa í lofttæmi
- Slíkar þyrpingar auka framleiðni þar sem chip yield hækkar

# Þurr æting



- Myndin sýnir þyrpingu þar sem æting fer fram á marglaga tengjum (TiW/AlCu/TiW) með AlCu ætingarklefa, TiW ætingarklefa og klefa sem hreinsar hlífðarlag

## Þurr æting



- Dæmigerð uppsetning á þyrpingu
- Umhverfis sýnaskiptaklefan sitja afhleðslurnar

## Þurr æting

- Dæmigerðar efnablöndur til ætingar í rafgasi

Djúpar raufir í Si	HBr/NF <sub>3</sub> /O <sub>2</sub> /SF <sub>6</sub>
Grunnar raufir í Si	HBr/Cl <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>
W	SF <sub>6</sub>
TiW	SF <sub>6</sub>
Al	BCl <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> , HBr/Cl <sub>2</sub>
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	CHF <sub>3</sub> /O <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>
SiO <sub>2</sub>	CF <sub>4</sub> /CHF <sub>3</sub> /Ar, C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>
Poly-Si	HBr/Cl <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , HBr/O <sub>2</sub> , SF <sub>6</sub>
Ljósviðnámslag	O <sub>2</sub>

⇒ Dæmi 21.2.

⇒ Dæmi 21.3.



## Þurr æting

- Á allra síðustu árum hefur þörfin aukist fyrir ætingu á mjóum djúpum raufum (e. high aspect ratio (HAR) etching)
- Þetta kemur til af því að æta þarf fyrir tengi í gegnum kísillög (e. through-silicon-via (TSV)) í þrívíðri smárásatækni
- Það er mjög erfitt að fá fram góða HAR kísilrauf ef aðeins er beitt stefnuháðri rafgas ætingu
- Það þarf að koma til vernd gagnvart ætingu á veggjum raufarinnar
- Slíka vernd er hægt að fá fram samhliða ætingunni eða með sérstöku verndarskrefi

# Purr æting

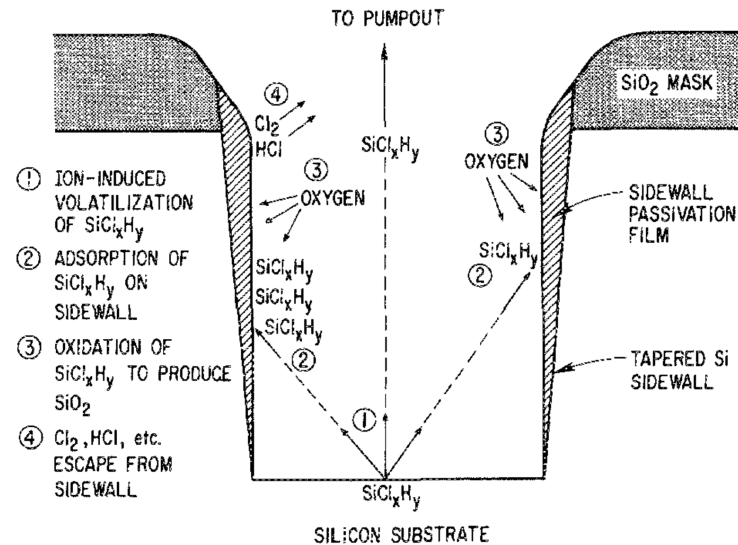


FIG. 12. A model of the sidewall film formation mechanism for the  $\text{HCl}/\text{O}_2/\text{BCl}_3$  RIE process studied in this work which is consistent with the composition of the sidewall passivation material.

Frá Oehrlein et al. (1990)

- Hlífðarlag á hliðarvegg raufar í kísli sem er ætt með  $\text{HCl}/\text{O}_2/\text{BCl}_3$  RIE
- Hlífðarlagið er kísil tvíoxíð

## Þurr æting

- Ein leið til að fá fram hlífðarlag á hliðarvegg raufar er að nota kælingu
- Valvísí er þá góð vegna þess að ætingarhraði ljósviðnámslagsins er lítill
- Hitastigið er - 130 – -100 °C og gasþrýstingur 10 mTorr, fljótandi köfnunarefni eða helín er þá í beinni snertingu við skífuna
- Með þessari tækni var hægt að fá hlutfall dýptar of breiddar upp í 30:1
- Ferlið byggir á SF<sub>6</sub> of O<sub>2</sub> og myndast 10 – 20 nm SiO<sub>x</sub>F<sub>y</sub> verndarlag á hliðarveggi
- Flúor atóm er hvarfögning sem að sér um ætinguna

## Þurr æting

- Í Bosch ferlinu eru ætingar og fjölliðu skref látin skiptast á (einkaleyfið er frá 1996)
- Með því var hægt að fá hærra hlutfall dýptar og breiddar og betri valkvæmni
- Í upphaflega ferlinu sá  $\text{SF}_6$  um ætinguna og fjölliðan var mynduð með  $\text{CHF}_3$  og Ar
- Önnur ætingargös eru  $\text{NF}_3$  og  $\text{CF}_4$  og fjölliðan mynduð í  $\text{C}_4\text{F}_8$

# Þurr æting

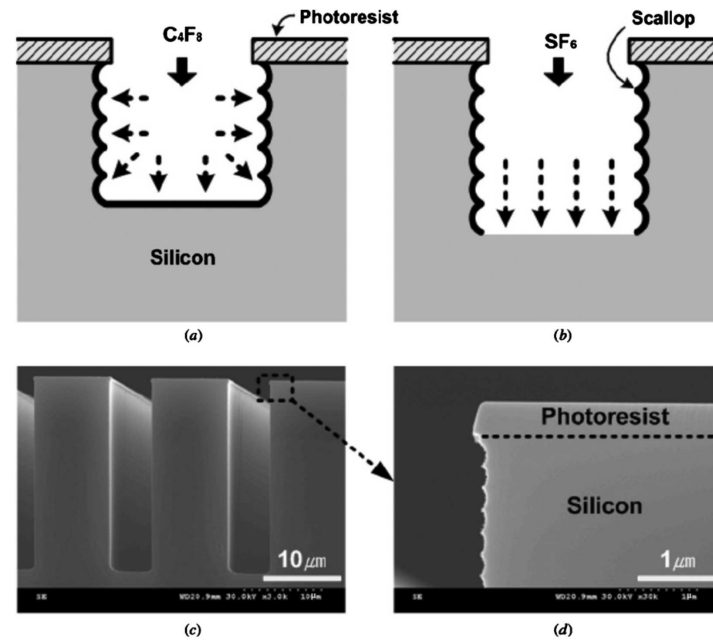


FIG. 1. Schematic of Bosch method. (a) Sidewall passivation using  $C_4F_8$ , (b) silicon isotropic etching using  $SF_6$  gas, (c) SEM image of deep trenches, (d) magnified SEM image of the sidewall with nanoscallops.

Frá Wu et al. (2010)

- Það er einkennandi fyrir Bosch ferlið að nanoscallops myndast á hliðarvegginn

## Þurr æting

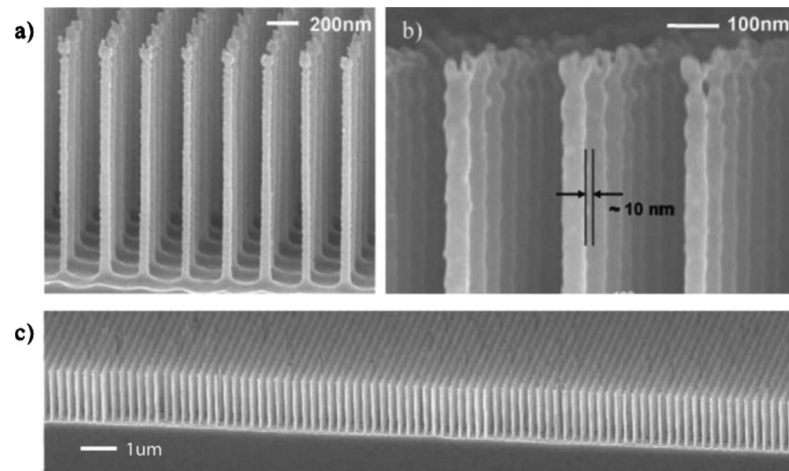


FIG. 5. Arrays of vertical silicon (100) nanopillars. (a) Silicon nanopillars as narrow as 40 nm diameter and 1.5  $\mu\text{m}$  tall with vertical sidewalls arrayed on an ordered 235 nm pitch grid. (b) Higher magnification view showing sidewall roughness less than 10 nm peak-to-peak. (c) Wide field view showing a large area array with long range order.

Frá Wu et al. (2010)

- Kísilsúlur sem eru undir 40 nm í þvermál af hæð 1.5  $\mu\text{m}$  þannig að hlutfall hæðar og dýptar er 50:1, eða 60:1 hafa verið framleiddar

## Þurr æting

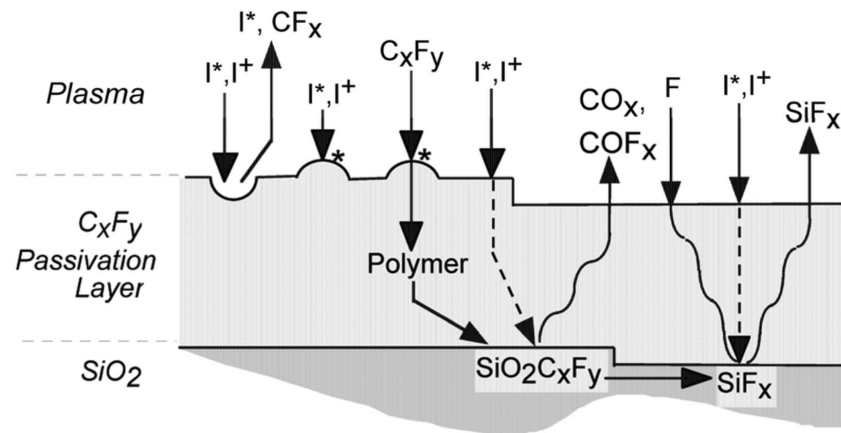


FIG. 26. Surface reaction mechanism during etching of SiO<sub>2</sub> in fluorocarbon-containing plasmas (Ref. 187). I<sup>+</sup> and I\* refer to positive ions and energetic neutrals, respectively. The dashed lines indicate that the particle loses energy during traversal through the polymer film. The curved lines represent species that diffuse through the polymer.

Frá Donnelly and Kornblit (2013)

- Yfirborðshvörf við ætingu á SiO<sub>2</sub> í rafgasi þar sem flúor er hvarfögnin

# Þurr æting

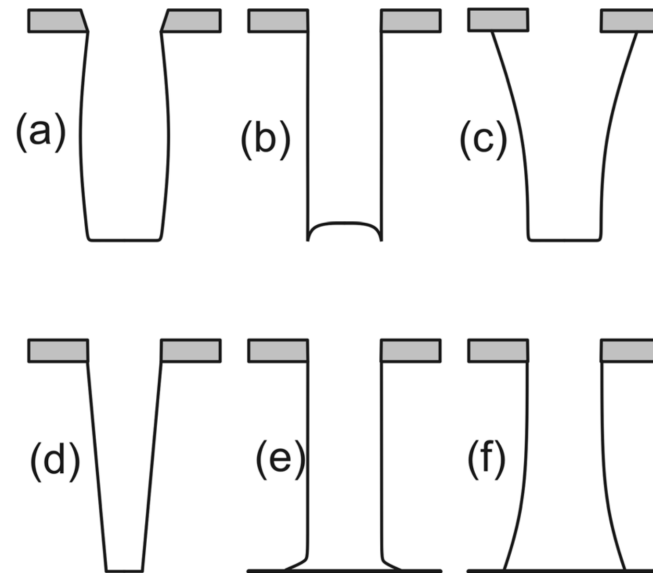


FIG. 31. Various profiles obtained during plasma etching: (a) bowing due to faceting of the mask; (b) microtrenching due to enhanced ion flux along the sidewall; (c) Undercutting due to an isotropic component in the etch process; (d) tapered profile due to deposition on the sidewall; (e) notching at the interface due to inadequate sidewall passivation or charging effects; (f) Re-entrant profile (overcutting) due to inadequate sidewall passivation and/or ion scattering.

Frá Donnelly and Kornblit (2013)

- Hin ýmsu þversnið sem geta komið fram við ætingu í rafgasi



# Purr æting

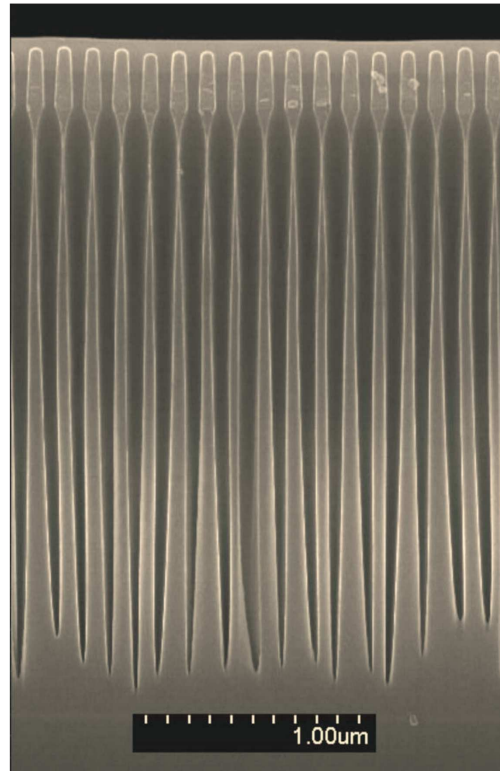


FIG. 1. (Color online) Scanning electron micrograph of an HAR array of  $\text{SiO}_2$  features etched in a commercially available capacitively coupled plasma chamber using a fluorocarbon gas mixture. There is errant twisting and varied etching rate among trenches yet nearly uniform bowing.

Frá Wang and Kushner (2010)

## Frekari upplýsingar

- Þessi kafli er að mikið byggður á byggður á köflum 13.3 og 13.4 hjá Sze and Lee (2012) og kafla 10 hjá Plummer et al. (2000). Nýlegar yfirlitsgreinar um ætingu eru Wu et al. (2010) sem fjallar um mjóar djúpar raufar í kísil og Donnelly and Kornblit (2013) sem fjallar efnafræði ætingarferlanna.

## Heimildir

Coburn, J. W. and H. F. Winters (1979). Ion- and electron-assisted gas surface chemistry – An important effect in plasma etching. *Journal of Applied Physics* 50(5), 3189–3196.

Donnelly, V. M. and A. Kornblit (2013). Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow. *Journal of Vacuum Science and Technology A* 31(5), 050825.

Oehrlein, G. S., J. F. Rembetski, and E. H. Payne (1990). Study of sidewall passivation and microscopic silicon roughness phenomena in chlorine-based reactive ion etching of silicon trenches. *Journal of Vacuum Science and Technology B* 8(6), 1199–1211.

Plummer, J. D., M. D. Deal, and P. B. Griffin (2000). *Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice, and Modeling*. New Jersey: Prentice Hall.

Sze, S. M. and M. K. Lee (2012). *Semiconductor Devices: Physics and Technology* (3 ed.). John Wiley & Sons.

Wang, M. and M. J. Kushner (2010). High energy electron fluxes in dc-augmented capacitively coupled plasmas. II. Effects on twisting in high aspect ratio etching of dielectrics. *Journal of Applied Physics* 107(2), 023309.

Wu, B., A. Kumar, and S. Pamarthy (2010). High aspect ratio silicon etch: A review. *Journal of Applied Physics* 108(5), 051101.