

Framleiðsla smárása:

Rafsvarar og fjölkristallaður kísill

Kaflí 17

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

10. vika haust 2016

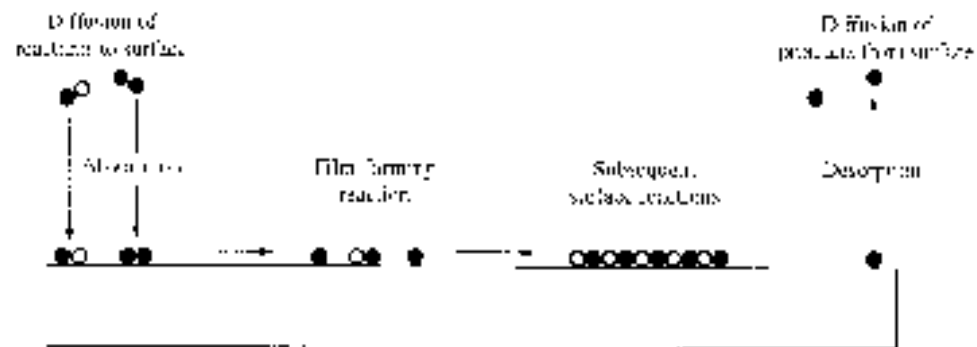
Þunnar húðir

- **Rafsvarar** sem felldir eru út á yfirborð hálfleiðara eins og kísiloxíð og kísilnítíð eru notaðir sem
 - einangrarar á milli leiðandi laga
 - grímur fyrir sveim og jónaígræðslu
 - til að loka af íbót í húðum
 - verndarlag umhverfis rásina
- **Fjölkristallaður kísill** er notaður sem
 - gáttarskaut í MOS tólum
 - leiðarar í fjöllum milli tengi
 - viðnám og snertur fyrir tól með grunn skeyti

Ræktun úr gasfasa

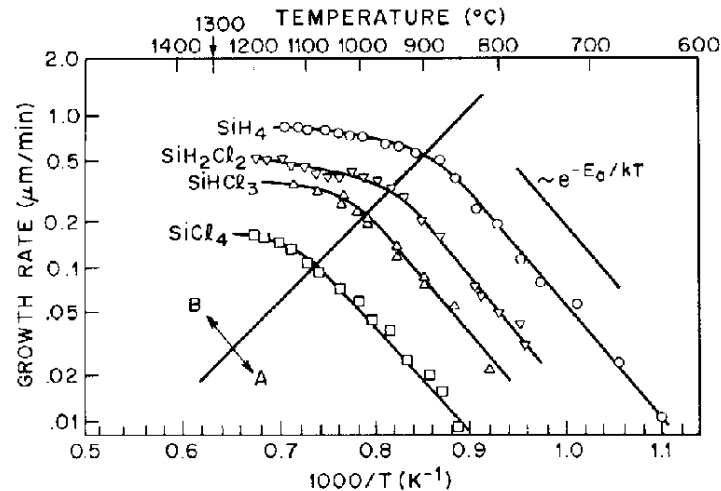
- **Ræktun úr gasfasa** (Efnagufuágræðsla) (e. chemical vapor depostion) er skilgreind sem myndun órokgjarnar húðar á undirlag með hvarfi hvarfefna úr gasfasa sem inniheldur íefnin

Ræktun úr gasfasa - ferli



- Sveim hvarfefna að yfirborði
- Hvarfefni sest á yfirborðið
- Efnahvarf
- Frákast á gasi og aukaafurðum
- Útsveim gaskenndra aukaafurða

Ræktun úr gasfasa - ferli



- Ræktunarhraði sem fall af hitastigi
- Fyrir lág hitastig breytist ræktunarhraðinn eins og $\exp(-E_a/kT)$ með $E_a = 1.6 \text{ eV}$ þar sem yfirborðshvörf ráða
- Ræktunarhraðinn breytist hægar með hitastigi $\propto T^{3/2}$ þar sem massaflæði takmarkar ræktunina við hærri hitastig

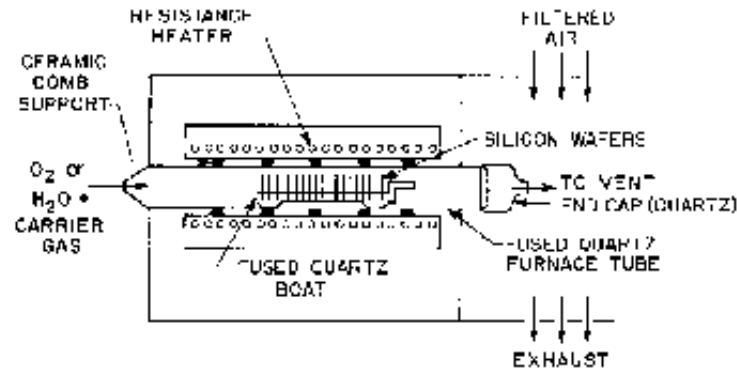
Ræktun rafsvara

- Þunnar húðir úr rafsvörum eru notaðar til einangrunar og passivation stakra tóla og smárása
- Það eru einkum notaðar þrjár aðferðir við ræktunina:
 - Ræktun úr gasfasa við andrúmsloftsþrýsting (e. atmospheric-pressure chemical vapor deposition (CVD) eða (APCVD))
 - Ræktun úr gasfasa við lágan þrýsting (e. low-pressure chemical vapor deposition (LPCVD))
 - Ræktun úr gasfasa í rafgasi (e. plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD))
- Í PECVD er orku frá rafgasinu aukið við varmaorkuna í hefðbundnu CVD kerfi

Ræktun rafsvara

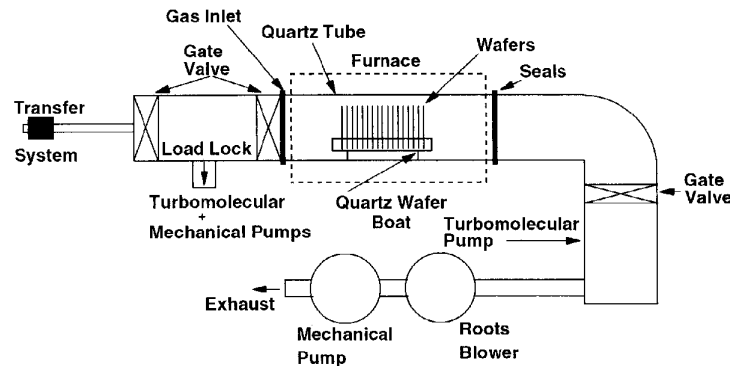
- Þegar valin er ræktunaraðferð þarf að taka tillit til
 - hitastigs undirlags
 - ræktunarhraða
 - einsleitni húðarinnar (e. film uniformity)
 - formgerð (e. morphology)
 - rafrænum og aflfræðilegum eiginleikum
 - efnasamsetningu rafsvarans

Ræktun úr gasfasa (CVD)



- Dæmigerður búnaður til ræktunar úr gasfasa er sýndur hér að ofan nema hvað fæða má inn á kerfið allrahandi mismunandi gös
- Ræktun við lágan þrýsting (LPCVD) hefur ýmsa kosti fram yfir ræktun við andrúmsloftsþrýsting, betri skrefþekju, meiri nákvæmni í stýringu á efnasamsetningu og gerð húða, lægra ræktunarhitastig, nægjanlegan ræktunarhraða og tiltölulega lágan framleiðslukostnað

Ræktun úr gasfasa (CVD)

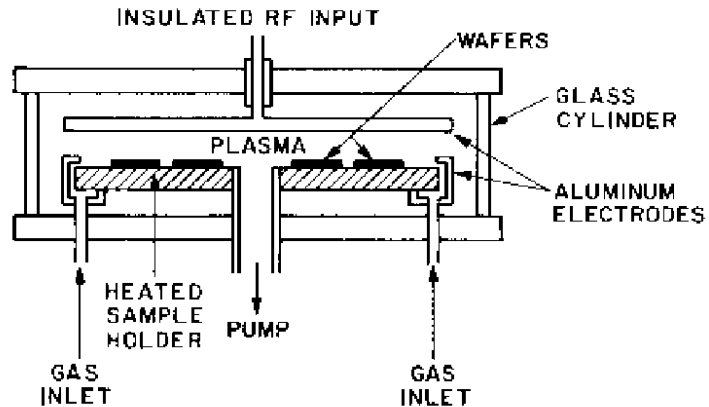


- Þegar ræktunin fer fram við skertan þrýsting er gasið fætt inn í annan endann og pumpað út hinum megin
- Hálfleiðaraskífurnar sitja lóðrétt í kvarsbát
- Þrýstingur er á bilinu 30 – 250 Pa (0.25 – 2.0 Torr)
- Gasflæði er 1 – 10 cm/s
- Hitastig 300 – 900 °C

Ræktun úr gasfasa (CVD)

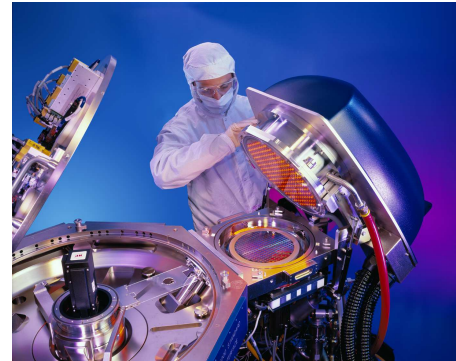
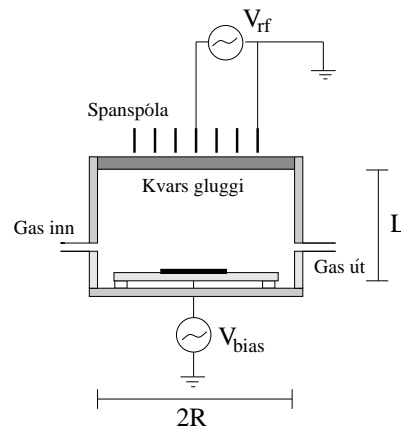
- Með slíkum búnaði má rækta húðir sem eru afar einsleitar
- Rækta má á nokkur hundruð skífur í einu
- Ræktunarferlið er fremur hægt og gösin eru gjarnan eitruð, tærandi og sprengifim
- Þegar ræktað er við lágan þrýsting (LPCVD) eru engin burðargös notuð sem kemur fram í minni óhreinindum
- Helstu gallar APCVD og LPCVD eru há ræktunarhitastig
- Við ræktun í rafgasi (jónað gas) eru ræktunarhitastig verulega mikið lægri - mögulegt vegna þess að rafeindir, jónir og hvarfeindir eru ekki í varmajafnvægi

Ræktun í rafgasi



- Rýmdarafhleðslan samstendur af samsíða málmskautum sem á er lögð rf spenna
- Málskautin sitja í lofttæmdum klefa og inn í hann flæðir gasið sem nota á
- Gasþrýstingur er gjarnan 100 – 1000 mTorr
- Rf spennan veldur afhleðslu í gasinu milli skautanna

Ræktun í rafgasi



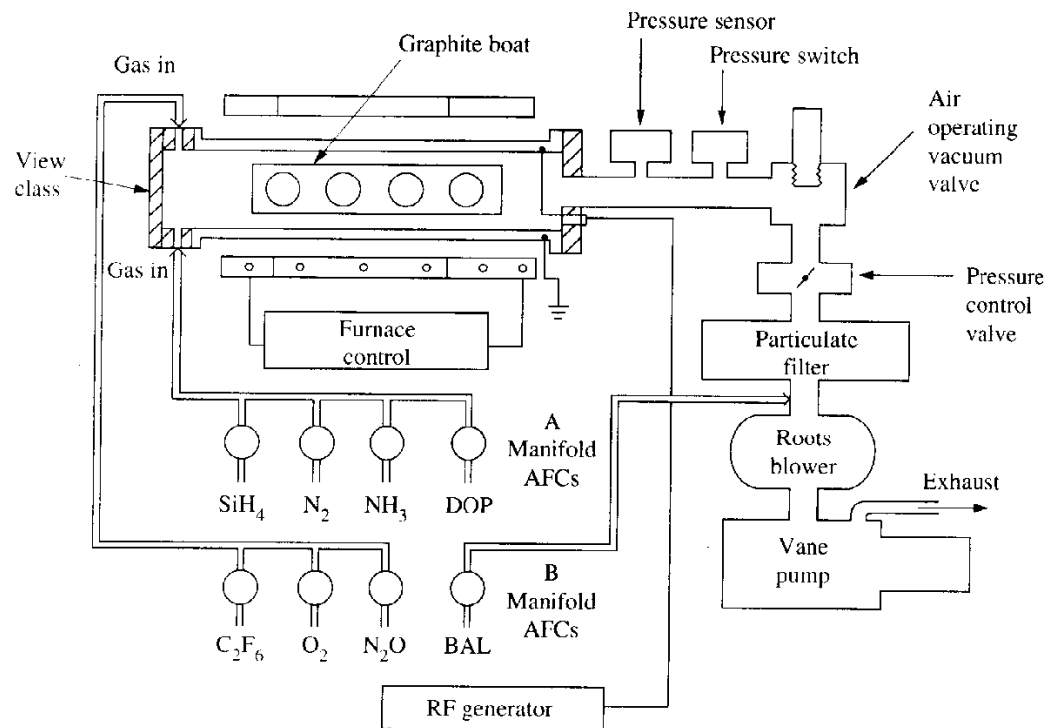
- Spanafhleðslan er drifin með rf spennu sem lögð er yfir spanspólu
- Afhleðslan myndast upphaflega vegna spennunar milli enda spólunnar
- Afhleðslu er viðhaldið með spanhrifum við jónað gasið
- Jónaþéttleiki er allnokkru hærri en í rýmdarafhleðslu
- Hægt er að stýra orku jóna sem lenda á skífunni

Ræktun í rafgasi

	Rýmdarafhleðsla	Hærri þéttleiki
Þrýstingur [mTorr]	10 – 1000	0.5 – 50
Afl [W]	50 – 2000	100 – 5000
Driftíðni [Mhz]	0.05 – 13.56	0 – 2450
Rafeindaþéttleiki [cm^{-3}]	10^9 – 10^{10}	10^{10} – 10^{12}
Rafeindahitastig [eV]	1 – 5	2 – 7
Orka jóna [V]	200 – 1000	< 100

- Hér eru bornir saman rýmdar- og spanafhleðsla
- Spanafhleðslan hefur mun hærri jónaþéttleika og vinnur við lægri þrýsting en rýmdarafhleðsla

Ræktun í rafgasi



- Dæmigert kerfi til ræktunar með rafgasi (PECVD)

Ræktun í rafgasi

- Helstu kostir við notkun rafgass við ræktunina er lágt ræktunarhitastig
- Rafgasið er **hlutjónað** (e. weakly ionized) - það samanstendur einkum af hlutlausum atómum og sameindum
- Jónaðar agnir leyfa lægra ræktunarhitastig
- Eiginleika húða má sníða til með jónahríð (e. ion bombardment) t.d. aflfræðilega spennu

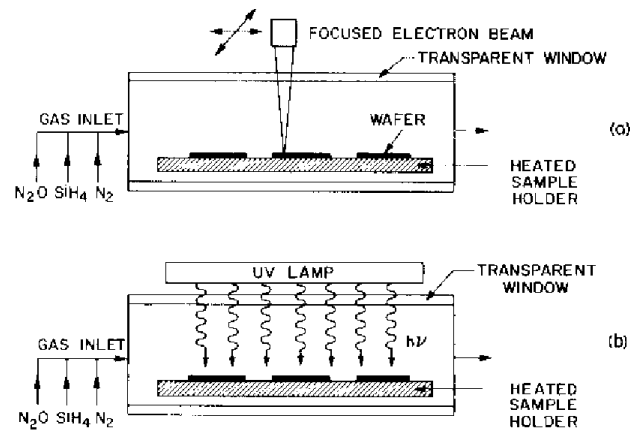
	LPCVD	PECVD
$\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 \Rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4$	850°C	200 – 400°C
$\text{SiH}_4 + \text{N}_2\text{O} \Rightarrow \text{SiO}_2\text{N}$	800°C	200 – 400°C
$\text{TEOS} + \text{O}_2 \Rightarrow \text{SiO}_2\text{N}$	720°C	350°C
$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \Rightarrow \text{SiO}_2\text{N}$	400°C	

Lág-hita ræktun



- Ræktun við lág hitastig verður æ mikilvægari með smækkandi tólum

Lág-hita ræktun



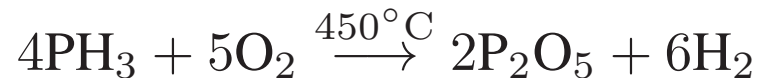
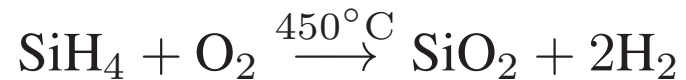
- Mynd (a) sýnir CVD ræktunaraðferð þar sem rafeindageisli er notaður til að rækta rafsvara húð. Ræktunin verður einungis undir því svæði sem geislanum er beint á
- Á svipaðana hátt má nota leysigeisla eða jónageisla
- Mynd (b) sýnir hvernig má nota útfjólublátt ljós til að koma af stað efnahvörfum sem áhrif hafa á ræktunina

Ræktun á kísíloxíði

- Kísíloxíð sem ræktað er úr gasfasa (CVD) getur ekki komið í stað varmaoxaðs kísíloxíðs, sem hefur bestu rafeiginleikana
- Kísíloxíð sem ræktað er úr gasfasa eru notuð til viðbótar við varmaoxað kísíloxíð
- Þannig er lag af óíbættu kísíloxíði notað sem einangrari milli laga af millitengjum, sem gríma við jónaígræðslu og sveim, og til að auka þykkt varmaoxaðs sviðsoxíðs
- Fosfóríbætt kísíloxíð er notað sem einangrari milli málmlaga og sem loka einangrunarlag yfir tól
- Oxíð íbætt með, fosfór, arseni og bór eru gjarnan notuð sem sveimlindir

Ræktun á kísíloxíði

- Til að rækta kísíloxíðhúðir við lág hitastig (300 – 500 °C) er notað silan, íbótarefni og súrefni
- Efnahvörfin fyrir fosfóríbætt kísíloxíð er



- Við þetta lága hitastig má rækta yfir állög
- Fyrir hitastig á milli 500 – 800 °C má nota tetraethylorthosilicate (TEOS) í LPCVD hvarfaofni



Ræktun á kísíloxíði

- Ræktunarhraðinn er háður ræktunarhitastigi samkvæmt

$$\exp(-E_a/kT)$$

þar sem E_a er örvunarorkan

- Örvunarorkan fyrir sílan hvarfið er aðeins 0.6 eV fyrir óíbætt oxíð og um núll fyrir fosfóríbætt oxíð
- Örvunarorkan fyrir TEOS hvarfið er mun hærri um 1.9 eV fyrir óíbætt oxíð og 1.4 eV þegar fosfóríbætiefnin eru til staðar

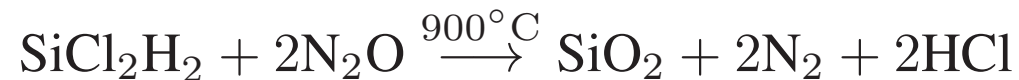
Ræktun á kísíloxíði

- Ræktunarhraði er háður hlutþrýstingi TEOS samkvæmt

$$1 - \exp(-p/p_0)$$

þar sem p er hlutþrýstingur TEOS og p_0 er um 30 Pa

- Við lágan TEOS hlutþrýsting er ræktunarhraðinn ákvarðaður af hvarfhraða yfirborðshvarfa.
- Við háan hlutþrýsting er yfirborðið nærri mettað af TEOS og ræktunarhraði verður nær óháður hlutþrýstingi
- Við há hitastig $\sim 900^\circ\text{C}$ má nota

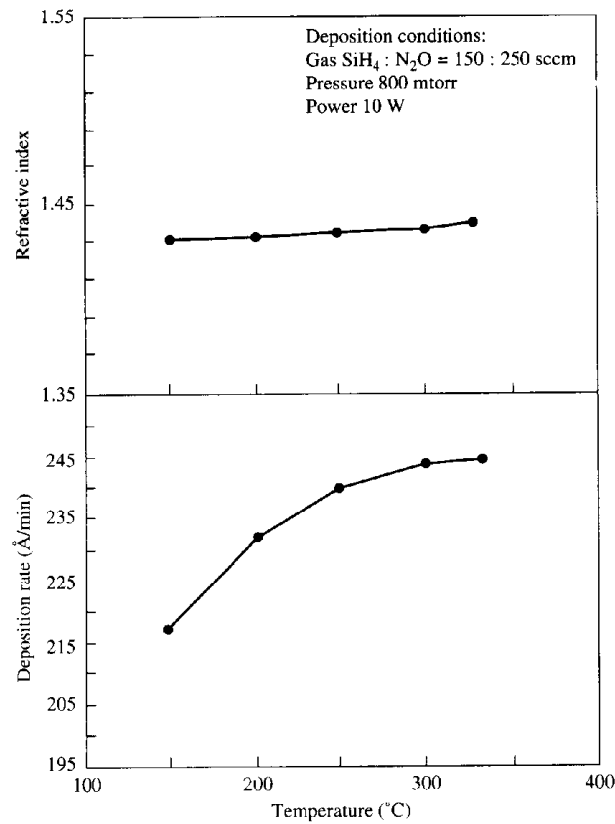


Ræktun á kísíloxíði

	Varmaoxað	Silane	TEOS	SiCl ₂ H ₂
	SiO ₂	SiO ₂ (H)	SiO ₂	SiO ₂ (Cl)
ρ [g/cm ³]	2.2	2.1	2.2	2.2
n	1.46	1.44	1.46	1.46
E_{\max} [V/cm]	$> 10 \times 10^6$	8×10^6	10×10^6	10×10^6
T_{growth} [°C]	1000	450	700	900
skrefþekja	-	nonconf.	conformal	conformal

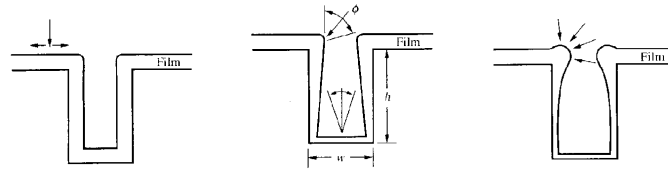
- Samanburður á eiginleikum kísíloxíðs sem er ræktað með mismunandi aðferðum er sýndur í töflunni hér að ofan
- Það er bein samsvörun á milli gæða húðarinnar og ræktunarhitastigs
- Við hærri hitastig verður húðin svipuð að gerð og kísíloxíð sem fengið er með varmaoxun

Ræktun á kísiloxíði



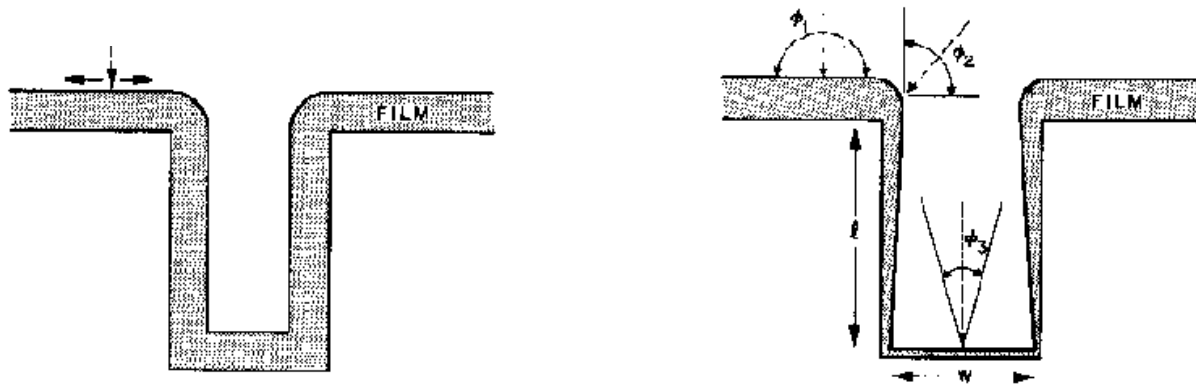
- Brotstuðull n og ræktunarhraði fyrir kísiloxíðræktun í rafgasi sem fall af ræktunarhitastigi

Ræktun á kísíloxíði



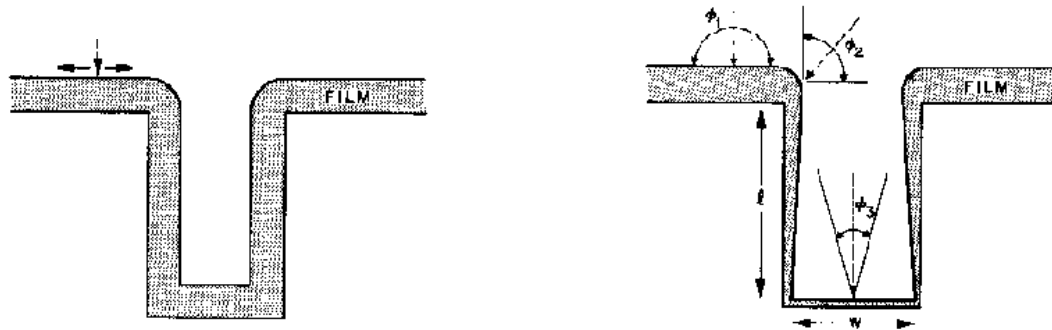
- **Skrefþekja** (e. step coverage) tengir landslag yfirborðs ræktaðrar húðar við skref í yfirborði hálfleiðarans
- Við sjáum conformal skrefþekju þegar þykkt húðarinnar er einsleit á öllum flötum skrefsins
- Þetta gerist ef færsla hvarfefna er hröð eftir að þau hafa sest á yfirborðið
- Þegar skrefþekjan er ekki einsleit (e. nonconformal) vegna þess að hvarfefnin setjast og hvarfast á yfirborðinu án þess að ferðast

Ræktun á kísíloxíði



- Þegar svo er ástatt er ræktunarhraðinn í réttu hlutfalli við innfallshorn gassameindanna
- Hvarfeindir sem lenda á lárétta yfirborði koma úr mörgum mismunandi áttum ϕ_1 getur spannað frá $0 - 180^\circ$
- Hvarfeindir sem koma inn að efsta hluta lóðrétta veggins hafa innfalshorn ϕ_2 sem getur spannað frá $0 - 90^\circ$, ræktunarhraðinn á lárétta yfirborðinu er því tvöfaldur miðað við lóðrétta vegginn

Ræktun á kísíloxíði



- Neðar á veggnum er ϕ_3 tengt breidd opunarinnar með

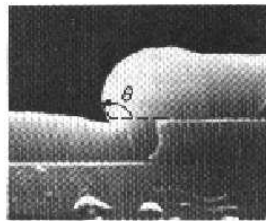
$$\phi_3 \approx \arctan \frac{W}{l}$$

þar sem l er dýpt og W er breidd

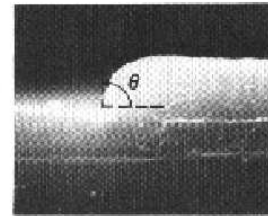
- Kísíloxíð ræktað með TEOS hefur nær einsleita skrefþekju vegna mikils ferðahraða sameinda á yfirborði
- Við silane ræktun ferðast sameindirnar nær ekkert á yfirborðinu

P-gler

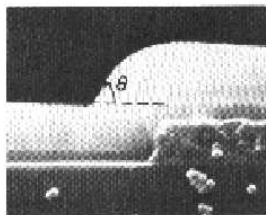
- Venjulega er æskilegt að yfirborðið sé slétt þegar kísiloxíð er notað sem einangrari milli málmhaga
- Fosfóríþætt kísiloxíð (P-glass) sem er ræktað við lág hitastig verður mjúkt og rennur við hitun og má með því fá slétt yfirborð



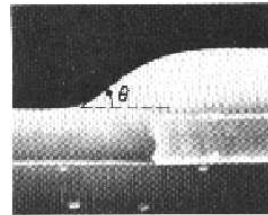
(a)



(b)

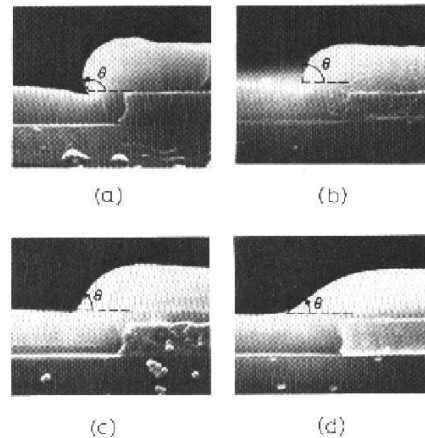


(c)



(d)

P-gler



- Þversnið úr rafeindasmásjá af P-gleri sem er hitað í vatnsgufu við 1100°C í 20 mín
- Mynd (a) sýnir gler sem hefur nær engan fosfór, og rennur ekki. Húðin verður íhvolf og hornið er 120°
- Myndir (b), (c) og (d) sýna P-gler með stighækkandi hlutfalli af fosfór upp að 7.2 wt%

P-gler

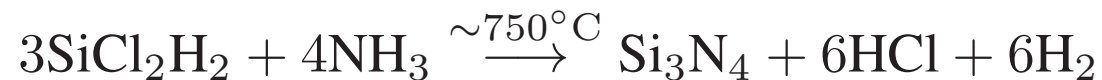
- Finna má hornið θ sem fall af hlutfallslegum massa fosfórs

$$\theta \approx 120^\circ \left[\frac{10 - \text{wt}\%}{10} \right]$$

- Ef hlutfallið er hærra en 8 wt% getur orðið tæring í málmhúðinni (þ.e. álinu)
- Til að fá horn sem er minna en 45° þarf hlutfallið að vera 6 wt%
- P gler er þess vegna gjarnan blandað 6 - 8 wt% fosfór

Kísilnítíð

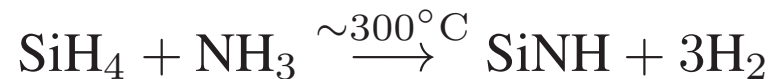
- Rækta má kísilnítíð húðir við um 750°C með LPCVD eða lághita (300°C) í rafgasi
- Í LPCVD ferlinu gengur hvarfið



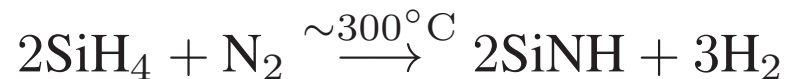
- Húðin sem fæst með LPCVD er myndlaus með um 8 at% af vetni
- Eðlisviðnám húðarinnar er um $10^{16} \Omega\text{cm}$, hlutfallslegur rafsvörunarstuðull er 6 og niðurbrotsspenna 10^7 V/cm

Kísilnítíð

- Vegna hins lága ræktunahitastigs má nota rafgasræktun til að rækta lag yfir smárás sem er fullframleidd
- Húðir ræktaðar við svo lág hitastig í rafgasi hafa ekki endilega alveg rétt efnahlutföll og þéttleiki þeirra ($2.4 - 2.8 \text{ g/cm}^3$) er heldur lægri en LPCVD ræktaðar húða ($2.9 - 3.1 \text{ g/cm}^3$)
- Við rafgasræktun ganga hvörfin



og



- Ræktunarhraði eykst gjarnan með ræktunarhitastigi, afli til rafgassins og gasþrýstingi

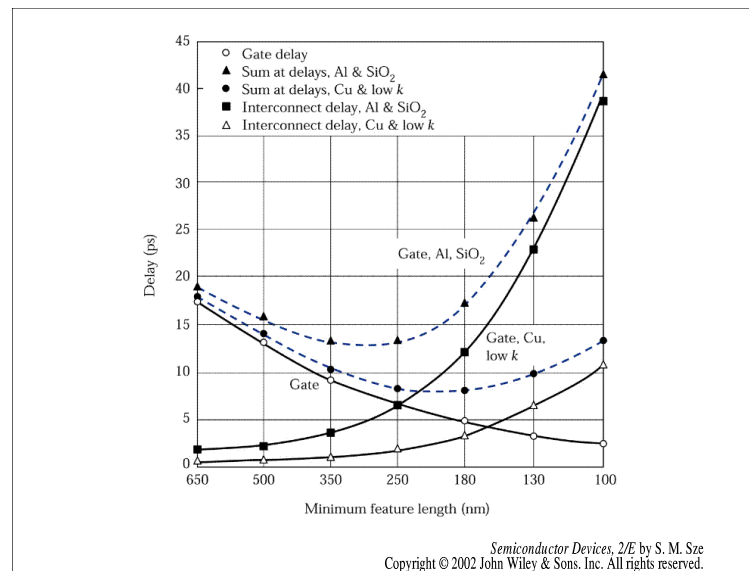
Kísilnítíð

- Mikið vetni er gjarnan í rafgasræktuðum kísilnítíð húðum allt að 20 – 25 at%
- Eðlisviðnám húðarinnar er um $10^5 - 10^{21} \Omega\text{cm}$ og ræðst af hlutfalli kísils og köfnunarefnis, niðurbrotsspenna $10^6 - 6 \times 10^6 \text{ V/cm}$

Lágur rafsvörunarstuðull

- Með smærri tólum og flóknari marglaga millitengjum þarf að huga að tölvegna viðnáms í leiðurum (R) og sníkju rýmdar (C)
- Hraðaaukning í einstaka smára er að hluta til étin upp af aukningu í RC tímafastanum
- Millitengin eru þess vegna að verða æ meira takmarkandi þáttur hvað varðar hraða, milliheyrslu og aflnotkun
- Til að draga úr þessari tölvegna eru tvær leiðir
 - millitengi með lægra viðnámi
 - millilög með lægri rýmd
- Það er því leitað að efnum með lægri rafsvörunarstuðul

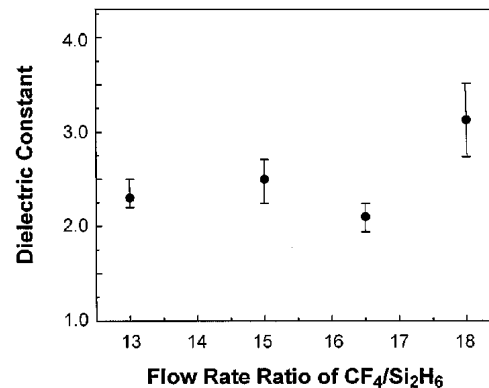
Lágur rafsvörunarstuðull



- Grafið sýnir töf í gátt og millitengjum sem fall af gáttarlengd - gert er ráð fyrir lági rafsvörunarstuðullinn sé 2.0, bæði Al og Cu leiðararnir eru $0.8 \mu\text{m}$ þykkir og $43 \mu\text{m}$ langir
- Fyrir tól með gáttarlengd 250 nm eða minna er 50 % af töf í rásinni vegna RC tafar í millitengjum

Lágur rafsvörunarstuðull

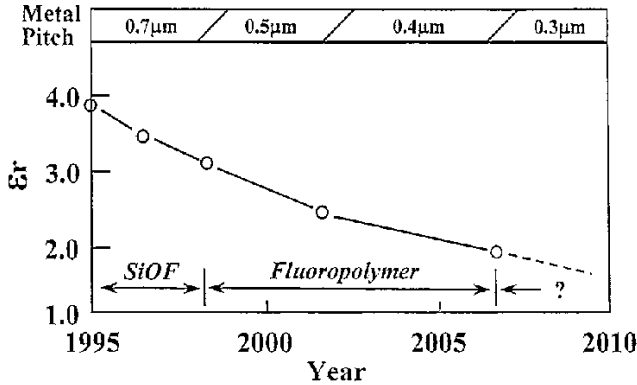
- Rafsvörunarstuðull varmaoxaðs kísiloxíðs er 3.9
- Prófað hefur verið að bæta F í kísiloxíðið og fá SiOF, C og fá SiOC eða rækta SiCF
- Með því fæst rafsvörunarstuðull á bilinu 2.1 - 3.9



(Jin et al. 2001)

- Rafsvörunarstuðull SiCF sem fall af flæðishlutfalli CF₄ og Si₂H₆

Lágur rafsvörunarstuðull



(Homma 1998)

Year		1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
Design Rule		0.25µm / 0.18µm		0.18µm / 0.13µm		0.13µm			
Metal Pitch		0.7µm / ~0.5µm		~0.5µm / ~0.4µm		~0.4µm			
Aspect Ratio		~2 / ~2.5		~2.5 / ~3		~3			
Patterning Method		RIE		RIE or Damascene					
Materials	PMD	BPSG or PSG		HDP-CVD SiO ₂ or SiOF					
	IMD	CVD-SiOF		Fluoropolymer Films		Porous Films or Air Gap ?			
	εr	~3.2		< 3.0		< 2.0			
Equipments	HDP- CVD	Helicon or ICP		HDP or PECVD (Organic Films)					
	CMP	ILD, PMD							
		Wiring (Al, Cu), Contact, Via		Damascene					

Lágur rafsvörunarstuðull

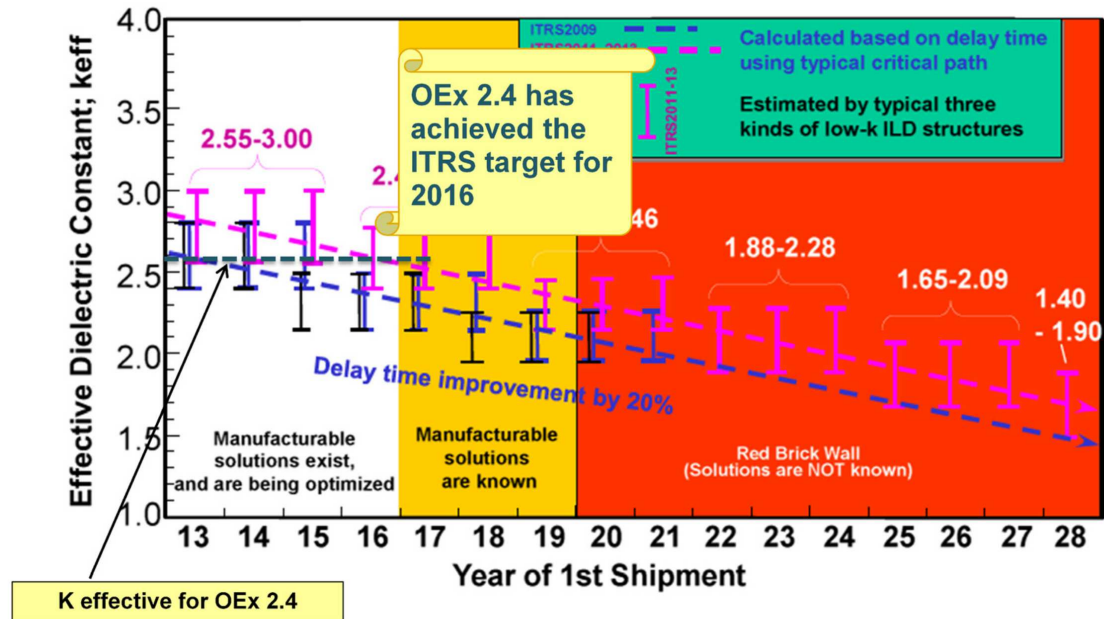


Figure INTC22 Low-k Roadmap Progression

(Grill, J. Vac. Sci. Technol. B 34, 020801 (2016))

- Síðustu árin hefur ultralow-k porous SiCOH (pSiCOH) gegnt lykilhlutverki

Lágur rafsvörunarstuðull

- Ýmsar fjölliður hafa verið til athugunar

		Rafsvörunarst.
VPD polymers	Parylene N	2.6
	Parylene F	2.4-2.5
	Svartur demantur	2.7-3.0
	Teflon-AF	1.93
Spin-on polymers	HSQ/MSQ	2.8-3.0
	Polymide	2.7-2.9
	SiLK	2.7
	Myndlaust kolefni (a-C:F)	2.1-2.4

⇒ Dæmi 17.1.

Hár rafsvörunarstuðull

- Þörf er á háum rafsvörunarstuðli fyrir ULSI rásir, sér í lagi fyrir svipulrýmdarminni (e. dynamic random access memory (DRAM))
- Geymsluþéttirinn í DRAM verður að viðhalda tilteknu gildi til að vinna eðlilega (þ.e. 40 fF)
- Fyrir gefna rýmd ($\epsilon_r A/d$), er minnsta þykkt valin sem uppfyllir kröfur um mesta leyfilegan lekastraum og minnstu mögulega niðurbrotsspennu
- Flatarmálið A fer minnkandi með auknum minnisþéttleika svo að auka verður rafsvörunarstuðul rafsvarans

Hár rafsvörunarstuðull

Efniseiginleikar sem skipta máli við val á rafsvara sem koma á í stað SiO_2

- rafsvörunarstuðull, orkugeil og þröskuldshæð
- varmafræðilegur stöðugleiki á kísli
- gæði samskeyta
- yfirborð húðar
- samhæfanleiki við gátt
- samhæfing að framleiðslu CMOS
- áreiðanleiki

(Wilk et al. 2001)

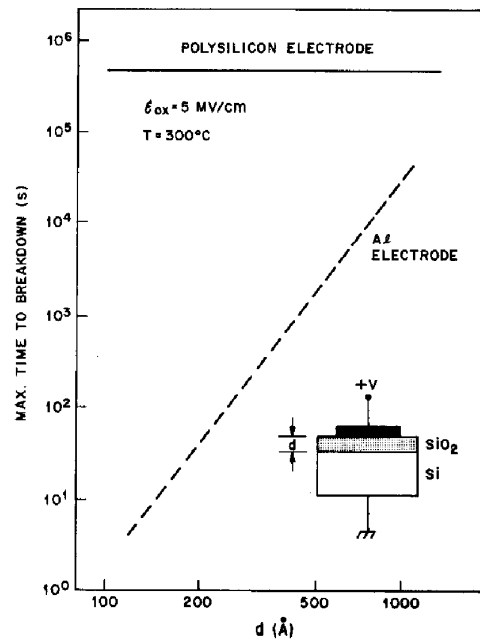
Hár rafsvörunarstuðull

Rafsvörunarstuðull	
Binary	
Ta ₂ O ₅	25
TiO ₂	40
ZrO ₂	25
HfO ₂	25
Y ₂ O ₃	17
Si ₃ N ₄	7
Paraelectric perovskite	
SrTiO ₃ (STO)	140
Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ (PMN)	1000-2000
Ferroelectric perovskite	
Pb(Zr _{0.47} Ti _{0.53})O ₃ (PZT)	> 1000

Fjölkrystallaður kísill

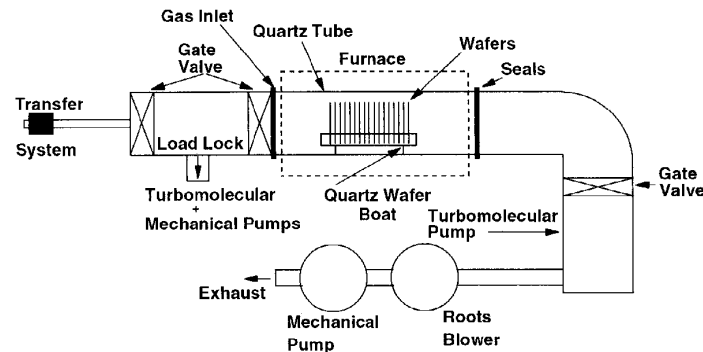
- Það var mikið framfaraskref þegar farið var að nota fjölkrystallaðan kísil í gáttarskaut MOS smára
- Ein meginástæðan er að fjölkrystallaður kísill myndar mun áreiðanlegra skaut en ál
- Fjölkrystallaður kísill er einnig notaður sem sveimlind þegar mynda á grunn skeyti og til að tryggja ohmsk skeyti við krystallaðan kísil
- Að auki er fjölkrystallaður kísill notaður þegar framleiða á viðnám með háu viðnámsgildi

Fjölkristallaður kísill



- Á myndinni er borinn saman tími til niðurbrots MOS tvists með ál skauti og skauti úr fjölkristölluðum kísli
- Fjölkristallaður kísill ber af og sér í lagi ef gáttaroxíð er þunnt

Fjölkrystallaður kísill

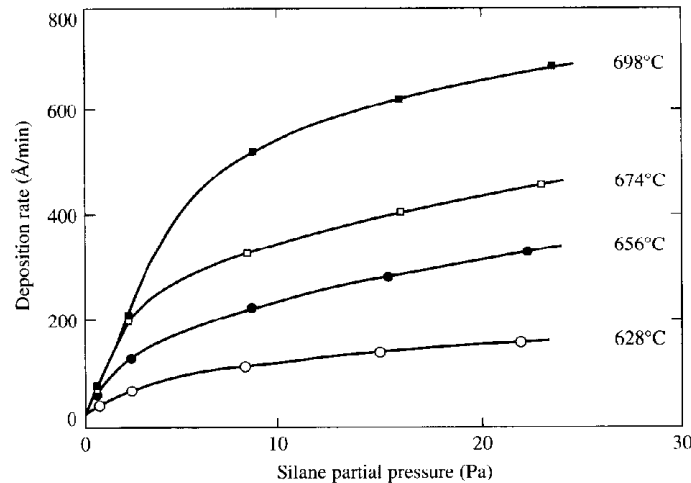


- Til að rækta fjölkrystallaðan kísil er notaður lágþrýstur hvarfofn, sem vinnur milli 600 og 650°C
- Þá er notað pyrolyzing silane sem gengur samkvæmt



- Ræktunin fer gjarnan fram við 0.2 til 1.0 Torr og með 100 % silane eða 20 – 30 % silan sem er þynnt í köfnunarefni

Fjölkristallaður kísill



- Á myndinni sést ræktunarhraði við fjögur mismunandi ræktunarhitastig og hlutþrýsting 33 Pa (0.25 Torr)
- Við lágan hlutþrýsting silan er ræktunarhraðinn í réttu hlutfalli við hlutþrýsting silan
- Þegar silan hlutfalið er aukið mettast í ræktunarhraðinn

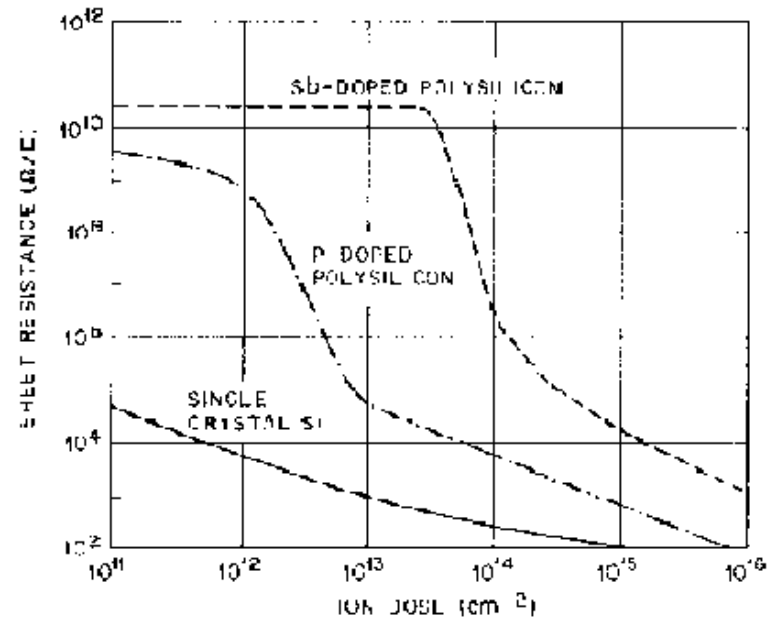
Fjölkrystallaður kísill

- Við dæmigerð ræktunarhitastig milli 600 og 650°C fylgir ræktunarhraðinn $\exp(-E_a/kT)$ með örvunarorku $E_a = 1.7$ eV, sem er nær óháð heildarþrýstingi í hvarfaofninum
- Við hærri ræktunarhitastig koma fram í ósléttri og lausri ræktun sem er ekki einsleit
- Fyrir ræktunarhitastig neðan við 600°C er ræktunarhraðinn of hægur til að vera nothæfur
- Framleiðsluþættir eins og ræktunarhitastig, íbót og hitunarferli eftir ræktun hafa áhrif á gerð fjölkrystallaða kísilsins

Fjölkrystallaður kísill

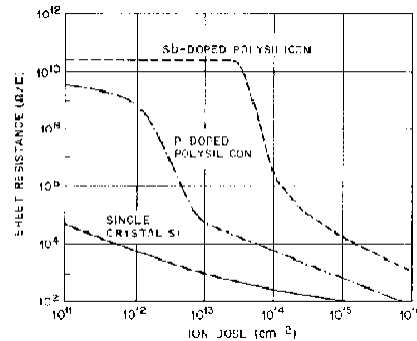
- Fjölkrystallaður kísill sem er ræktaður við 600 – 650°C kemur fram í stuðlum sem samanstanda af kornum sem eru 0.03 – 0.3 μm og ráðandi stefna er (110)
- Ef sveimað er inn fosfór við 950°C þá eykst kornastærðin í 0.5 – 1 μm
- Ef síðan er oxað við 1050°C ná kornin 1 - 3 μm að stærð
- Fjölkrystallaðann kísil má íbæta með sveimi, jónaígræðslu, og með því að blanda íbótargösnum í ræktunarferlinu (in-situ)
- Gjarnan er þó íbætt með jónaígræðslu vegna lægra hitastigs

Fjölkristallaður kísill



- Sheet viðnám fjölkristallaðs kísils sem íbættur er með fosfór og antímon

Fjölkrystallaður kísill



- Ígræddur skammtur, hitastig og lengd hitunar hafa einnig áhrif á viðnám ígrædds fjölkrystallaðs kísils
- Hleðsluberagildirur á kornamörkum (e. grain boundary) valda mjög háu viðnámi í mikið ígræddu efni
- Viðnám fellur hratt og nálgast gildið í einkristölluðum kísli, þegar hleðsluberagildirur eru mettaðar með íbót

Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor devices: Physics and technology*, John Wiley & Sons, 2 ed., 2002, kaffi 11.2 - 11.3
- [2] H. C. Cheng, Dielectric and Polysilicon Film Deposition in *ULSI Technology*, editors C. Y. Chang and S. M. Sze, McGraw-Hill, 1996
- [3] R. C. Jaeger, *Introduction to microelectronic fabrication*, Addison-Wesley, 1988, kaffi 6.3
- [4] A. Grill, PECVD low and ultralow dielectric constant materials: From invention and research to products, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, **34** (2016) 020801
- [5] T. Homma, Low dielectric constant materials and methods for interlayer dielectric films in ultralarge-scale integrated circuit multilevel interconnections, *Materials Science and Engineering: R*, **23** (1998) 243-285
- [6] Y. Y. Jin, Kihong Kim, and G. S. Lee, Preparation of low dielectric constant silicon containing fluorocarbon films by plasma enhanced chemical vapor deposition, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **19** (2001) 314-316
- [7] G. D. Wilk, R. M. Wallace and J. M. Anthony, High-kappa gate dielectrics: Current status and materials properties considerations, *Journal of Applied Physics* **89** (2001) 5243-5275