

Smárásir:

Rafsvarar og fjölkristallaður kísill

Kafi 17

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

10. vika vor 2010

1

Punnar 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 fjöllaga millitengi
 - viðnám og snertur fyrir tól með grunn skeyti

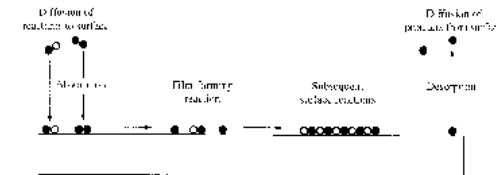
2

Ræktun úr gasfasa

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

3

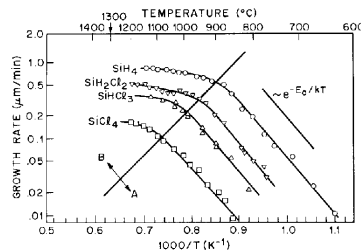
Ræktun úr gasfasa - ferli



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

4

Ræktun úr gasfasa - ferli



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

5

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

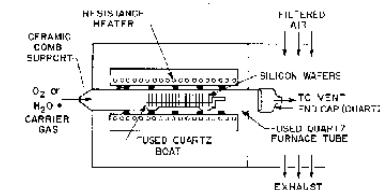
6

Ræktun rafsvara

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

7

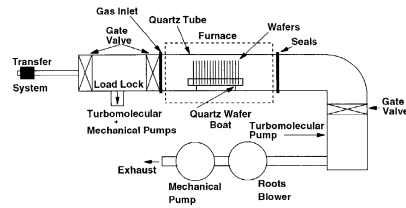
Ræktun úr gasfasa (CVD)



- 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

8

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

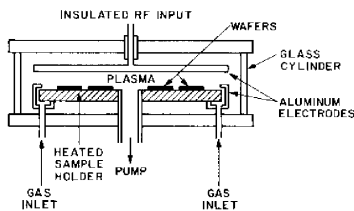
9

Ræktun úr gasfasa (CVD)

- Með slíkum búnaði má rækta húðir sem eru afar einsleitir
- 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

10

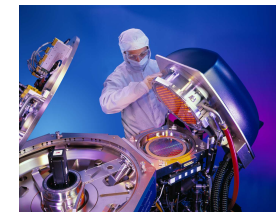
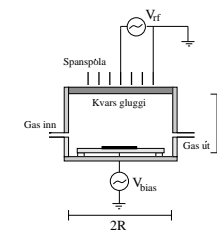
Ræktun í rafgasi



- Rýmdarafhleðslan samstendur af samsíða málm-skautum sem á er lögð rf spenna
- Málm-skautin 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

11

Ræktun í rafgasi



- Spanafhleðslan er drifin með rf spennu sem lögð er yfir spanspólu
- Afhleðslan myndast upphaflega vegna spennununnar 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

12

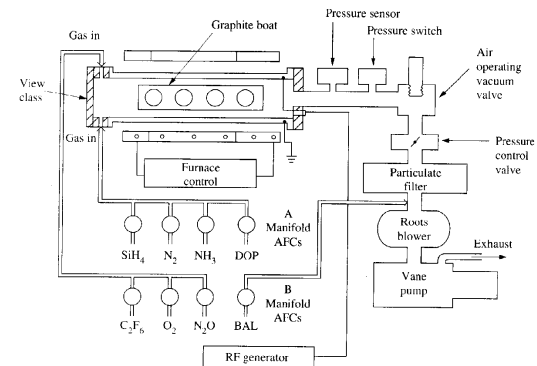
Ræktun í rafgasi

	Rýmdarafhleðsla	Hærrí þéttleiki
Þrýstingur [mTorr]	10 – 1000	0.5 – 50
Afl [W]	50 – 2000	100 – 5000
Driftíðni [Mhz]	0.05 – 13.56	0 – 2450
Rafeindapéttleiki [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 hærrí jónapéttleika og vinnur við lægri þrýsting en rýmdarafhleðsla

13

Ræktun í rafgasi



- Dæmigert kerfi til ræktunar með rafgasi (PECVD)

14

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. affræðilega 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	

15

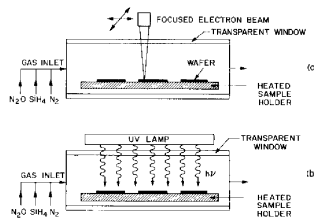
Lág-hita ræktun



- Ræktun við lág hitastig verður æ mikilvægari með smækkandi tólum

16

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

17

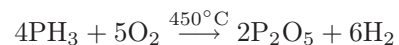
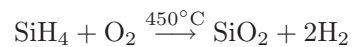
Ræktun á kísiloxíði

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

18

Ræktun á kísiloxíði

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



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



19

Ræktun á kísiloxíði

- Ræktunarhraðinn er háður ræktunarhitastigi samkvæmt

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

þar sem E_a er örvunarorkan

- Örvunarorkan fyrir silan 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

20

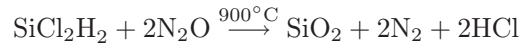
Ræktun á kísiloxíði

- 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



21

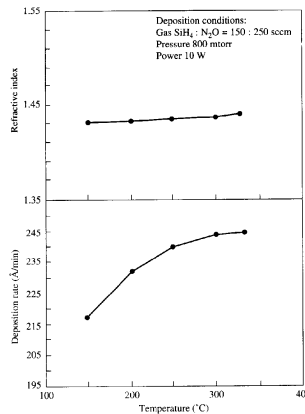
Ræktun á kísiloxíði

	Varmaoxað	Silane	TEOS	SiCl_2H_2
	SiO_2	$\text{SiO}_2(\text{H})$	SiO_2	$\text{SiO}_2(\text{Cl})$
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 kísiloxíðs 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 kísiloxíð sem fengið er með varmaoxun

22

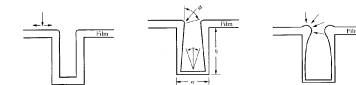
Ræktun á kísiloxíði



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

23

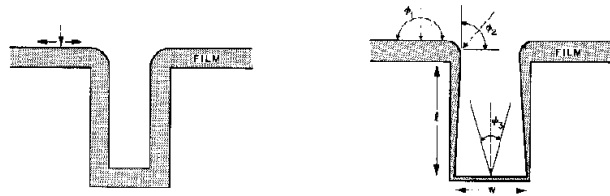
Ræktun á kísiloxíði



- 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

24

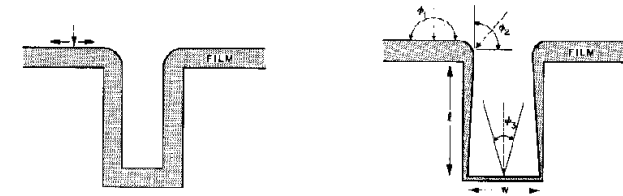
Ræktun á kísíloxíði



- 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

25

Ræktun á kísíloxíði



- Neðar á veggnum er ϕ_3 tengt breidd opunarinnar með

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

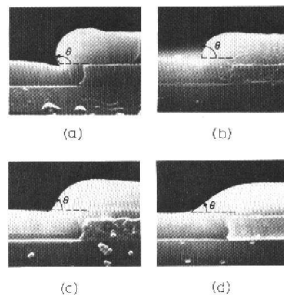
þar sem l er dýpt og W er breidd

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

26

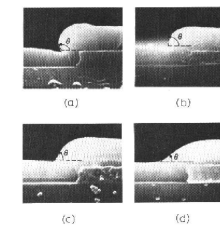
P-gler

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



27

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 íhvolft og hornið er 120°
- Myndir (b), (c) og (d) sýna P-gler með stighækkandi hlutfalli af fosfór upp að 7.2 wt%

28

P-gler

- Finna má hornið θ sem fall af hlutfallslegum massa fosfórs

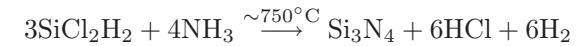
$$\theta \approx 120^\circ \left[\frac{10 - \text{wt}\%}{10} \right]$$

- 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

29

Kísilnítíð

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

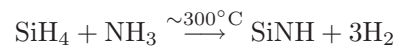


- Húðin sem fæst með LPCVD er myndlaus með um 8 at% af vetni
- Eðlisviðnám húðarinnar er um $10^{16} \Omega\text{cm}$, hlutfallslegur rafsvörunarstuðull er 6 og niðurbrotsspenna 10^7V/cm

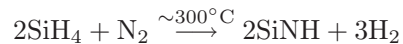
30

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

31

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 $10^6 - 6 \times 10^6 \text{V/cm}$

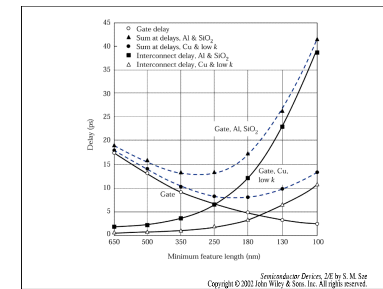
32

Lágur rafsvörunarstuðull

- Með smærri tólum og flóknari marglaga millitengjum þarf að huga að töf vegna 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, milliheyrlu og afnotkun
- Til að draga úr þessari töf eru tvær leiðir
 - millitengi með lægra viðnám
 - millilög með lægri rýmd
- Það er því leitað að efnum með lægri rafsvörunarstuðul

33

Lágur rafsvörunarstuðull

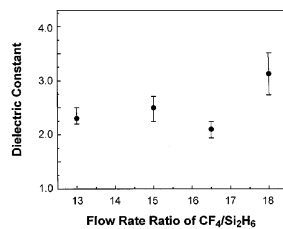


- Grafið sýnir töf í gátt og millitengjum sem fall af gáttarlengd - gert er ráð fyrir lági rafsvörunarstuðullinn sé 2.0, bæði Al og Cu leiðararnir eru $0.8 \mu\text{m}$ þykkir og $43 \mu\text{m}$ langir
- Fyrir tól með gáttarlengd 250 nm eða minna er 50% af töf í rásinni vegna RC tafar í millitengjum

34

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

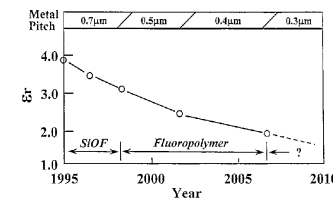


(Jin et al. 2001)

- Rafsvörunarstuðull SiCF sem fall af flæðishlutfalli CF_4 og Si_2H_6

35

Lágur rafsvörunarstuðull



(Homma 1998)

	Year	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Design Rule		0.25 μm		0.18 μm		0.13 μm		
Metal Pitch		0.7 μm		~0.5 μm		~0.4 μm		
Aspect Ratio		~2		~2.5		~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?		
	Er	~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		

36

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.

37

Hár rafsvörunarstuðull

- Þörf er á háum rafsvörunarstuðli fyrir ULSI rásir, sér í lagi fyrir svipulrýmdarminni (e. dynamic random access memory (DRAM))
- Geymslupéttirinn 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

38

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)

39

Hár rafsvörunarstuðull

Rafsvörunarstuðull	
Binary	
Ta_2O_5	25
TiO_2	40
ZrO_2	25
HfO_2	25
Y_2O_3	17
Si_3N_4	7
Paraelectric perovskite	
SrTiO_3 (STO)	140
$\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PMN)	1000-2000
Ferroelectric perovskite	
$\text{Pb}(\text{Zr}_{0.47}\text{Ti}_{0.53})\text{O}_3$ (PZT)	> 1000

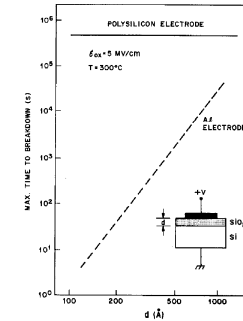
40

Fjölkrystallaður kísill

- Það var mikið framfaraskref þegar farið var að nota fjölkrystallaðan kísil í gáttarskaft 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

41

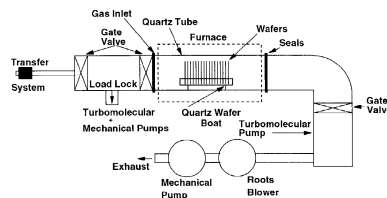
Fjölkrystallaður kísill



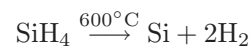
- Á myndinni er borinn saman tími til niðurbrots MOS tvists með ál skauti og skauti úr fjölkrystölluðum kísil
- Fjölkrystallaður kísill ber af og sér í lagi ef gáttaroxíð er þunnt

42

Fjölkrystallaður kísill



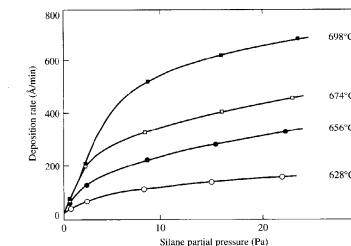
- Til að rækta fjölkrystallaðan kísil er notaður lágþrýstur hvarfofn, sem vinnur milli 600 og 650°C
- Þá er notað pyrolyzing silane sem gengur samkvæmt



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

43

Fjölkrystallaður 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

44

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

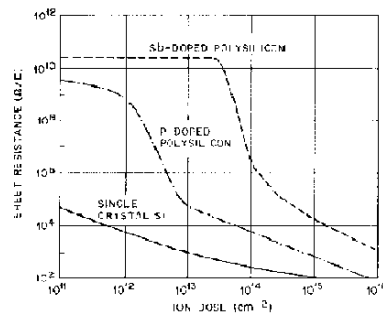
45

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

46

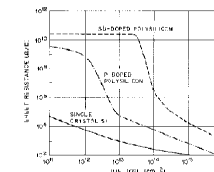
Fjölkrystallaður kísill



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

47

Fjölkrystallaður kísill



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

48

Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor devices: Physics and technology*, John Wiley & Sons, 2 ed., 2002, kafi 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, kafi 6.3
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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