

**Framleiðsla smárása:**

# **Málmur-oxíð-hálfleiðari**

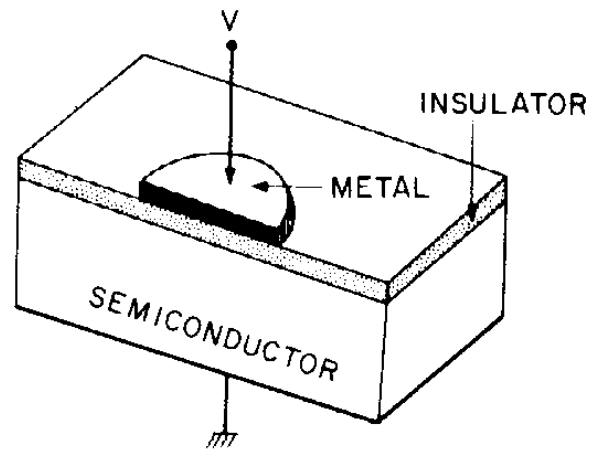
## **Kaflí 10**

**Jón Tómas Guðmundsson**

**tumi@hi.is**

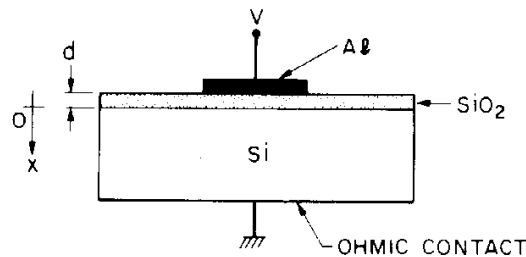
**7. vika haust 2016**

## Málmur-oxíð-hálfleiðari



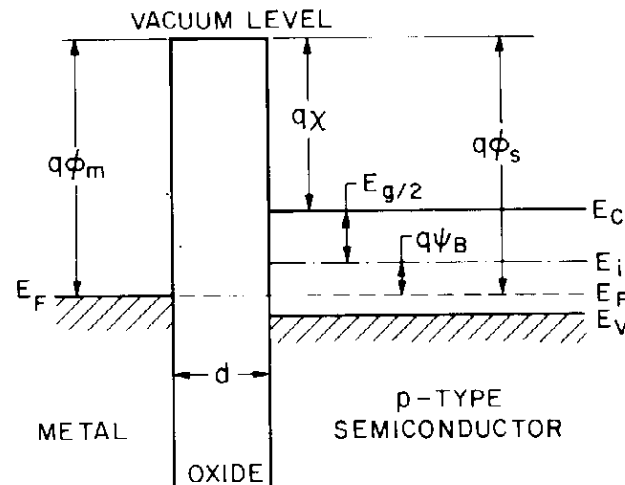
- Samloka málms, oxíðs og hálfleiðara gegnir afar mikilvægu hlutverki í nútíma rafeindatækni
- Þetta tól er nefnt MOS-tvistur (e. MOS-diode)
- Í raun má líta á samlokuna sem plötupétti þar sem önnur platan er málmur og hin hálfleiðari

## Málmur-oxíð-hálfleiðari



- Þversnið samloku málms, oxíðs og hálfleiðara sést á myndinni
- $d$  er þykkt oxíðsins og  $V$  er spenna sem lögð er á málmskautið
- Þegar neikvæð spenna er lögð á málminn þá væntum við þess að jafnstór jákvæð hleðsla safnist á yfirborð hálfleiðarans
- Í hálfleiðara af  $p$ -gerð kemur þetta fram sem söfnun hola við samskeyti hálfleiðara og oxíðs
- Á sama hátt leiðir jákvæð spenna á málminn af sér neikvæða hleðslu á yfirborði hálfleiðara

# Málmur-oxíð-hálfleiðari



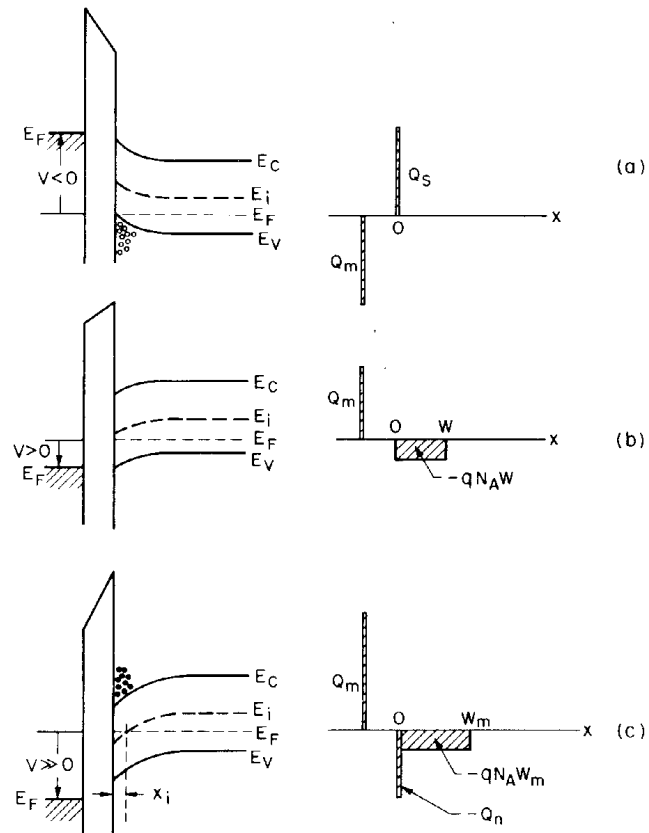
- Orkuborðamynd af MOS kjörtvisti við  $V = 0$
- MOS kjörtvistur er skilgreindur þ.a. við  $V = 0$  er orkumunur vinnufalls málmsins  $q\phi_m$  og hálfleiðarans  $q\phi_s$ , núll, skilgreint

$$q\phi_{ms} = q(\phi_m - \phi_s) = q\phi_m - \left[ q\chi + \frac{E_g}{2} + q\phi_b \right] = 0$$

## Málmur-oxíð-hálfleiðari

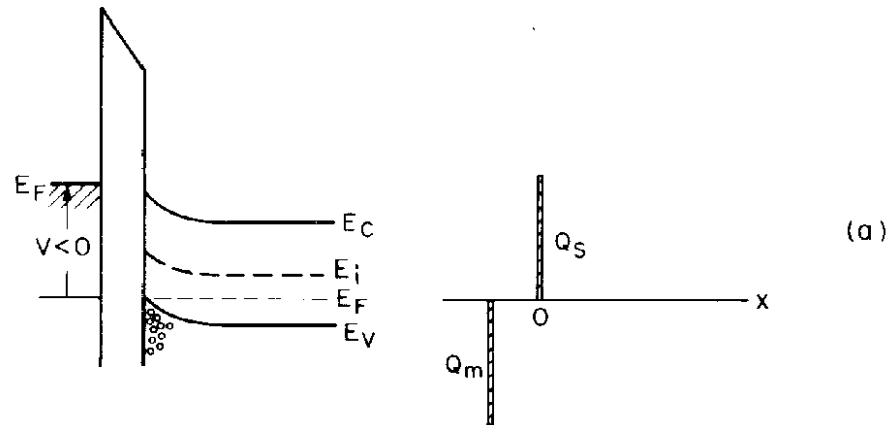
- Hér er  $\chi$  rafeindasækni hálfleiðarans og  $q\phi_b$  er orkumunurinn milli Fermiorkustigsins  $E_F$  og eigin Fermiorkustigsins  $E_i$
- Orkuborðarnir eru flatir þegar engin spenna er lögð á
- Eina hleðslan sem er til staðar í tvistinum, við hvaða álagða spennu sem vera vill, er í hálfleiðaranum og síðan jafnstór hleðsla með andstæðu formerki á yfirborði málmnsins sem liggur að oxíðinu
- Engin flutningur hleðslubera á sér stað um oxíðið við álagða dc-spennu

# Hálfleiðarar



- Gerum ráð fyrir málm, oxíði og hálfleiðara af  $p$ -gerð

## Neikvæð álögð spenna ( $V < 0$ )



- Þegar spennan er neikvæð ( $V < 0$ ) þá bogna borðarnir við yfirborð hálfleiðarans upp á við
- Enginn straumur rennur um tólið, óháð álagðri spennu, ef gert er ráð fyrir MOS kjörtvist, þar með er Fermiorkustig hálfleiðarans fast

## Neikvæð álögð spenna ( $V < 0$ )

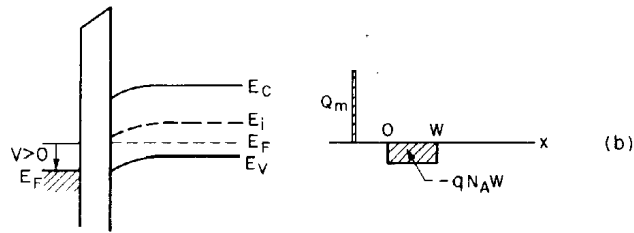
- Hleðsluberapéttleiki ríkjandi bera í hálfleiðara

$$p_p = n_i \exp [(E_i - E_F)/kT]$$

- Þegar borðarnir bogna upp á við eykst orkumunurinn  $E_i - E_F$  og þar með safnast fyrir holur við samskeyti oxíðs og hálfleiðara
- Hleðsludreifing er sýnd á mynd (a) þar sem  $Q_s$  er jákvæð hleðsla á einingarflöt í hálfleiðaranum og  $Q_m$  er neikvæð hleðsla á einingarflöt í málminum  $|Q_m| = Q_s$



## Jákvæð álögð spenna ( $V > 0$ )

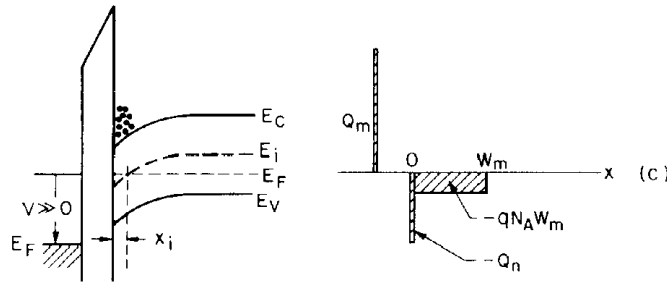


- Þegar lág jákvæð spennan er lögð á málminn ( $V > 0$ ) þá bogna borðarnir við yfirborð hálfleiðarans niður á við og fjöldi ríkjandi bera, hola, við samskeyti oxíðs og hálfleiðara er skertur
- Holum er ýtt frá samskeytunum, sem skilja þá eftir berasnautt bil þar sem eftir standa jónaðir rafþegar
- Rúmhleðsla á flatarmálseiningu,  $Q_{sc}$ , í hálfleiðaranum

$$Q_{sc} = -qN_A x_d$$

þar sem  $x_d$  er breiddin á berasnauðabilinu

## Há jákvæð spenna ( $V \gg 0$ )



- Þegar há jákvæð spenna er lögð á, þá bogna borðarnir ennþá meira svo að eigin orkustig hálfleiðarans  $E_i$  við yfirborðið fer niður fyrir Fermiorkustigið
- Rafeindapéttleikinn er háður  $E_F - E_i$  samkvæmt

$$n_p = n_i \exp [(E_F - E_i)/kT]$$

- Ef  $E_F - E_i > 0$  þá er þéttleiki víkjandi bera  $n_p$  við yfirborðið orðinn meiri en  $n_i$  og þéttleiki ríkjandi bera  $p_p$  minni en  $n_i$

## Há jákvæð spenna ( $V \gg 0$ )

- Fjöldi rafeinda (víkjandi bera) er því orðinn meiri en fjöldi hola (ríkjandi bera)
- Svæðið næst samskeytum hálfleiðara og oxíðs er því **umhverft** (e. inverted)
- Ef borðarnir eru beygðir enn frekar kemur að því að leiðniborði nálgast Fermiorkustigið.
- Þá eykst rafeindaþéttleikinn næst samskeytunum mjög hratt
- Þegar hér er komið sögu er mestur hluti neikvæðra aukahleðslna í hálfleiðaranum  $Q_n$  vegna rafeinda í þunnu umhverfðu lagi  $0 \leq x \leq x_i$ , þar sem  $x_i$  er breidd umhverfða lagsins
- Dæmigerð gildi á  $x_i$  eru 1 – 10 nm en alltaf mun minna en berasnautt bil yfirborðsins

## Berasnautt bil við yfirborð

- Þegar umhverft lag hefur myndast tekur berasnauða bilið hágildi sitt
- Lítil aukning í borðabognun (sem samsvarar lítilli breytingu í breidd berasnauðabilsins) veldur mikilli aukningu hleðslu á umhverfða svæðinu  $Q_n$
- Við algera umhverfingu er hleðsla á einingarflatarmál í hálfleiðaranum gefin með

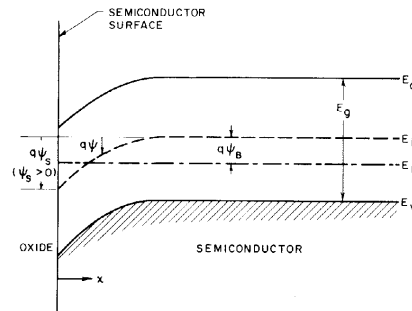
$$Q_s = Q_n + Q_{sc}$$

þar sem

$$Q_{sc} = -qN_A x_{dmax}$$

og  $x_{dmax}$  er mesta breidd berasnauða bilsins

## Berasnautt bil við yfirborð



- Rafstöðumættið  $\psi$  er skilgreint núll í bol hálfleiðarans og við yfirborð hálfleiðarans er mættið  $\psi_s$  nefnt **yfirborðsmætti** (e. surface potential)
- Rita má rafeinda- og holupéttleika sem fall af rafstöðumættinu

$$n_p = n_i \exp [q(\psi - \psi_b)/kT]$$

$$p_p = n_i \exp [q(\psi_b - \psi)/kT]$$

þar sem  $\psi$  er jákvætt þegar borðinn er beygður niður á við

## Berasnautt bil við yfirborð

- Við yfirborðið er þéttleiki hleðslubera

$$n_s = n_i \exp [q(\psi_s - \psi_b)/kT]$$

$$p_s = n_i \exp [q(\psi_b - \psi_s)/kT]$$

- Við sjáum því að fyrir yfirborðsmættið gildir:

$\psi_s < 0$             Uppsöfnun hola (borðar bogna upp á við)

$\psi_s = 0$             Flaturlagning

$\psi_b > \psi_s > 0$     Holurýrnun

$\psi_s = \psi_b$         Miðja orkugeilar með  $n_s = n_p = n_i$

$\psi_s > \psi_b$         Umhverfing (borðar bogna niður á við)

## Berasnautt bil við yfirborð

- Hegðun mættisins sem fall af staðsetningu er gefin með jöfnu Poisson

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho_s(x)}{\epsilon_s}$$

þar sem  $\rho_s$  er heildar rúmhleðsluþéttleikinn

- Þegar berasnautt svæði myndast í hálfleiðara þá er hleðslan gefin með

$$\rho_s = -qN_A$$

## Berasnautt bil við yfirborð

- Með því að tegra jöfnu Poisson fæst rafstöðumættið í berasnauðabilinu við yfirborðið

$$\psi = \psi_s \left[ 1 - \frac{x}{x_d} \right]^2$$

og þar með er yfirborðsmættið

$$\psi_s = \frac{qN_A x_d^2}{2\epsilon_s}$$

- Athuga ber að mættið svipar til mættis á  $n^+ - p$ -skeytum
- Yfirborðið er umhverft þegar  $\psi_s > \psi_b$



## Berasnautt bil við yfirborð

- Þegar alger umhverfing hefst gerum við ráð fyrir að rafeindapéttleiki við yfirborðið sé jafn íbótarpéttleika við yfirborðið

$$n_s = N_A$$

ef gert er ráð fyrir  $p$ -leiðni hálfleiðara

- Þegar þetta gildir er Fermiorkustigið við yfirborðið jafnmikið ofan við eigin Fermiorkustigið og það er neðan við eigin Fermiorkustigið í bolnum
- Þar eð  $N_A = n_i \exp(q\psi_b/kT)$  þá má rita

$$\psi_s(\text{umhverfing}) \approx 2\psi_b = \frac{2kT}{q} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right)$$

## Berasnautt bil við yfirborð

- Berasnaðabilið við yfirborðið nær mestu dýpt þegar umhverfing við yfirborðið er alger
- Samkvæmt því er dýpt berasnaðabilsins þegar  $\psi_s = \psi_s(\text{umhverfing})$  eða

$$x_{\text{dmax}} = \left( \frac{2\epsilon_s \psi_s(\text{umhv.})}{qN_A} \right)^{1/2} \approx \left( \frac{2\epsilon_s (2\psi_b)}{qN_A} \right)^{1/2}$$

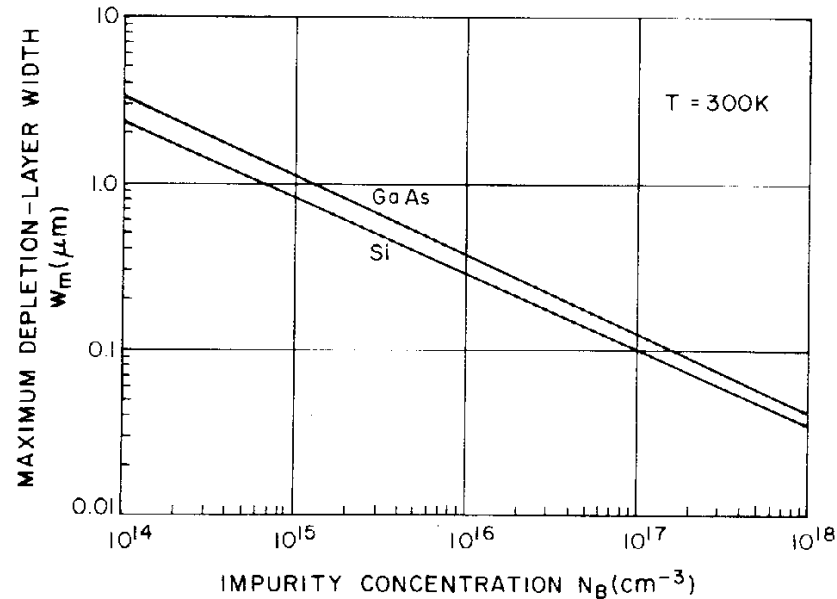
eða

$$x_{\text{dmax}} \approx \left( \frac{4\epsilon_s kT \ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A} \right)^{1/2}$$

- Þar með er

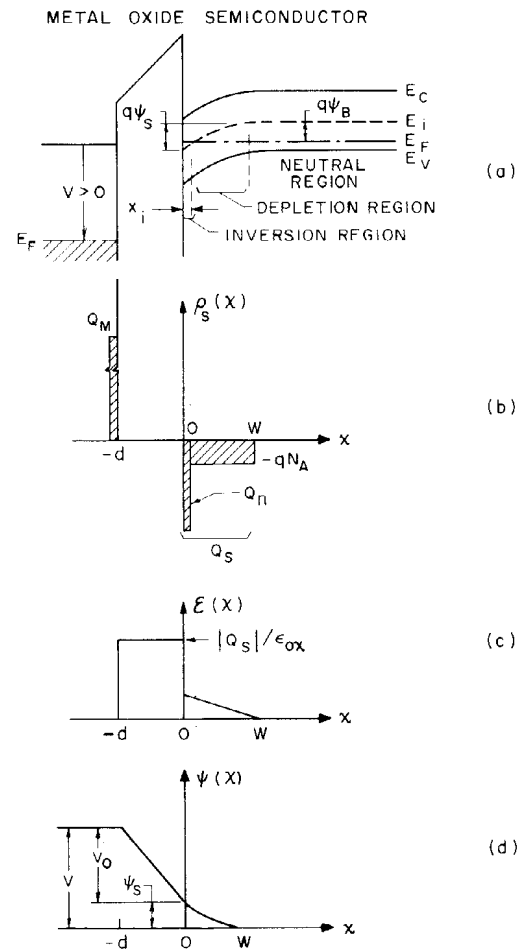
$$Q_{\text{sc}} = -qN_A x_{\text{dmax}} \approx \sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\psi_b)}$$

## Berasnautt bil við yfirborð



- Samband dýptar berasnauðabilsins og íbótarþéttleika fyrir kísil og GaAs
- Grafið sýnir mestu breidd berasnauða bilsins sem fall af íbótarþéttleika í Si og GaAs við algera umhverfingu

# Rýmnd



## Rýmd

- Álögð spenna fellur að hluta til yfir oxíðið og að hluta til yfir hálfleiðarann eða

$$V = V_o + \psi_s$$

þar sem  $V_o$  er mættið yfir oxíðið, gefið með

$$V_o = \mathcal{E}_o d = \frac{|Q_s| d}{\epsilon_{ox}} \equiv \frac{|Q_s|}{C_o}$$

þar sem

$\mathcal{E}_o$  er rafsviðið í oxíðinu

$Q_s$  er hleðsla á einingarflatarmál hálfleiðarans

$C_o = \epsilon_{ox}/d$  er rýmd oxíðs á einingarflatarmál

## Rýmd

- Heildarrýmd MOS tvists  $C$  samanstendur af raðtengingu rýmdar oxíðsins  $C_o$  og rýmdar berasnauda bils hálfleiðarans  $C_d = \epsilon_s/x_d$

$$C = \frac{C_o C_d}{C_o + C_d}$$

- Hér má eyða  $x_d$  og rita

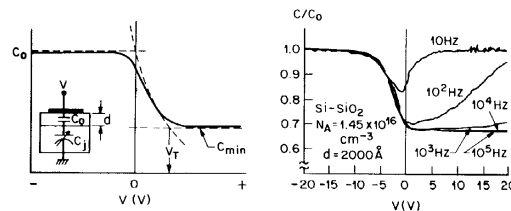
$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{\left[1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2 V}{qN_A \epsilon_s d^2}\right]^{1/2}}$$

sem segir að rýmdin falli með aukinni álagðri spennu

- Þegar neikvæð spenna er lögð yfir MOS tvistinn myndast ekkert berasnautt bil en holur safnast upp við yfirborð hálfleiðarans. Þá er heildar rýmdin um það bil sama og rýmd oxíðsins  $\epsilon_{ox}/d$

# Rýmd

- Þegar umhverfing er alger, þá eykst dýpt berasnauða bilsins ekki frekar með aukinni álagðri spennu



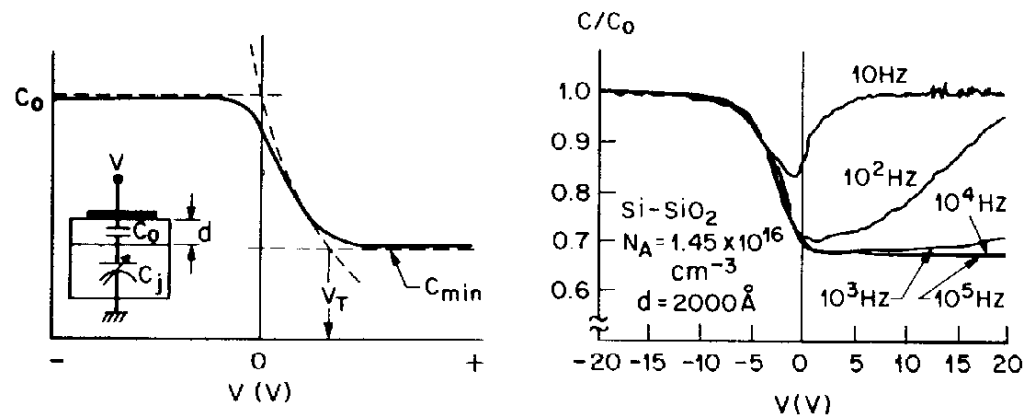
- Þetta gerist við gáttarspennuna sem gildir þegar  $\psi_s = \psi_s(\text{umhv.})$  og skilgreinir **þröskuldspennuna**

$$V_T = \frac{qN_A x_{d\max}}{C_o} + \psi_s(\text{umhv.})$$

eða

$$V_T \approx \frac{[2\epsilon_s N_A (2\psi_b)]^{1/2}}{C_o} + 2\psi_b$$

# Rýmd

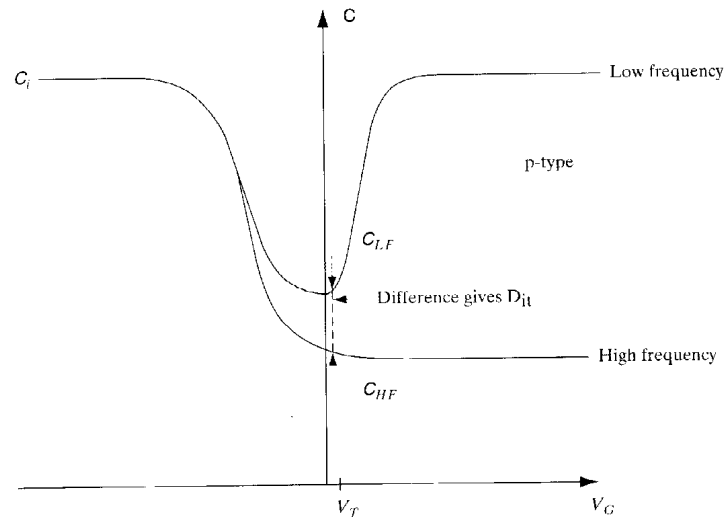


- Eftir að alger umhverfing hefur átt sér stað situr heildar rýmdin í minnsta gildi sínu

$$C_{\min} = \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{d + (\epsilon_{\text{ox}}/\epsilon_s)x_{\text{dmax}}}$$

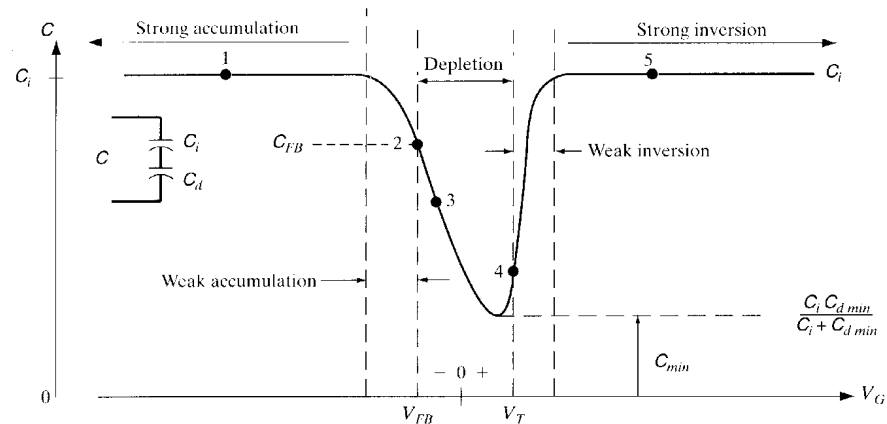


# Rýmd



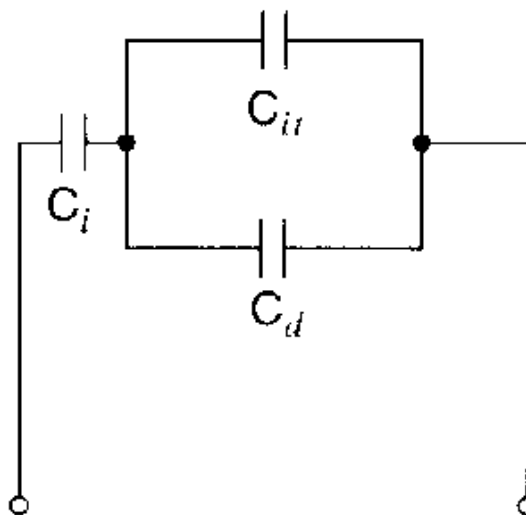
- Ákvarða má stærðir eins og þykkt oxíðs, íbótarþéttleika undirlags og þröskuldsspennu út frá  $C - V$  kennilínunni
- Lögun ferilsins ræðst af leiðnigerð undirlagsins
- Ef rýmdin við háa tíðni er há fyrir neikvæða spennu og lítil fyrir jákvæða spennu þá höfum við  $p$ -leiðandi undirlag

# Rýmd



- Ef tíðnin er lág og efnið er  $p$ -leiðandi, þá fellur rýmdin þegar spennan hækkar (verður minna neikvæð) og rís síðan snögg við umhverfingu
- Fyrir  $n$ -leiðandi efni fæst spegilmynd ferilsins
- Rýmdin  $C_o = \epsilon_{ox}/d$  við uppsöfnun eða algera umhverfingu (við lága tíðni) gefur þykkt oxíðsins

# Rýmd



- Minnsta rýmd MOS tvistsins  $C_{\min}$  svarar til raðtengingar  $C_o$  og minnstu rýmdar vegna berasnaðða bilsins  $C_{d\min} = \epsilon_s/x_{d\max}$ , eða sem svarar til mestu breiddar  $x_{d\max}$

## Rýmd

- Þá ætti að vera hægt að finna íbótarþéttleika undirlags með

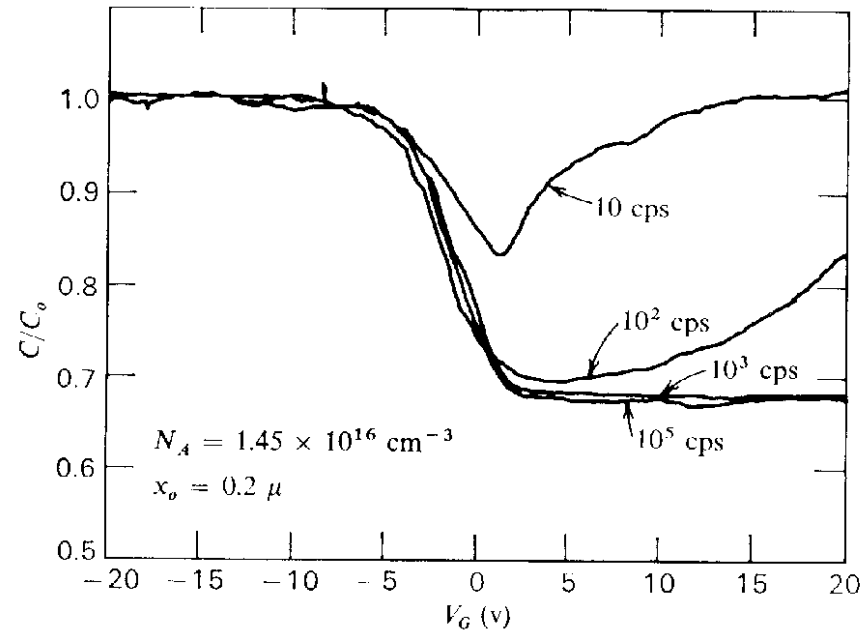
$$x_{\text{dmax}} = 2 \left[ \frac{\epsilon_s kT \ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A} \right]^{1/2}$$

en það er flókið, nálgun á lausninni er

$$N_A = 10^{[30.388 + 1.683 \log C_{\text{dmin}} - 0.03177(\log C_{\text{dmin}})^2]}$$

þar sem  $C_{\text{dmin}}$  er í  $\text{F}/\text{cm}^2$

# Rýmd

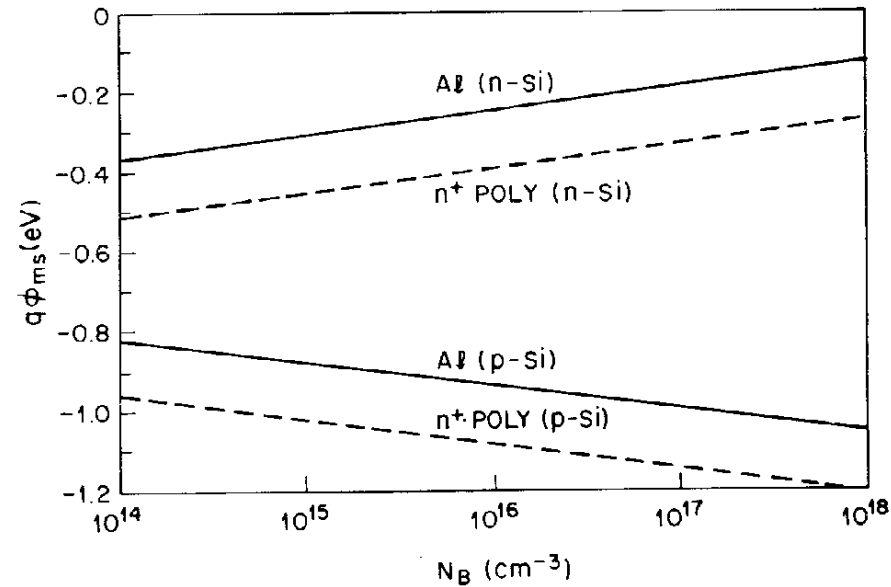


- Áhrif mælitíðni á  $C - V$  kennilínu MOS tvists
- Við lágar tíðnir stefnir heildarrýmdin á rýmd oxíðsins þegar umhverfing er alger

## SiO<sub>2</sub>-Si

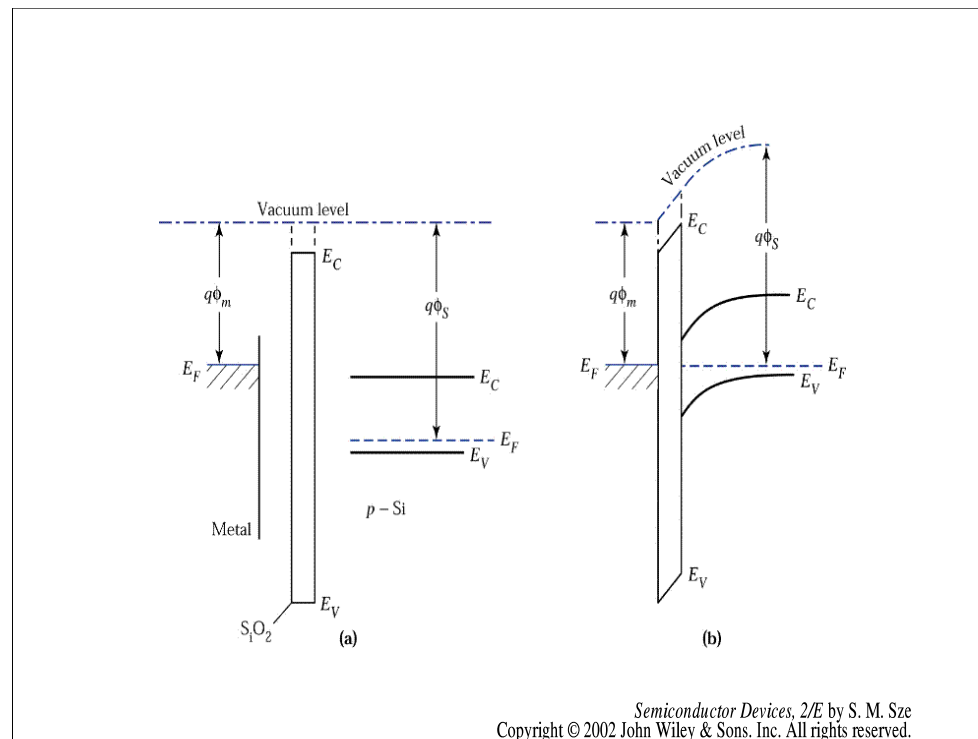
- Mest rannsakaði MOS tvisturinn er sá sem gerður er úr málm-SiO<sub>2</sub>-Si
- Raunverulegur MOS tvistur víkur frá kjörtilfellinu:
  - Fyrir algenga málma er  $q\psi_{ms}$  ekki nauðsynlega núll
  - Einnig eru hleðslur á SiO<sub>2</sub> samskeytunum
  - Að auki geta verið hleðslur í oxíðinu

# SiO<sub>2</sub>-Si



- Vinnufall hálfleiðarans  $q\phi_s$ , breytist með íbótarþéttleika
- Algengasta málmskautið er ál með  $q\phi_m = 4.1$  eV
- Fjölkrystallaður kísill er einnig mikið notaður. Vinnufall  $n^+$ –poly er 4.05 eV og  $p^+$ –poly er 5.05 eV

# SiO<sub>2</sub>-Si



- Þegar teiknuð er borðamynd af MOS tvist, er byrjað með einangraðan málm og einangraðan hálfleiðara, sem á milli er sett oxíð, allir borðar eru flatir



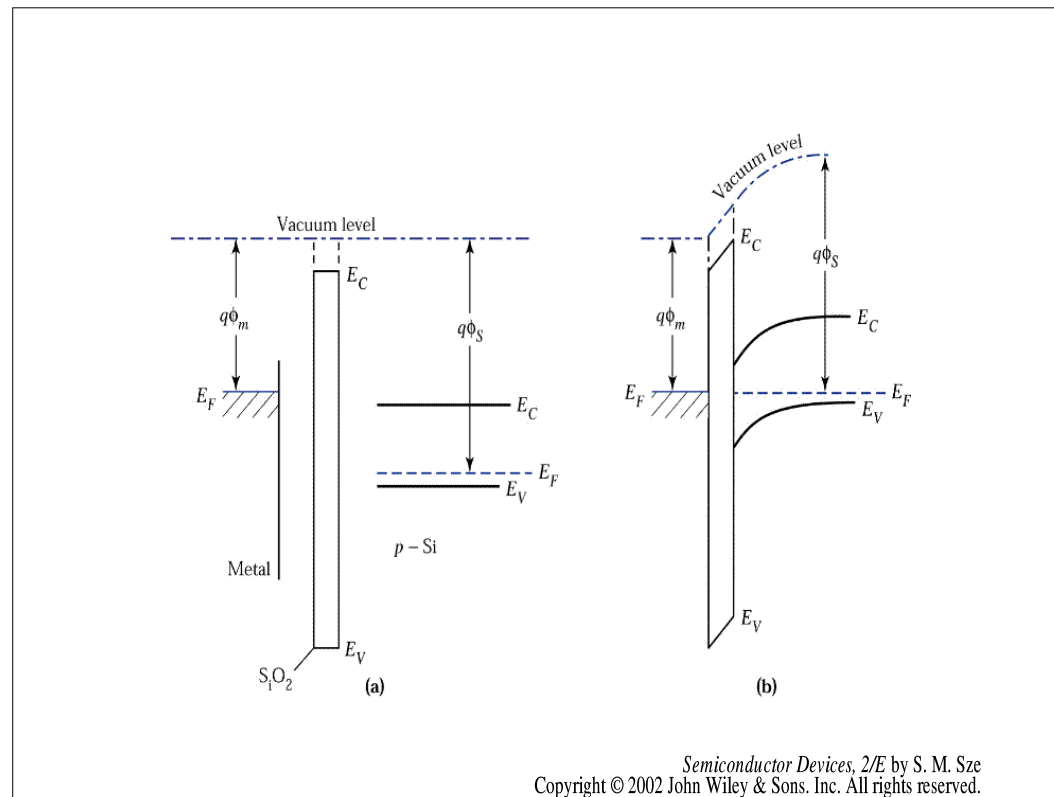
## SiO<sub>2</sub>-Si

- Þegar þeim er skeytt saman bogna borðar hálfleiðarans niður á við til að bæta upp vinnufallsmuninn
- Í varmajafnvægi verða Fermiorkustigin að standast á
- Nú er  $q\phi_m < q\phi_s$  og mismunurinn  $q\phi_{ms}$  neikvæður sem nemur

$$V_{FB} = \phi_m - \phi_s$$

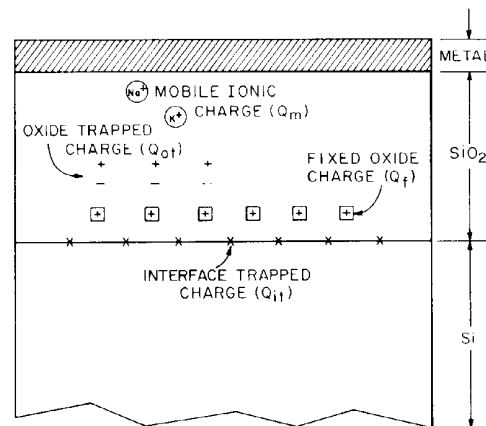
þ.a. leggja verður á neikvæða spennu  $V_{FB}$  til að borðarnir verði flatir  
( $V_{FB} = \phi_{ms}$ )

# SiO<sub>2</sub>-Si



- Málmurinn verður jákvætt hlaðinn og hálfleiðarinn neikvætt hlaðinn við yfirborðið

## Skeytagildrur og hleðsla



- Hleðslur í oxíðinu og gildrur (e. traps) við Si/SiO<sub>2</sub> samskeytin hafa einnig áhrif á verkun MOS tvista
  - hleðsla sem hremmd er við samskeytin
  - föst hleðsla í oxíði
  - hleðsla sem oxíð hremmir
  - hreyfanlegar hlaðnar jónir

## Skeytagildrur og hleðsla

- Hremming hleðslu  $Q_{it}$  við yfirborðið stafar af eiginleikum Si/SiO<sub>2</sub> samskeytanna og ræðst af efnasamsetningu þeirra
- Gildrurnar eru staðsettar á samskeytunum og hafa orkuástönd innan orkugeilar kísils
- Þéttleiki gildra er stefnuháður
- Þéttleiki samskeytagildra er um stærðargráðu minni í  $\langle 100 \rangle$  stefnuna heldur en í  $\langle 111 \rangle$  stefnuna
- Gjarnan eru þessar gildrur hlutleystar með vetnisíþætingu
- Þéttleiki  $Q_{it}$  í  $\langle 100 \rangle$  stefnuna er allt niður í  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ , þ.e. ein hleðsla er hremmd fyrir hver  $10^5$  yfirborðs atóm
- Í  $\langle 111 \rangle$  stefnu er  $Q_{it} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

## Skeytagildrur og hleðsla

- Föst hleðsla  $Q_f$  er gjarnan í oxíðinu 3 nm inn af Si/SiO<sub>2</sub> samskeytunum
- Almennt séð er  $Q_f$  jákvæð hleðsla sem ræðst af oxunar- og bökunarskilyrðum sem og stefnu kísils
- Líta má á  $Q_f$  sem sheet hleðslu
- Hleðslupéttleiki á góðum skeytum vegna föstu hleðslunnar er  $10^{10}$  cm<sup>-2</sup> fyrir  $\langle 100 \rangle$  yfirborð og  $5 \times 10^{10}$  cm<sup>-2</sup> fyrir  $\langle 111 \rangle$  yfirborð
- Vegna þess að hleðslupéttleikinn  $Q_{it}$  og  $Q_f$  er lægri í  $\langle 100 \rangle$  stefnur er sú stefna æskileg þegar byggður er MOSFET úr kísli

## Skeytagildirur og hleðsla

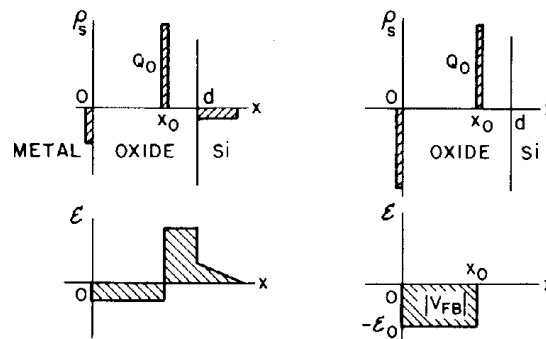
- Hleðsla sem hremmd er af oxíðinu  $Q_{ot}$  stafar af veilum í kísiloxíðinu
- Hleðslur þessar má mynda með Röntgengeislun eða háorku rafeindahríð
- Gildirnar eru dreifðar um oxíðlagið
- Megnið af hremmdri hleðslu  $Q_{ot}$  má fjarlægja með lághita bökun

## Skeytagildirur og hleðsla

- Hleðsla vegna hreyfanlegra jóna  $Q_m$
- Jónir eins og natrín og aðrar alkali jónir eru hreyfanlegar í oxíðinu við há hitastig ( $> 100^\circ\text{C}$ ) og háspennuáraun
- Snefilefni eins og alkalímálmur geta valdið áreiðanleikavandamálum í tólum sem vinna við há hitastig
- Þegar jónirnar hreyfast um oxíðið getur það komið fram sem hliðrun á  $C - V$  ferlinum eftir spennuásnum

## Skeytagildrur og hleðsla

- Ofangreindar hleðslur valda heildarhleðslu sem hefur áhrif á samskeytin
- Gerum ráð fyrir jákvæðri sheet hleðslu  $Q_0$  innan oxíðsins



- Þessi jákvæða hleðsla spanar neikvæða hleðslu, sem kemur fram að hluta í málminum og að hluta í hálfleiðaranum
- Rafsviðsdreifingin fæst með því að tegra jöfnu Poisson einu sinni og gera ráð fyrir því að  $q\phi_{ms} = 0$



## Skeytagildrur og hleðsla

- Til að fá flata borða (þ.e. engin hleðsla í hálfleiðaranum) verður að leggja neikvæða spennu á málminn
- Þegar neikvæða spennan er aukin færast neikvæðu hleðslurnar á málminn þar og rafsviðsdreifingin hliðrast þar til rafsviðið á yfirborði hálfleiðarans er núll
- Flatamálið undir rafsviðsferlinum samsvarar þá til spennunnar við flata borða

$$V_{\text{FB}} = -\mathcal{E}_0 x_0 = -\frac{Q_0}{\epsilon_{\text{ox}}} x_0 = -\frac{Q_0}{C_0} \frac{x_0}{d}$$

- Spennan sem gefur flata borða er þess vegna háð sheet hleðslunni  $Q_0$  sem og staðsetningu hennar  $x_0$

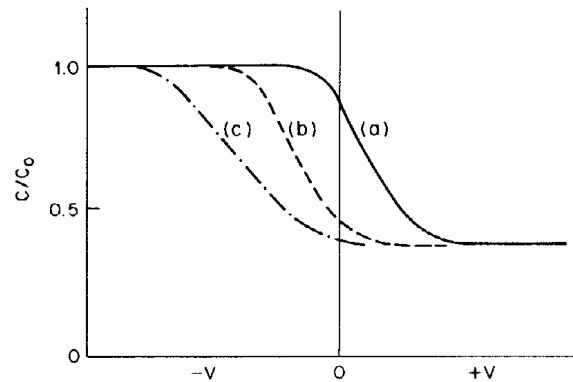
## Skeytagildrur og hleðsla

- Almennar má rita

$$V_{\text{FB}} = -\frac{1}{C_0} \left[ \frac{1}{d} \int_0^d x \rho(x) dx \right]$$

þar sem  $\rho(x)$  er hleðsluþéttleiki í oxíðinu

## Skeytagildrur og hleðsla



- Ef  $q\phi_{ms} \neq 0$  og ef  $Q_f$ ,  $Q_m$  og  $Q_{ot}$  eru teljandi, þá hliðrast  $C - V$  ferillinn sem nemur

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_m + Q_{ot}}{C_0}$$

- Ferill (a) er MOS kjörtvistur, (b) er hliðruð vegna  $q\phi_{ms}$ ,  $Q_f$ ,  $Q_m$  og  $Q_{ot}$  og (c) er frekar hliðruð og bjöguð vegna  $Q_{it}$

⇒ Dæmi 10.1.

⇒ Dæmi 10.2.

# Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor devices: Physics and Technology*, John Wiley & Sons, 2ed., 2002, kafli 6.1
- [2] Ben G. Streetman og Sanjay Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 5th ed., Prentice Hall, 2000, kaflar 6.4.2. - 6.4.5.
- [3] A. S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, 1967, kafli 9