

Framleiðsla smárása:

Málmur-oxíð-hálfleiðari

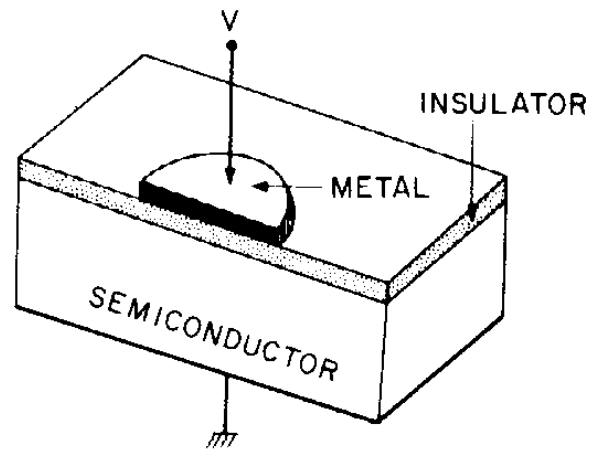
Kaflí 10

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

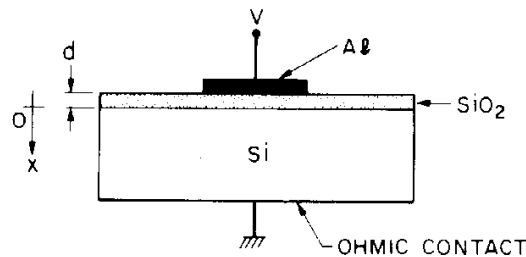
7. vika haust 2014

Málmur-oxíð-hálfleiðari



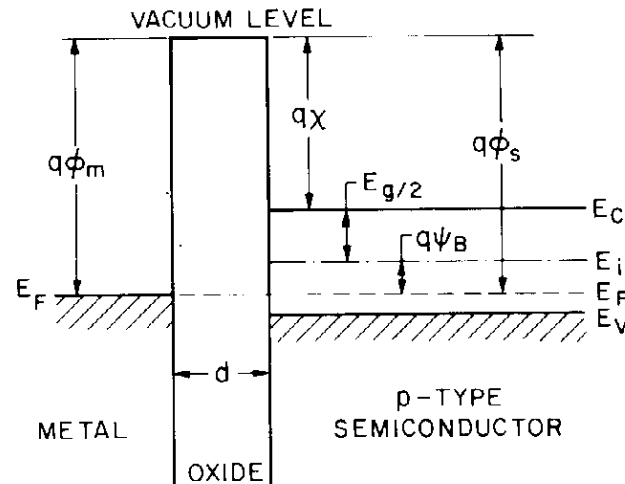
- Samloka málms, oxíðs og hálfleiðara gegnir afar mikilvægu hlutverki í nútíma rafeindatækni
- Þetta tól er nefnt MOS-tvistur (e. MOS-diode)
- Í raun má líta á samlokuna sem plötupétti þar sem önnur platan er málmur og hin hálfleiðari

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



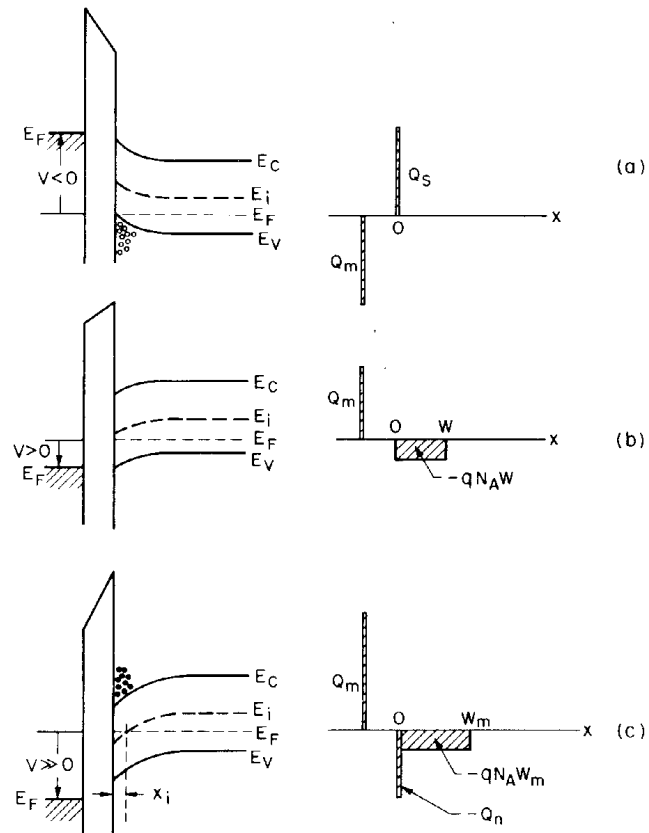
- Orkuborðamynd af MOS kjörtvisti við $V = 0$
- MOS kjörtvistur er skilgreindur þ.a. við $V = 0$ er orkumunur vinnufalls málmsins $q\phi_m$ og hálfleiðarans $q\phi_s$, núll, skilgreint

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

Málmur-oxíð-hálfleiðari

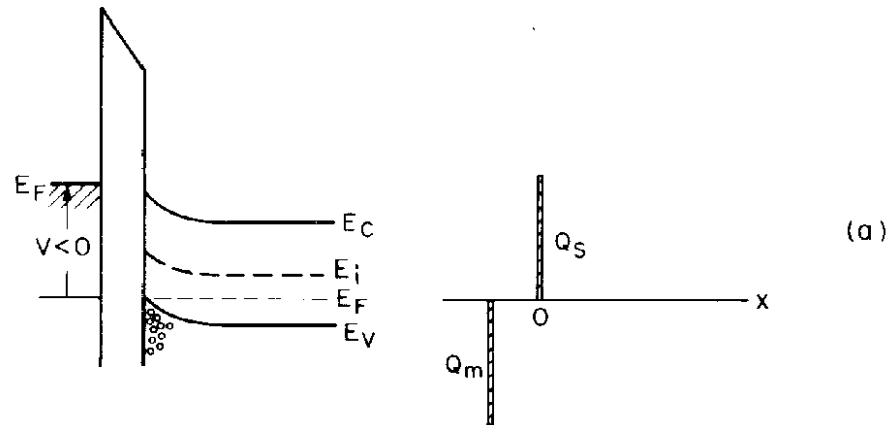
- Hér er χ rafeindasækni hálfleiðarans og $q\phi_b$ er orkumunurinn milli Fermiorkustigsins E_F og eigin Fermiorkustigsins E_i
- Orkuborðarnir eru flatir þegar engin spenna er lögð á
- Eina hleðslan sem er til staðar í tvistinum, við hvaða álagða spennu sem vera vill, er í hálfleiðaranum og síðan jafnstór 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

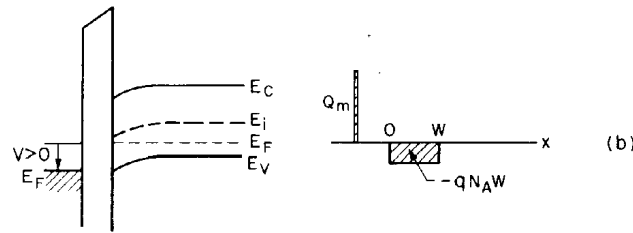
Neikvæð álögð spenna ($V < 0$)

- 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 ($V > 0$)

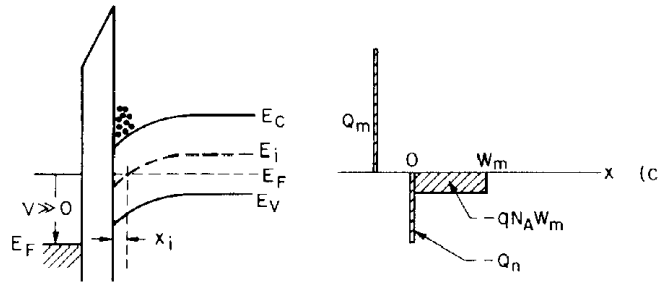


- Þegar lág jákvæð spennan er lögð á málminn ($V > 0$) þá bogna borðarnir við yfirborð hálfleiðarans niður á við og fjöldi ríkjandi bera, hola, við samskeyti oxíðs og hálfleiðara er skertur
- Holum er ýtt frá samskeytunum, sem skilja þá eftir berasnautt bil þar sem eftir standa jónaðir rafþegar
- Rúmhleðsla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

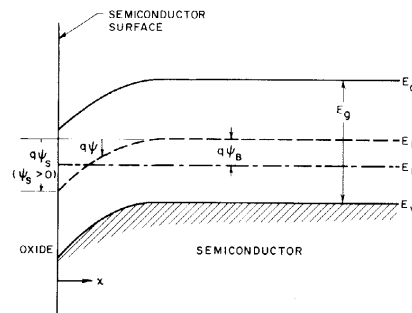
$$Q_s = Q_n + Q_{sc}$$

þar sem

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

og x_{dmax} er mesta breidd berasnauða bilsins

Berasnautt bil við yfirborð



- Rafstöðumættið ψ er skilgreint núll í bol hálfleiðarans og við yfirborð hálfleiðarans er mættið ψ_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 ψ 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 ρ_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

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

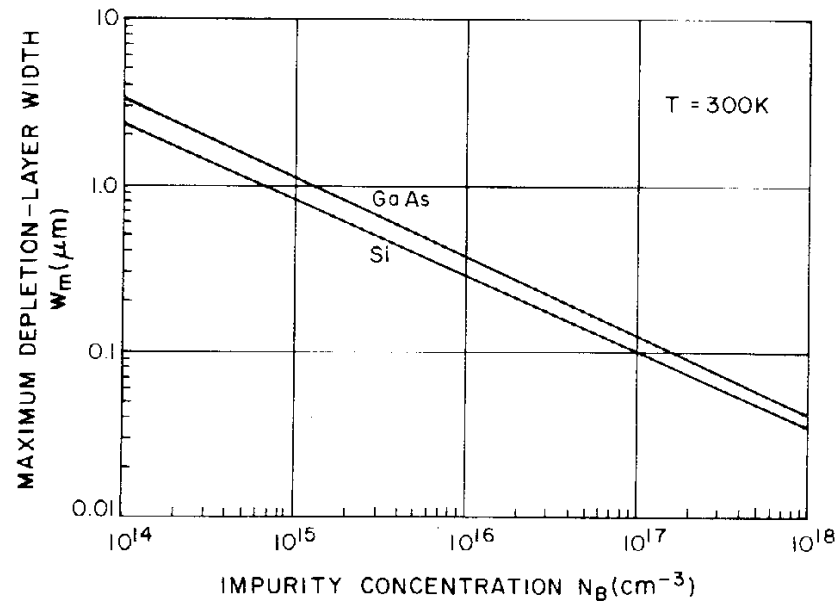
eða

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

- Þar með er

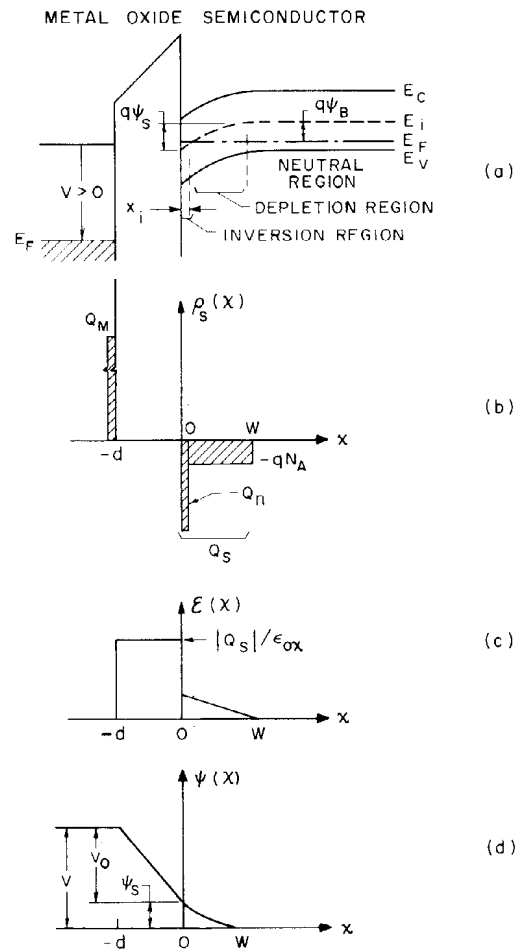
$$Q_{\text{sc}} = -qN_A x_{\text{dmax}} \approx \sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\psi_b)}$$

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

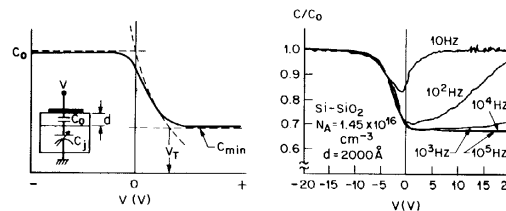
$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{\left[1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2 V}{qN_A \epsilon_s d^2}\right]^{1/2}}$$

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 ϵ_{ox}/d

Rýmd

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



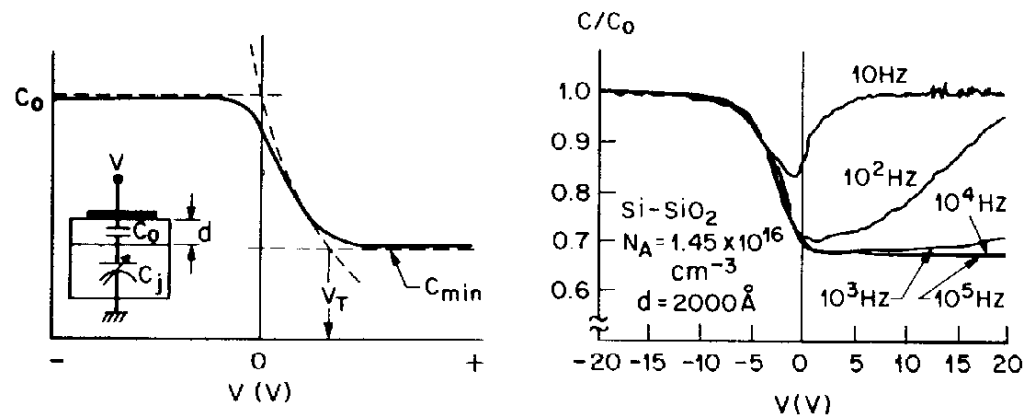
- Þetta gerist við gáttarspennuna sem gildir þegar $\psi_s = \psi_s(\text{umhv.})$ og skilgreinir **þröskuldspennuna**

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

eða

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

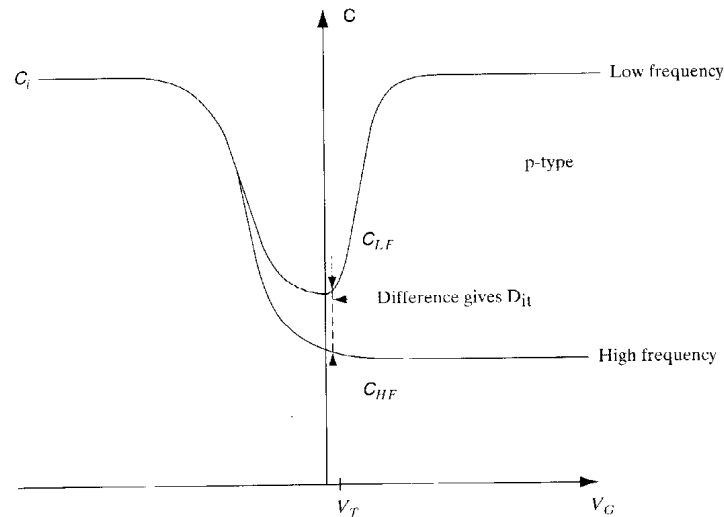
Rýmd



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

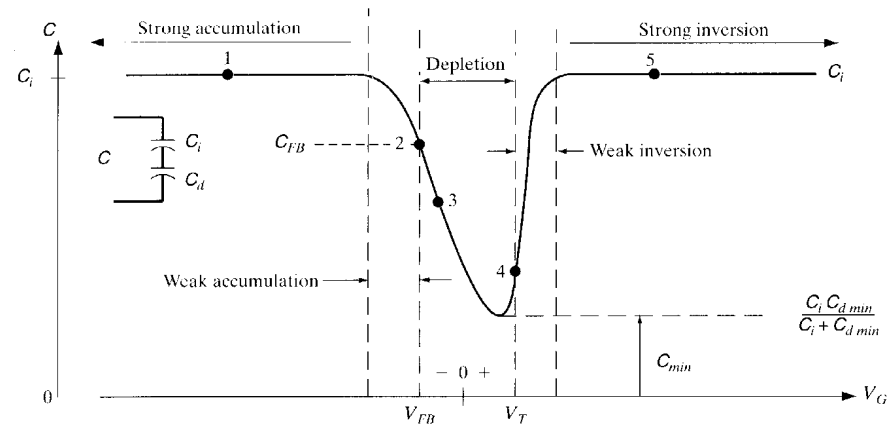
$$C_{\min} = \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{d + (\epsilon_{\text{ox}}/\epsilon_{\text{s}})x_{\text{dmax}}}$$

Rýmd



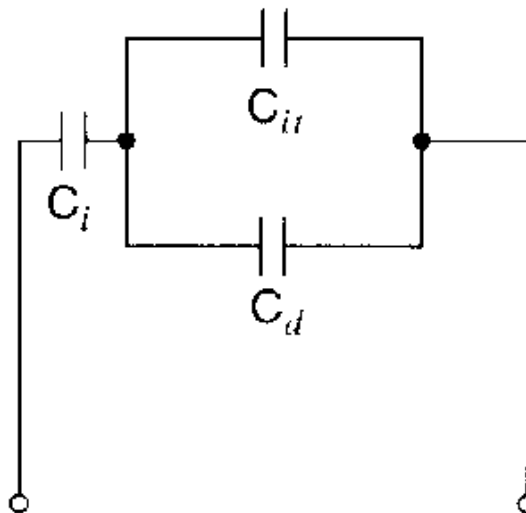
- Ákvarða má stærðir eins og þykkt oxíðs, íbótarþéttleika undirlags og þröskuldsspennu út frá $C - V$ kennilínunni
- Lögun ferilsins ræðst af leiðnigerð undirlagsins
- Ef rýmdin við háa tíðni er há fyrir neikvæða spennu og lítil fyrir jákvæða spennu þá höfum við p -leiðandi undirlag

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 berasnauða 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

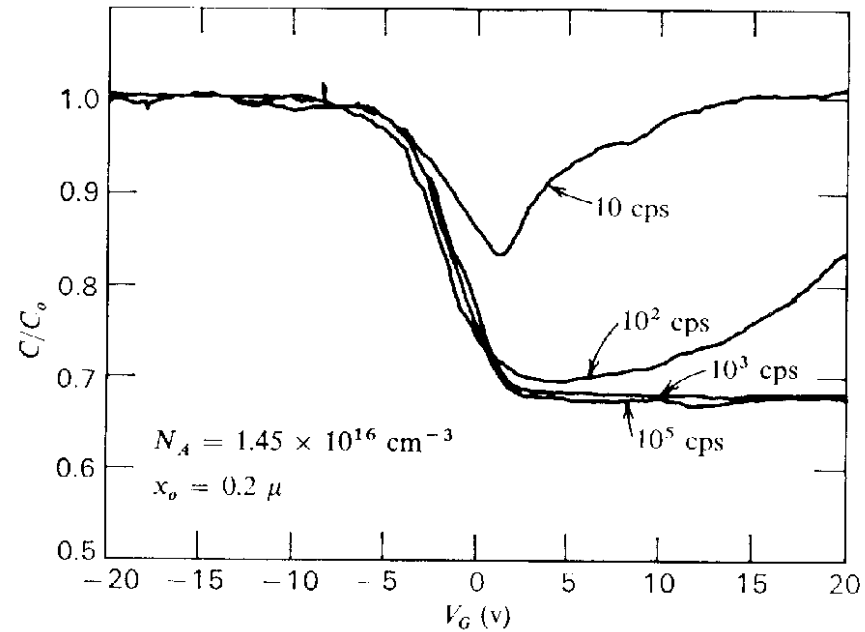
$$x_{\text{dmax}} = 2 \left[\frac{\epsilon_s kT \ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A} \right]^{1/2}$$

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_{dmin} er í F/cm²

Rýmd

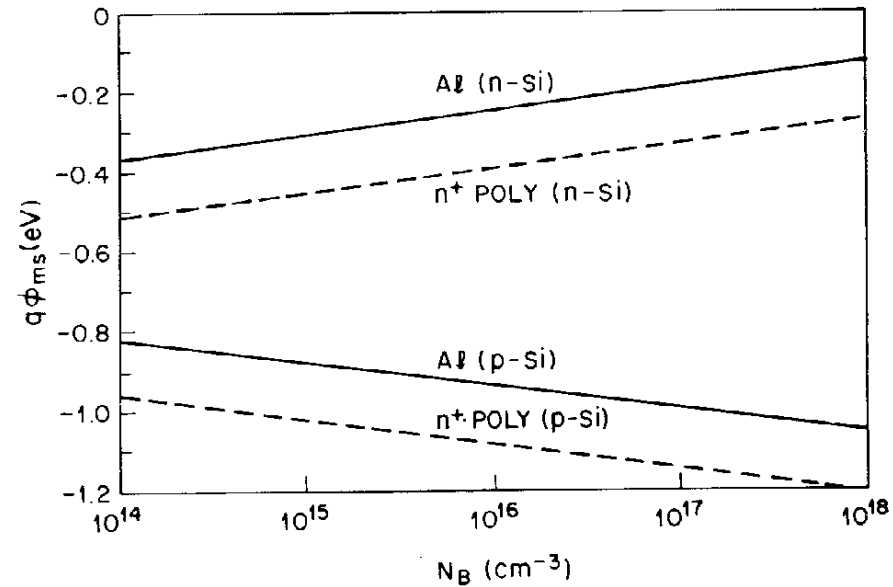


- Áhrif mælitíðni á $C - V$ kennilínu MOS tvists
- Við lágar tíðnir stefnir heildarrýmdin á rýmd oxíðsins þegar umhverfing er alger

SiO₂-Si

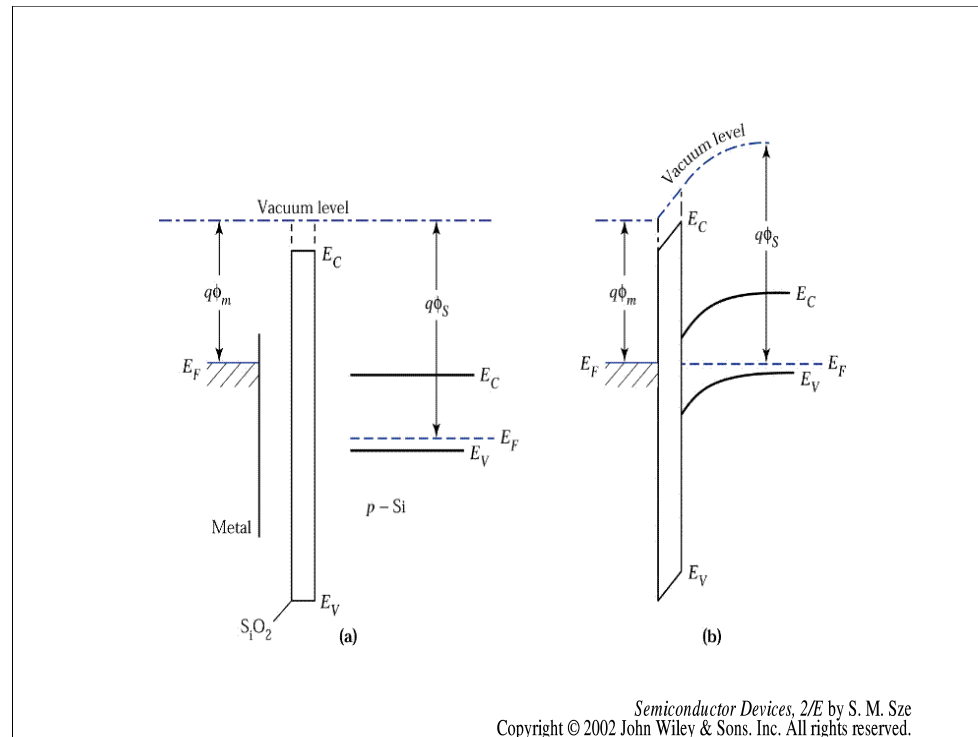
- Mest rannsakaði MOS tvisturinn er sá sem gerður er úr málm-SiO₂-Si
- Raunverulegur MOS tvistur víkur frá kjörtilfellinu:
 - Fyrir algenga máлма er $q\psi_{ms}$ ekki nauðsynlega núll
 - Einnig eru hleðslur á SiO₂ samskeytunum
 - Að auki geta verið hleðslur í oxíðinu

SiO₂-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

SiO₂-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

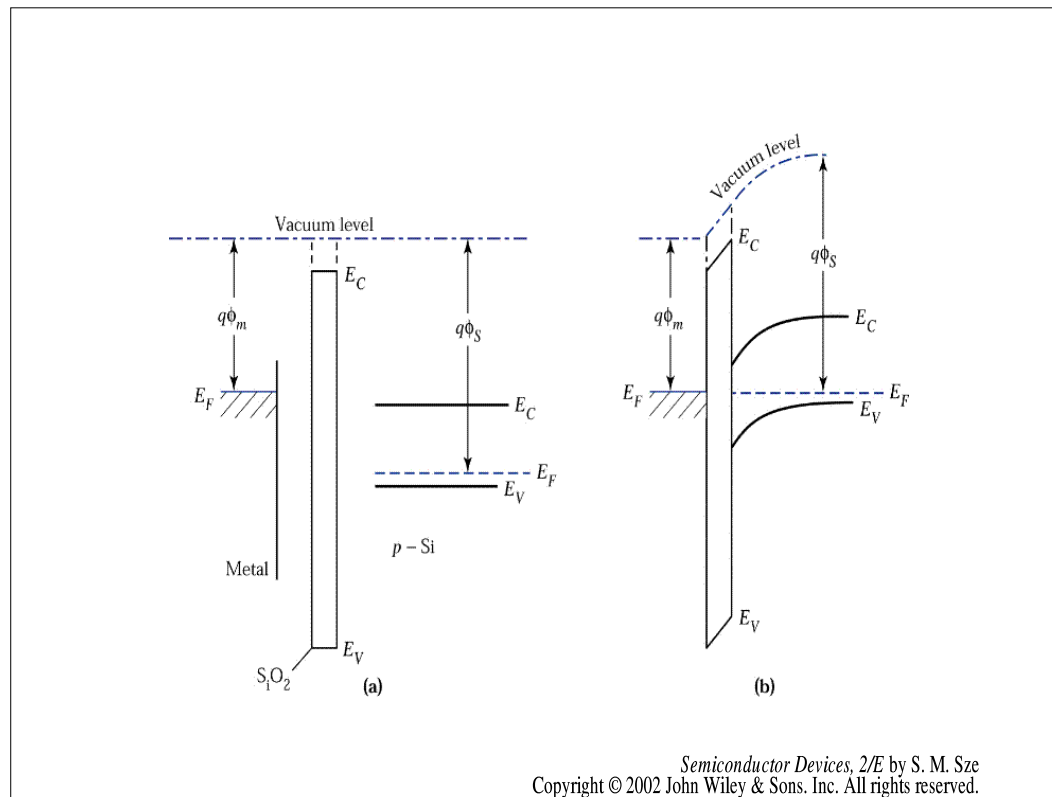
SiO₂-Si

- 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

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

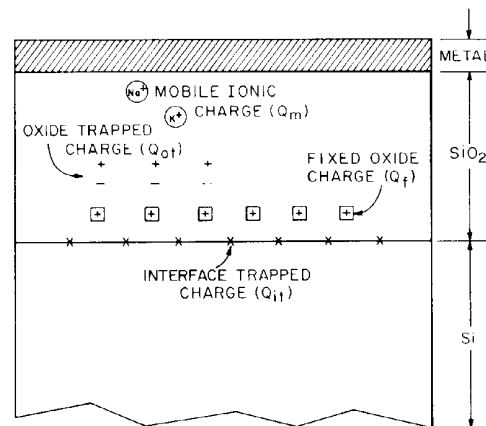
þ.a. leggja verður á neikvæða spennu V_{FB} til að borðarnir verði flatir
($V_{FB} = \phi_{ms}$)

SiO₂-Si



- Málmurinn verður jákvætt hlaðinn og hálfleiðarinn neikvætt hlaðinn við yfirborðið

Skeytagildrur og hleðsla



- Hleðslur í oxíðinu og gildrur (e. traps) við Si/SiO₂ 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/SiO₂ 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} 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/SiO₂ 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⁻² fyrir $\langle 100 \rangle$ yfirborð og 5×10^{10} cm⁻² 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

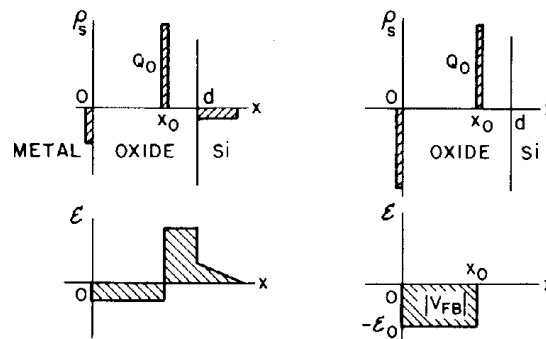
- Hleðsla sem hremmd er af oxíðinu Q_{ot} stafar af veilum í kísiloxíðinu
- Hleðslur þessar má mynda með Röntgengeislun eða háorku rafeindahríð
- Gildirnar eru dreifðar um oxíðlagið
- Megnið af hremmdri hleðslu Q_{ot} má fjarlægja með lághita bökun

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

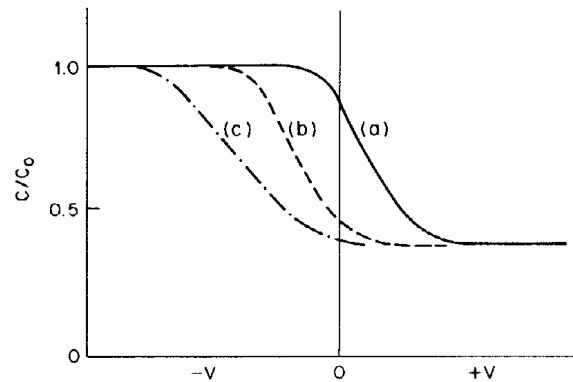
Skeytagildrur og hleðsla

- 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