

**Eðlisfræði þéttefnis I:**

# **Hálfleiðaratól**

## **Kaflí 10**

**Jón Tómas Guðmundsson**

**tumi@hi.is**

**14. vika haust 2017**

# Inngangur

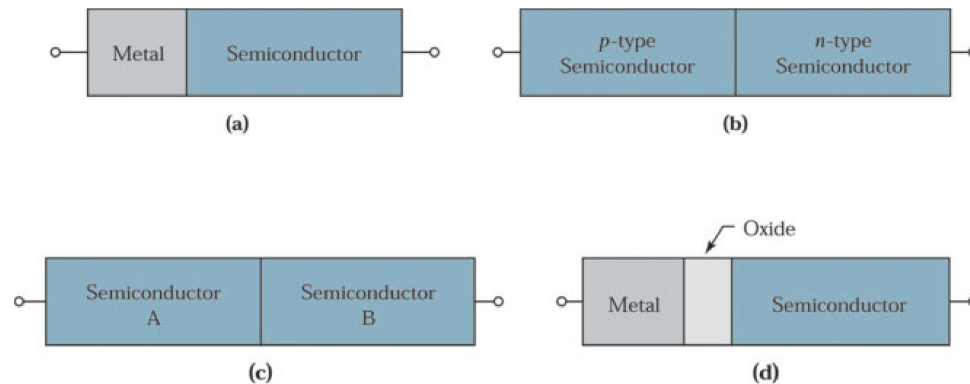


Fig. 2 Basic device building blocks. (a) Metal-semiconductor interface; (b)  $p$ - $n$  junction; (c) heterojunction interface; and (d) metal-oxide-semiconductor structure.

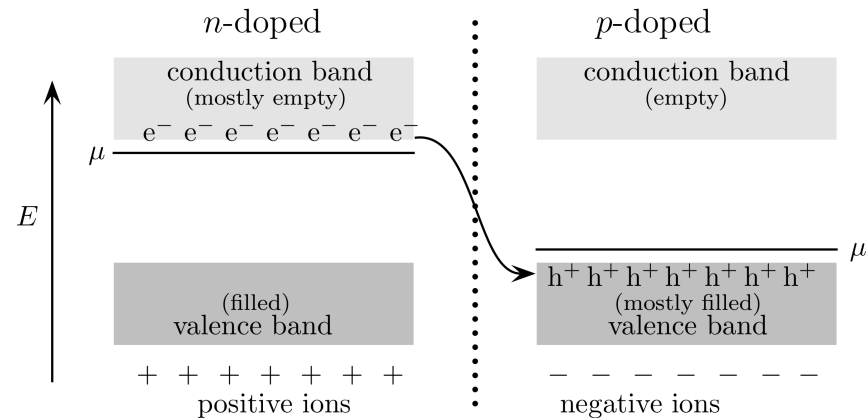
Frá Sze and Lee (2012)

- Flest hálfleiðaratól hafa í það minnsta ein samskeyti milli  $n$ - og  $p$ -leiðandi hálfleiðara
- Eiginleikar þessara  $p$ - $n$ -skeyta eru nýttir í afriðun, mögnun, sem rofar og í aðrar aðgerðir í rafrásum

## Tvistur

- Skoðum nú p-n-skeyti sem eru skörp
- Gerum nú ráð fyrir p- og n-hálfleiðara sem skeytt er saman til að mynda samskeyti
- Áður en þeim er skeytt saman hefur n efnið mikinn þéttleika rafeinda og fáar holur og hið gagnstæða gildir um p-efnið
- Þegar p og n hálfleiðararnir koma saman sveima holur frá p-hálfleiðara til n-hálfleiðara
- Við þetta byggist upp rafsvið yfir skeytin

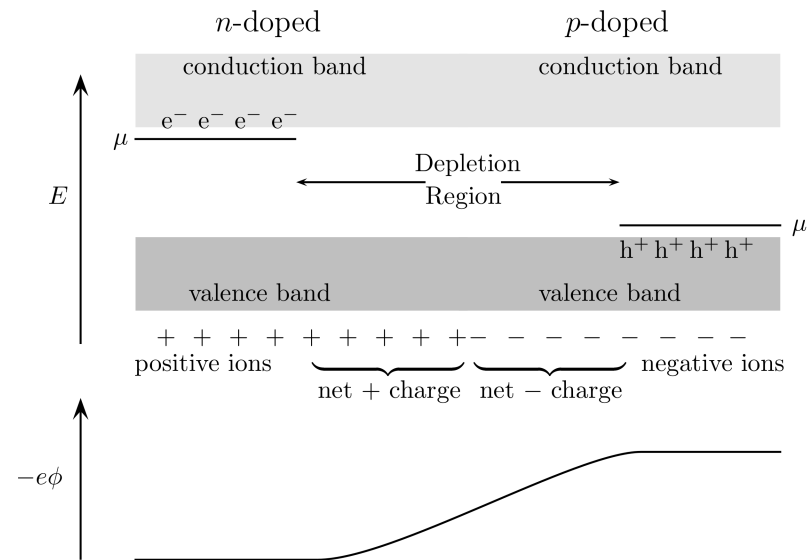
# Tvistur



Frá Simon (2013)

- Efnismætti n-gerðar hálfleiðara er nærri neðri brún leiðniborða og í p-gerð hálfleiðara er það nærri gildisborða
- Þegar hálfleiðurunum er skeytt saman leita rafeindirnar til lægra efnamættis og fylla holurnar (eyða þeim)

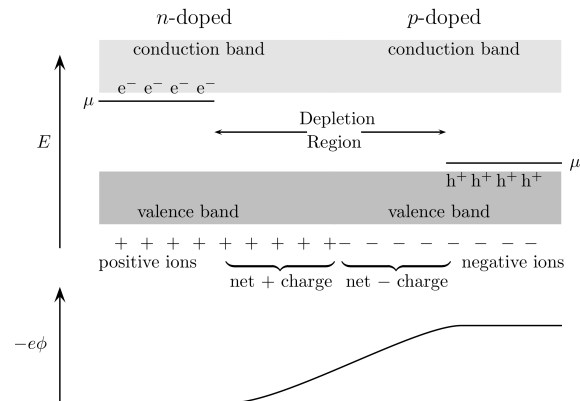
# Tvistur



Frá Simon (2013)

- Rafeindir sem sveima frá  $n$ - til  $p$ -hálfleiðara skilja eftir  $N_D^+$  rafgjafa jónir
- Holur sem sveima frá  $p$ - til  $n$ -hálfleiðara skilja eftir  $N_A^-$  rafþega jónir

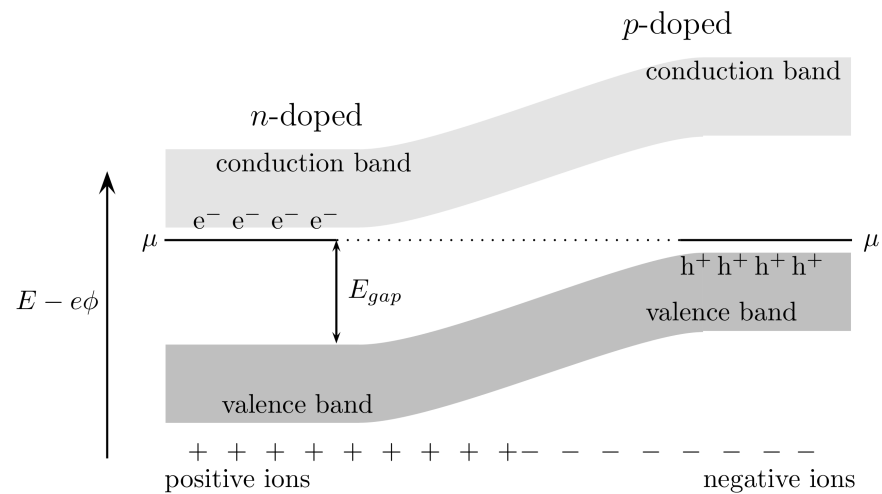
# Tvistur



Frá Simon (2013)

- Þegar rafeindirnar hafa fallið í holur og eytt bæði rafeind og holu, þá situr eftir **berasnautt bil** (e. depletion region) umhverfis samskeytin sem er snautt hleðsluberum
- Þessar jónir leiða til rafsviðs yfir berasnauða bilið
- Stefna rafsviðsins er öfug við straumstefnu hleðslubera

# Tvistur



Frá Simon (2013)

- Borðamynd pn-skeyta án álagðrar spennu

## Tvistur

- Rafsviðið veldur rek straumum sem eru gangstæðir við sveimstrauminn
- Það safnast ekki fyrir rafeindir eða holur á samskeytasvæðinu eða

$$J_p(\text{rek}) + J_p(\text{sveim}) = 0$$

$$J_n(\text{rek}) + J_n(\text{sveim}) = 0$$

- Rafsviðið byggist upp þangað til heildarstraumurinn er núll í jafnvægi
- Rafsviðið myndast á svæði af breidd  $W$  umhverfis skeytin og það myndast spennunur  $V_0$  yfir  $W$
- $V_0$  er kallað **snertimætti**



## Twistor

- Rek og sveim stýttist út í jafnvægi

$$J(x) = q \left[ \mu_p p(x) \mathcal{E}(x) - D_p \frac{dp(x)}{dx} \right] = 0$$

eða

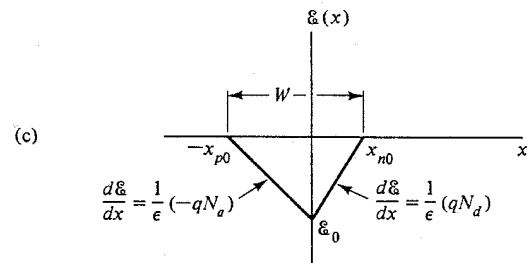
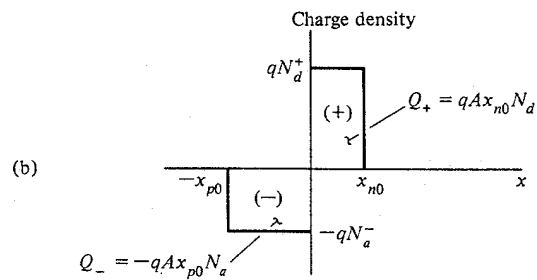
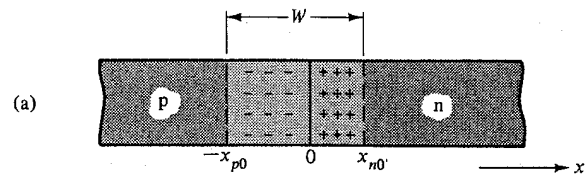
$$\frac{\mu_p}{D_p} \mathcal{E}(x) = \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$

þar sem stefnan á  $x$  er valin frá  $p$  til  $n$ .

- Nú er rafsviðið tengt mættinu með

$$\mathcal{E}(x) = - \frac{dV(x)}{dx}$$

# Twistor



# Twistor

- Með jöfnu Einsteins

$$\frac{\mu_p}{D_p} = \frac{kT}{q}$$

fæst

$$\frac{-q}{kT} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$

- Tegrum

$$\frac{-q}{kT} \int_{V_p}^{V_n} dV = \int_{p_n}^{p_p} \frac{1}{p} dp$$

SVO

$$\frac{-q}{kT} (V_n - V_p) = \ln \left( \frac{p_p}{p_n} \right)$$

## Tvistur

- Umritun gefur

$$V_0 = V_n - V_p = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{p_p}{p_n} \right)$$

þá er

$$\frac{n_n}{n_p} = \frac{p_p}{p_n} = \exp \left( \frac{qV_0}{kT} \right)$$

þar sem  $p_p n_p = n_i^2 = p_n n_n$

## Tvistur

- Í jafnvægi verður Fermiorkan að vera fasti yfir samskeytin í tólinu
- Þar sem  $p_n$  og  $p_p$  eru í varmajafnvægi utan við berasnauðabilið þá má rita

$$\frac{p_p}{p_n} = \exp \left[ \frac{qV_0}{kT} \right] = \frac{N_v \exp \left[ - \left( \frac{E_{Fp} - E_{vp}}{kT} \right) \right]}{N_v \exp \left[ - \left( \frac{E_{Fn} - E_{vn}}{kT} \right) \right]}$$

eða

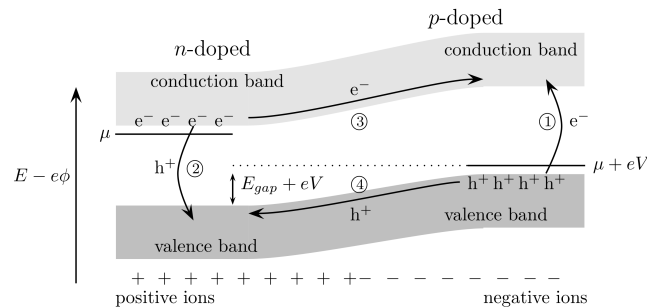
$$\exp \left[ \frac{qV_0}{kT} \right] = \exp \left[ \frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT} \right] \exp \left[ \frac{E_{vp} - E_{vn}}{kT} \right]$$

og þar með

$$qV_0 = E_{vp} - E_{vn}$$

- Hér táknar  $v_p$  gildisborða p-megin samskeyta

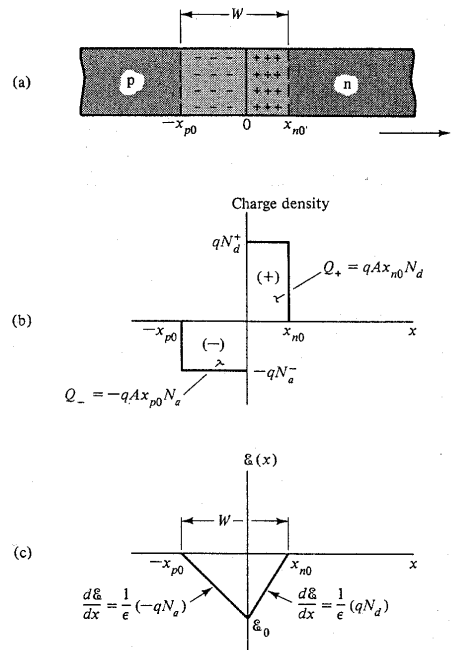
# Tvistur



Frá Simon (2013)

- Orkuborðar sitt hvoru megin skeytanna eru aðskilyldir með snertimættinu  $V_0$
- Þegar spenna er lögð á skeytin hækkar þröskuldsþættið eða lækkar miðað við snertimættið
- Við þetta breytist afstaða Fermiorkustiganna sitt hvoru megin skeytanna sem nemur orku sem jöfn er í eV þeirri spennu sem lögð er á skeytin í voltum

# Tvistur



- Með góðri nálgun getum við sagt að rúmhleðslan í bilinu  $W$  umhverfis samskeytin stafi einungis af  $N_D^+$  og  $N_A^-$  jónum

## Tvistur

- Á umbreytingarsvæðinu sveima rafeindir frá n til p en aðrar reka vegna rafsviðsins frá p til n (og sambærilegt má segja um holur)
- Tvípóllinn sem myndast um skeytin vegna rúmhleðslunnar verður að hafa sömu hleðslu beggja vegna skeytanna  $Q_+ = |Q_-|$
- Þannig getur vegalengdin sem berasnauða-bilið nær inn n- og p-efnið sitt hvoru megin skeytanna verið mislöng
- Fyrir skeyti með þverskurðarflatarmál  $A$  má rita

$$qAx_{p0}N_A = qAx_{n0}N_D$$

þar sem  $x_{p0}$  er stærð berasnauða-bilsins í p-hálfleiðaranum og  $x_{n0}$  er stærð berasnauðabilsins í n-hálfleiðaranum



## Tvistur

- Til að finna rafsviðsdreifinguna yfir berasnauðabilið byrjum við með jöfnu Poisson

$$\frac{d\mathcal{E}(x)}{dx} = \frac{q}{\epsilon}(p - n + N_D^+ - N_A^-)$$

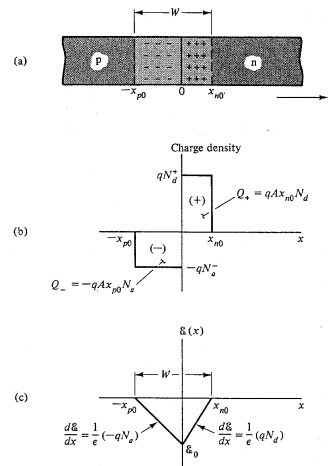
sem tengir stigul í rafsviði við rúmhleðsluna við  $x$

- Jafnan einfaldast þegar gert er ráð fyrir að engir hleðsluberar séu á svæðinu og gert er ráð fyrir fullkominni jónun íbótarinnar  $N_D^+ = N_D$  og  $N_A^- = N_A$

$$\frac{d\mathcal{E}(x)}{dx} = \frac{q}{\epsilon}N_D \quad \text{ef} \quad 0 < x < x_{n0}$$

$$\frac{d\mathcal{E}(x)}{dx} = -\frac{q}{\epsilon}N_A \quad \text{ef} \quad -x_{p0} < x < 0$$

# Tvistur



- Við sjáum að graf af  $\mathcal{E}(x)$  sem fall af  $x$  hefur tvær hallatölur
- Jákvæða (vex með  $x$ ) n megin við skeytin og neikvæða (fellur með  $x$ ) p megin skeytanna
- Rafsviðið tekur lággildi við  $x = 0$
- $\mathcal{E}(x)$  er neikvætt allsstaðar á bilinu

## Twistur

- Við vissum fyrir að  $\mathcal{E}(x)$  var í  $-x$ -stefnu (frá n til p) vegna hleðslustraums
- Minnsta gildið á rafsviðinu er

$$\mathcal{E}_0 = -\frac{q}{\epsilon} N_D x_{n0} = -\frac{q}{\epsilon} N_A x_{p0}$$

- Viljum nú tengja rafsvið og snertispennu  $V_0$
- Vitum

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$$

eða

$$-V_0 = \int_{x_{p0}}^{x_{n0}} \mathcal{E}(x) dx$$

## Tvistur

- Sem gefur

$$V_0 = -\frac{1}{2}\mathcal{E}_0(x)W = \frac{1}{2}\frac{q}{\epsilon}N_D x_{n0}W$$

- Notum  $x_{n0}N_D = x_{p0}N_A$  og að  $W = x_{p0} + x_{n0}$  þ.a.

$$x_{n0} = \frac{WN_A}{N_A + N_D}$$

eða

$$V_0 = \frac{1}{2}\frac{q}{\epsilon}\frac{N_A N_D}{N_A + N_D}W^2$$

sem við leysum fyrir  $W$

$$W = \left[ \frac{2\epsilon V_0}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2}$$

## Tvistur

- Þá er

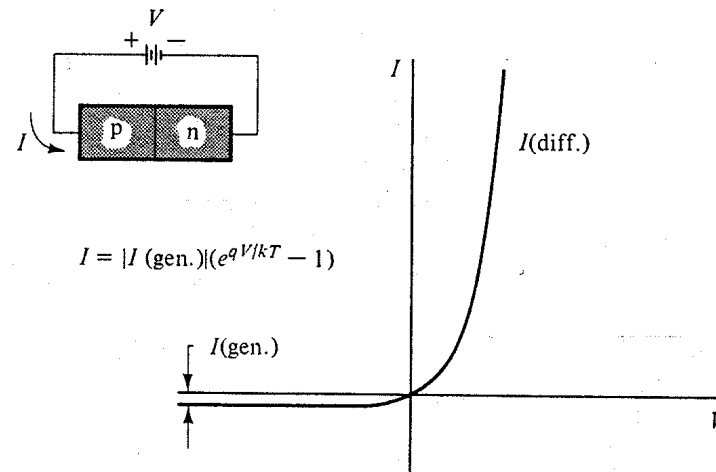
$$x_{p0} = \frac{W N_D}{N_A + N_D} = \frac{W}{1 + N_A/N_D}$$

$$x_{n0} = \frac{W N_A}{N_A + N_D} = \frac{W}{1 + N_D/N_A}$$

- Berasnauðabilið nær lengra inn í létt íbætta efnið
- Ef  $N_A \ll N_D$  þá er  $x_{p0}$  stærra en  $x_{n0}$
- Breidd berasnauða bilsins er í réttu hlutfalli við kvaðratrótina af spennunni yfir skeytin

⇒ Dæmi 10.1.

# Tvistur



- Straumur rennur auðveldlega frá p til n þegar á p er lögð jákvæð spenna með tilliti til n, **framspennt**
- nær engin straumur rennur þegar p er neikvætt með tilliti til n, **bakspennt**
- Álögð spenna fellur að mestu yfir berasnauða bilið

# Tvistur

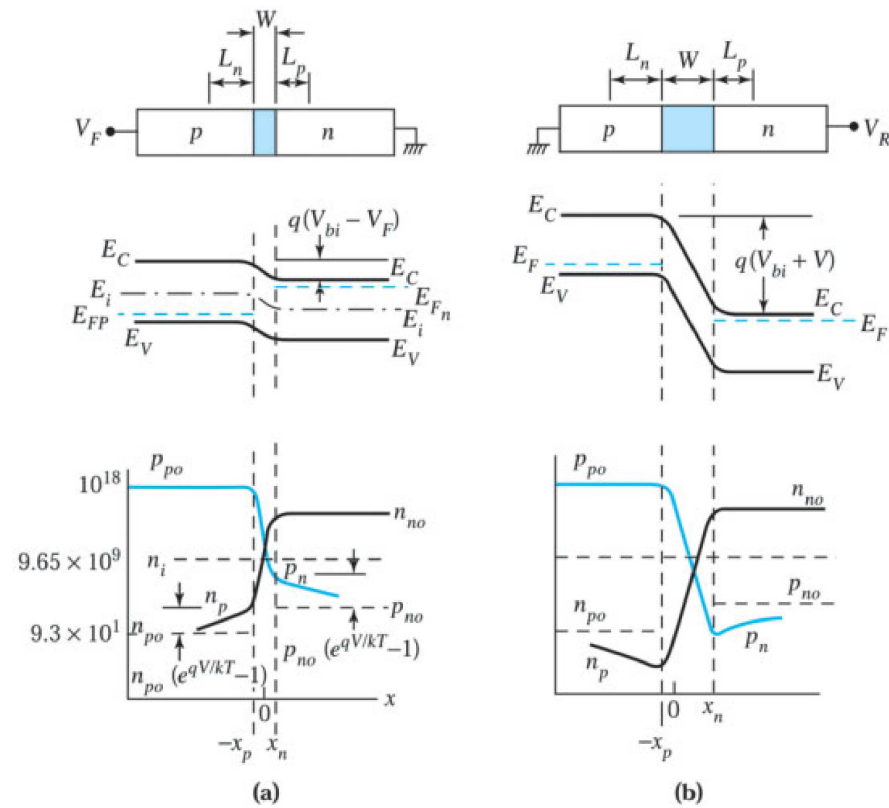


Fig. 14 Depletion region, energy band diagram and carrier distribution. (a) Forward bias. (b) Reverse bias.

Frá Sze and Lee (2012)

# Tvistur

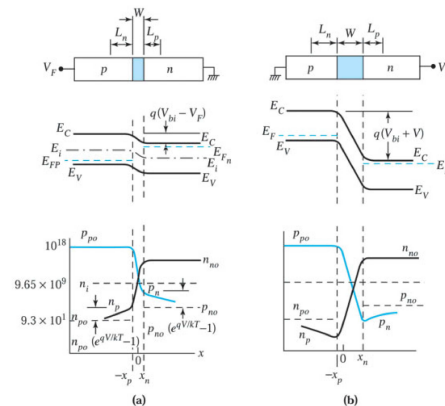


Fig. 14 Depletion region, energy band diagram and carrier distribution. (a) Forward bias. (b) Reverse bias.

- Gerum ráð fyrir álagðri ytri spennu  $V$ , sem er jákvæð þegar jákvæð spenna er á p með tilliti til n
- Mættisþröskuldurinn við samskeytin er lækkaður með framspennu  $V_f$  svo hann verður  $(V_0 - V_f)$
- Við bakspennu  $V_r$  hækkar mættisþröskuldurinn við samskeytin svo hann verður  $(V_0 + V_r)$



## Tvistur – Skeytarýmd

- Það eru tvær gerðir rýmdar á samskeytum n- og p-hálfleiðara
  - **Skeytarýmd** vegna tvípólsins á rúmhleðslusvæðinu
  - Rýmd sem stafar af því að spennan fylgir ekki eftir þegar straumur breytist um skeytin, geymd hleðsla
- Báða þessa rýmdarþætti þarf að taka til greina við hönnun p-n-skeyta
- Auðvelt er að sjá fyrir sér skeytarýmd vegna hleðsludreifingar á rúmhleðslusvæðinu

## Twistor – Skeytarýmd

- Breidd berasnauðabilsins er

$$W = \left[ \frac{2\epsilon(V_0 - V)}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2}$$

- Rýmd er rituð

$$C = \left| \frac{dQ}{dV} \right|$$

þar sem hleðslan  $Q$  ræðst af breidd berasnauðabilsins.

$$|Q| = qAx_{n0}N_D = qAx_{p0}N_A$$

eða

$$|Q| = A \left[ 2q\epsilon(V_0 - V) \frac{N_D N_A}{N_A + N_D} \right]^{1/2}$$

## Tvistur – Skeytarýmd

- Rýmdin er því spennuháð

$$C = \frac{A}{2} \left[ \frac{2q\epsilon}{(V_0 - V)} \frac{N_D N_A}{N_A + N_D} \right]^{1/2}$$

eða

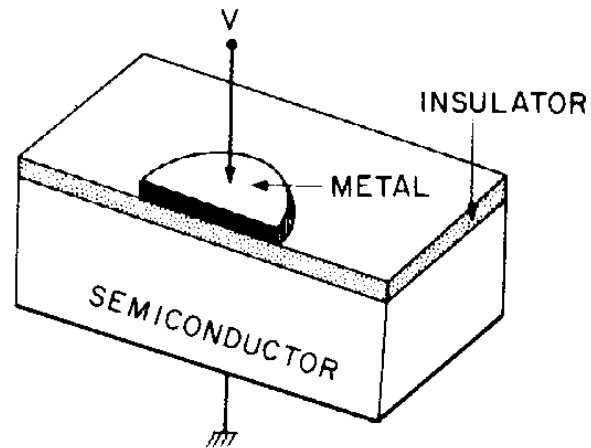
$$C \propto (V_0 - V)^{-1/2}$$

- Við sjáum einnig að ef  $N_A \gg N_D$  og  $x_{n0} \approx W$  þegar  $x_{p0}$  er óvera þá er

$$C = \frac{A}{2} \left[ \frac{2q\epsilon}{(V_0 - V)} N_D \right]^{1/2}$$

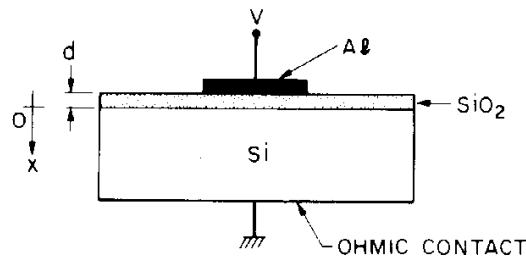
- Það má því finna íbótarþéttleikann í n-efninu, sem er minna íbætt, með því að mæla rýmd

## Málmur-oxíð-hálfleiðari (MOS)



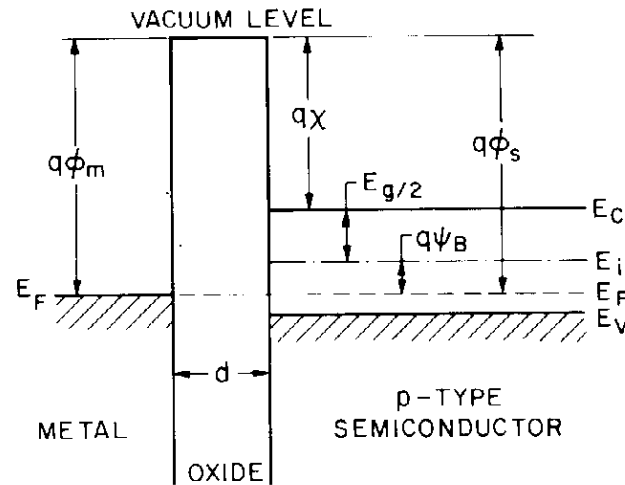
- Samloka málms, oxíðs og hálfleiðara gegnir afar mikilvægu hlutverki í nútíma rafeindatækni
- Þetta tól er nefnt MOS-tvistur (e. MOS-diode)
- Í raun má líta á samlokuna sem plötubétti þar sem önnur platan er málmur og hin hálfleiðari

## Málmur-oxíð-hálfleiðari (MOS)



- 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 (MOS)



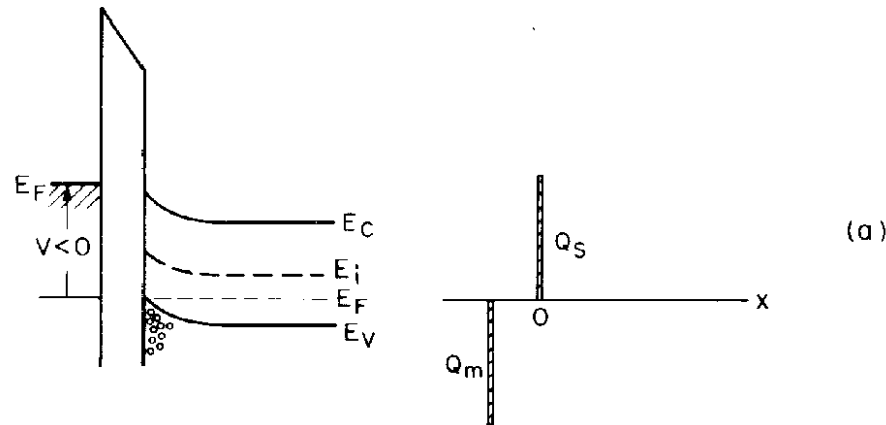
- Orkuborðamynd af MOS kjörtvisti við  $V = 0$
- MOS kjörtvistur er skilgreindur þ.a. við  $V = 0$  er orkumunur vinnufalls málmsins  $q\phi_m$  og hálfleiðarans  $q\phi_s$ , núll, skilgreint

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

## Málmur-oxíð-hálfleiðari (MOS)

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

## MOS – 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



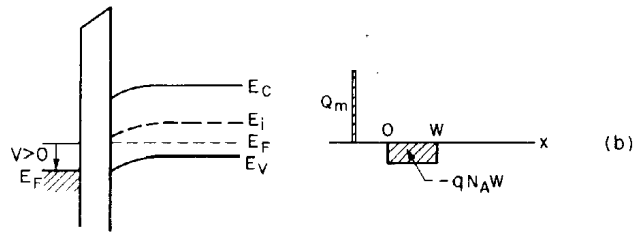
## MOS – Neikvæð álögð spenna ( $V < 0$ )

- Hleðsluberáþéttleiki 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  $|Q_m| = Q_s$

## MOS – Jákvæð álögð spenna ( $V > 0$ )

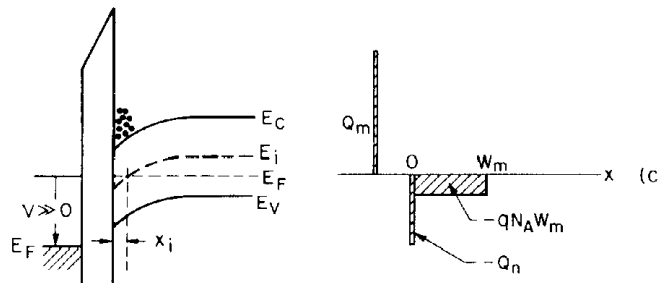


- Þegar lág jákvæð spennan er lögð á málminn ( $V > 0$ ) þá bogna borðarnir við yfirborð hálfleiðarans niður á við og fjöldi ríkjandi bera, hola, við samskeyti oxíðs og hálfleiðara er skertur
- Holum er ýtt frá samskeytunum, sem skilja þá eftir berasnautt bil þar sem eftir standa jónaðir rafþegar
- Rúmhleðsla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

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

þar sem  $x_d$  er breiddin á berasnauðabilinu

## MOS – 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

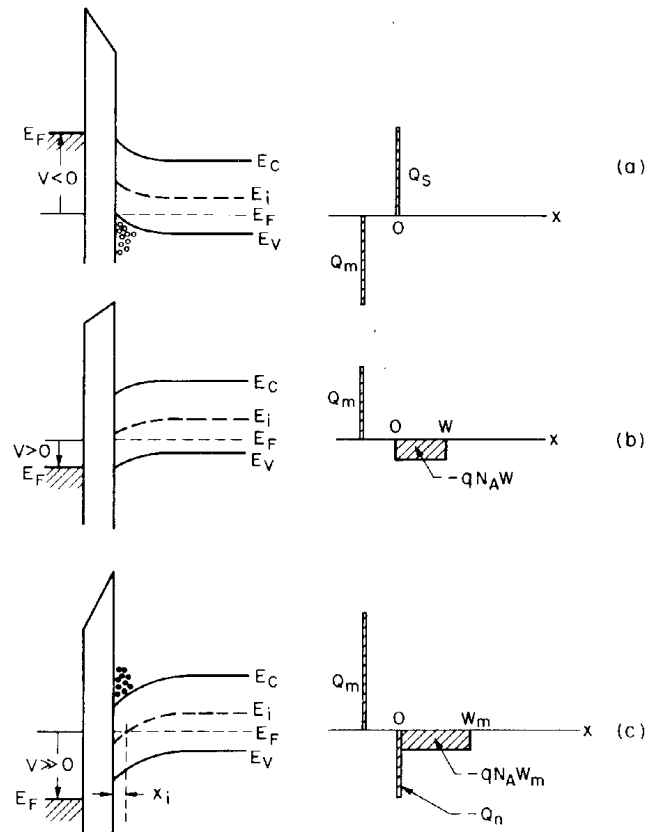
$$n_p = n_i \exp [(E_F - E_i)/kT]$$

- 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  $n_i$

## MOS – 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 rafeindapéttleikinn 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

# Málmur-oxíð-hálfleiðari (MOS)



## MOS – 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

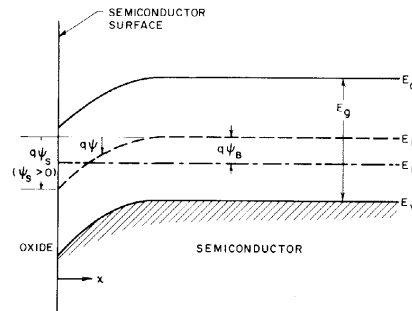
$$Q_s = Q_n + Q_{sc}$$

þar sem

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

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

# MOS – 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

## MOS – 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)

$\psi_s = 0$             Flaturlag borði

$\psi_b > \psi_s > 0$     Holurýrnun

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

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



## MOS – 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

$$\rho_s = -qN_A$$

## MOS – 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  $\psi_s > \psi_b$

## MOS – Berasnautt bil við yfirborð

- Þegar alger umhverfing hefst gerum við ráð fyrir að rafeindapéttleiki við yfirborið 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

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

## MOS – Berasnautt bil við yfirborð

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

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

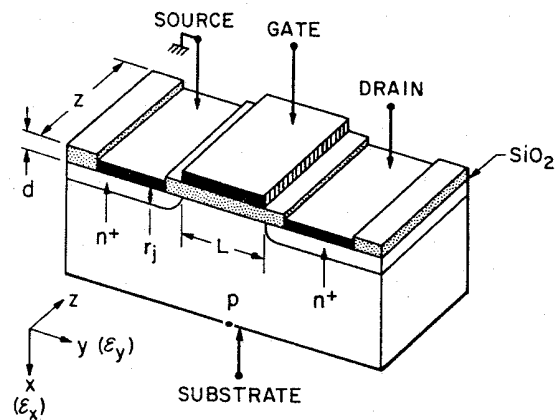
eða

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

- Þar með er

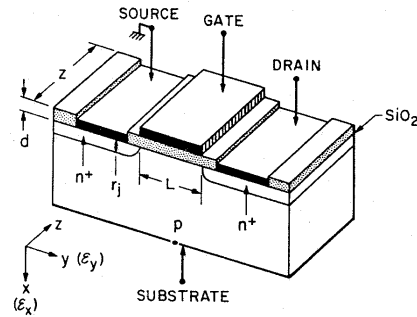
$$Q_{\text{sc}} = -qN_A x_{\text{dmax}} \approx \sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\psi_b)}$$

# MOSFET



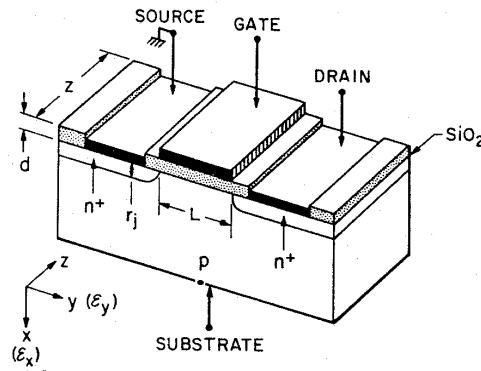
- MOSFET (e. Metal-oxide semiconductor field effect transistor) er mikilvægasta tólið í örtölvum og minnisrásum
- MOSFET hefur orðið almenna merkingu og flestir nútíma MOSFET hafa ekki gátt úr málm heldur fjölkristölluðum kísli
- Þeir hafa stundum verið nefndir IGFET (e. Insulated gate field effect transistor)

# MOSFET



- MOSFET hefur fjóra tengipunkta
- Hann er byggður á  $p$ -leiðandi undirlagi (fyrir  $n$ -rása tól) sem í eru mynduð tvö  $n^+$  svæði, **lind** og **svelgur**
- Málmskautið ofan í oxíðinu er kallað **gátt**
- Gáttarskautið má einnig gera úr fjölkristölluðum kísli sem þá er mikið íbættur
- Fjórða tengið eru ohmsk skeyti við undirlagið

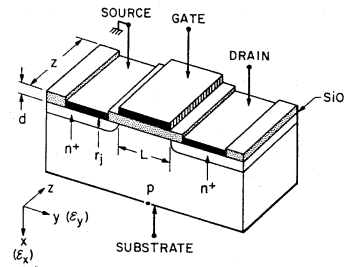
# MOSFET



- Helstu kennistærðir MOSFET

- Rásalengdin,  $L$ , sem er fjarlægðin milli  $n^+$  –  $p$ –skeytanna tveggja
- Vídd rásar,  $Z$
- Þykkt oxíðlagsins,  $d$
- Dýpt samskeytanna,  $r_j$
- Íbótarþéttleiki undirlags,  $N_A$

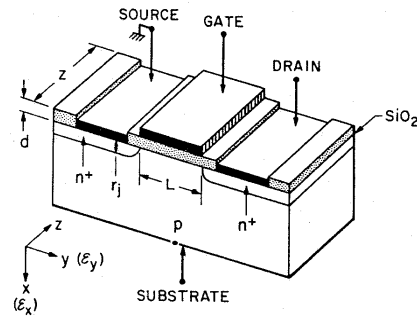
# MOSFET



- Þegar engin spenna er lögð á gáttina þá samsvara lind og svelgur tveimur  $p - n$ -skeytum sem snúa bökum saman. Þá rennur þar aðeins lítil mettnarstraumur
- Þegar nægilega há jákvæð spenna er lögð á gáttina, umhverfist svæðið neðan við oxíðlagið (rásin) á milli tveggja háibættu  $n^+$ -svæðanna
- Þar með eru lind og svelgur tengd með leiðandi braut
- Leiðni rásarinnar stjórnast af spennunni sem lögð er á gáttina

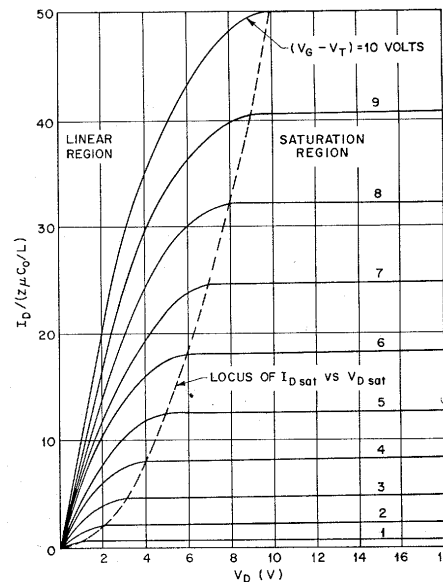


# MOSFET



- Þröskuldsspennan  $V_T$  er minnsta gáttarspenna sem þarf til að rásin leiði
- Venjulega leiðir rásin ekki þegar engin spenna er lögð á gátt og fer að leiða þegar nægilega há spenna er lögð á, **hvatfeti** (enhancement-type, normally off)
- Í sumum tilfellum er rásin leiðandi við enga álagða spennu. Ef við höfum  $n$ -rásar tól þá þarf í því tilfalli neikvæða gáttarspennu til að loka rásinni, **latfeti** (depletion-type, normally on)

# MOSFET – $I_D$ – $V_D$ kennilína



- Fyrir gefna gáttarspennu  $V_G$  vex svelgstraumurinn fyrst línulega með aukinni svelgspennu (línulega svæðið) en fellur síðan í mettun
- Brotalínan táknar leg svelgspennunar  $V_{Dsat}$  þar sem straumurinn nær hágildi sínu

## Frekari upplýsingar

Um helstu hálfleiðaratól er fjallað í kafla 18 hjá Simon (2013). Fjallað er um pn-skeyti í kafla 3 hjá Sze and Lee (2012) og kafla 4 hjá Hu (2010) og um MOS og MOSFET í kafla 5 hjá Sze and Lee (2012) og köflum 5 og 6 hjá Hu (2010).

## Heimildir

Hu, C. C. (2010). *Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Simon, S. H. (2013). *The Oxford Solid State Basics*. Oxford: Oxford University Press.

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