Rafeindatækni fastra efna:

Tvistar

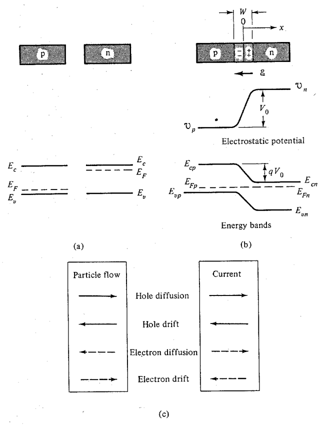
Kafli 11

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

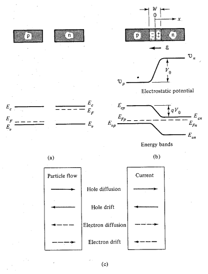
13. nóvember 2000

Samskeyti



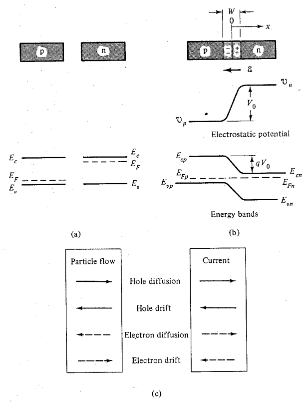
- Skoðum nú p-n-skeyti sem eru skörp
- Gerum nú ráð fyrir p- og n-hálfleiðara sem skeytt er saman til að mynda samskeyti
- Áður en þeim er skeytt saman hefur n efnið mikinn þéttleika rafeinda og fáar holur og hið gagnstæða gildir um p-efnið.

Samskeyti



- Þegar p og n hálfleiðararnir koma saman sveima holur frá p-hálfleiðara til n-hálfleiðara.
- Við þetta byggist upp rafsvið yfir skeytin
- 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
- Stefna rafsviðsins er því öfug við straumstefnu hleðslubera

Samskeyti



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

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

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

Samskeyti

- Rafsviðið byggist upp þangað til heildarstraumurinn er núll í jafnvægi
- Rafsviðið myndast á svæði af breidd W umhverfis skeytin og það myndast spennumunur V_0 yfir W
- V_0 er kallað **snertimætti**
- Rek og sveim styttist út í jafnvægi

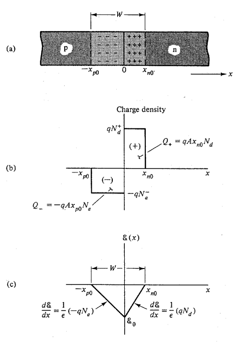
$$J(x) = q\left[\mu_{\mathrm{p}} p(x)\mathcal{E}(x) - D_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}p(x)}{\mathrm{d}x}\right] = 0$$

eða

$$\frac{\mu_{\mathrm{p}}}{D_{\mathrm{p}}}\mathcal{E}(x) = \frac{1}{p(x)}\frac{\mathrm{d}p(x)}{\mathrm{d}x}$$

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

Samskeyti



- Nú er rafsviðið tengt mættinu með

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{\mathrm{d}V(x)}{\mathrm{d}x}$$

svo með jöfnu Einsteins

$$\frac{\mu_{\mathrm{p}}}{D_{\mathrm{p}}} = \frac{kT}{q}$$

fæst

$$\frac{-q}{kT}\frac{\mathrm{d}V(x)}{\mathrm{d}x} = \frac{1}{p(x)}\frac{\mathrm{d}p(x)}{\mathrm{d}x}$$

Samskeyti

- Tegrum

$$\frac{-q}{kT}\int_{V_{\mathrm{p}}}^{V_{\mathrm{n}}}\mathrm{d}V = \int_{p_{\mathrm{n}}}^{p_{\mathrm{p}}}\frac{1}{p}\mathrm{d}p$$

svo

$$\frac{-q}{kT}(V_{\mathrm{n}} - V_{\mathrm{p}}) = \ln\left(\frac{p_{\mathrm{p}}}{p_{\mathrm{n}}}\right)$$

og

$$V_0 = V_{\mathrm{n}} - V_{\mathrm{p}} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{p_{\mathrm{p}}}{p_{\mathrm{n}}}\right)$$

þá er

$$\frac{n_{\mathrm{n}}}{n_{\mathrm{p}}} = \frac{p_{\mathrm{p}}}{p_{\mathrm{n}}} = \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right)$$

þar sem $p_{\mathrm{p}}n_{\mathrm{p}} = n_{\mathrm{i}}^2 = p_{\mathrm{n}}n_{\mathrm{n}}$

$\Longrightarrow$ Dæmi 11.1.

Samskeyti

- 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

$$\frac{p_{\mathrm{p}}}{p_{\mathrm{n}}} = \exp\left[\frac{qV_0}{kT}\right] = \frac{N_{\mathrm{v}}\exp\left[-\left(\frac{E_{\mathrm{Fp}}-E_{\mathrm{vp}}}{kT}\right)\right]}{N_{\mathrm{v}}\exp\left[-\left(\frac{E_{\mathrm{Fn}}-E_{\mathrm{vn}}}{kT}\right)\right]}$$

eða

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

og þar með

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

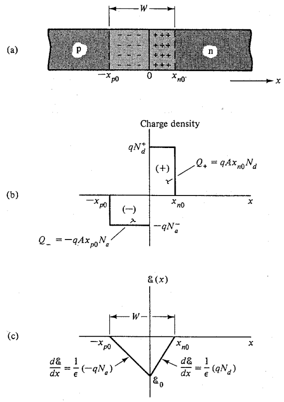
- Hér táknar vp gildisborða p-megin samskeyta

Samskeyti

- Orkuborðar sitt hvoru megin skeytanna eru aðskyldir með snertimættinu V_0
- Þegar spenna er lögð á skeytin hækkar þröskuldsmættið 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

$\Longrightarrow$ Dæmi 11.2.

Samskeyti



- Með góðri nálgun getum við sagt að rúmhleðslan í bilinu W umhverfis samskeytin stafi einungis af N_D^+ og N_A^- jónum
- Það er því svæði snautt hleðsluberum umhverfis skeytin, **bera-snauða-bilið**

Samskeyti

- Á umbreytingarsvæðinu sveima rafeindir frá n til p en aðrar reka vegna rafsviðsins frá p til n (og sambærilegt má segja um holur)
- Á umbreytingasvæðinu eru alltént mjög fáir hleðsluberar á hverjum tíma
- 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

$$qAx_{\mathrm{p0}}N_\mathrm{A} = qAx_{\mathrm{n0}}N_\mathrm{D}$$

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

Samskeyti

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

$$\frac{\mathrm{d}\mathcal{E}(x)}{\mathrm{d}x} = \frac{q}{\epsilon}(p - n + N_\mathrm{D}^+ - N_\mathrm{A}^-)$$

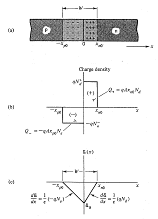
sem tengir stigul í rafsviði við rúmhleðsluna við x

- Jafnan einfaldast þegar gert er ráð fyrir að engir hleðsluberar séu á svæðinu og gert er ráð fyrir fullkominni jónun íbótarinnar $N_\mathrm{D}^+ = N_\mathrm{D}$ og $N_\mathrm{A}^- = N_\mathrm{A}$

$$\frac{\mathrm{d}\mathcal{E}(x)}{\mathrm{d}x} = \frac{q}{\epsilon}N_\mathrm{D} \qquad \text{ef} \quad 0 < x < x_{\mathrm{n0}}$$

$$\frac{\mathrm{d}\mathcal{E}(x)}{\mathrm{d}x} = -\frac{q}{\epsilon}N_\mathrm{A} \qquad \text{ef} \quad -x_{\mathrm{p0}} < x < 0$$

Samskeyti



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

$$\mathcal{E}_0 = -\frac{q}{\epsilon} N_{\mathrm{D}} x_{\mathrm{n}0} = -\frac{q}{\epsilon} N_{\mathrm{A}} x_{\mathrm{p}0}$$

Samskeyti

- Viljum nú tengja rafsvið og snertispennu V_0
- Vitum

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{\mathrm{d}V(x)}{\mathrm{d}x}$$

eða

$$-V_0 = \int_{x_{\mathrm{p}0}}^{x_{\mathrm{n}0}} \mathcal{E}(x)\mathrm{d}x$$

eða

$$V_0 = -\frac{1}{2}\mathcal{E}_0(x)W = \frac{1}{2}\frac{q}{\epsilon} N_{\mathrm{D}} x_{\mathrm{n}0} W$$

- Notum $x_{\mathrm{n}0} N_{\mathrm{D}} = x_{\mathrm{p}0} N_{\mathrm{A}}$ og að $W = x_{\mathrm{p}0} + x_{\mathrm{n}0}$ þ.a.

$$x_{\mathrm{n}0} = \frac{W N_{\mathrm{A}}}{N_{\mathrm{A}} + N_{\mathrm{D}}}$$

eða

$$V_0 = \frac{1}{2}\frac{q}{\epsilon}\frac{N_{\mathrm{A}} N_{\mathrm{D}}}{N_{\mathrm{A}} + N_{\mathrm{D}}} W^2$$

sem við leysum fyrir W

$$W = \left[\frac{2\epsilon V_0}{q}\left(\frac{1}{N_{\mathrm{A}}} + \frac{1}{N_{\mathrm{D}}}\right)\right]^{1/2}$$

Samskeyti

- Þá er

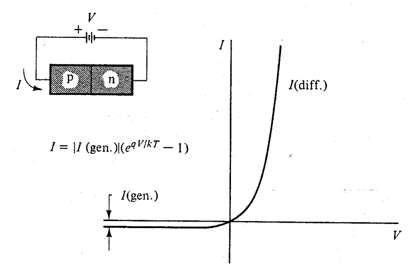
$$x_{\mathrm{p}0} = \frac{W N_{\mathrm{D}}}{N_{\mathrm{A}} + N_{\mathrm{D}}} = \frac{W}{1 + N_{\mathrm{A}}/N_{\mathrm{D}}}$$

$$x_{\mathrm{n}0} = \frac{W N_{\mathrm{A}}}{N_{\mathrm{A}} + N_{\mathrm{D}}} = \frac{W}{1 + N_{\mathrm{D}}/N_{\mathrm{A}}}$$

- Berasnauðabilið nær lengra inn í létt íbætta efnið
- Ef $N_{\mathrm{A}} \ll N_{\mathrm{D}}$ þá er $x_{\mathrm{p}0}$ stærra en $x_{\mathrm{n}0}$
- Breidd berasnauða bilsins er í réttu hlutfalli við kvaðratrótina af spennunni yfir skeytin

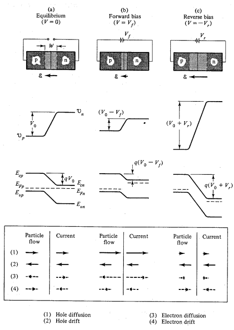
$\Longrightarrow$ Dæmi 11.3.

Samskeyti



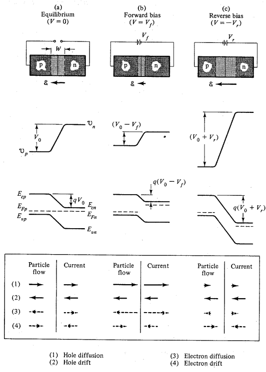
- Straumur rennur auðveldlega frá p til n þegar á p er lögð jákvæð spenna með tilliti til n, **framspennt**
- nær engin straumur rennur þegar p er neikvætt með tilliti til n, **bakspennt**
- Álögð spenna fellur að mestu yfir berasnauða bilið

Samskeyti



- 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 $(V_0 - V_\mathrm{f})$
- Við bakspennu V_r hækkar mættisþröskuldurinn við samskeytin svo hann verður $(V_0 + V_\mathrm{r})$

Samskeyti



- Rafsviðið yfir skeytin lækkar við framspennu þar sem álagt svið er gagnstætt innra rafsviði
- Rafsviðið yfir skeytin hækkar við bakspennu þar sem álagt svið er samsíða innra rafsviði
- Breyting á rafsviði á samskeytum kallar á breytingu á vídd berasnauðabilsins

Samskeyti

- Sveimstraumur samanstendur af ríkjandi hleðsluberum, n-megin rafeindum, sem yfirvinna mættisþröskuldinn og sveima yfir í p-efnið
- Á sama hátt sveima holur frá p-efni til n-efnis
- Við framspennt skeyti er þessi þröskuldur lækkaður í $(V_0 - V_\mathrm{f})$ og fleiri rafeindir n-megin skeytanna hafa næga orku til að sveima yfir þröskuldinn
- Við bakspennu hækkar þröskuldurinn og verður það hár $(V_0 + V_\mathrm{r})$ að nær engar rafeindir n-megin eða hour p-megin hafa næga orku til að komast yfir
- Þess vegna eru óverulegir sveimstraumar um bakspennt skeyti

Samskeyti

- Rekstraumur er tiltölulega óháður hæð þröskuldsins og rek rafeinda og hola þess vegna nær óháð álagðri spennu
- Fjöldi víkjandi bera takmarkar rekstrauminn sem ræðst því af framköllun víkjandi bera nálægt skeytunum til að fæða strauminn
- Heildarstraumurinn sem fer um skeytin er summa sveim- og rekstraums
- Við bakspennu eru sveimstraumar óverulegir og aðeins örlítill straumur fer um skeytin vegna myndunar rafeinda-holupara í eða við berasnauðabilið

Samskeyti

- Framspenna $V = V_\mathrm{f}$ eykur líkur á að hleðsluberi geti sveimað um skeytin og því verður straumur um skeytin jafnvægisgildið margfaldað með $\exp(qV_\mathrm{f}/kT)$
- Við óspennt skeyti er sveimstraumurinn jafnstór myndunarstraumnum að tölugildi $|I(\text{sveim})| = |I(\text{myndun})|$
- Við framspennt skeyti verður sveimstraumurinn $|I(\text{myndun})| \exp(qV_\mathrm{f}/kT)$
- Heildarstraumurinn er þá sveimstraumurinn að frádregnu tölugildi myndunarstraumsins $|I(\text{myndun})|$ sem við köllum I_0 og þar með

$$I = I_0(\exp(qV_\mathrm{f}/kT) - 1)$$

sem nefnd er **tvistjafnan**

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

Skeytarýmd

- Breidd berasnauðabilsins er

$$W = \left[\frac{2\epsilon(V_0 - V)}{q}\left(\frac{1}{N_\mathrm{A}} + \frac{1}{N_\mathrm{D}}\right)\right]^{1/2}$$

- Rýmd er rituð

$$C = \left|\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}V}\right|$$

þar sem hleðslan Q ræðst af breidd berasnauðabilsins.

$$|Q| = qAx_\mathrm{n0}N_\mathrm{D} = qAx_\mathrm{p0}N_\mathrm{A}$$

eða

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

og rýmdin því spennuháð

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

eða

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

Skeytarýmd

- Við sjáum einnig að ef $N_\mathrm{A} \gg N_\mathrm{D}$ og $x_\mathrm{n0} \approx W$ þegar x_p0 er óvera þá er

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

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

$\Longrightarrow$ Dæmi 11.4.

Heimildir

[1] S. M. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, John Wiley & Sons, 1985

[2] B. G. Streetman, *Solid State Electronics*, Prentice-Hall, 1980

[3] G. W. Neuseck, *The PN junction diode, Modular series on solid state devices, volume II*, Addison-Wesley, 1983