Rafeindatækni fastra efna:

Samskeyti málms og hálfleiðara

Kafli 14

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

23. nóvember 2000

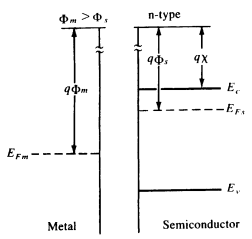
Samskeyti málms og hálfleiðara

- Afriðandi punktsnerta milli málms og hálfleiðara var uppgötvuð 1874 og í yfir 100 ár hafa slíkar snertur verið notaðar til afriðunar og í geisla- og ljósnema
- Málmsnertur gengdu einnig innspýtingar- og gleypnihlutverki í fyrstu smárunum
- Þegar síðan framleiðsla pn-skeyta varð möguleg varð mikilvægi málm-hálfleiðarasnerta fyrst og fremst sem óafriðandi skeyti, svonefnd Ohmsk tengi, sem bera straum að og frá pn-samskeyta tólum
- Það að skeyti séu Ohmsk, þarf ekki nauðsynlega að þýða að straum-spennu kennilína þeirra sé línuleg

Schottky þröskuldur

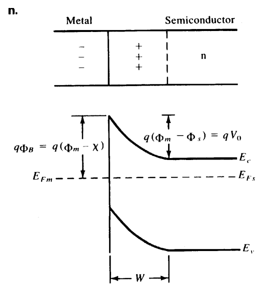
- Þegar málminum er skeytt við hálfleiðarann getur myndast á samskeytunum svæði sem snautt er hleðsluberum og er það nefnt **Schottky þröskuldur**
- Berar streyma frá annarri einingunni yfir í hina
- Afleiðingin er að svið myndast og orkuborðar bogna við skeytin
- Augljóst er að vegna þessa myndast þunnt lag rúmhleðslu með andstæða skautun í málminum næst samskeytunum, þannig að hleðslujafnvægi er varðveitt yfir samskeytin
- Skeyti þar sem berasnautt bil myndast innan hálfleiðarans svipar til pn-skeyta tveggja hálfleiðandi búta

Schottky þröskuldur



- Vinnfall málms í lofttæmi er $q\phi_{\mathrm{m}}$
- Orkuna $q\phi_{\mathrm{m}}$ þarf því til að fjarlægja eina rafeind við Fermiorku út í lofttæmið utan við málminn
- Dæmigerð gildi á ϕ_{m} fyrir hrein yfirborð eru
  - Al 4.3 eV
  - Au 4.8 eV

Schottky þröskuldur



- Þegar málmur sem hefur vinnufall $q\phi_{\mathrm{m}}$ snertir hafleiðara með vinnufall $q\phi_{\mathrm{s}}$, verður flutningur á hleðslu þar til Fermiáströndin standast á í jafnvægi
- Til dæmis ef $\phi_{\mathrm{m}} > \phi_{\mathrm{s}}$ þá er Fermiorkustig hálfleiðarans hærra en málmsins áður en þeir snertast
- Til að fá Fermiáströndin til að standast á verður að hækka rafstöðumætti hálfleiðarans (þ. e. lækka verður orku rafeindanna) með tilliti til málmsins

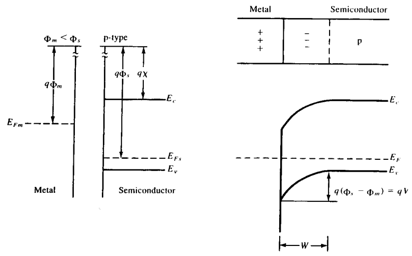
Schottky þröskuldur

- Fyrir n-gerð af hálfleiðara streyma rafeindir yfir í málminn þar til Fermiástönd standast á og bera-snautt-bil W myndast næst samskeytunum
- Hleðsla jákvætt hlöðnu rafgjafajónanna á bera-snauða-bilinu samsvarar þá neikvæðri hleðslu málmsins
- Rafsvið og borðabognun verður á samskeytunum
- Snertimættið V_0, sem hindrar frekara sveim rafeinda úr leiðniborða hálfleiðarans inn í málminn, er gefið með mismun í vinnuföllum málms og hálfleiðara $\phi_{\mathrm{m}} - \phi_{\mathrm{s}}$
- Mættisþröskuldurinn ϕ_{b} er

$$\phi_{\mathrm{b}} = \phi_{\mathrm{m}} - \chi$$

þar sem $q\chi$ er **rafeindasækni** (e. electron affinity) hálfleiðarans og er mæld frá lofttæmi inn að leiðniborða hálfleiðara

Schottky þröskuldur

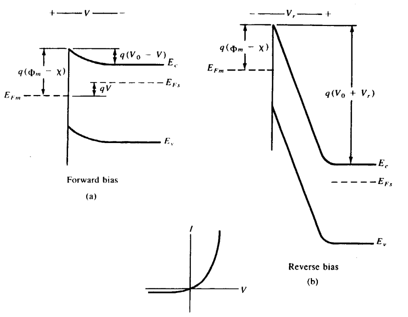


- Að ofan er Schottky þröskuldur fyrir p-gerð af hálfleiðara með $\phi_{\mathrm{m}} < \phi_{\mathrm{s}}$
- Til að jafna Fermiorkustigin þarf jákvæða hleðslu á málmmegin samskeytanna og neikvæða hleðslu hálfleiðaramegin samskeytanna
- Neikvæða hleðslan kemur fram sem bera-snautt-bil W þar sem eftir standa jónaðir rafþegar (N_{A}^{-})

Schottky þröskuldur

- Mættisþröskuldurinn V_0 sem hindrar holusveim frá hálfleiðaranum til málmsins er gefinn með $\phi_{\mathrm{s}} - \phi_{\mathrm{m}}$, en mættisþröskuld þennan má lækka eða hækka með því að leggja fram- eða bakspennu á skeytin
- Athuga ber að rafstöðumættisþröskuldur fyrir jákvæða hleðslu hefur andstætt formerki við rafstöðumættisþröskuld fyrir neikvæða hleðslu
- Hin tvö tilfellin, $\phi_{\mathrm{m}} < \phi_{\mathrm{s}}$ fyrir n-gerð og $\phi_{\mathrm{m}} > \phi_{\mathrm{s}}$ fyrir p-gerð, leiða til óafriðandi (ohmskra) samskeyta

Schottky þröskuldur



- Þegar skeytin eru framspennt með spennunni V þá lækkar snertispennan frá V_0 í $V_0 - V$
- Afleiðing af því að rafeindir úr leiðniborða hálfleiðarans eiga auðveldara með að sveima um bera-snauða-bilið inn í málminn
- Þetta þýðir aukinn straum um skeytin frá málmi til hálfleiðara

Schottky þröskuldur

- Bakspenna hækkar þröskuldinn í $V_0 + V_\mathrm{r}$ og flæði rafeinda frá málmi til hálfleiðara verður óverulegt
- Í öllu falli sér rafeindaflæðið frá málmi til hálfleiðara þröskuldinn $\phi_\mathrm{b} = \phi_\mathrm{m} - \chi$
- Þegar framspenna á Schottky tvist er ekki mjög há gildir tvistjafnan

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

- Þá ræðst mettunarstraumurinn J_0 meðal annars af stærð mættisþröskuldsins ϕ_b fyrir innspýtingu rafeinda frá málmi inn í hálfleiðara
- Þröskuldur þessi ($\phi_\mathrm{m} - \chi$ í kjörtilfelli) er óháður álagðri spennu

Schottky þröskuldur

- Við væntum að líkur á að rafeind í málminum komist yfir þröskuldinn séu gefnar með Boltzmann stuðli eða

$$J_0 \propto \exp\left[\frac{-q\phi_\mathrm{b}}{kT} \right]$$

- Tvistjafnan gildir á sama hátt fyrir p-gerðar hálfleiðara, þá er hálfleiðarinn jákvæður miðað við málminn í framspennu og holur flæða frá hálfleiðaranum til málmsins
- Framstraumur er í báðum þessum tilfellum vegna innspýtingar ríkjandi bera frá hálfleiðara yfir í málminn
- Til að lýsa fjölda þeirra rafeinda sem komast yfir skeytin má tengja saman flæðið í framspennu J_f og flæðið í bakspennu J_0 með

$$J_\mathrm{f} = J_0 \exp\left(\frac{qV}{kT} \right)$$

Schottky þröskuldur

- Hér er

$$J_0 \equiv A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT} \right)$$

og A^* er nefndur Richardson fasti hálfleiðarans og $A^* = 4\pi m^* q k^2 / h^3$

- Fasti Richardson hefur gildið $A^* = 1,2 \times 10^6 (m^*/m)$ [$\mathrm{Am^{-2}K^{-2}}$] ef gert er ráð fyrir að leiðniborði hálfleiðarans hafi kúlulaga fastorkufleti. Þetta er raunin í GaAs þar sem $(m^*/m) = 0.072$.
- Heildarstraumþéttleikinn J er síðan ritaður sem

$$J = J_\mathrm{f} - J_0 = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

sem einnig er ritað

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT} \right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

Schottky þröskuldur

- Skoðum nú samskeyti málms og n-gerðar af hálfleiðara og leysum jöfnu Poission
- Setjum $\phi = 0$ á yfirborði hálfleiðarans, þ.a. $\phi_\mathrm{b} - V$ er mættið innan hans
- Mættið innan þröskuldsins vex frá $\phi(x=0) = 0$ upp í $\phi(x=W) = \phi_\mathrm{b} - V$, ef W er vídd berasnauða bilsins
- Spennudreifingu er lýst með jöfnu Poission
$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_\mathrm{s}\epsilon_0}$$
- Í hálfleiðaranum eru þéttleiki jónaðra rafgjafa N_{D^+}, ϵ_s æstæður rafsvörunarstuðull og ϵ_0 er rafsvörunarstuðull lofttæmis
- Ef N_{D^+}, þéttleiki jónaðra rafgjafa, er fasti og n er rafeindaþéttleiki þá er hleðsluþéttleikinn
$$\rho = q(N_{\mathrm{D}^+} - n)$$

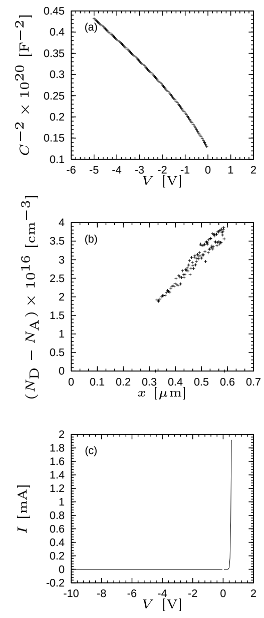
Schottky þröskuldur

- þar eð mættið er fasti fyrir $x \geq W$ verður að krefjast þess að heildar rúmhleðslan sé núll á því bili
- Á bilinu frá $x = W$ til $x = 0$ fellur rafeindaþéttleikinn þar eð rafeindir þurfa að yfirstíga þröskuld af hæð $q(\phi_\mathrm{b} - V)$.
- Ef $q(\phi_\mathrm{b} - V) \gg kT$ er góð nálgun að setja
$$\rho \approx qN_{\mathrm{D}^+}$$
á bilinu $0 \leq x \leq W$
- Randskilyrði eru $\phi = 0$ ef $x = 0$, $\phi = \phi_\mathrm{b} - V$ ef $x \geq W$ og $\frac{d\phi}{dx} = 0$ ef $x \geq W$. Þegar gert er ráð fyrir jafnri dreifingu jónaðra veilna í hálfleiðaranum gefur jafna Poission fleygbogaþröskuld
$$\phi(x) = -\frac{qN_{\mathrm{D}^+}}{\epsilon_\mathrm{s}\epsilon_0}\left[\frac{1}{2}x^2 - xW\right]$$
þar sem $0 \leq x \leq W$ og W er vídd berasnauða bilsins.

Skeytarýmd - Schottky skeyti

- Ljóst má vera að skeytin verka sem þéttir.
- Hleðslan Q á flatareiningu málms er
$$Q = qN_{\mathrm{D}^+}W = \sqrt{2\epsilon_\mathrm{s}\epsilon_0 N_{\mathrm{D}^+}(\phi_\mathrm{b} - V)}$$
og smámerkisrýmdin, C, á flatareiningu við bakspennt skeyti
$$\begin{aligned} C &= \frac{dQ}{dV} \\ &= \sqrt{\frac{qN_{\mathrm{D}^+}\epsilon_\mathrm{s}\epsilon_0}{2}}\sqrt{\phi_\mathrm{b} + V_\mathrm{r} - \xi - \frac{kT}{q}} \end{aligned}$$
þar sem V_r er bakspenna á skeytum og $\xi = E_\mathrm{C} - E_\mathrm{F}$, þannig að rita má
$$N_{\mathrm{D}^+} = \frac{2}{q\epsilon_\mathrm{s}\epsilon_0}\frac{dV}{d(1/C^2)}$$
og þar eð N_{D^+} er fasti í berasnauða bilinu fæst bein lína þegar $\frac{1}{C^2}$ er degið upp sem fall af álagðri spennu V.

Skeytarýmd - Schottky skeyti



Schottky tvistur á GaAs:Li

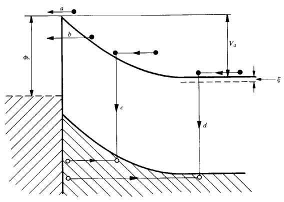
Skeytarýmd - Schottky skeyti

- Vídd berasnauða bilsins W er tengd bognun orkuborðans í hálfleiðaranum, E_{b} með

$$E_{\mathrm{b}} = \phi_{\mathrm{b}} - \phi_{\mathrm{s}} - qV = \frac{q^2 W^2 N_{D^+}}{2\epsilon_{\mathrm{s}}\epsilon_0}$$

  þar sem ϕ_{b} er þröskuldshæðin, ϕ_{s} er staða Fermiorkunnar miðað við leiðniborðabrún hálfleiðara og V er álögð spenna í framstefnu.

Flutningsferli um þröskuldinn



- Fjórar leiðir eru mögulegar fyrir straum um Schottky þröskuld við framspennt skeyti
- Í n-gerð af efni eru þessi fjögur ferli eftirfarandi
  a. varmajónun veldur því að hleðsluberar komast yfir þröskuldinn og inn í málminn
  b. smug um þröskuldinn,
  c. sameining á rúmhleðslusvæðinu
  d. sameining á hlutlausa svæði hálfleiðarans (jafngildir innspýtingu víkjandi bera).

Flutningsferli um þröskuldinn

- Ferli a. er venjulega það mikilvægasta og er oft skírskotað til þess sem besta Schottky þröskulds, ferli b. - d. valda því fráviki frá þessari kjörhegðan.
- Þegar Schottky díóða hlítir lögmálum um varmajónun, og framspennan er ekki mjög há, þá er

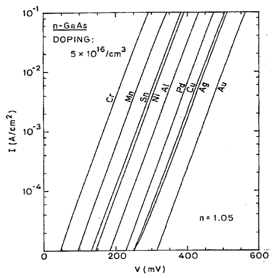
$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

  þar sem J er straumþéttleiki á flatarmálseiningu og

$$J_0 = A^{**}T^2 \left[\exp\left(\frac{q\phi_e}{kT}\right) \right]$$

  þar sem ϕ_e er virk hæð þröskuldsins.

Ákvörðun á þröskuldshæð



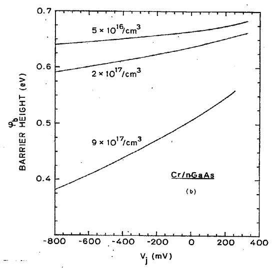
Newman et al. Phys. Rev B **33** (1986) 1146

- Í raun uppfylla raunverulegar díóður aldrei jöfnuna nákvæmlega. Hegðan þeirra er betur lýst með jöfnunni

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{q\phi_e}{kT}\right) \right]$$

  þar sem n er **gæðastuðull tvists** (sem getur verið háð hitastigi) og er nær óháð V og stærra en 1

Ákvörðun á þröskuldshæð



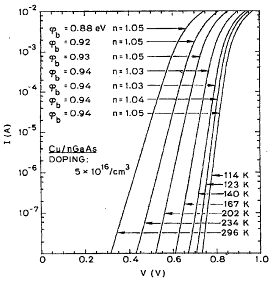
Newman et al. Phys. Rev B **33** (1986) 1146

- Ein aðalástæðan fyrir því að n er stærra en einn er að þröskuldshæðin er spennuháð
- Í raun er alltaf mældur straumurinn I fremur en straumþéttleikinn J og til ákvörðunar á J er þörf á að þekkja yfirborðsflatarmál skeytanna, S
- Ef út frá því er gengið að kennilínan sé það nærri því að lýsa kjördíóðu að ákvarða megi I_0 þá má finna þröskuldhæðina á tvo vegu.

Ákvörðun á þröskuldshæð

- Ef A^{**} er þekkt, þá gefur gildið á J_0 strax ϕ_e. Þröskuldshæðin er fundin með því að framlengja ferilinn $\ln[I/\{1-\exp(-qV/kT)\}]$ niður að $V=0$ sem gefur ϕ_e við óspennt skeyti, sem þá er ritað $\phi_{e0}=\phi_{b0}-\Delta\phi_0$
- Ef A^{**} er ekki þekkt, þá eru mældar $I(V)$ kennilínur fyrir nokkur gildi á hitastigi og með því fundið J_0 sem fall af T. Graf sem sýnir $\ln(J_0/T^2)$ á móti T^{-1} gefur beina línu með hallatölu $-q\phi_{e0}/k$ sem sker lóðrétta ásinn í gildinu $\ln A^{**}$

Ákvörðun á þröskuldshæð



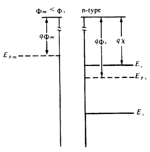
Newman et al. Phys. Rev B **33** (1986) 1146

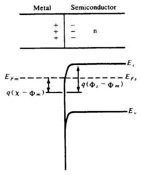
- Þröskuldshæðin er almennt fallandi með hitastigi þar eð þensla grindarinnar veldur breytingu á orkugeilinni og öðrum þeim stærðum sem ákvarða ϕ_{b0}
- Í fyrstu nálgun má rita $\phi_{e0}(T)=\phi_{e0}(0)-bT$, þannig að hallatala ferilsins $\ln(J_0/T^2)$ á móti T^{-1} er $-q\phi_{e0}(0)/k$ með skurðpunkt í $\ln A^{**}+qb/k$.

Ohmsk snerta

- Nauðsynlegt er að hægt sé að tengja málm tengi í hin mismunadi hálfleiðaratól, sem hafa engin áhrif á merkið frá tólinu
- Þá viljum við gjarna að $I-V$ kennilína sé línuleg og hafi óverulegt viðnám í báðar straumstefnur
- Í besta falli verður viðnámið yfir rúmhleðslusvæðið óverulegt í samanburði við viðnám hálfleiðarans, sem málminum er skeytt við
- Ohmsk skeyti eru þau samskeyti, milli málms og hálfleiðara, sem ekki hafa veruleg áhrif á eiginleika tólsins
- Þannig eru skeytin fullnægjandi ef þau geta veitt straumi með spennufalli, sem er óverulegt, í samanburði við spennufallið yfir tólið, jafnvel þó svo að samband straums og spennu sé ekki fullkomlega línulegt

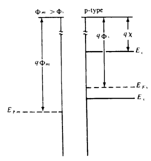
Ohmsk snerta

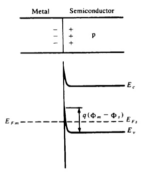




- Í kjörtilfelli eru samskeyti málms og hálfleiðara ohmsk þegar hleðslan, sem spönuð er í málminum til að Fermiástöndin standist á, eru vegna ríkjandi bera
- Til dæmis þegar $\phi_{\rm m} < \phi_{\rm s}$ (n-gerð) er í jafnvægi þá standast Fermiástöndin á vegna flutnings rafeinda frá málminum til hálfleiðarans
- Við þetta hækkar orka rafeinda hálfleiðarans (lækkar rafstöðumætti þeirra) með tilliti til málmsins
- Við þetta verður þröskuldur fyrir rafeindaflæði milli málms og hálfleiðara lítill

Ohmsk snerta





- Á sama hátt þegar $\phi_{\rm m} > \phi_{\rm s}$ (p-gerð) er í jafnvægi þá er auðveldur flutningur hola frá málminum til hálfleiðarans
- Ekkert bera-snautt-bil myndast í hálfleiðaranum vegna þess að rafstöðumættið sem jafna Fermiorkustiginn kallar á uppsöfnun ríkjandi bera í hálfleiðaranum
- Ohmsk skeyti eru gjarnan mynduð með því að íbæta hálfleiðarann mikið nálægt samskeytunum þ.a. ef þröskuldur er til staðar á samskeytunum þá er berasnauð breidd hans nægilega lítil til að hleðsluberar smjúgi í gegnum hann.

Raunveruleikinn - Schottky

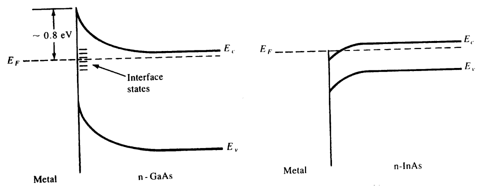
- Fræðilega má finna viðnám skeytanna ef vinnustærðir (hitastig og spenna) og eðlisstærðir (snertiflötur, þéttleiki veilna, þröskuldshæð, virkur massi og rafsvörunarstuðull) eru þekktar
- Í raun hafa einnig ýmsir aðrir þættir áhrif á gæði skeytanna
  - samskeytalög vegna oxunar
  - yfirborðsskemdir
  - innspýting víkjandi bera
- Enn vantar nokkuð á að fullur skilningur sé á öllum þeim þáttum sem ákvarða hæð Schottky þröskuldsins, þannig að ekki er hægt að mynda þröskuld með fyrirfram ákvarðaða rafeignleika

$\Longrightarrow$ Dæmi 14.1.

Raunveruleikinn - Schottky

- Yfirborð hálfleiðara hefur yfirborðsástönd, orkustig sem koma fram vegna ófullkominna tengja á yfirborðinu og annarra þátt
- Þetta veldur hleðslum á samkeytum málms og hálfleiðara
- Gjarnan myndast þunnt samskeytalag, t.d. á kísil myndast þunnt oxíð lag í andrúmslofti 20 – 30 Å
- Slík yfirborðslög hafa áhrif á eiginleika samskeytanna
- Í samsettum hálfleiðurum myndast samskeytalag sem hefur í för með sér orkuástönd sem negla Fermiorku hálfleiðarans í fasta stöðu óháð málmi þeim sem á er húðað

Raunveruleikinn - Schottky



- Til dæmis yfirborðsástönd staðsett við 0.7 – 0.9 eV neðan við leiðniborða negla Fermiorkuna á yfirborði GaAs og hæð Schottky þröskuldsins ræðst af þessari neglingu fremur en vinnufalli málms
- Áhugavert tilfelli er InAs þar sem Fermiorkan er negld ofan við leiðniborðabrún í n-gerð InAs og nær allir málmar mynda ohmsk skeyti

Heimildir

[1] Ben G. Streetman og Sanjay Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 5th ed., Prentice Hall, 2000, kafli 5.7

[2] E. H. Rhoderick og R. H. Williams, *Metal Semiconductor Contacts*, 2nd ed., Oxford University Press, 1988

[3] N. Newman, M. van Schilfgaarde, T. Kendewicz, M. D. Williams and W. E. Spicer, *Physical Review B* **33** (1986) 1146 – 1159

[4] Snorri Þ. Ingvarsson og Hafliði P. Gíslason, Samskeyti málma og hálfleiðara, í *Eðlisfræði á Íslandi VI*, Eðlisfræðifélag Íslands, 1992