

Framleiðsla smárása:

Samskeyti málms og hálfleiðara

Kaflí 9

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

5. vika haust 2016

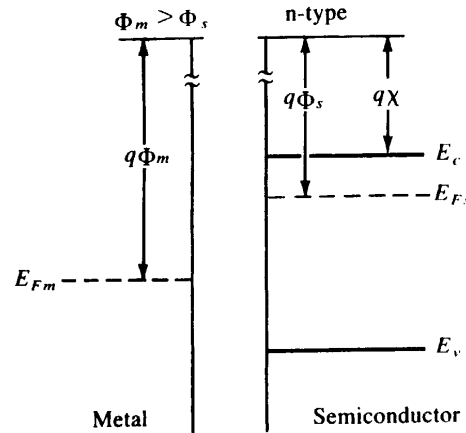
Samskeyti málm- og hálfleiðara

- Afriðandi punktsnerta milli málm- 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

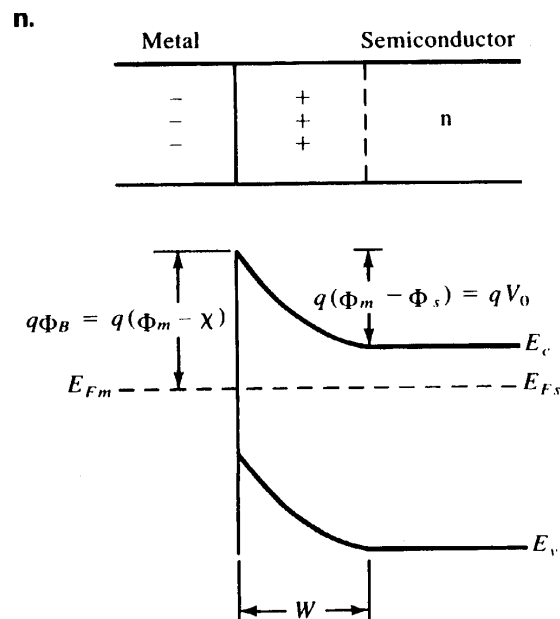
- Þegar málminum er skeytt við hálfleiðarann getur myndast á samskeytunum svæði sem snautt er hleðsluberum og er það nefnt **Schottky þröskuldur**
- Berar streyma frá annarri einingunni yfir í hina
- Afleiðingin er að svið myndast og orkuborðar bogna við skeytin
- Augljóst er að vegna þessa myndast þunnt 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



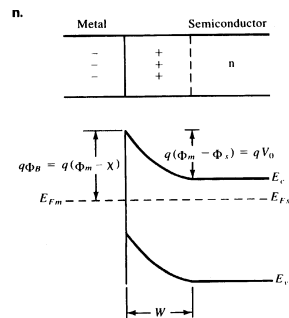
- Vinnfall málmis í lofttæmi er $q\phi_m$
- Orkuna $q\phi_m$ þarf því til að fjarlægja eina rafeind við Fermiorku út í lofttæmið utan við málminn
- Dæmigerð gildi á ϕ_m fyrir hrein yfirborð eru
 - fyrir Al 4.3 eV og fyrir Au 4.8 eV

Schottky þröskuldur



- Þegar málmur sem hefur vinnufall $q\phi_m$ snertir hálfleiðara með vinnufall $q\phi_s$, verður flutningur á hleðslu þar til Fermiástöndin standast á í jafnvægi

Schottky þröskuldur



- Til dæmis ef $\phi_m > \phi_s$ þá er Fermiorkustig hálfleiðarans hærra en málmsins áður en þeir snertast
- Til að fá Fermiástöndin til að standast á verður að hækka rafstöðumætti hálfleiðarans (þ. e. lækka verður orku rafeindanna) með tilliti til málmsins
- Fyrir n-gerð af hálfleiðara streyma rafeindir yfir í málminn þar til Fermiástönd standast á og bera-snautt-bil W myndast næst samskeytunum

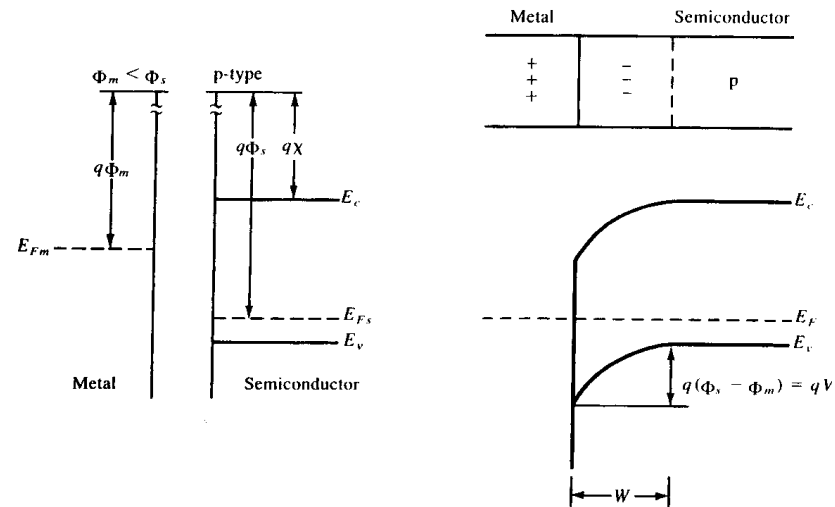
Schottky þröskuldur

- 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 $\phi_m - \phi_s$
- Mættisþröskuldurinn ϕ_b er

$$\phi_b = \phi_m - \chi$$

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

Schottky þröskuldur

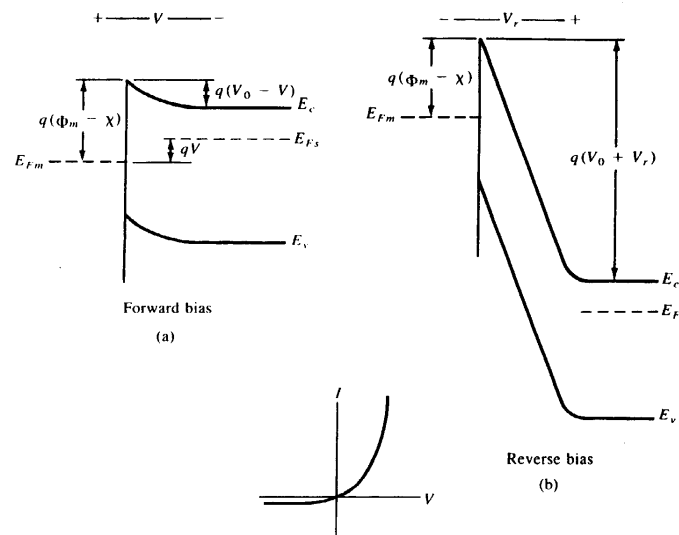


- Að ofan er Schottky þröskuldur fyrir p-gerð af hálfleiðara með $\phi_m < \phi_s$
- Til að jafna Fermiorkustigin þarf jákvæða hleðslu á málmmeigin samskeytanna og neikvæða hleðslu hálfleiðaramegin samskeytanna

Schottky þröskuldur

- Neikvæða hleðslan kemur fram sem bera-snautt-bil W þar sem eftir standa jónaðir rafþegar (N_A^-)
- Mættisþröskuldurinn V_0 sem hindrar holusveim frá hálfleiðaranum til málmsins er gefinn með $\phi_s - \phi_m$, 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, $\phi_m < \phi_s$ fyrir n-gerð og $\phi_m > \phi_s$ 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 málm til hálfleiðara

Schottky þröskuldur

- Bakspenna hækkar þröskuldinn í $V_0 + V_r$ og flæði rafeinda frá málm til hálfleiðara verður óverulegt

- Í öllu falli sér rafeindaflæðið frá málm til hálfleiðara þröskuldinn

$$\phi_b = \phi_m - \chi$$

- 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 mettnarstraumurinn J_0 meðal annars af stærð mættisþröskuldsins ϕ_b fyrir innspýtingu rafeinda frá málm inn í hálfleiðara

- Þröskuldur þessi ($\phi_m - \chi$ í kjörtílfelli) er óháður álagðri spennu

Schottky þröskuldur

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

$$J_0 \propto \exp \left[\frac{-q\phi_b}{kT} \right]$$

- Tvístjafnan 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

Schottky þröskuldur

- 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

$$J_f = J_0 \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

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

Schottky þröskuldur

- Heildarstraumpéttleikinn J er síðan ritaður sem

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

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. $\phi_b - V$ er mættið innan hans
- Mættið innan þröskuldsins vex frá $\phi(x = 0) = 0$ upp í $\phi(x = W) = \phi_b - V$, ef W er vídd berasnauða bilsins
- Spennudreifingu er lýst með jöfnu Poission

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_s\epsilon_0}$$

- Í hálfleiðaranum eru þéttleiki jónaðra rafgjafa N_{D+} , ϵ_s æstæður rafsvörunarstuðull og ϵ_0 er rafsvörunarstuðull lofttæmis

Schottky þröskuldur

- Ef N_{D+} , þéttleiki jónaðra rafgjafa, er fasti og n er rafeindapéttleiki þá er hleðsluþéttleikinn

$$\rho = q(N_{D+} - n)$$

- 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 rafeindapéttleikinn þar eð rafeindir þurfa að yfirstíga þröskuld af hæð $q(\phi_b - V)$.
- Ef $q(\phi_b - V) \gg kT$ er góð nálgun að setja

$$\rho \approx qN_{D+}$$

á bilinu $0 \leq x \leq W$

Skeytarýmd - Schottky skeyti

- Randskilyrði eru $\phi = 0$ ef $x = 0$, $\phi = \phi_b - V$ 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

$$\phi(x) = -\frac{qN_{D+}}{\epsilon_s\epsilon_0} \left[\frac{1}{2}x^2 - xW \right]$$

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

$$Q = qN_{D^+}W = \sqrt{2\epsilon_s\epsilon_0N_{D^+}(\phi_b - V)}$$

og smámerkisrýmdin, C , á flatareiningu við bakspennt skeyti

$$\begin{aligned} C &= \frac{dQ}{dV} \\ &= \sqrt{\frac{qN_{D^+}\epsilon_s\epsilon_0}{2}} \left(\phi_b + V_r - \xi - \frac{kT}{q} \right)^{-1/2} \end{aligned}$$

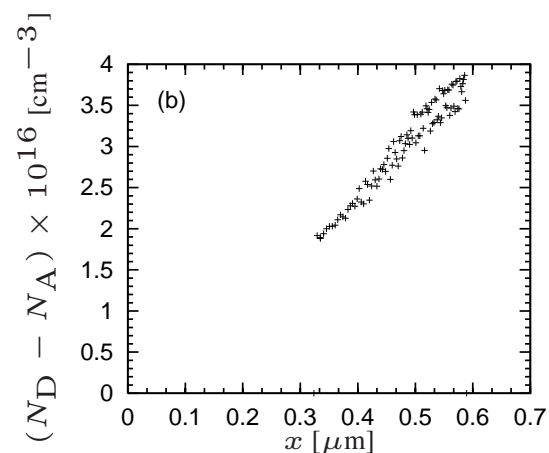
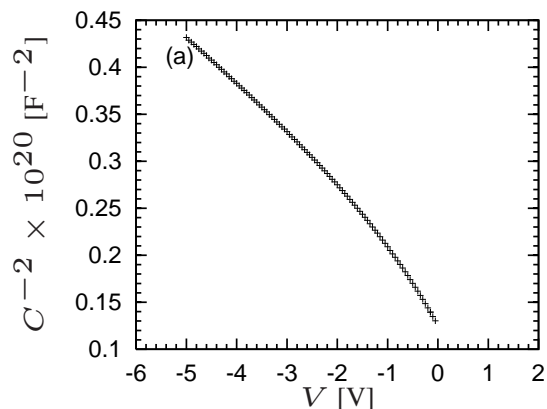
þar sem V_r er bakspenna á skeytum og $\xi = E_C - E_F$

Skeytarýmd - Schottky skeyti

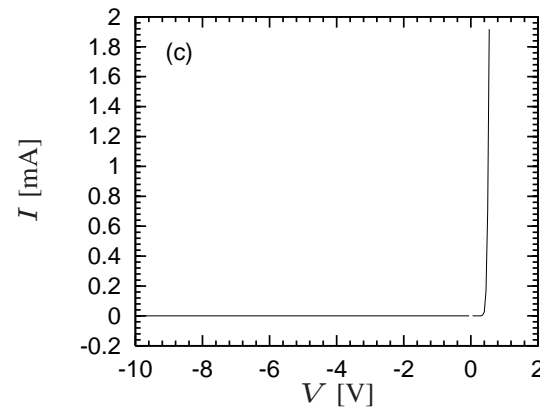
- Þannig að rita má

$$N_{D+} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0} \frac{dV}{d(1/C^2)}$$

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

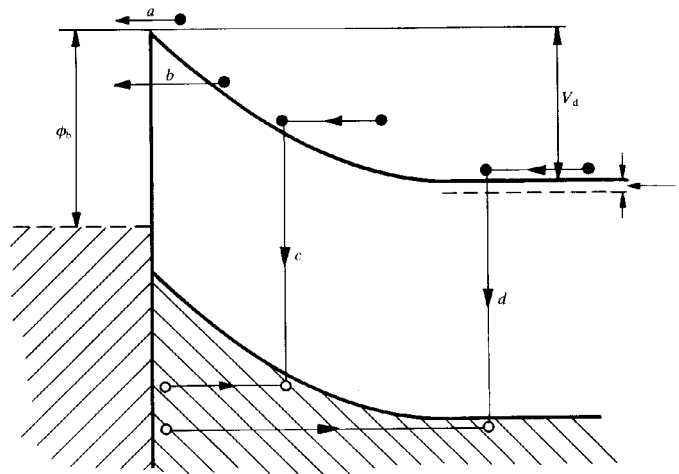
Skeytarýmd - Schottky skeyti

- Vídd berasnauða bilsins W er tengd bogun orkuborðans í hálfleiðaranum, E_b með

$$E_b = \phi_b - \phi_s - qV = \frac{q^2 W^2 N_{D+}}{2\epsilon_s \epsilon_0}$$

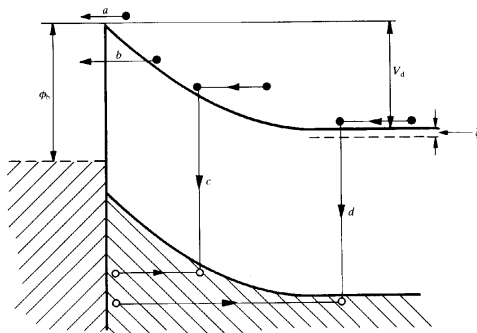
þar sem ϕ_b er þröskuldshæðin, ϕ_s er staða Fermiorkunnar miðað við leiðniborðabrún hálfleiðara og V er álögð spenna í framstefnu.

Flutningsferli um þröskuldinn



- Fjórar leiðir eru mögulegar fyrir straum um Schottky þröskuld við framspennt skeyti

Flutningsferli um þröskuldinn



- 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 hlutlausu svæði hálfleiðarans (innspýting 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

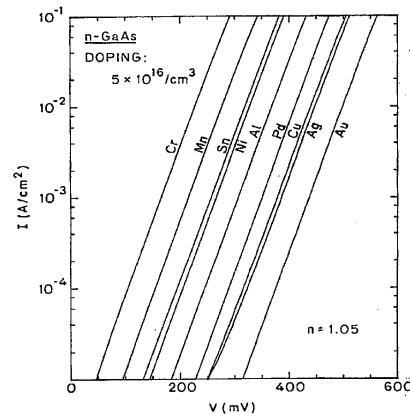
$$J = J_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

þar sem J er straumbéttleiki 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



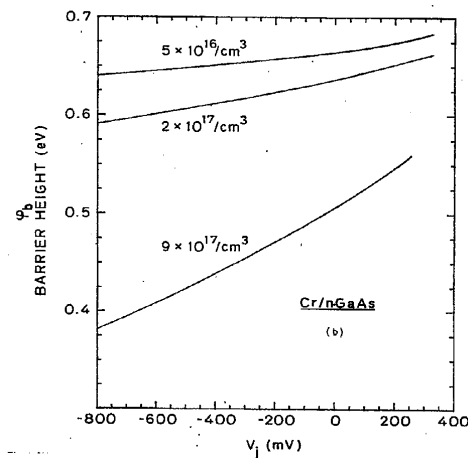
Newman et al. Phys. Rev B **33** (1986) 1146

- 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

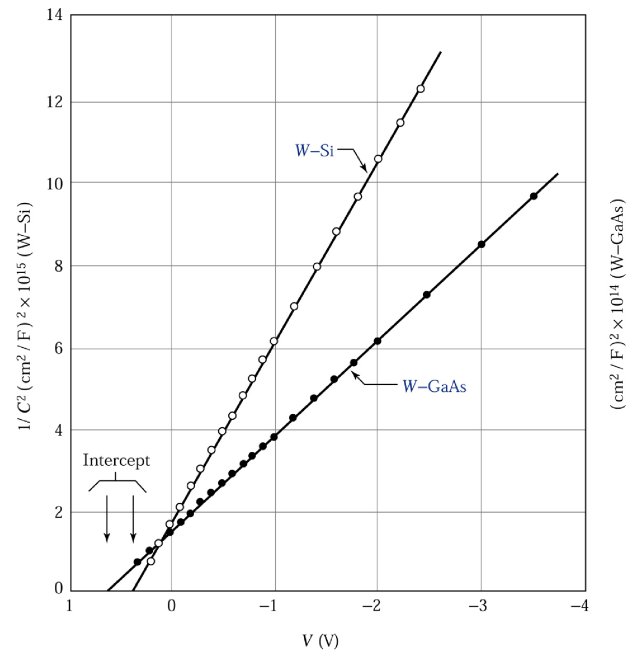
- Ein aðalástæðan fyrir því að n er stærra en einn er að þröskuldshæðin er spennuháð
- Í raun er alltaf mældur straumurinn I fremur en straumþéttleikinn J og til ákvörðunar á J er þörf á að þekkja yfirborðsflatarmál skeytanna, S

Ákvörðun á þröskuldshæð

- Ef út frá því er gengið að kennilínan sé það nærri því að lýsa kjördíóðu að ákvarða megi I_0 þá má finna þröskuldshæðina á tvo vegu.
 - 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 $\ln A^{**}$

⇒ Dæmi 9.1.

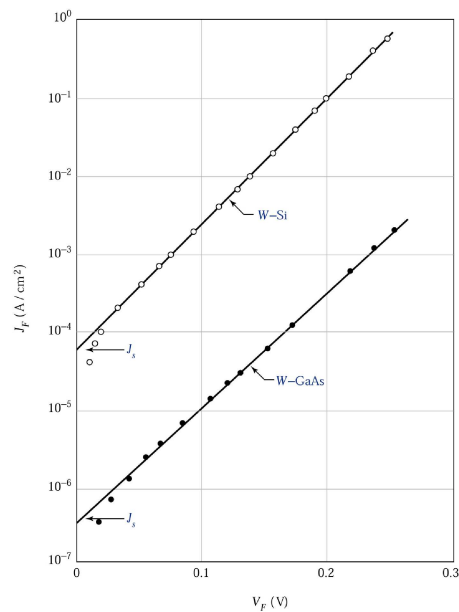
Ákvörðun á þröskuldshæð



S. M. Sze, (2001)

- $1/C^2$ sem fall af álagðri spennu fyrir W-Si og W-GaAs tvista
 \implies Dæmi 9.2.

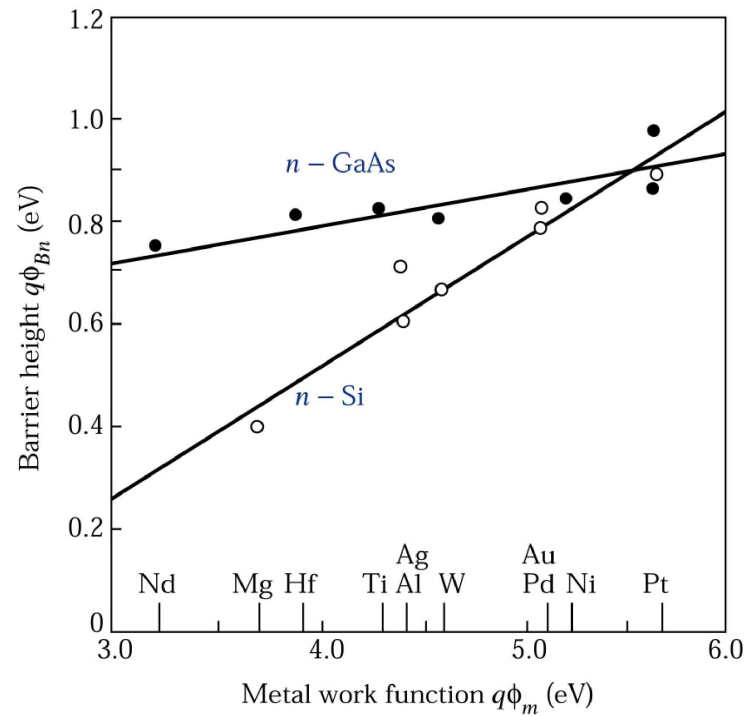
Ákvörðun á þröskuldshæð



S. M. Sze, (2001)

- Straumur sem fall af álagðri framspennu fyrir W-Si og W-GaAs tvista

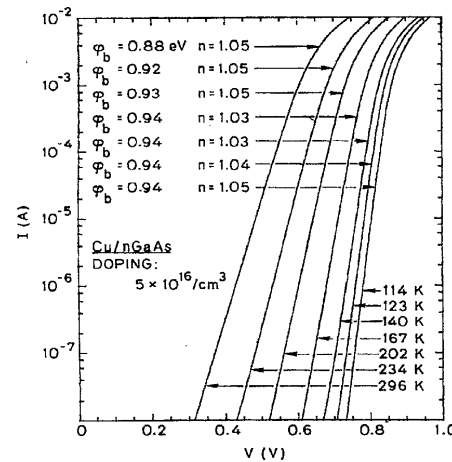
Ákvörðun á þröskuldshæð



S. M. Sze, (2001)

- Samband þröskulds og vinnufall fyrir ýmsa málma á GaAs og Si

Ákvörðun á þröskuldshæð



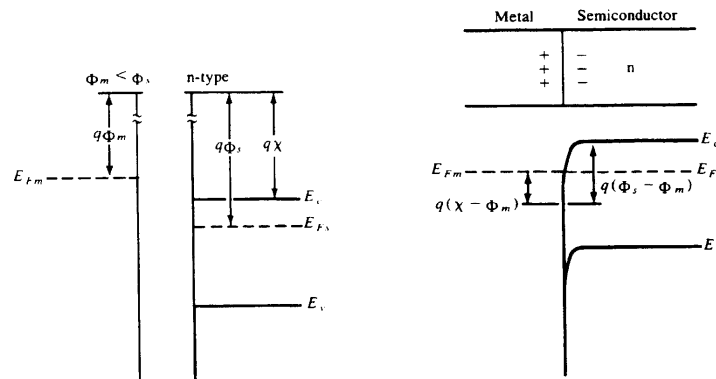
Newman et al. Phys. Rev B 33 (1986) 1146

- 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

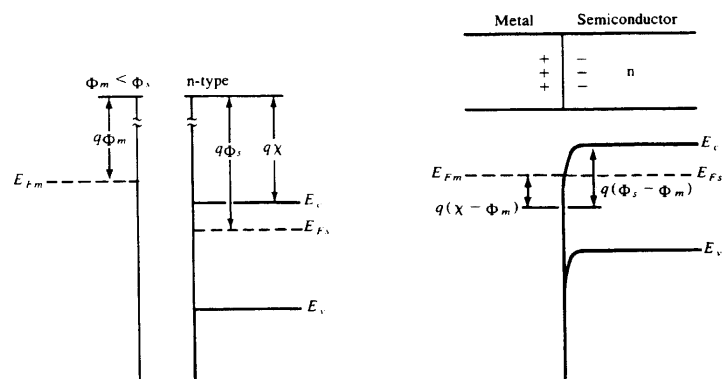
- Nauðsynlegt er að hægt sé að tengja málm tengi í hin mismunandi hálfleiðaratól, sem hafa engin áhrif á merkið frá tólinu
- Þá viljum við gjarna að $I - V$ kennilína sé línuleg og hafi óverulegt viðnám í báðar straumstefnur
- Í besta falli verður viðnámið yfir rúmhleðslusvæðið óverulegt í samanburði 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

Ohmsk snerta



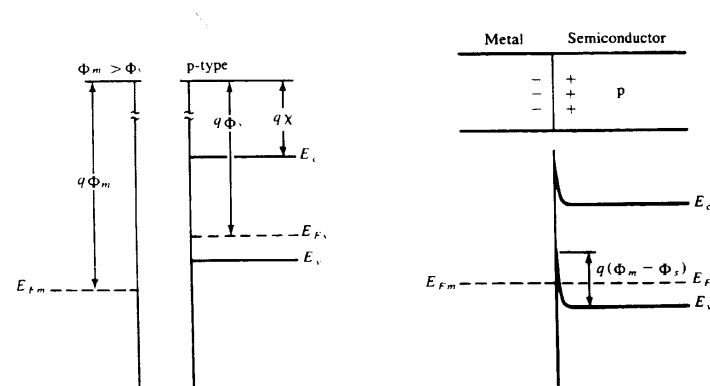
- Þannig eru skeytin fullnægjandi ef þau geta veitt straumi með spennufalli, sem er óverulegt, í samanburði við spennufallið yfir tólið, jafnvel þó svo að samband straums og spennu sé ekki fullkomlega línulegt
- Í kjörtílfelli eru samskeyti málm og hálfleiðara ohmsk þegar hleðslan, sem spönuð er í málminum til að Fermiástöndin standist á, eru vegna ríkjandi bera

Ohmsk snerta



- Til dæmis þegar $\phi_m < \phi_s$ (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 $\phi_m > \phi_s$ (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 snerta

- 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.

Ohmsk snerta

- Oft er **eðlisviðnám snertu** (e. specific contact resistance) notað sem mælikvarði á Ohmsk skeyti skilgreint sem

$$R_c \equiv \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1} \quad \Omega \text{cm}^2$$

- Fyrir skeyti málms og lítið íbætts hálfleiðara er varmajónun ráðandi straumferli og þá er

$$R_c = \frac{k}{aA^*T} \exp \left[\frac{q\phi_{bn}}{kT} \right]$$

- Lægri þröskuldshæð gefur þá minna eðlisviðnám

Ohmsk snerta

- Ef að íbótin er mikil verður þröskudurinn mjór og smug gegnir meira hlutverki og verður jafnvel ráðandi
- Smugstraumurinn verður þá í réttu hlutfalli við líkur á smugi eða

$$I \sim \exp \left[-2W \left(\frac{2m_n(q\phi_{bn} - qV)}{\hbar^2} \right)^{1/2} \right]$$

þar sem W er vídd berasnauða bilsins sem nálga má með

$$W \approx \left[\frac{2\epsilon_s(\phi_{bn} - V)}{qN_D} \right]^{1/2}$$

- Þá er

$$I \sim \exp \left[-C_2 \frac{\phi_{bn} - V}{N_D^{1/2}} \right] \quad \text{og} \quad C_2 = 4\sqrt{m_n\epsilon_s}/\hbar$$

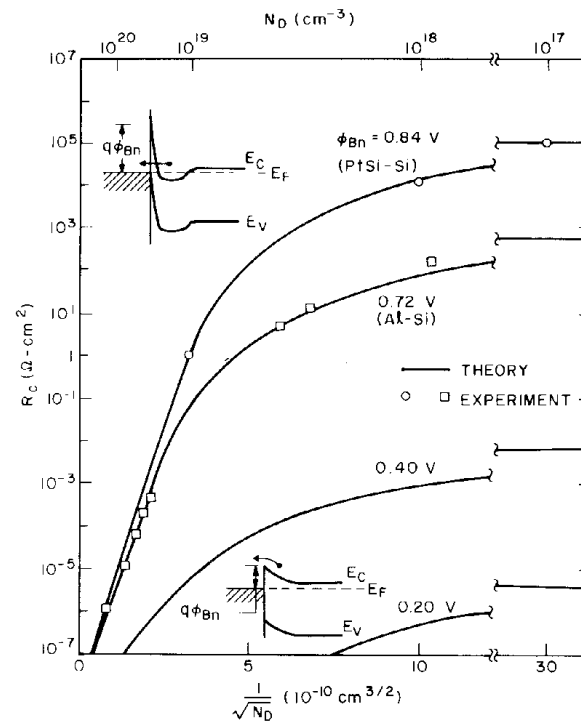
Ohmsk snerta

- Eðlisviðnám málmsnertu við háíbættan hálfleiðara er þá

$$R_c \sim \exp \left[\frac{C_2 \phi_{bn}}{N_D^{1/2}} \right] = \exp \left[\frac{4\sqrt{m_n \epsilon_s} \phi_{bn}}{N_D^{1/2} \hbar} \right]$$

- Snertiviðnámið fyrir mikið íbættan hálfleiðara er því mjög háð íbótarþéttleikanum
- Fyrir $N_D \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ er smug ráðandi ferli og snertiviðnámið fellur hratt með aukinni íbót
- Fyrir $N_D \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ er varmajónun ráðandi og snertiviðnámið nær óháð íbótinni

Ohmsk snerta



S. M. Sze, 1985

- Myndin sýnir snertiviðnámið R_C sem fall af $1/N_D^{1/2}$

Samantekt

	hálfleiðari	skeyti
$\phi_m > \phi_s$	n-gerð	Shcottky
$\phi_m < \phi_s$	p-gerð	Shcottky
$\phi_m < \phi_s$	n-gerð	Ohmsk
$\phi_m > \phi_s$	p-gerð	Ohmsk

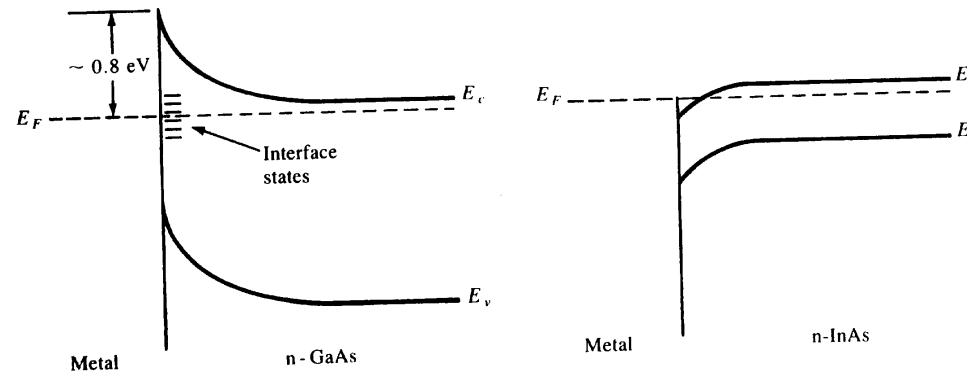
Raunveruleikinn - Schottky

- 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

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 málmum 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

⇒ Dæmi 9.3.

Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor devices: Physics and Technology*, 2 ed., John Wiley & Sons, 2002, kafli 7.1
- [2] Ben G. Streetman og Sanjay Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 5th ed., Prentice Hall, 2000, kafli 5.7
- [3] E. H. Rhoderick og R. H. Williams, *Metal Semiconductor Contacts*, 2nd ed., Oxford University Press, 1988
- [4] N. Newman, M. van Schilfgaarde, T. Kendewicz, M. D. Williams and W. E. Spicer, *Physical Review B* **33** (1986) 1146 – 1159
- [5] Snorri Þ. Ingvarsson og Hafliði P. Gíslason, Samskeyti málma og hálfleiðara, í *Eðlisfræði á Íslandi VI*, Eðlisfræðifélag Íslands, 1992