

Smárásir:

# Samskeyti málms og hálfleiðara

## Kaffi 9

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

5. vika vor 2010

1

## 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 málms- 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

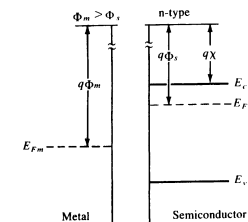
2

## Schottky þröskuldur

- Þegar málminum er skeytt við hálfleiðarann getur myndast á samskeytunum svæði sem snauft 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 berasnauft bil myndast innan hálfleiðarans svipar til pn-skeyta tveggja hálfleiðandi búta

3

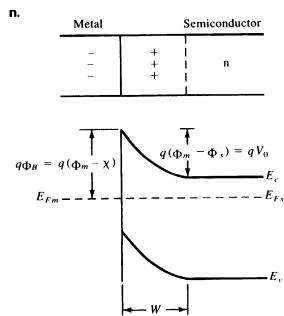
## Schottky þröskuldur



- Vinnfall málms 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  $\phi_m$  fyrir hrein yfirborð eru  
– fyrir Al 4.3 eV og fyrir Au 4.8 eV

4

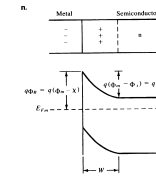
## Schottky þröskuldur



- 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

5

## Schottky þröskuldur



- Til dæmis ef  $\phi_m > \phi_s$  þá er Fermiorkustig hálfleiðarans hærra en málmnsins 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 málmnsins
- Fyrir n-gerð af hálfleiðara streyma rafeindir yfir í málminn þar til Fermiástönd standast á og bera-snauðt-bil  $W$  myndast næst samskeytunum

6

## Schottky þröskuldur

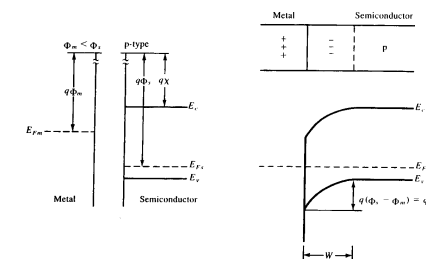
- Hleðsla jákvætt hlöðnu rafgjafajónanna á bera-snauða-bilinu samsvarar þá neikvæðri hleðslu málmnsins
- Rafsvið og borðabogun verður á samskeytunum
- Snertimættið  $V_0$ , sem hindrar frekara sveim rafeinda úr leiðniborða hálfleiðarans inn í málminn, er gefið með mismun í vinnuföllum málmns og hálfleiðara  $\phi_m - \phi_s$
- Mættisþröskuldurinn  $\phi_b$  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

7

## 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

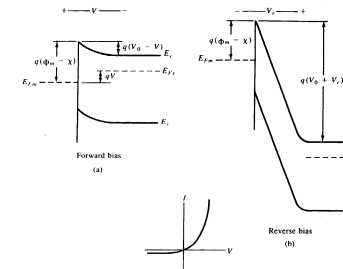
8

## 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

9

## Schottky þröskuldur



- Þegar skeytin eru framspennt með spennunni  $V$  þá lækkar snertispenndan 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

10

## Schottky þröskuldur

- Bakspenna hækkar þröskuldinn í  $V_0 + V_r$  og flæði rafeinda frá málmi til hálfleiðara verður óverulegt
- Í öllu falli sér rafeindaflæðið frá málmi 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  $\phi_b$  fyrir innspýtingu rafeinda frá málmi inn í hálfleiðara
- Þröskuldur þessi ( $\phi_m - \chi$  í kjörtilfelli) er óháður álagðri spennu

11

## Schottky þröskuldur

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

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

- 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

12

## Schottky þröskuldur

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

13

## Schottky þröskuldur

- Heildarstraumþéttleikinn  $J$  er síðan ritaður sem

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

sem einnig er ritað

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

14

## 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 berasnauda bilsins
- Spennudreifing er lýst með jöfnu Poission

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

- Í hálfleiðaranum eru þéttleiki jónaðra rafgjafa  $N_{D+}$ ,  $\epsilon_s$  æstæður rafsvörunarstuðull og  $\epsilon_0$  er rafsvörunarstuðull lofttæmis

15

## Schottky þröskuldur

- Ef  $N_{D+}$ , þéttleiki jónaðra rafgjafa, er fasti og  $n$  er rafeindaþéttleiki 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 rafeindaþéttleikinn 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  $0 \leq x \leq W$

16

## 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 jafni 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.

17

## Skeytarýmd - Schottky skeyti

- Ljóst má vera að skeytin verka sem þéttir.
- Hleðslan  $Q$  á flatareiningu málmis er

$$Q = qN_{D+}W = \sqrt{2\epsilon_s\epsilon_0 N_{D+}(\phi_b - V)}$$

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  $\xi = E_C - E_F$

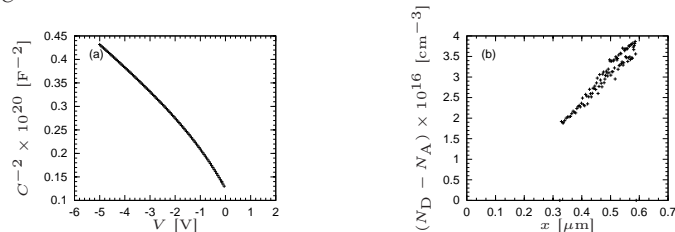
18

## Skeytarýmd - Schottky skeyti

- Þannig að rita má

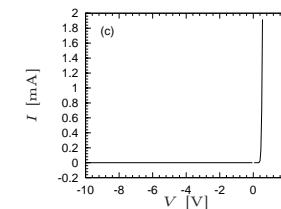
$$N_{D+} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0} \frac{dV}{d(1/C^2)}$$

og þar eð  $N_{D+}$  er fasti í berasnauða bilinu fæst bein lína þegar  $\frac{1}{C^2}$  er deigið upp sem fall af álagðri spennu  $V$



19

## Skeytarýmd - Schottky skeyti



- Schottky tvistur á GaAs:Li

20

## Skeytarýmd - Schottky skeyti

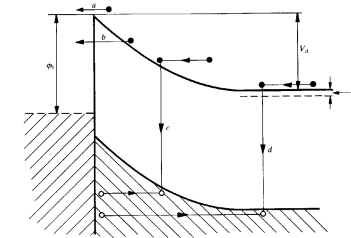
- Vídd berasnauda bilsins  $W$  er tengd bogun orkuborðans í hálfleiðaranum,  $E_b$  með

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

þar sem  $\phi_b$  er þröskuldshæðin,  $\phi_s$  er staða Fermiorkunnar miðað við leiðniborðabrún hálfleiðara og  $V$  er álögð spenna í framstefnu.

21

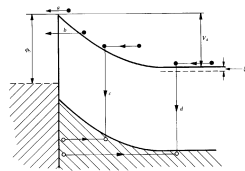
## Flutningsferli um þröskuldinn



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

22

## Flutningsferli um þröskuldinn



- Í n-gerð af efni eru þessi fjögur ferli eftirfarandi
  - varmajónun veldur því að hleðsluberar komast yfir þröskuldinn og inn í málminn
  - smug um þröskuldinn
  - sameining á rúmhleðslusvæðinu
  - sameining á hlutlausu svæði hálfleiðarans (innspyting víkjandi bera)

23

## 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 framspegnan er ekki mjög há, þá er

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

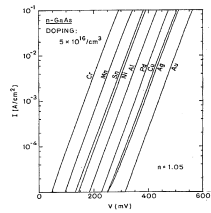
þar sem  $J$  er straumbéttleiki á flatarmálseiningu og

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

þar sem  $\phi_e$  er virk hæð þröskuldsins.

24

## Ákvörðun á þröskuldshæð



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

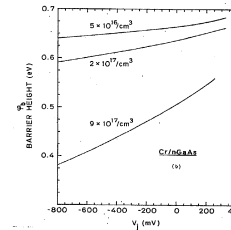
- Í raun uppfylla raunverulegar díóður aldrei jöfnuna nákvæmlega
- Hegðan þeirra er betur lýst með jöfnunni

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

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

25

## 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,  $S$

26

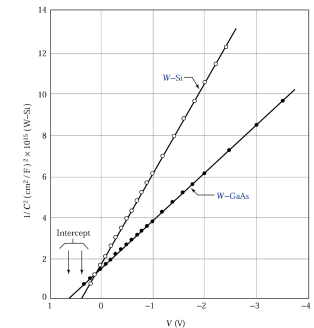
## Ákvörðun á þröskuldshæð

- 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  $\phi_e$ . Þröskuldshæðin er fundin með því að framlengja ferilinn  $\ln[I/\{1 - \exp(-qV/kT)\}]$  niður að  $V = 0$  sem gefur  $\phi_e$  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.

27

## Ákvörðun á þröskuldshæð

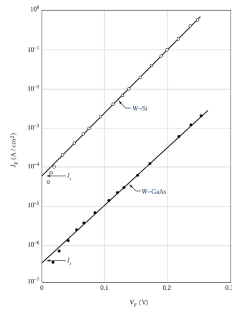


S. M. Sze, (2001)

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

28

## Ákvörðun á þröskuldshæð

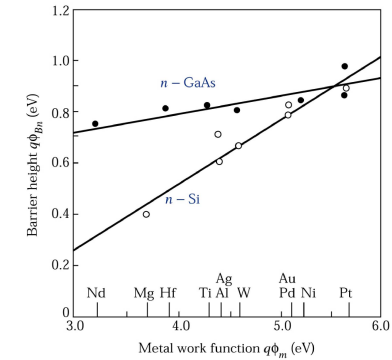


S. M. Sze, (2001)

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

29

## Ákvörðun á þröskuldshæð

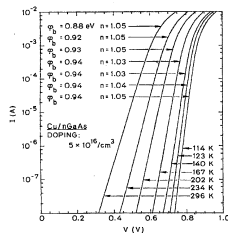


S. M. Sze, (2001)

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

30

## 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  $\phi_{b0}$
- 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  $\ln A^{**} + qb/k$ .

31

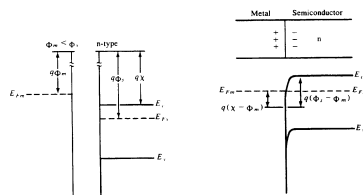
## Ohmsk snerta

- Nauðsynlegt er að hægt sé að tengja málmgengi 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

32



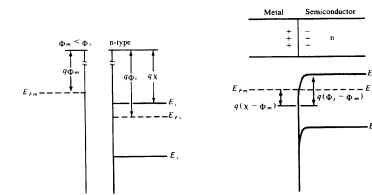
## Ohmsk snerta



- 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 málms og hálfleiðara ohmsk þegar hleðslan, sem spönuð er í málminum til að Fermiástöndin standist á, eru vegna ríkjandi bera

33

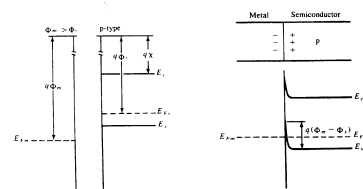
## Ohmsk snerta



- 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

34

## 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-snauð-bil myndast í hálfleiðaranum vegna þess að rafstöðumættið sem jafna Fermiorkustiginn kallar á uppsöfnun ríkjandi bera í hálfleiðaranum

35

## 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.

36

## 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

37

## 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

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

38

## Ohmsk snerta

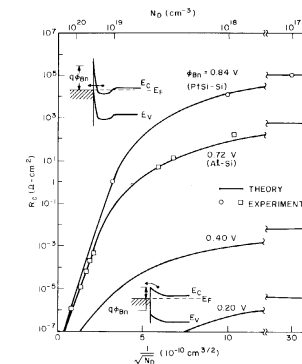
- Eðlisviðnám málmsnertu við háibættan hálfleiðara er þá

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

- 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

39

## Ohmsk snerta



S. M. Sze, 1985

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

40

## Samantekt

	hálleiðari	skeyti
$\phi_m > \phi_s$	n-gerð	Schottky
$\phi_m < \phi_s$	p-gerð	Schottky
$\phi_m < \phi_s$	n-gerð	Ohmsk
$\phi_m > \phi_s$	p-gerð	Ohmsk

41

## 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

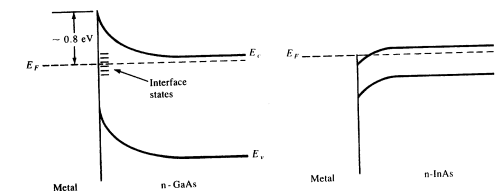
42

## Raunveruleikinn - Schottky

- Yfirborð hálleiðara hefur yfirborðsástönd, orkustig sem koma fram vegna ófullkominna tengja á yfirborðinu og annarra þátt
- Þetta veldur hleðslum á samkeytum málms og hálleiðara
- 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 hálleiðurum myndast samskeytalag sem hefur í för með sér orkuástönd sem negla Fermiorku hálleiðarans í fasta stöðu óháð málmi þeim sem á er húðað

43

## 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.

44

## Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor devices: Physics and Technology*, 2 ed., John Wiley & Sons, 2002, kaflí 7.1
- [2] Ben G. Streetman og Sanjay Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 5th ed., Prentice Hall, 2000, kaflí 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 P. Ingvarsson og Hafði P. Gíslason, Samskeyti málma og hálfleiðara, í *Eðlisfræði á Íslandi VI*, Eðlisfræðifélag Íslands, 1992