

Framleiðsla smárása:

Eðlisfræði hálfleiðara

Kaflí 4

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

3. vika haust 2018

Hálfleiðarar

- Ge, Si og C atóm sem raðast í demantgrind hafa fjóra næstu granna sem sérhver hefur fjórar rafeindir á ysta hvolfi
- Í þessum kristöllum deilir sérhvert atóm gildisrafeindum sínum með fjórum grönnum
- Bindikrafturinn stafar af skammtafræðilegri víxlverkun milli þessara deildu gildisrafeinda og tengin því nefnd **gildistengi** (e. covalent bond)
- Samsettur hálfleiðari eins og GaAs hefur blönduð tengi, sem bæði hafa jóníska- og samgilda eiginleika

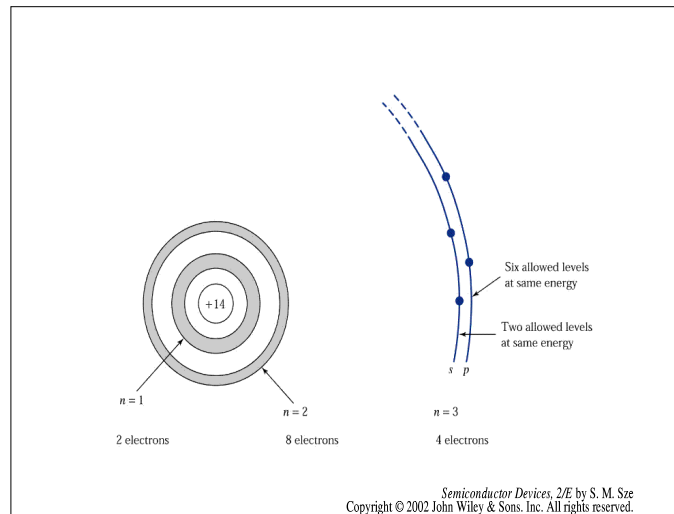
Hálfleiðarar

- Rafeindir á stöku einangruðu atómi hafa stök orkuástönd eða brautir
- Orkustig rafeinda á vetnisatómi eru gefin með líkani Bohr

$$E_H = -\frac{m_e q^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{13.6}{n^2}$$

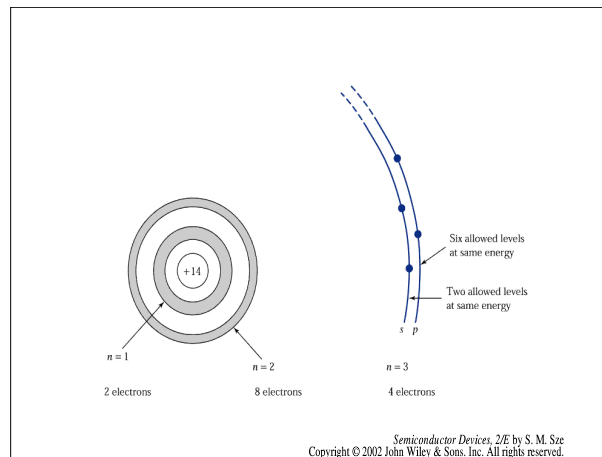
- m_e er massi frjálsrar rafeindar
 - q er hleðsla rafeindar
 - ϵ_0 er rafsvörunarstuðull lofttæmis
 - h er fasti Planck
 - n er heil jákvæð tala, **meginskammtatala**
- Hin stöku orkuástönd eru -13.6 eV fyrir grunnorkustigið ($n = 1$), -3.4 eV fyrir fyrsta örvaða ástand ($n = 2$) o. s. frv.

Hvel - borðar



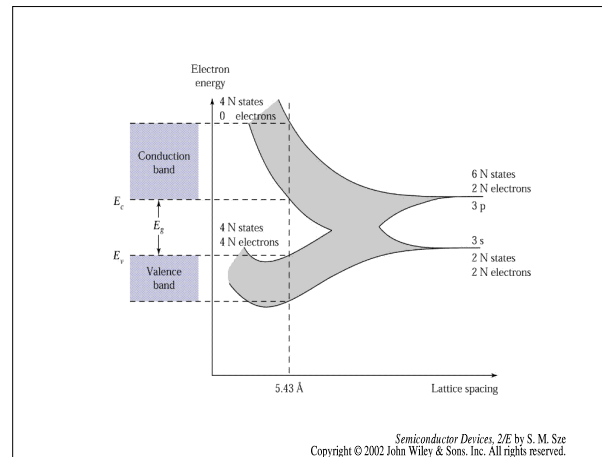
- Samgild tengi eiga sér stað milli atóma sama frumefnis eða ólíkra frumefna sem hafa svipaða rafeindaskipun ytri hvela
- Myndin sýnir einangrað kísilatóm sem hefur 14 rafeindir. Af þessum 14 eru 10 á innri hvelum
- Hinar 4 eru tiltölulega veikar bundnar og geta tekið þátt í efnahvörfum

Hvel - borðar



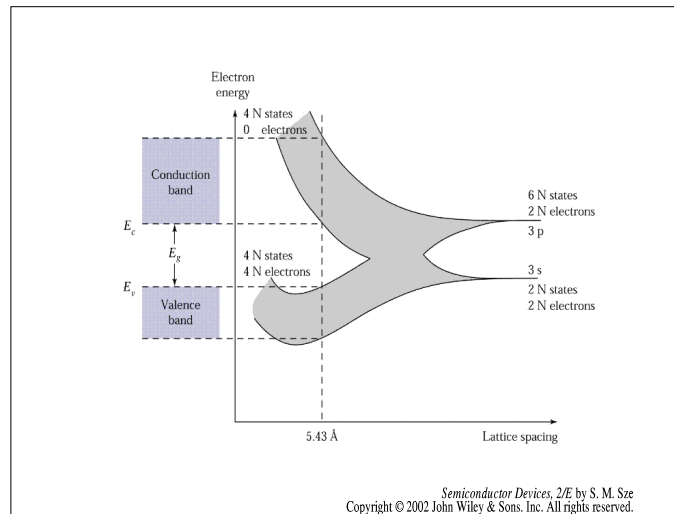
- Það þarf því aðeins að huga að ysta hveli ($n = 3$) fyrir gildisrafeindir þar eð tvö innri hvelin eru algerlega full
- 3s hvelið (þ.e. $n = 3$ og $\ell = 0$) hefur tvö leyfð ástönd og í því sitja tvær gildisrafeindir við $T = 0$ K
- 3p hvelið (þ.e. $n = 3$ og $\ell = 1$) hefur sex leyfð ástönd og í því sitja tvær gildisrafeindir við $T = 0$ K

Hvel - borðar



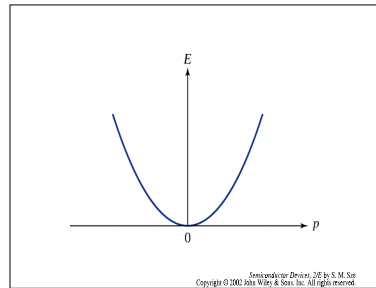
- Myndun kísilkristalls úr N einagruðum kísilatómum
- Þegar fjarlægðin á milli atóma minnkar, þá renna 3s og 3p hluthvel hinna N kísilatóma saman og skarast, mynda borða
- Við tiltekna jafnvægisfjarlægð klofna borðarnir aftur upp, fjögur skammtaástönd á atómi í lægri borðanum og fjögur í þeim efri

Hvel - borðar



- Við alkul sitja allar rafeindirnar í lægstu leyfðu ástöndunum (gildisborða)
- Efri ástöndin eru ósetin og tóm (leiðniborði)
- E_g er orkan sem þarf til að losa rafeind upp í leiðniborða og skilja eftir holu í gildisborða

Orkugeil-borðar



- Orka frjálstrar rafeindar er gefin með

$$E = \frac{p^2}{2m_e}$$

þar sem p er skriðþungi og m_e er massi frjálstrar rafeindar

- Vegna lotubundna mættis kjarnans þarf að skipta á massa frjálstrar rafeindar með virkum massa

$$E = \frac{p^2}{2m_e^*}$$

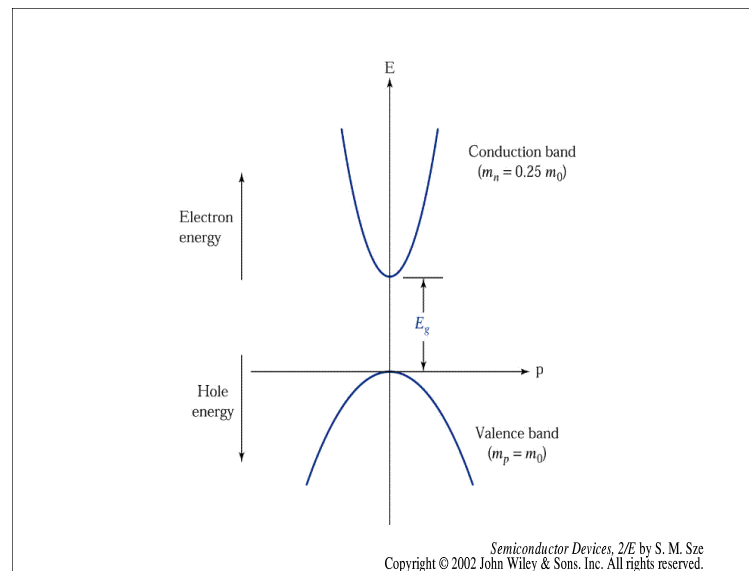
Orkugeil-borðar

- Virki massi rafeindarinnar er háður eiginleikum hálfleiðarans

$$m_e^* = \left(\frac{d^2 E}{dp^2} \right)^{-1}$$

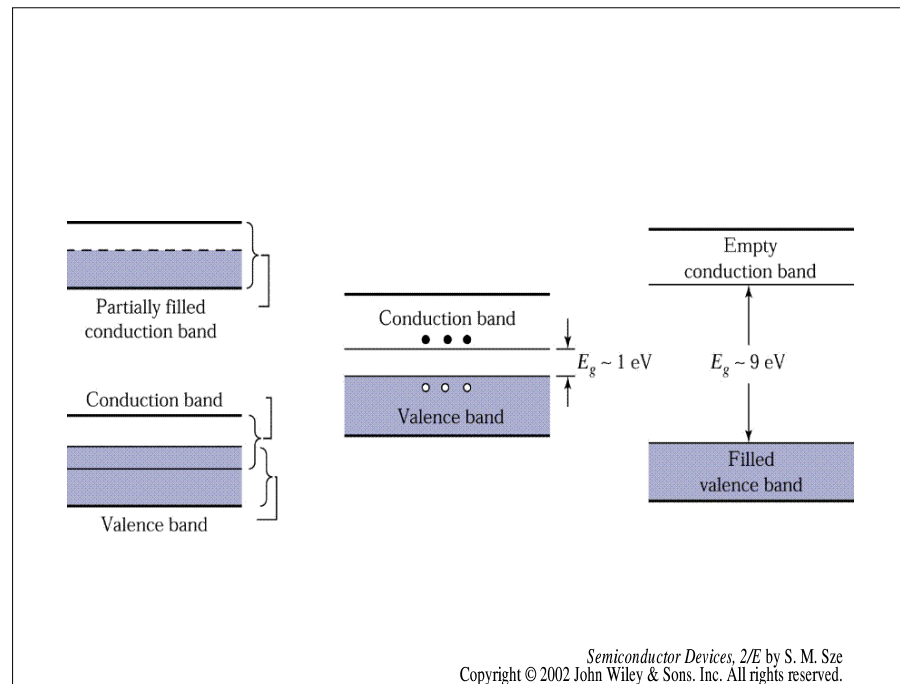
- Sama má rita fyrir holur
- Mjórri fleygbogi svarar þess vegna til stærri annarrar afleiðu og minni virks massa
- Aðskilnaður borða við $p = 0$ er orkugeilin E_g

Orkugeil-borðar



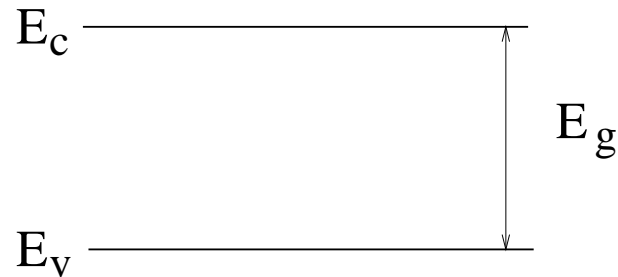
- Myndin sýnir samband orku og skriðþunga í hálfleiðara með virkan massa rafeinda $m_e^* = 0.25m_e$ í leiðniborða og virkan massa hola $m_h^* = m_e$ í gildisborða
- Raunverulegt samband orku og skriðþunga í kísli og GaAs er mun flóknara

Orkugeil



- (a) Leiðari (leiðniborði fylltur að hluta eða borðar skarast)
- (b) Hálfleiðari
- (c) Einanгрari

Orkugeil



- Þegar atóm koma saman í þéttfni mynda brautir rafeindanna orkuborða
- Á milli borðanna eru svæði, tiltekin orkugildi, sem rafeindir þéttfnisins geta ekki setið, nefnd **orkugeil**
- Efri borðinn er nefndur **leiðniborði** og sá neðri **gildisborði**
- Orkuaðskilnaður lægsta hluta leiðniborða, E_c og efsta hluta gildisborða, E_v er orkugeilin, E_g
- Orkugeilin er einn mikilvægasti eiginleiki hálfleiðara

Orkugeil

- Við stofuhita og eðlilegan andrúmsloftsþrýsting er orkugeil kísils 1.12 eV og GaAs 1.42 eV
- Orkugeilin breytist með hitastigi samkvæmt

$$E_g = 1.17 - \frac{(4.73 \times 10^{-4})T^2}{(T + 636)}$$

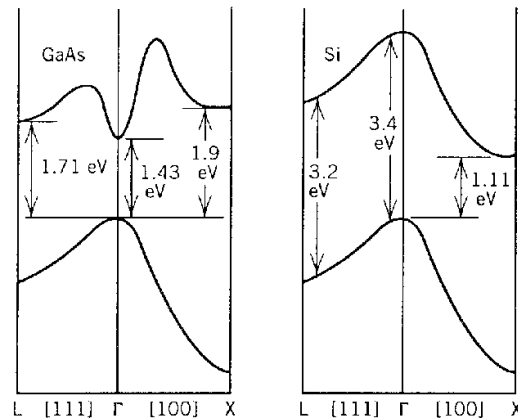
fyrir kísil og

$$E_g = 1.52 - \frac{(5.4 \times 10^{-4})T^2}{(T + 204)}$$

fyrir GaAs

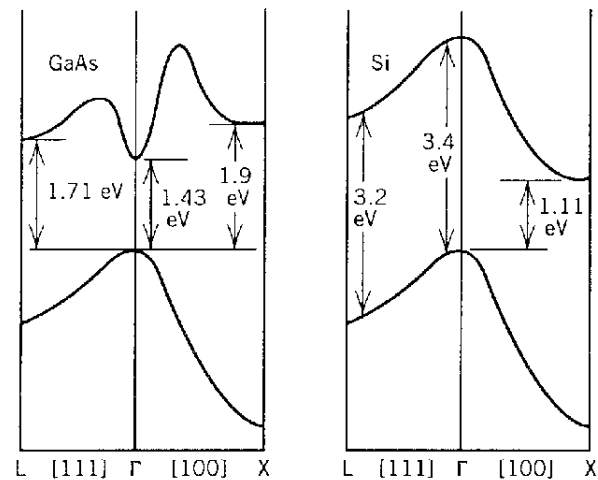
- Fyrir báða þessa hálfleiðara er dE_g/dT neikvætt og orkugeilin minnkar með auknu hitastigi

Orkuborðar



- Myndin sýnir orkuborða kísils og GaAs þar sem orka er teiknuð sem fall af skriðþunga hleðslubera í tvær kristallastefnur
- Orkan er teiknuð í hásamhverfu [111] og [100] stefnur kristallsins, $k = 0$ er táknað með Γ
- Orkugeilin E_g er á milli neðsta hluta leiðniborða og hæsta hluta gildisborða

Orkuborðar



- Fyrir kísil sést að hággildi gildisborða er við $k = 0$ en lággildi leiðniborða er í $[100]$ stefnuna
- Til að flytja rafeind úr gildisborða upp í leiðniborða þarf því að koma til orka ($> E_g$) og breyting þarf að verða í skriðþunga
- Kísill hefur þess vegna **óbeina orkugeil**

Orkugeil

- Í hálfleiðara með **beina orkugeil** eins og GaAs, þá getur rafeind í leiðniborða fallið í tómt sæti í gildisborða og gefið frá sér orkumuninn sem ljóseind
- Í hálfleiðara með óbeina orkugeil getur rafeindin ekki fallið beint niður í gildisborða heldur þarf einnig að koma til breyting í skriðþunga rafeindarinnar. Orkan fer þá gjarnan sem varmi til grindar fremur en sem útgeislun ljóseindar
- Rafeindir má örva með varma eða ljósi út úr gildisborða upp í leiðniborða og er hún þá frjáls til að taka þátt í leiðniferli hálfleiðarans
- Þegar rafeind er örvuð úr gildisborða upp í leiðniborða þá verður eftir hola í gildisborða og myndað hefur verið rafeinda-holu-par

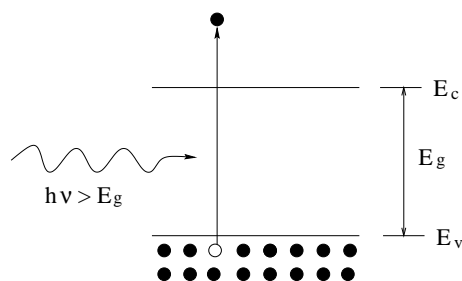
Virkur massi

- Rafeindir í kristalli eru ekki fullkomlega frjálssar, þær víxlverka við lotubundið mætti kristallsgrindarinnar
- Vegna lotubundna mættisins er innleiddur **virkur massi**

$$m^* = \frac{\hbar^2}{d^2 E / dk^2}$$

- Krappi borðans ákvarðar því virkan massa agnar
- Rafeind í leiðniborða gallín arsen, sem lýsa má sem mjóum fleygboga, hefur virkan massa $0.07m_e$
- Rafeind í leiðniborða kísils, sem lýsa má með víðum fleygboga, hefur virkan massa $0.19m_e$. Virkur massi rafeinda í kísli ræðst af kristalstefnu, $0.19m_e$ er virkur massi hornrétt á [100] stefnuna

Eigin hálfleiðari



- Fullkominn hálfleiðarakristallur sem inniheldur engin óhreinindi eða grindarveilur er nefndur **eigin hálfleiðari** (e. intrinsic semiconductor)
- Þá eru engir frjálsir hleðsluberar til staðar við alkul, þar sem gildisborði er fullur og leiðniborði er tómur
- Við hærri hitastig myndast rafeinda-holu-pör, n rafeindir í leiðniborða og p holur í gildisborða
- Fyrir eigin hálfleiðara er $n = p = n_i$

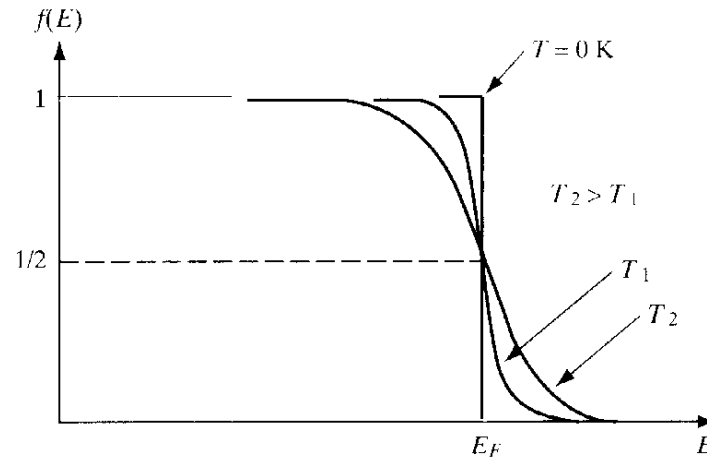
Tölfræði Fermi-Dirac

- Rafeindir í þéttfni hlíta tölfræði Fermi-Dirac

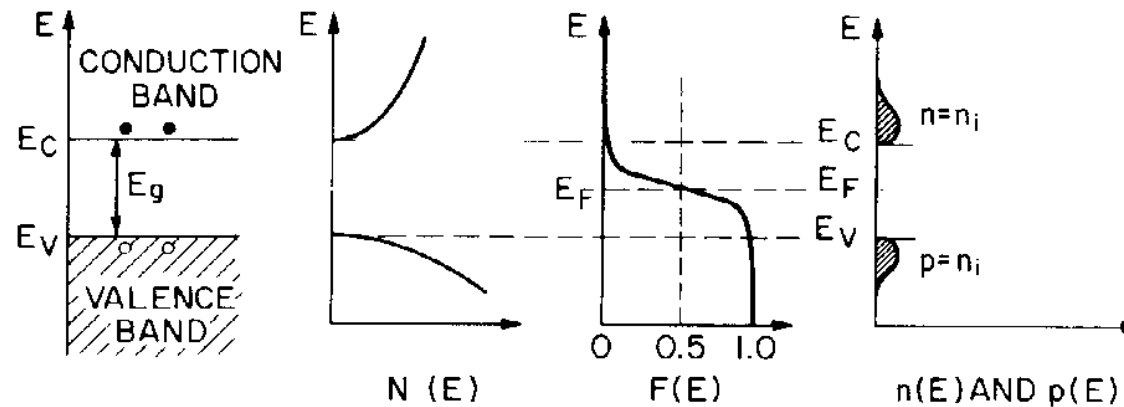
$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

sem gefur líkur á að orkuástand E sé settið rafeind við hitastigið T

- Gildið E_F er Fermiorkustigið og við $E = E_F$ er $f(E) = \frac{1}{2}$



Tölfræði Fermi-Dirac



- Nota má Fermifallið til að reikna þéttleika rafeinda og hola í hálfleiðara ef þéttleiki leyfðra ástanda í leiðni- og gildisborða eru þekktur

Tölfræði Fermi-Dirac

- Þéttleiki rafeinda í leiðniborða er

$$n = \int_{-\infty}^{E_c} f(E)N(E)dE$$

þar sem $N(E)dE$ er ástandspéttleiki á orkubílinu sem dE spannar

- Ástandspéttleikinn er gefinn með

$$N(E) = 4\pi \left(\frac{2m^*}{h^2} \right)^{3/2} E^{1/2}$$

Tölfræði hleðslubera

- Fyrir orkugildi sem eru $3kT$ ofan eða neðan við Fermiorkustigið þá má nálga Fermifallið með

$$f(E) \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right) \quad \text{ef } E - E_F > 3kT$$

$$f(E) \approx 1 - \exp\left(-\frac{E_F - E}{kT}\right) \quad \text{ef } E - E_F < 3kT$$

- Þá er þéttleiki rafeinda í leiðniborða

$$n \approx N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

er virkur ástandspéttleiki í leiðniborða

Tölfræði hleðslubera

- Á sama hátt fæst þéttleiki hola í gildisborða

$$p \approx N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$

þar sem

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

er virkur ástandspéttleiki í gildisborða

- Nú má setja

$$np = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2$$

Tölfræði hleðslubera

- Jöfnurnar má umrita

$$n = n_i \exp\left(-\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(-\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$$

þar sem E_i er eiginorkustigið

- Við stofuhita er fyrir kísil

$$N_C = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \quad \text{og} \quad N_V = 1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

og fyrir GaAs

$$N_C = 4.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad \text{og} \quad N_V = 7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

Tölfræði hleðslubera

- Fermiorkustigið í eiginleiðandi hálfleiðara er

$$E_F = E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right)$$

- Nú er

$$np = n_i^2$$

SVO

$$n_i^2 = N_v N_c \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right)$$

og

$$n_i = \sqrt{N_v N_c} \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right)$$

þar sem

$$E_g = E_c - E_v$$

Tölfræði hleðslubera

- Eiginþéttleikinn við stofuhita er þá

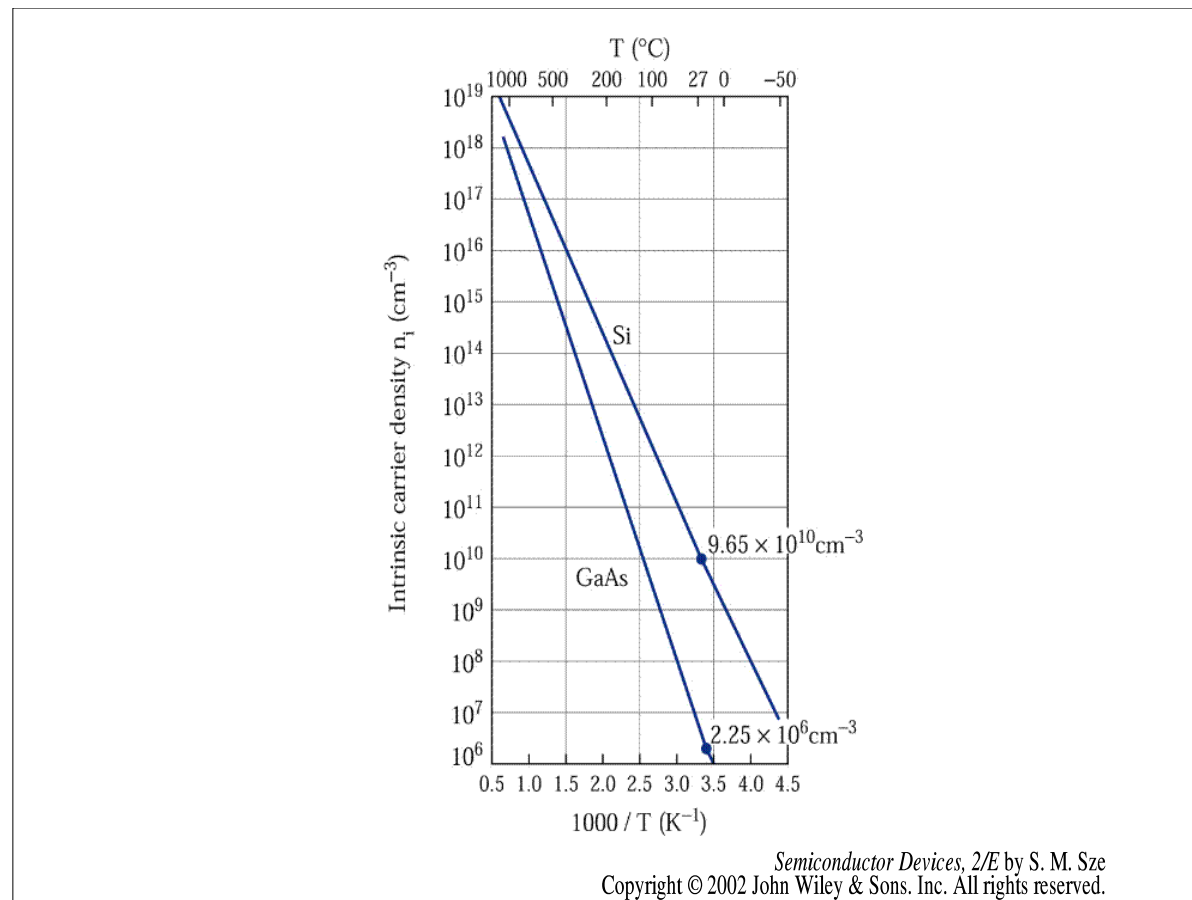
$$n_i = 9.65 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

fyrir kísil og

$$n_i = 2.25 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

fyrir GaAs

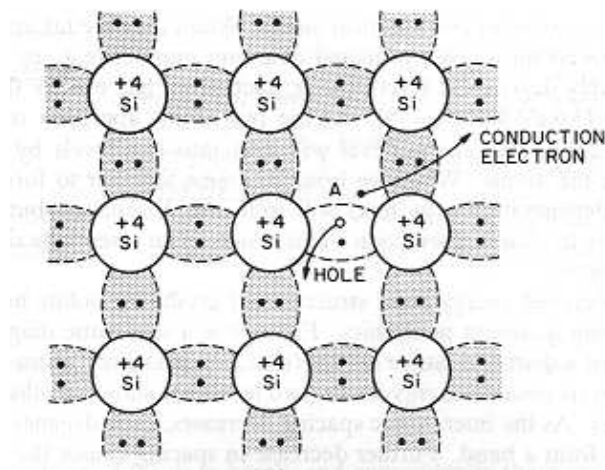
Eigin hálfleiðari



- Eiginþéttleiki í kísli og GaAs sem fall af umhverfu hitastigs

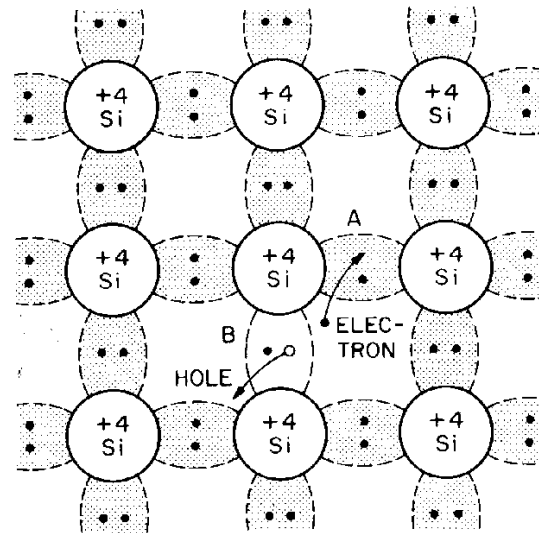
Íbættur hálfleiðari

- Þegar kristallur er íbættur eru mynduð ný orkustig sem gjarnan sitja í orkugeilinni



- Á myndinn sést kísilgrind þar sem einu kísilatómi hefur verið skipt út fyrir arsen atóm, sem hefur 5 gildisrafeindir
- Fimmta rafeindin er því gefin upp í leiðniborðann og kísillinn verður n-leiðandi og arsen er **rafgjafi**

Íbættir hálfleiðari



- Þegar bór atóm með þrjár gildisrafeindir er skipt inn fyrir kísilatóm er rafeind þegin af gildisborðanum til að mynda fjögur samgild tengi
- Þá verður til p-leiðandi hálfleiðari og bór er **rafþegi**

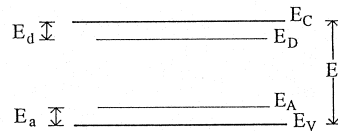
Hálfleiðarar

- Til að reikna orku veiluástands jónaðrar veilu er einfaldasta nálgunin að nota orku vetnisatómsins og skipta á m_e og virkum massa m^* og á ϵ_0 og rafsvörunarstuðli hálfleiðara ϵ_s

$$E_D = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_s} \right)^2 \left(\frac{m^*}{m_e} \right) E_H$$

- Þetta er nálgun sem gildir fyrir grunnar veilur, gefur rétta stærðargráðu jónunarorku, en gildir ekki fyrir djúpar veilur, þ.e. ef jónunarorka veilur er $\geq 3kT$
- Fyrir grunnar veilur dugar varmaorka við stofuhita til að jóna alla rafgjafa og rafþega

Hálfleiðarar



- Við fullkomna jónun er

$$n = N_D$$

í n-leiðandi efni sem einungis hefur rafgjafaíbætur og

$$p = N_A$$

í p-leiðandi efni sem einungis hefur rafþegaíbætur

- Jónunarorka arsen rafgjafa er $E_D = 54$ meV og bór rafþega $E_A = 45$ meV í kísli
- Jónunarorka kísil rafgjafa er $E_D = 5.8$ meV og zink rafþega er $E_A = 31$ meV í GaAs

Íbættur hálfleiðari

- Fyrir íbættan hálfleiðara má rita

$$E_C - E_F = kT \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right)$$

- Því hærri sem rafgjafþéttleikinn er því nær er Fermiorkustigið neðri brún leiðniborða
- Svipað gildir fyrir rafþegaíbot

$$E_F - E_V = kT \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right)$$

Íbættur hálfleiðari

- Oft er hentugt að rita rafeinda- og holupéttleika sem fall of eiginpéttleika n_i og eiginorkustiginu

$$\begin{aligned}n &= N_C \exp [-(E_c - E_F)/kT] \\ &= N_C \exp [-(E_c - E_i)/kT] \exp [-(E_F - E_i)/kT]\end{aligned}$$

eða

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

og

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

- Ef hvorutveggja rafgjafa og rafþegaíbætur eru í hálfleiðaranum þá ákvarðar sú íbót sem hefur hærri péttleika leiðnigerð hálfleiðarans

Tölfræði hleðslubera

- Fermiorkustigið stillir sig af til að varðveita hleðslujafnvægi

$$n + N_A = p + N_D$$

Notum

$$np = n_i^2$$

og leysum fyrir hleðsluberapéttleika í n-leiðandi hálfleiðara

$$n_n = \frac{1}{2} \left[N_D - N_A + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2} \right]$$

og

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n}$$

- Þá eru rafeindir **ríkjandi hleðsluberar** og holur **víkjandi hleðsluberar**

Tölfræði hleðslubera

- Á sama hátt gildir fyrir p-leiðandi efni

$$p_p = \frac{1}{2} \left[N_A - N_D + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2} \right]$$

og

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p}$$

- Yfirleitt er virkur íbótarþéttleiki $|N_D - N_A|$ mun stærri en eiginþéttleikinn n_i svo að

$$n_n \approx N_D - N_A \quad \text{ef } N_D > N_A$$

$$p_p \approx N_A - N_D \quad \text{ef } N_A > N_D$$

\implies Dæmi 4.1. \implies Dæmi 4.2.

Jónunarorkan

- Þeir hleðsluberar sem aðgengilegir eru í hálfleiðara við gefið hitastig eru dreifðir á orkuborða og veiluástönd
- Við jafnvægi er hleðsluberadreifingin fengin með færslum hleðslubera á milli borða og veiluástanda
- Þéttleiki frjálsra bera í orkuborða ræðst þannig af þéttleika veiluástanda
- Hegðan þéttleikans við hitastigsbreytingu gefur veilupéttleikann og tilsvarandi jónunarorku, það er stöðu veilunnar í orkugeilinni.
- Í hreinum hálfleiðandi kristalli myndast hola í gildisborðann fyrir sérhverja rafeind sem er örðuð upp í leiðniborðann. Þess vegna er talað um rafeinda-holu par

Jónunarorkan

- Sé notuð fleygboga tengsl orku og ástandsþéttleika í gildis- og leiðniborða þá má reikna rafeinda og holupéttleika n og p með

$$n = 2 \int_{E_C}^{\infty} \frac{N_C(E) dE}{1 + \exp[-(E - E_F)/kT]} \quad (1)$$

$$p = 2 \int_{-\infty}^{E_V} \frac{N_V(E) dE}{1 + \exp[-(E_F - E)/kT]} \quad (2)$$

þar sem $N_C(E)$ er ástandsþéttleiki á leiðniborðanum og N_V er ástandsþéttleiki á gildisborðanum

$$N_C = 2 \left(\frac{m_e^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \quad \text{og} \quad N_V = 2 \left(\frac{m_h^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$$

Jónunarorkan

- Stuðullin tveir endurspeglar þá staðreynd að hvert orkustig hefur tvær spunastefnur
- Athugum tilfellið þar sem hálfleiðari hefur eitt rafgjafaorkustig í E_D og eitt rafþegaorkustig í E_A
- Fyrir rafgjafa og rafþega sem hafa þéttleika N_D og N_A er þéttleiki rafeinda og hola í veiluástandum

$$n_D = \frac{g_D N_D}{g_D + \exp[(E_C - E_D - E_F)/kT]} \quad (3)$$

$$p_A = \frac{g_A N_A}{g_A + \exp[(E_F - E_V - E_A)/kT]} \quad (4)$$

þar sem g_D og g_A eru margfeldnistuðlar rafgjafa og rafþega ástandanna.

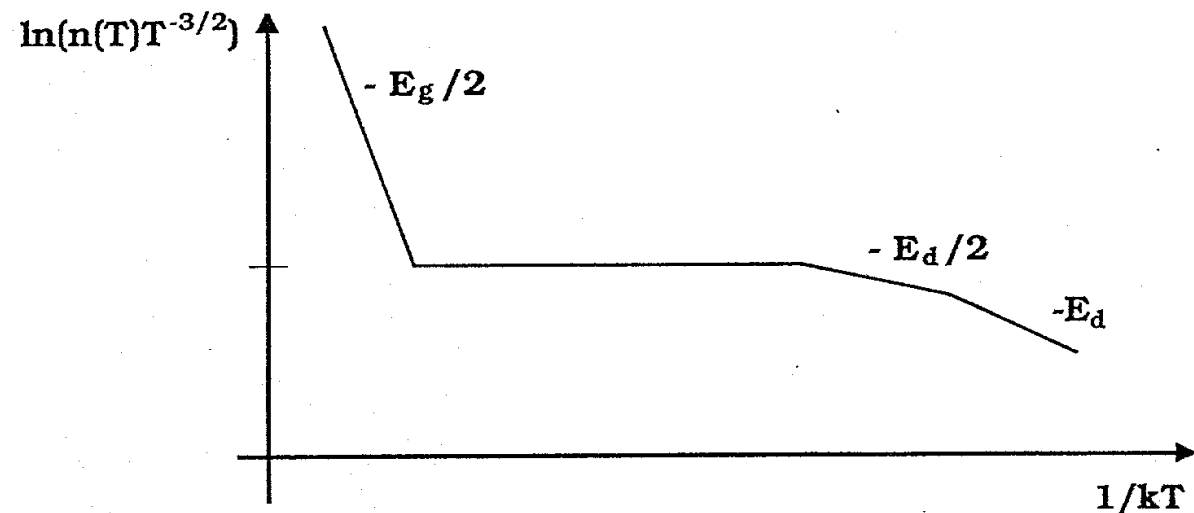
Jónunarorkan

- Fimmta jafnan lýsir rafhlutleysi hálfleiðarans

$$n + n_D - p - p_A = N_D - N_A \quad (5)$$

- Til að finna n , p , n_D og p_A er nauðsynlegt að leysa kerfi fimm jafna (1) - (5) með fimm óþekktum. Fimmta breytan er efnismættinu E_F .
- Þessar jöfnur verður að leysa saman tölulega
- Á ákveðnum hitastigsbilum má gera nálganir sem gera það mögulegt að fá fram einfaldar lausnir

Jónunarorkan



- Skoðum nú þessar nálganir fyrir n-leiðandi hálfleiðara ($N_D > N_A$), sem hefur að geyma einfalda rafgjafa og rafþega í tilfellinu $g_D = 2$ og $g_A = 2$.

Jónunarorkan

- Mikilvægt tilfelli er þegar hitastigið er það lágt að $N_D \gg N_A > n$ þá er

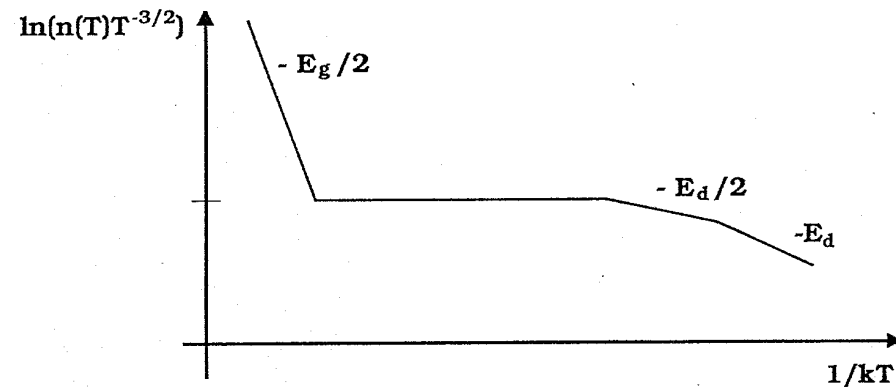
$$n = \frac{N_C(N_D - N_A)}{2N_A} \exp[-E_D/kT]$$

- Lausn umhverfis stofuhitastig. Þegar $kT \approx E_D$, það er $\exp(-E_D/kT) \approx 1$ þá er $n_D \ll N_D$ og allir rafgjafar og rafþegar eru jónaðir. Þá er

$$n - p = N_D - N_A$$

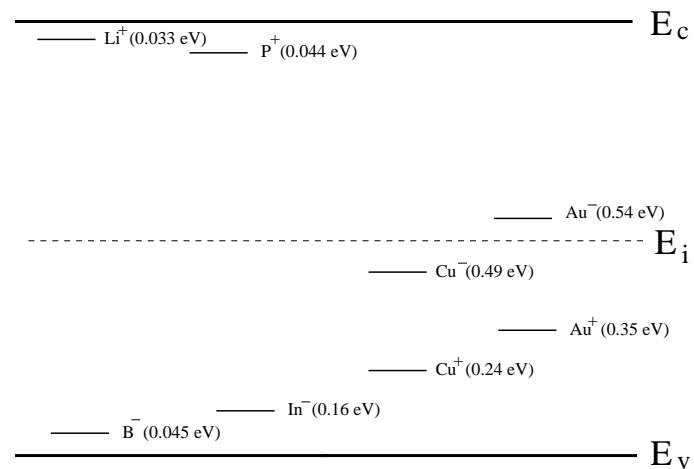
- Flest hálfleiðandi tól eru hönnuð til að vinna við stofuhita, og venjulega eru rafgjafa- og rafþegaíbætur nær að fullu jónaðar í slíkum tólum við það hitastig

Jónunarorkan



- Framangreindar jöfnur gefa $n(T)$ á hinum ýmsu hitastigsbilum, og segja að graf af $\ln(nT^{-3/2})$ á móti T^{-1} sé nálgað með beinni línu með hallatölu E_d , $E_d/2$, 0 og $E_g/2$ með auknu hitastigi.

Íbótarveilur í kísli



- Íbótarveilan er ýmist rafgjafi (jákvæð) eða rafþegi (neikvæð) þegar hún er jónuð
- Sumar veilur geta myndað mörg orkustig í orkugeilinni eins og t.d. gull
- Au myndar rafgjafaástand (Au^+) 0.34 eV ofan við gildisborða og rafþegaástand (Au^-) 0.54 eV neðan við leiðniborða

Leiðni og hreyfanleiki

- Lögmál Ohms segir að straumbéttleiki sé í réttu hlutfalli við rafsvið

$$J = \sigma \mathcal{E}$$

þar sem

$$\sigma = \frac{nq^2\tau}{m_n^*} [\Omega\text{cm}]^{-1}$$

er leiðni vegna rafeinda

- Þetta má einnig rita

$$\sigma = qn\mu_n$$

þar sem

$$\mu_n = \frac{q\tau}{m_n^*}$$

er **hreyfanleiki** rafeinda, sem lýsir reki rafeinda í þéttfni

Leiðni og hreyfanleiki

- Hreyfanleika má líta á sem meðalrekhraða á rafsviðseiningu

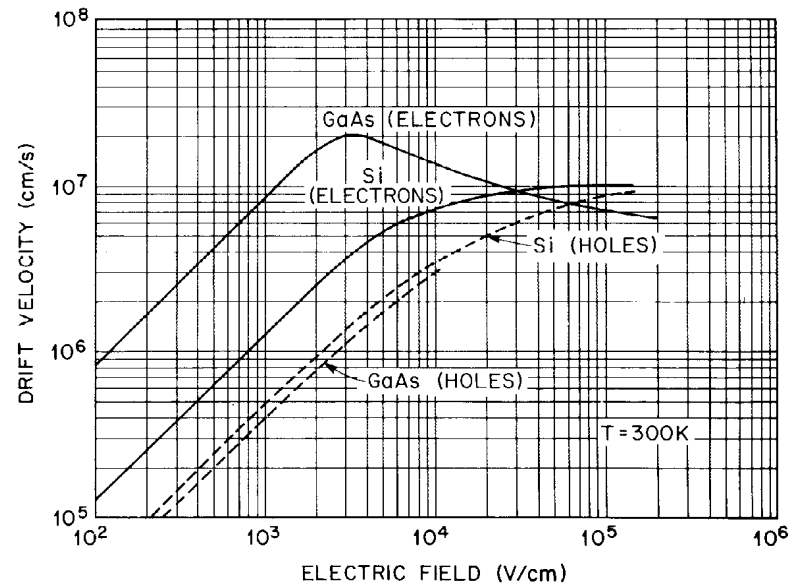
$$\mu_n = -\frac{\langle v \rangle}{\mathcal{E}}$$

- Ef bæði holur og rafeindir bera straum má rita

$$J = q(n\mu_n + p\mu_p)\mathcal{E} = \sigma\mathcal{E}$$

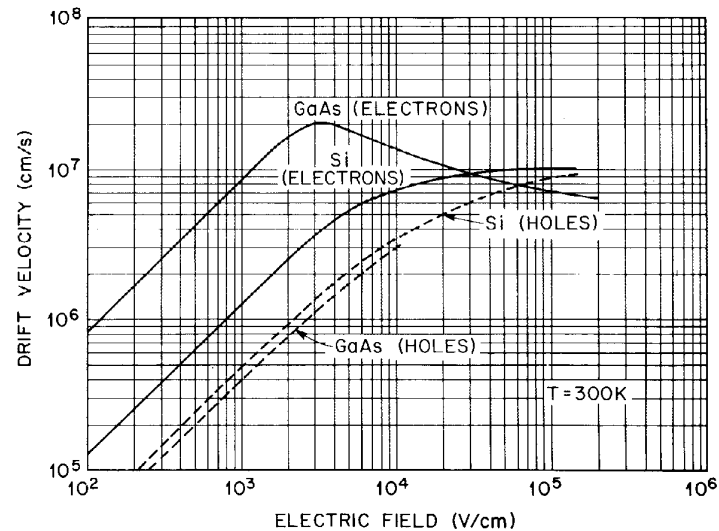
- Hreyfanleiki ákvarðast af virkum massa m^* og meðal frjálsum tíma τ
- Við væntum að m^* sé lítil í kröppum leiðniborða GaAs og hreyfanleiki því hár
- Meðal frjáls tími τ ákvarðast af hitastigi og íbótarþéttleika hálfleiðarans

Leiðni og hreyfanleiki



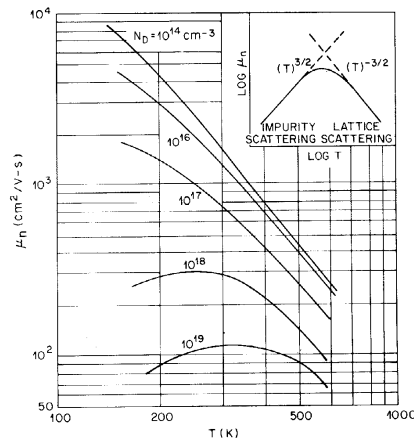
- Rekhraði sem fall af rafsviðsstyrk í GaAs og kísli
- Við lágan rafsviðsstyrk er rekhraðinn línulega háður álögðu sviði
- Það gildir á meðan tími milli árekstra τ er óháður álögðu sviði

Leiðni og hreyfanleiki



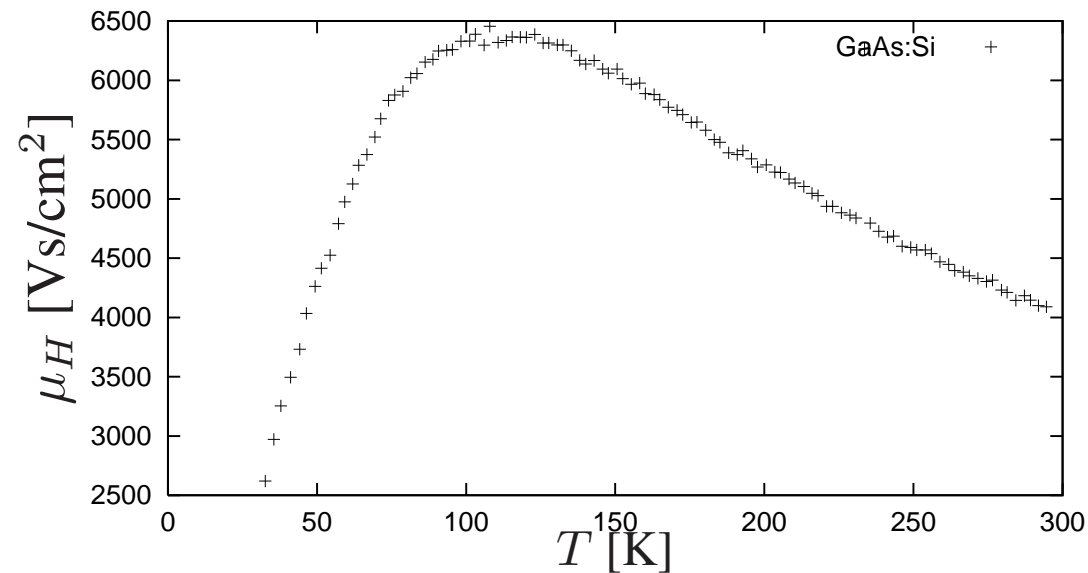
- Þegar rafsviðsstyrkurinn er aukinn (10^3 V/cm) verður leiðnin σ háð rafsviðinu
- Þá er rekhraðinn af svipaðri stærð og varmahreyfing hleðsluberanna $v_{th} \approx 10^7$ m/s og umfram orkan fer fremur til grindar en í að auka hraða hleðsluberanna–mettun

Leiðni og hreyfanleiki



- Tvö megin ferlin sem áhrif hafa á hreyfanleika hleðslubera eru
 - dreifing vegna grindartitrings
 - dreifing vegna veilna
- Vægi dreifingar vegna grindartitrings eykst með auknu hitastigi og þess vegna fellur hreyfanleikinn með aukunu hitastigi
- Við lág hitastig er dreifing frá veilum kristallinum ráðandi

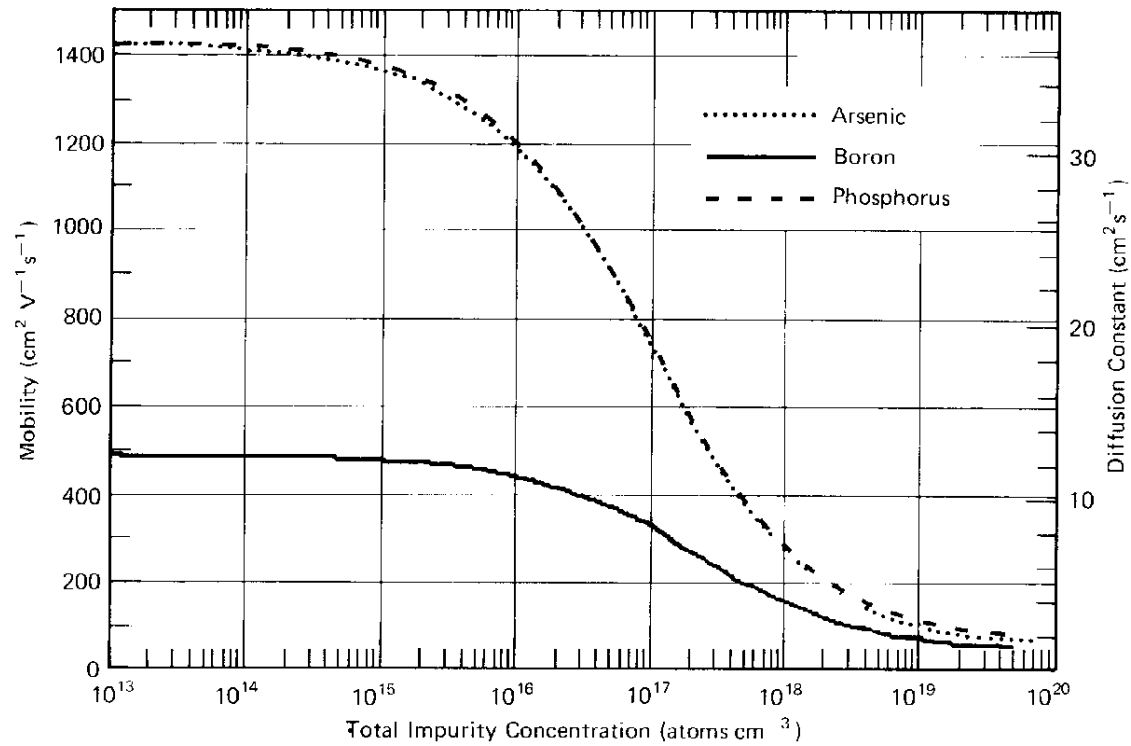
Leiðni og hreyfanleiki



- Hreyfanleiki í kísilíbættu GaAs mældur með Hall- og leiðnimælingu

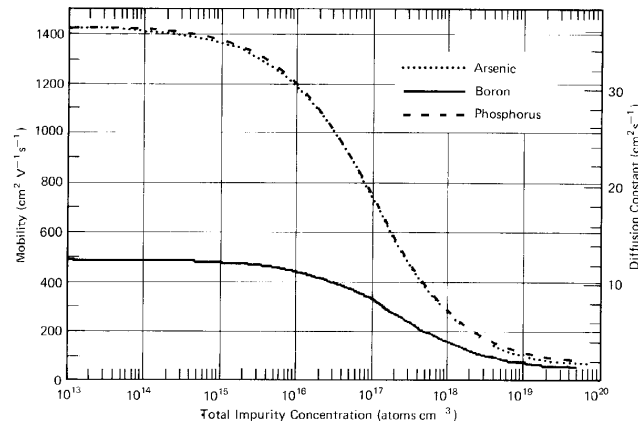
⇒ Dæmi 4.3.

Leiðni og hreyfanleiki



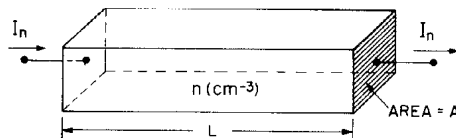
- Hreyfanleiki rafeinda og hola í kísli við stofuhita

Leiðni og hreyfanleiki



- Í lítið íbættu efni er hreyfanleiki vegna jónaðra veilna hærri en hreyfanleiki vegna grindartitrings, þess vegna er hreyfanleiki, bæði rafeinda og hola, nær óháður íbótarþéttleika neðan við 10¹⁵ cm⁻³
- Við hærri íbótarþéttleika er dreifing vegna jónaðrar íbótar af svipaðri stærðargráðu og grindartitringur og hreyfanleiki minnkar með aukinni íbót

Leiðni og hreyfanleiki



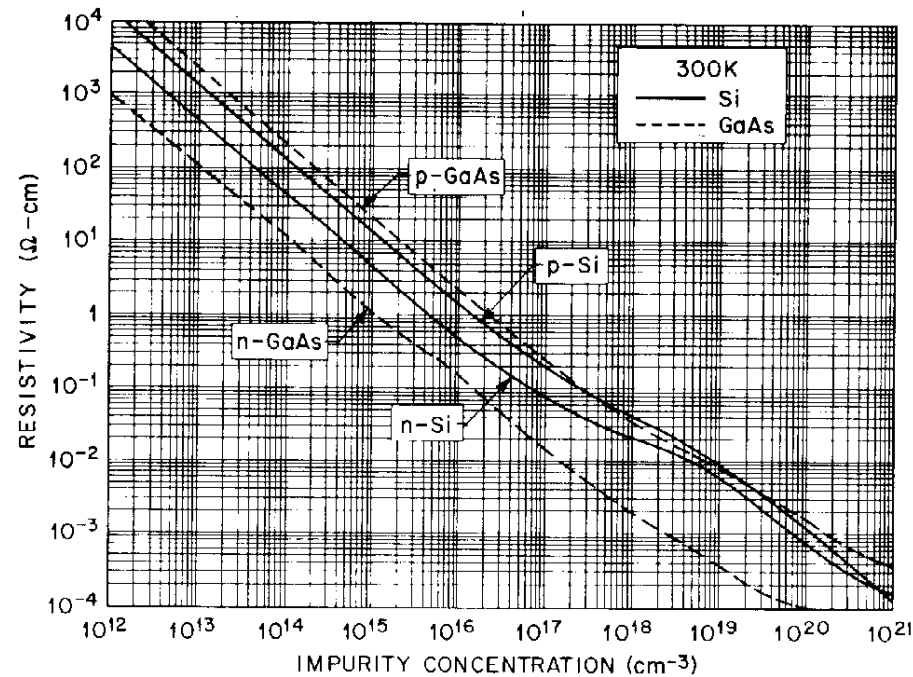
- **Viðnám** er eðliseiginleiki rásaeyningar eða tóls og er táknað með R þar sem

$$R = \frac{\rho L}{Wd} = \frac{L}{Wd} \frac{1}{\sigma}$$

og $A = Wd$ er þverskurðarflatarmál, ρ er eðlisviðnám og L er lengd.

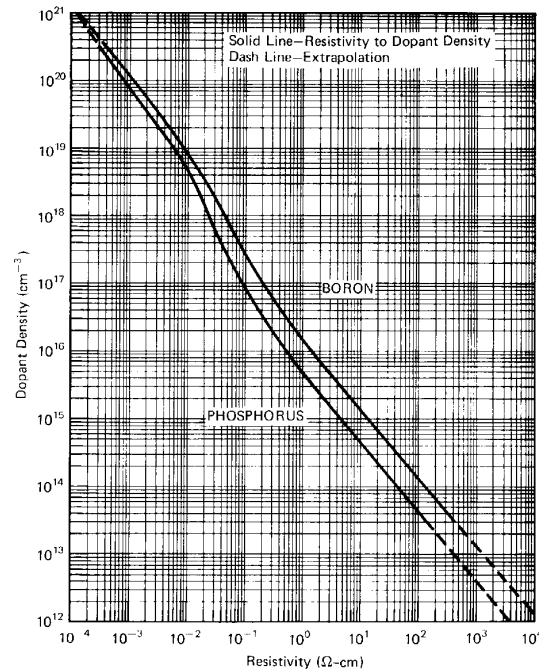
Efni	Eðlisviðnám [$\Omega \text{ cm}$]
Kísill	2.3×10^5
Kolefni	4×10^{-3}
Ál	2.7×10^{-6}
Kopar	1.7×10^{-6}
Polystyrene	1×10^{18}

Leiðni og hreyfanleiki



- Viðnám sem fall af íbótarþéttleika í kísli og GaAs við 300 K
- Við þetta hitastig eru allar grunnar rafgjafa- og rafþegaíbætur fulljónaðar

Leiðni og hreyfanleiki



- Íbótarþéttleiki sem fall af eðlisleiðni við 296 K fyrir kísil íbættum með bór og fosfór

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor devices: Physics and technology*, John Wiley & Sons, 2ed., 2002, kaflar 2.4 -2.7 og 3
- [2] R. S. Muller og T. I. Kamins, *Device Electronics for Integrated Circuits*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1986, kafli 1
- [3] Ben G. Streetman og Sanjay Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 5th ed., Prentice Hall, 2000, kafli 3
- [4] J. Bourgoin og M. Lannoo, *Point Defects in Semiconductors II*, Springer Series in Solid-State Sciences, Vol. 35, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1983