

Eðlisfræði þéttefnis I:

Eðlisfræði hálfleiðara

Kaflí 9

Jón Tómas Guðmundsson

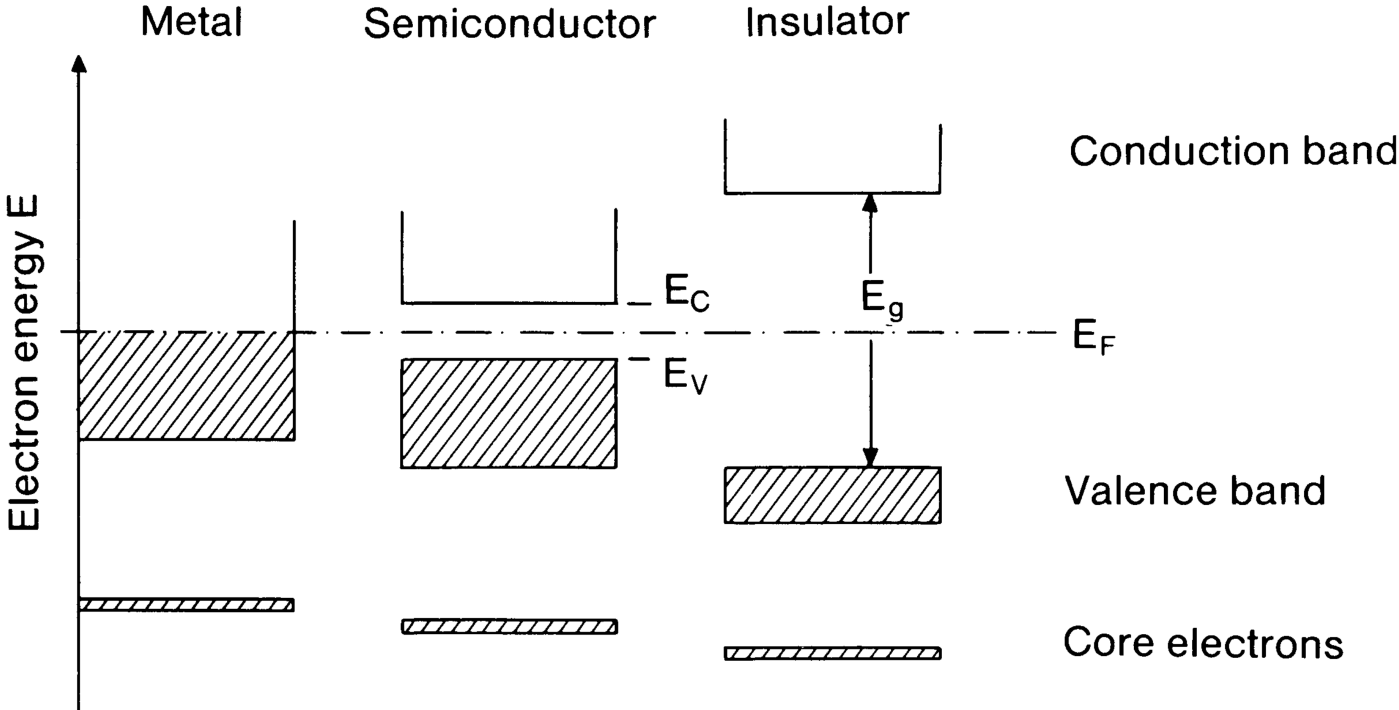
tumi@hi.is

10. vika haust 2018

Inngangur

- Við höfum séð að aðeins hlutfylltir orkuborðar geta borið rafstraum
- Fullir eða tómir orkuborðar leggja ekki til rafleiðni og þéttfni þar sem allir borðar eru fullir eða tómir er einangrari
- Ef fjarlægðin á milli efsta fyllta borða (gildisborða) og lægsta hluta lægsta tóma borða (leiðniborða) er tiltölulega lítill (~ 1 eV), þá getur hluti rafeinda sloppið úr gildisborða upp í leiðniborða – þá er talað um hálfleiðara
- Eitt einkenni hálfleiðara er að ef í þá er bætt mjög litlu magni af óhreinindum má breyta leiðni þeirra verulega sem og leiðnigerð

Inngangur



Frá Ibach and Lüth (2009)

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
- Það verður blöndun s - og p -bylgjufalla og (sp^3) -tengi myndast – sem nærri við jafnvægisstöðu leiðir til uppskiptingar í bonding (gildisborða) og antibonding (leiðniborða) brauta
- 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

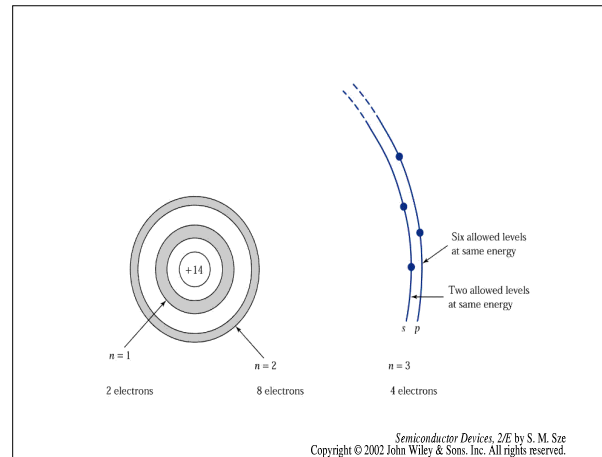
Hálfleiðarar

- 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.

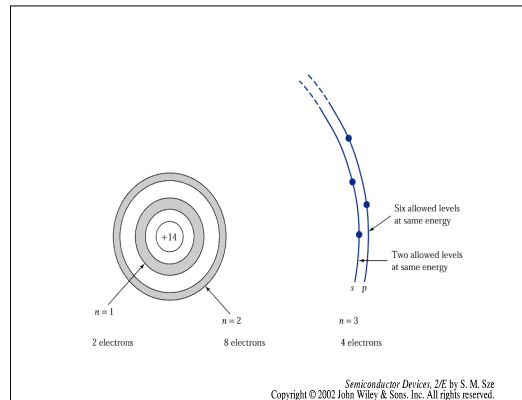
Hvel - borðar



Frá Sze (2002)

- 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

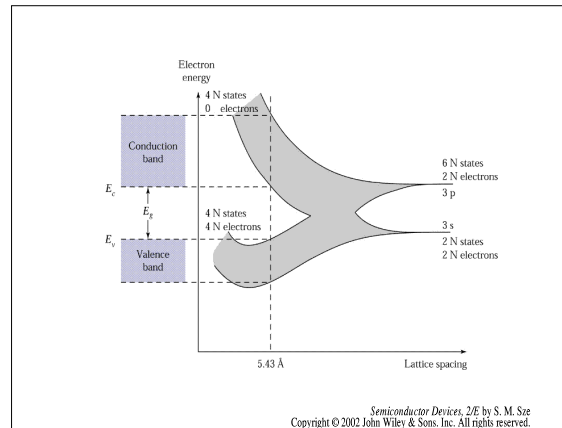
Hvel - borðar



Frá Sze (2002)

- 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

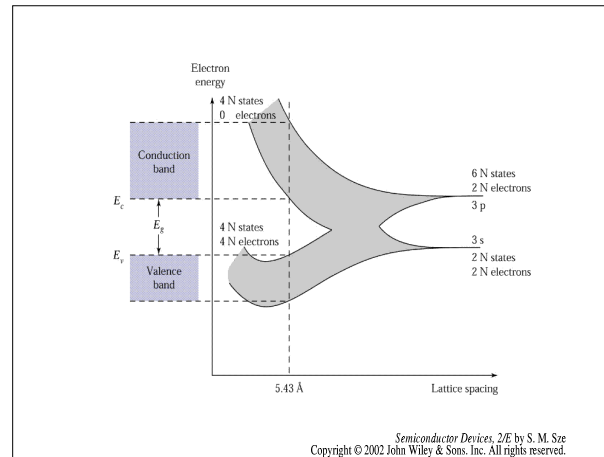
Hvel - borðar



Frá Sze (2002)

- 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

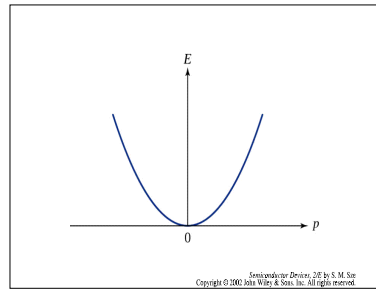
Hvel - borðar



Frá Sze (2002)

- 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

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

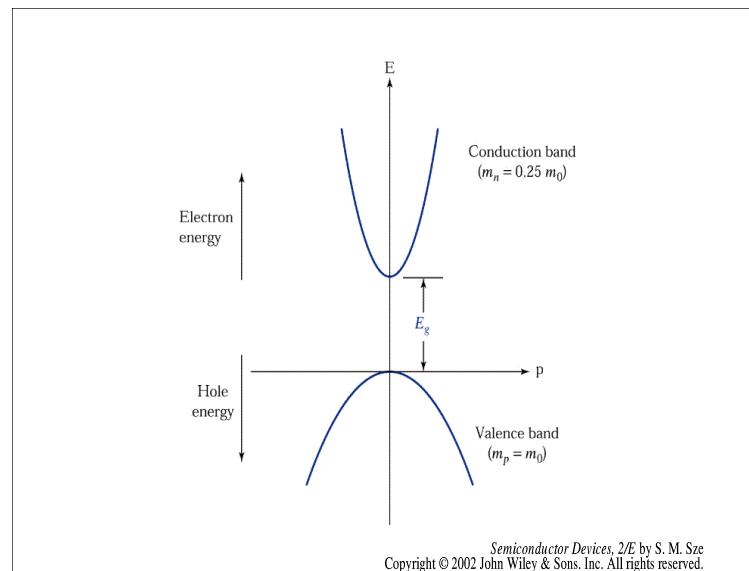
Orkugeil-borðar

- Virki massi rafeindarinnar er háður eiginleikum hálfleiðarans

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

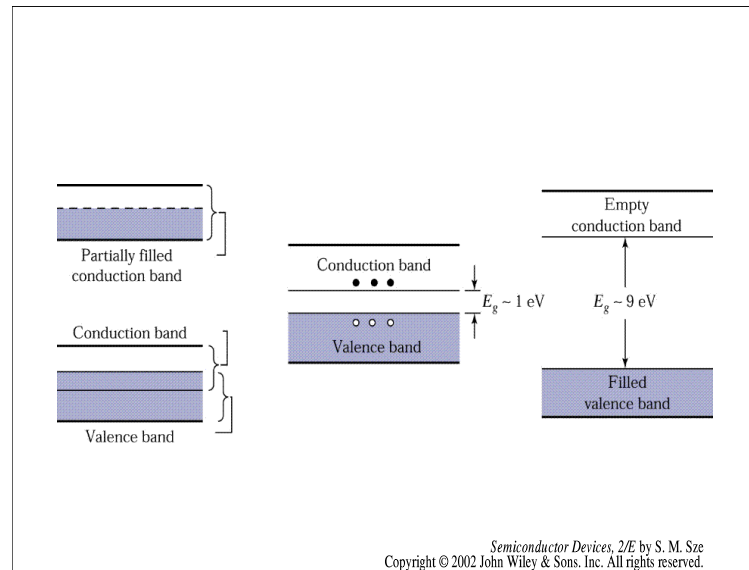
- Sama má rita fyrir holur
- Mjórri fleygbogi svarar þess vegna til stærri annarrar afleiðu og minni virks massa
- Aðskilnaður borða við $p = 0$ er orkugeilin E_g

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

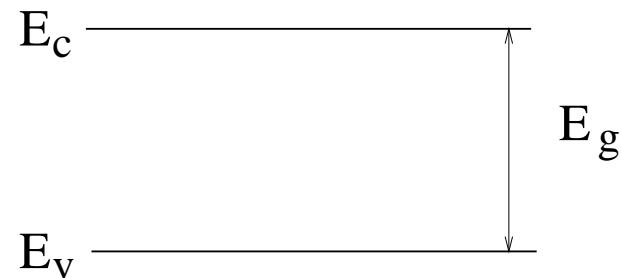
Orkugeil



Frá Sze (2002)

- (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

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

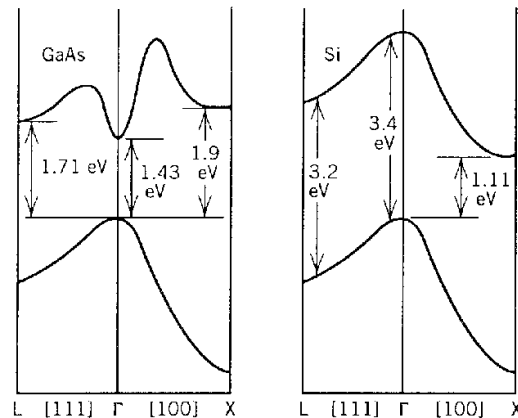
fyrir kísil og

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

fyrir GaAs

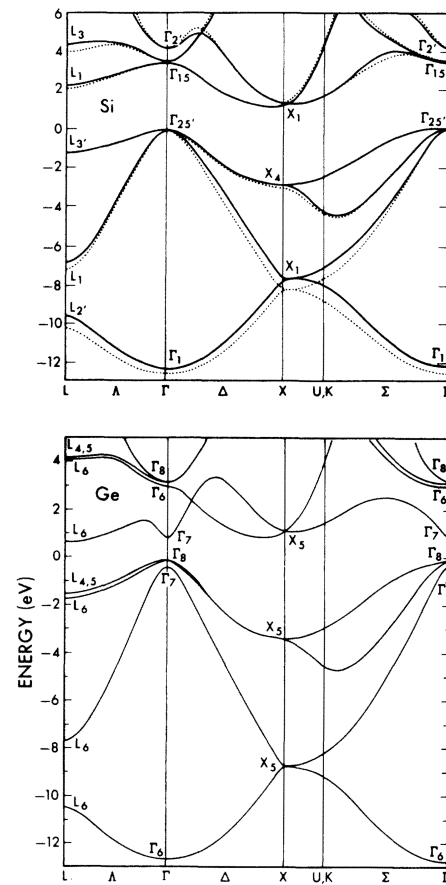
- Fyrir báða þessa hálfleiðara er dE_g/dT neikvætt og orkugeilin minnkar með auknu hitastigi

Orkuborðar



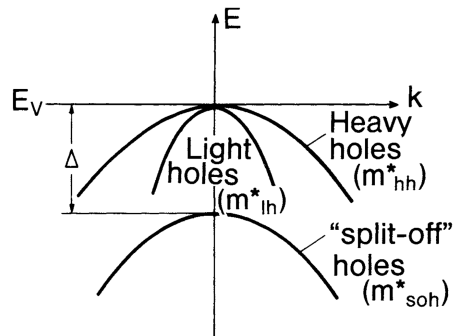
- Myndin sýnir orkuborða kísils og GaAs þar sem orka er teiknuð sem fall af skriðþunga hleðslubera í tvær kristallastefnur
- Orkan er teiknuð í hásamhverfu $[111]$ og $[100]$ stefnur kristallsins, $k = 0$ er táknað með Γ
- Orkugeilin E_g er á milli neðsta hluta leiðniborða og hæsta hluta gildisborða

Orkuborðar



Frá Chelikowsky and Cohen (1976)

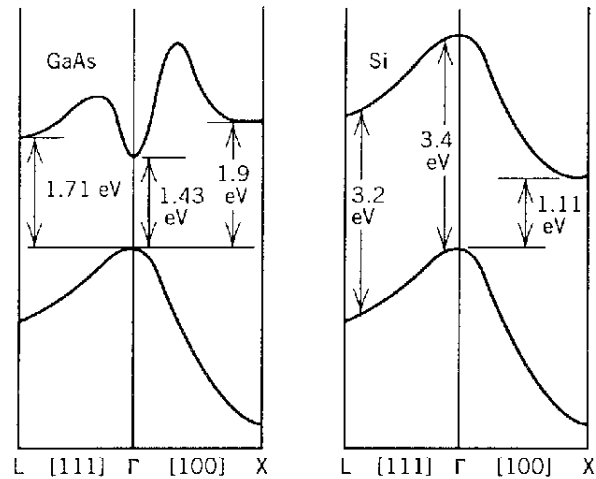
Orkuborðar



Frá Ibach and Lüth (2009)

- Við sjáum að efsti hluti gildisborðans er flóknari – það er annar gildisborði við Γ sem er $\Delta = 0.29$ eV neðan við hinn fyrri fyrir Ge og $\Delta = 0.044$ eV fyrir Si
- Þetta stafar af víxlverkun spuna og brautar
- Það er þess vegna talað um þungar og léttar holur táknað með m_{hh}^* og m_{lh}^*

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 frjálst 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

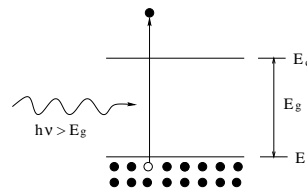
Virkur massi

- Rafeindir í kristalli eru ekki fullkomlega frjálsar, 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 $n = p = n_i$

⇒ Dæmi 9.1.

⇒ Dæmi 9.2.

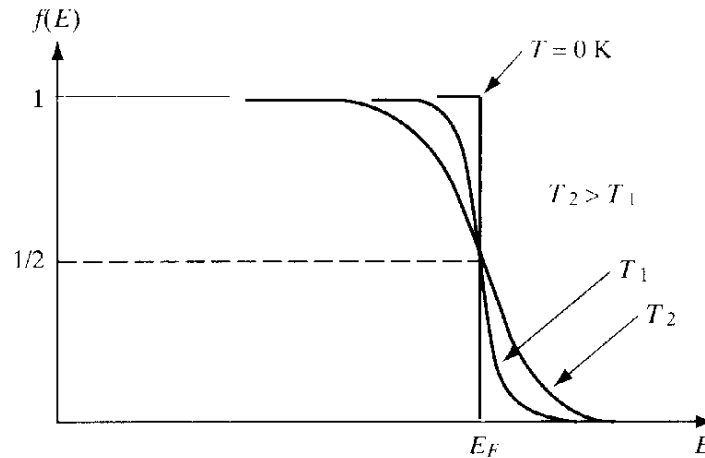
Tölfræði Fermi-Dirac

- Rafeindir í þéttfni hlíta tölfræði Fermi-Dirac

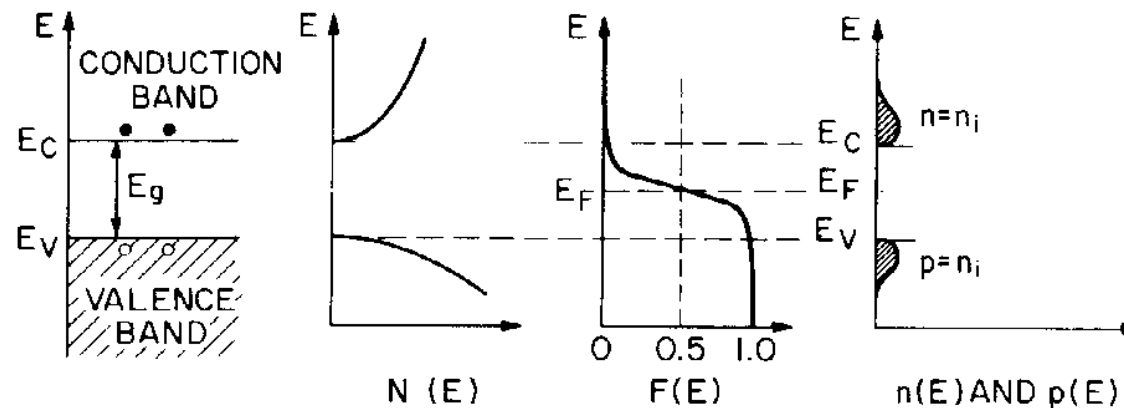
$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

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



Frá Sze (2002)

- 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

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

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

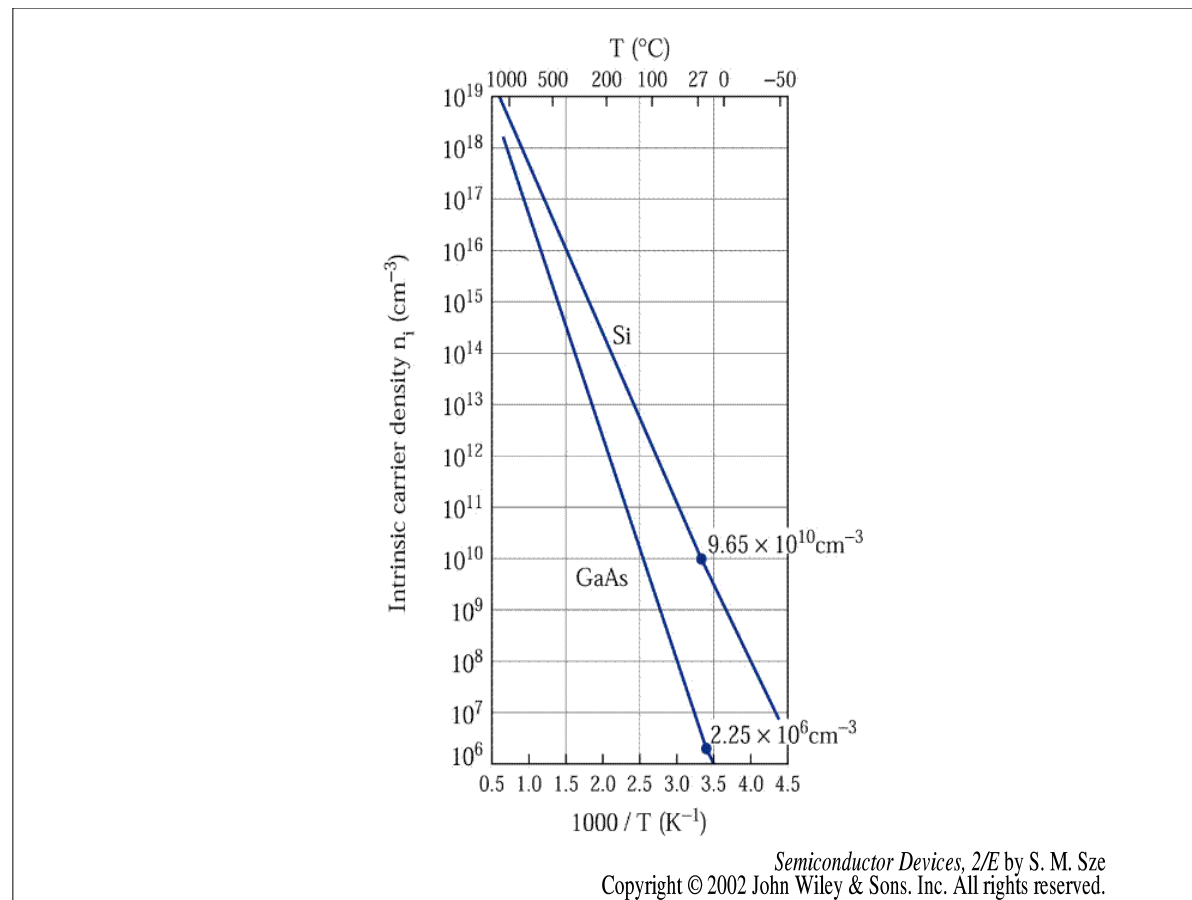
$$n_i = 9.65 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

fyrir kísil og

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

fyrir GaAs

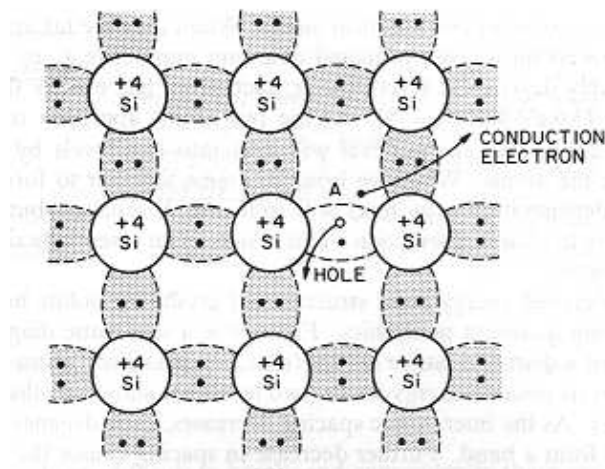
Eigin hálfleiðari



- Eiginþéttleiki í kísli og GaAs sem fall af umhverfu hitastigs

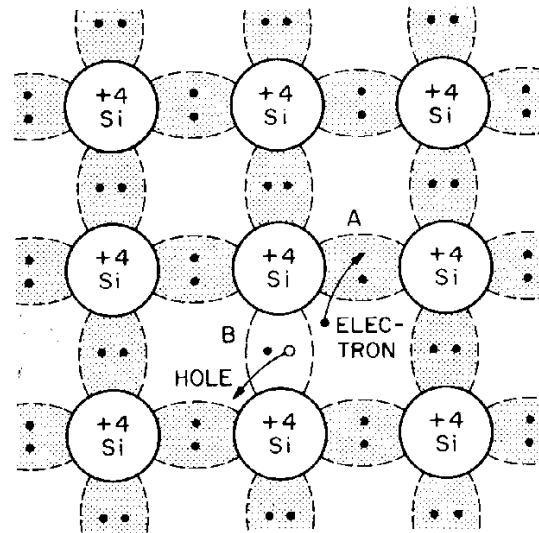
Íbættur hálfleiðari

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



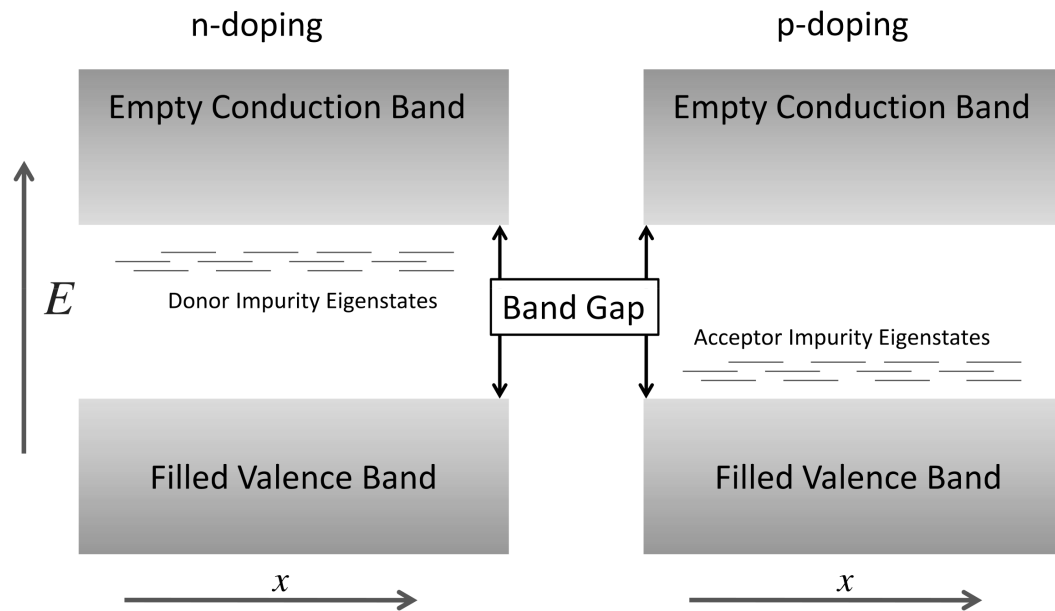
- Á myndinn sést kísilgrind þar sem einu kísilatómi hefur verið skipt út fyrir arsen atóm, sem hefur 5 gildisrafeindir
- Fimmta rafeindin er því gefin upp í leiðniborðann og kísillinn verður n-leiðandi og arsen er **rafgjafi**

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



Frá Simon (2013)

- Orkumynd af íbættum hálfleiðurum með rafgjafa íbót (vinstri) og rafþega íbót (hægri)

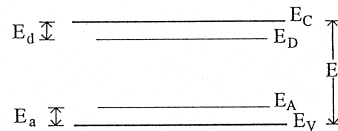
Hálfleiðarar

- 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 9.3. \implies Dæmi 9.4.

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 holuþéttleika 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.

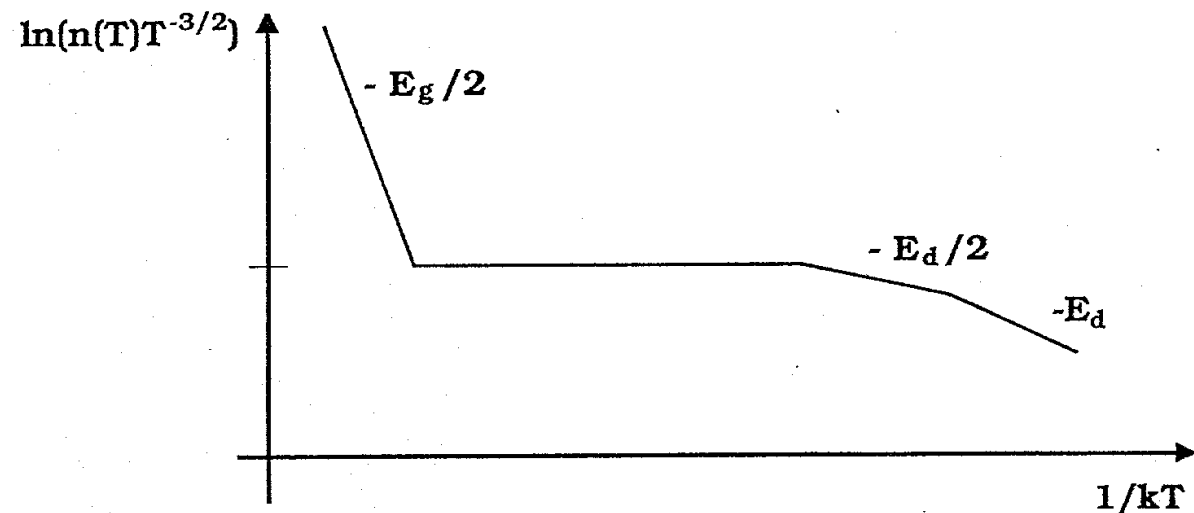
Jónunarorkan

- 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

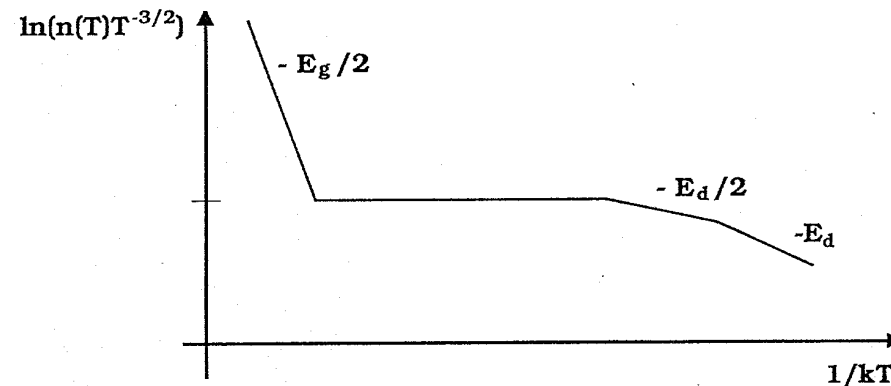
$$n = \frac{N_C(N_D - N_A)}{2N_A} \exp[-E_D/kT]$$

- 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

$$n - p = N_D - N_A$$

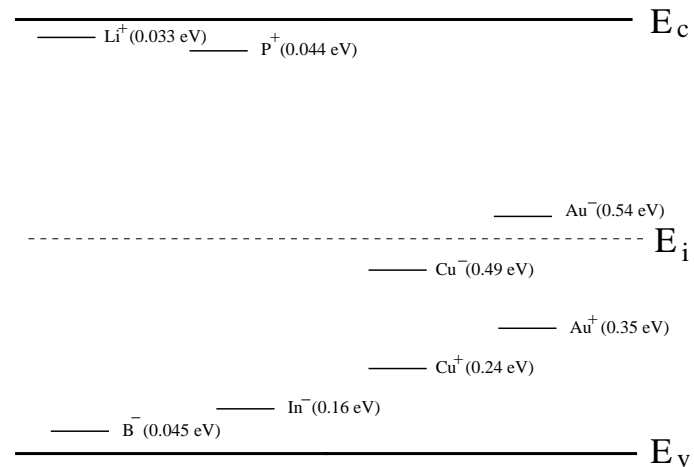
- Flest hálfleiðandi tól eru hönnuð til að vinna við stofuhita, og venjulega eru rafgjafa- og rafþegaíbætur nær að fullu jónaðar í slíkum tólum við það hitastig

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

Íbótarveilur í kísli

	IIIA	IVA	VA	VIA	
	5 10.811 B Boron	6 12.01115 C Carbon	7 14.0067 N Nitrogen	8 15.9994 O Oxygen	
	13 26.9815 Al Aluminum	14 28.086 4 Si Silicon	15 30.9738 P Phosphorus	16 32.064 S Sulfur	
IIB	30 65.37 Zn Zinc	31 69.72 Ga Gallium	32 72.59 Ge Germanium	33 74.922 As Arsenic	34 78.96 Se Selenium
	48 112.40 Cd Cadmium	49 114.82 In Indium	50 118.69 Sn Tin	51 121.75 Sb Antimony	52 127.60 Te Tellurium
	80 200.59 Hg Mercury	81 204.37 Tl Thallium	82 207.19 Pb Lead	83 208.980 Bi Bismuth	84 (210) Po Polonium

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

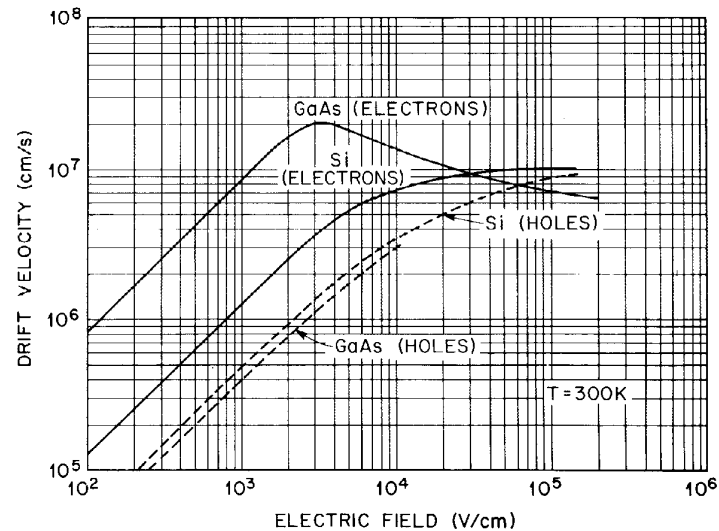
$$\mu_n = -\frac{\langle v \rangle}{\mathcal{E}}$$

- 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

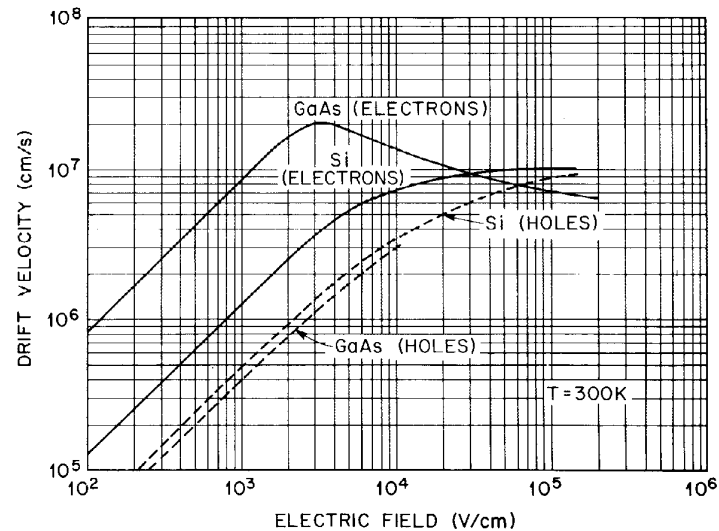
Leiðni og hreyfanleiki



Frá Sze (2002)

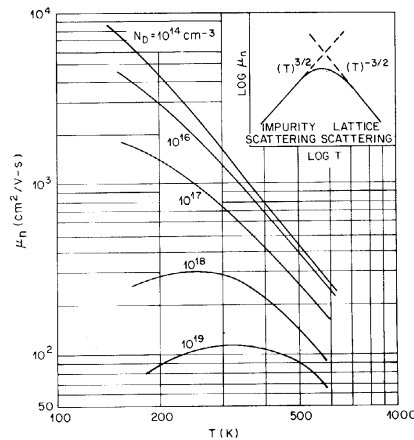
- Rekhraði sem fall af rafsviðsstyrk í GaAs og kísli
- Við lágan rafsviðsstyrk er rekhraðinn línulega háður álögðu sviði
- Það gildir á meðan tími milli árekstra τ er óháður álögðu sviði

Leiðni og hreyfanleiki



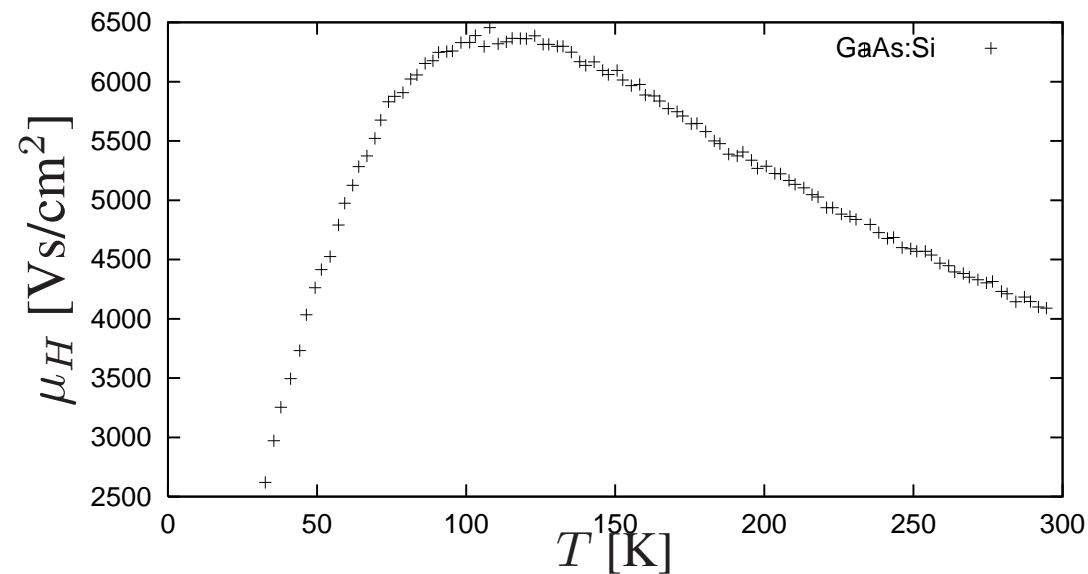
- Þegar rafsviðsstyrkurinn er aukinn (10^3 V/cm) verður leiðnin σ háð rafsviðinu
- Þá er rekhraðinn af svipaðri stærð og varmahreyfing hleðsluberanna $v_{th} \approx 10^7$ m/s og umfram orkan fer fremur til grindar en í að auka hraða hleðsluberanna–mettun

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

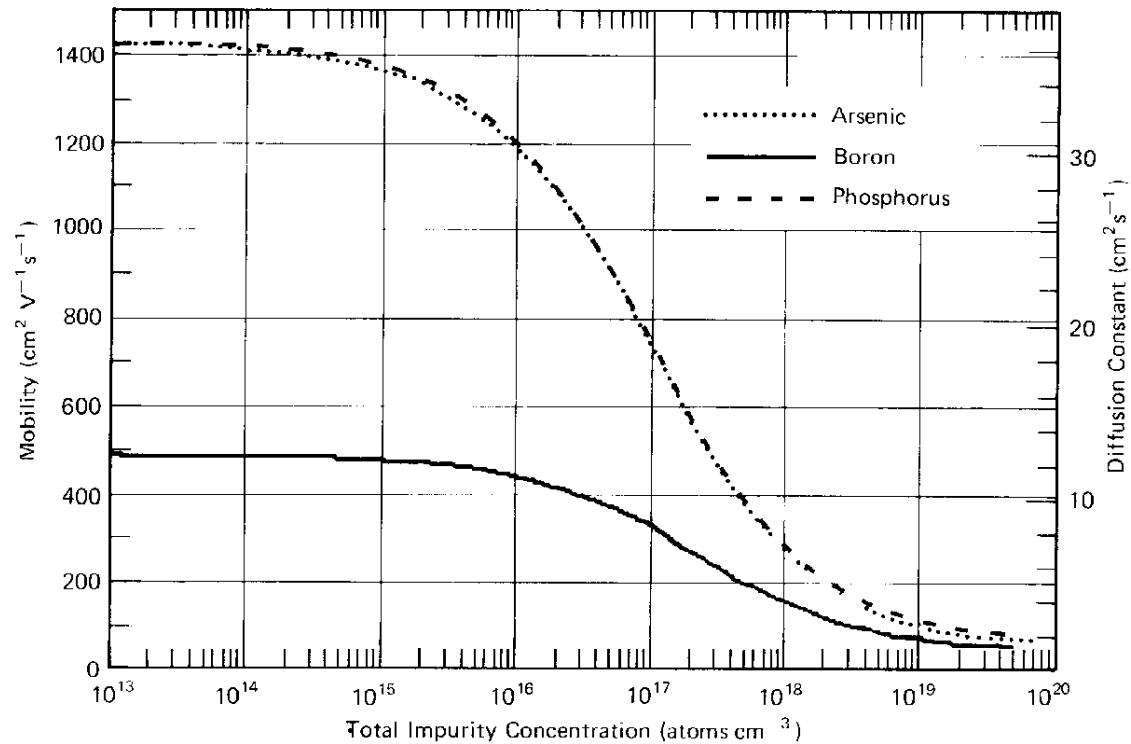
Leiðni og hreyfanleiki



- Hreyfanleiki í kísilíbættu GaAs mældur með Hall- og leiðnimælingu

⇒ Dæmi 9.5.

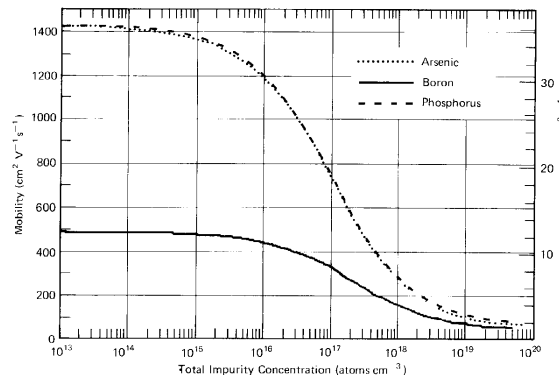
Leiðni og hreyfanleiki



Frá Muller and Kamins (1986)

- Hreyfanleiki rafeinda og hola í kísli við stofuhita

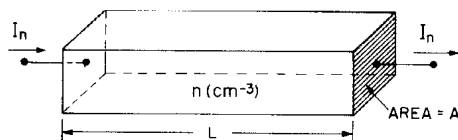
Leiðni og hreyfanleiki



Frá Muller and Kamins (1986)

- 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 10^{15} cm^{-3}
- Við hærri íbótarþéttleika er dreifing vegna jónaðrar íbótar af svipaðri stærðargráðu og grindartitringur og hreyfanleiki minnkar með aukinni íbót

Leiðni og hreyfanleiki



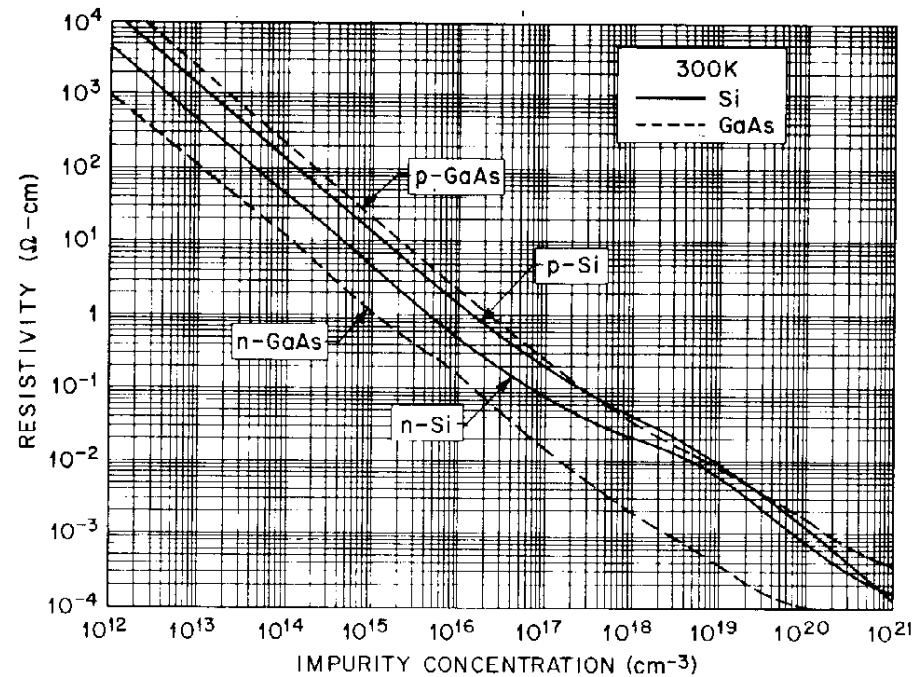
- **Viðnám** er eðliseiginleiki rásaeiningar eða tóls og er táknað með R þar sem

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

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

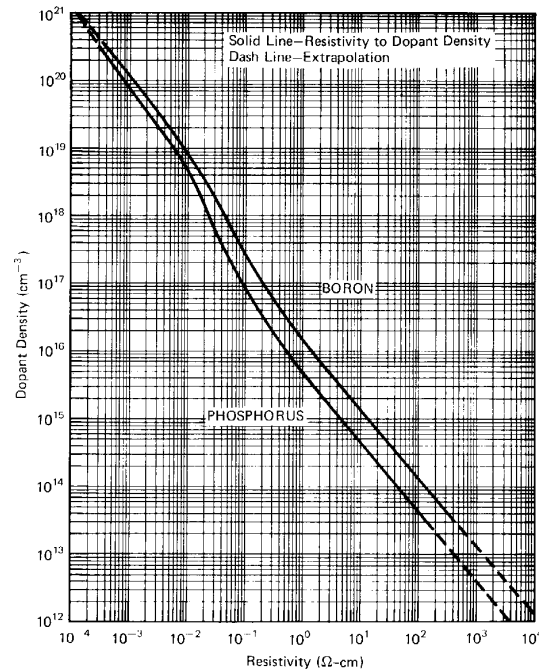
Efni	Eðlisviðnám [Ω cm]
Kísill	2.3×10^5
Kolefni	4×10^{-3}
Ál	2.7×10^{-6}
Kopar	1.7×10^{-6}
Polystyrene	1×10^{18}

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

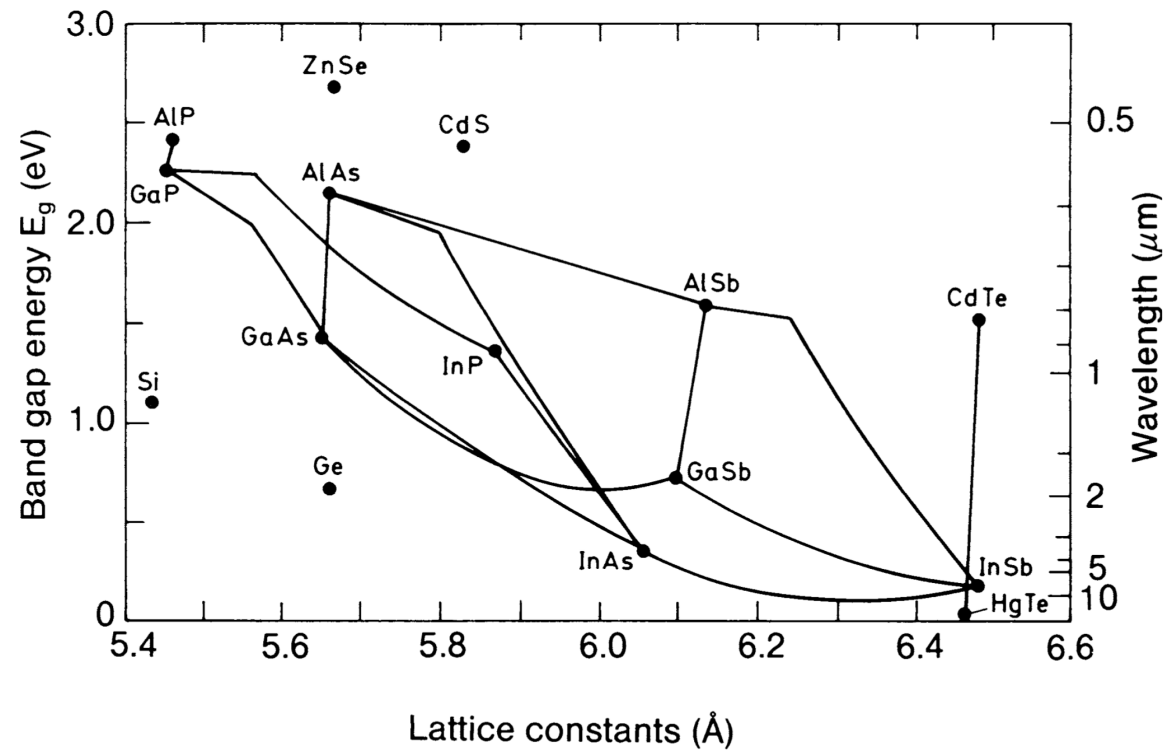
Leiðni og hreyfanleiki



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

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

Orkugeil



Frá Ibach and Lüth (2009)

Frekari upplýsingar

Þessi kafli er að mestu byggður á köflum 2.4 – 2.7 og 3 hjá Sze (2002). Sambærileg umfjöllun er í kafla 12 hjá Ibach and Lüth (2009) og kafla 3 hjá Streetman and Banerjee (2000). Það er umfjöllun um eðlisfræði hálfleiðara í kafla 17 og helstu hálfleiðaratól í kafla 18 hjá Simon (2013). Gröf sem sýna samband íbótarþéttleika, leiðni og hreyfanleika eru að mestu tekin frá Muller and Kamins (1986) og Sze (2002). Ítarlega umfjöllun um tölfræði í hálfleiðurum má finna hjá Bourgoïn and Lannoo (1983).

Heimildir

Bourgoin, J. and M. Lannoo (1983). *Point Defects in Semiconductors II: Experimental Aspects*, Volume 35 of *Springer Series in Solid-State Sciences*. Springer-Verlag.

Chelikowsky, J. R. and M. L. Cohen (1976). Nonlocal pseudopotential calculations for the electronic structure of eleven diamond and zinc-blende semiconductors. *Physical Review B* 14(2), 556–582.

Ibach, H. and H. Lüth (2009). *Solid-State Physics: An Introduction to Principles of Materials Science* (4 ed.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

Muller, R. S. and T. I. Kamins (1986). *Device Electronics for Integrated Circuits* (2 ed.). New York: John Wiley & Sons.

Simon, S. H. (2013). *The Oxford Solid State Basics*. Oxford: Oxford University Press.

Streetman, B. G. and S. Banerjee (2000). *Solid State Electronic Devices* (5 ed.). Prentice Hall.

Sze, S. M. (2002). *Semiconductor Devices: Physics and Technology* (2 ed.). John Wiley & Sons.