Verkleg eðlisfræði:

Hallhrif í hálfleiðurum

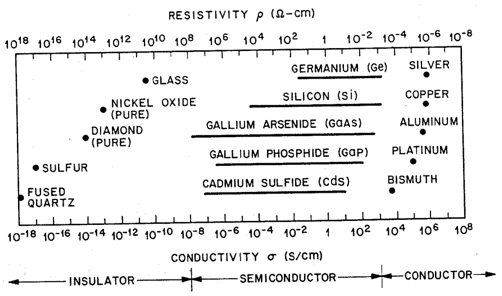
Tilraun 6

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

12. febrúar 2003

Hálfleiðarar



- Þéttefni má skipta í einangrara, hálfleiðara og leiðara
- Leiðni hálfleiðara er næm fyrir hitastigi, ljósi, segulsviði og magni óhreininda í efninu
- Þessi næmni leiðninnar gerir hálfleiðara mikilvægustu efnin í rafeindatækni

Hálfleiðarar

Tveir mikilvægustu hálfleiðararnir fyrir tól og smárásir eru

- Si - kísill
- GaAs - gallín arsen

Table 2 Element and Compound Semiconductors

Element	IV–IV Compounds	III–V Compounds	II–VI Compounds	IV–VI Compounds
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		InSb		

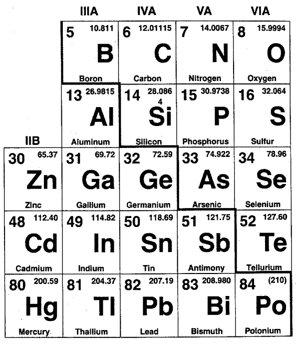
Kísill

Kísill er mest notaða efnið í framleiðslu smárása

Kostir kísils:

- Auðvelt er að oxa kísil og mynda kísiloxíð
- Kísiloxíð er ágætur einangrari
- Nóg er af kísli í náttúrunni og verð upphafsefnis tiltölulega lágt
- Kísill hefur stærri orkugeil en german og getur því unnið við hærra hitastig

Ræktun kísils



- Kísill kemur fyrir í náttúrunni, um fjórðungur jarðskorpunnar er kísill
- Það er mikilvægasta efnið fyrir rafeindaiðnaðinn
- Kísill er eitt mest rannsakaða frumefnið í náttúrunni.

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

$$E_{\mathrm{H}} = -\frac{m_{\mathrm{e}} q^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{13.6}{n^2}$$

  þar sem

  m_{e} er massi frjálsrar rafeindar

  q er hleðsla rafeindar

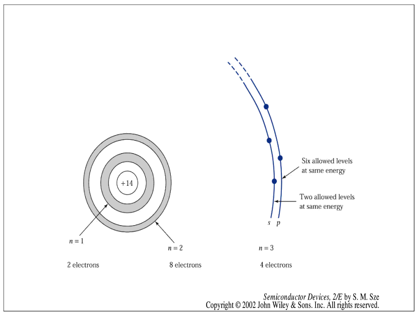
  ϵ_0 er rafsvörunarstuðull lofttæmis

  h er fasti Planck

  n er heil jákvæð tala, **meginskammtatala**

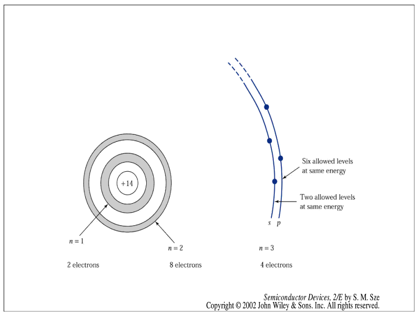
- Hin stöku orkuástönd eru -13.6 eV fyrir grunnorkustigið ($n = 1$), -3.4 eV fyrir fyrsta örvaða ástand ($n = 2$) o. s. frv.

Hvel - borðar



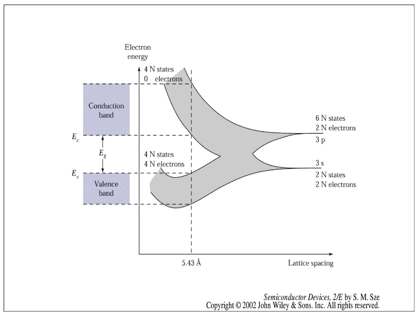
- Samgild tengi eiga sér stað milli atóma sama frumefnis eða ólíkra frumefna sem hafa svipaða rafeindaskipun ytri hvela
- Myndin sýnir einangrað kísilatóm sem hefur 14 rafeindir
- Af þessum 14 eru 10 á innri hvelum
- Hinar 4 eru tiltölulega veikar bundnar og geta tekið þátt í efnahvörfum

Hvel - borðar



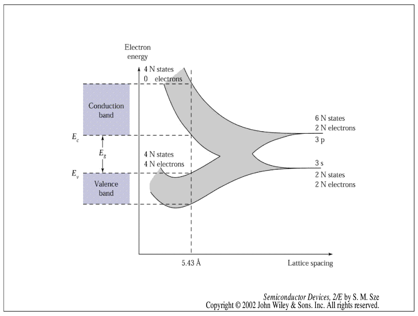
- Það þarf því aðeins að huga að ysta hveli ($n = 3$) fyrir gildisrafeindir þar eð tvö innri hvelin eru algerlega full
- 3s hvelið (þ.e. $n = 3$ og $\ell = 0$) hefur tvö leyfð ástönd og í því sitja tvær gildisrafeindir við $T = 0$ K
- 3p hvelið (þ.e. $n = 3$ og $\ell = 1$) hefur sex leyfð ástönd og í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

Hvel - borðar



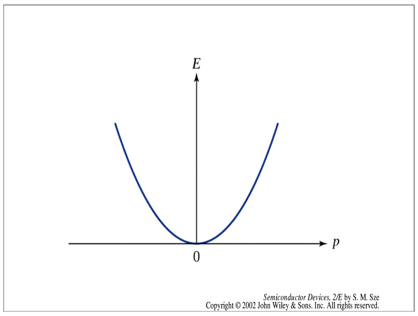
- Myndun kísilkristalls úr N einagruðum kísilatómum
- Þegar fjarlægðin á milli atóma minnkar, þá renna 3s og 3p hluthvel hinna N kísilatóma saman og skarast, mynda borða
- Við tiltekna jafnvægisfjarlægð klofna borðarnir aftur upp, fjögur skammtaástönd á atómi í lægri borðanum og fjögur í þeim efri

Hvel - borðar



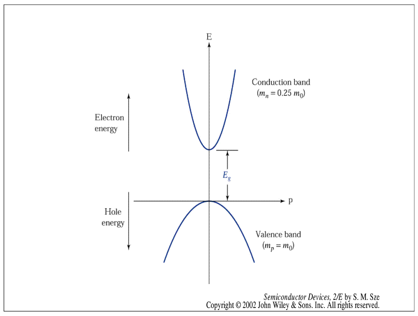
- Við alkul sitja allar rafeindirnar í lægstu leyfðu ástöndunum (gildisborða)
- Efri ástöndin eru ósetin og tóm (leiðniborði)
- E_g er orkan sem þarf til að losa rafeind upp í leiðniborða og skilja eftir holu í gildisborða

Orkugeil-borðar



- Orka frjálsrar rafeindar er gefin með
$$E = \frac{p^2}{2m_e}$$
þar sem p er skriðþungi og m_e er massi frjálsrar rafeindar
- Vegna lotubundna mættis kjarnans þarf að skipta á massa frjálsrar rafeindar með virkum massa
$$E = \frac{p^2}{2m_e^*}$$

Orkugeil-borðar

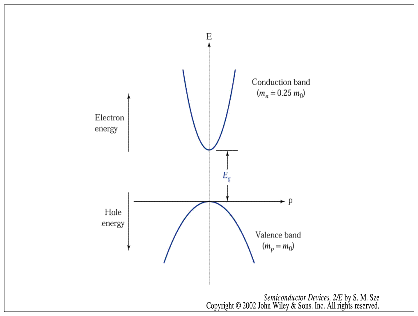


- Virki massi rafeindarinnar er háður eiginleikum hálfleiðarans

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

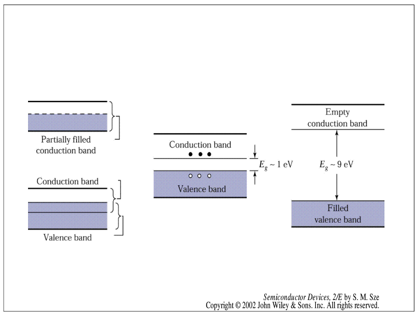
- Sama má rita fyrir holur
- Mjórri fleygbogi svarar þess vegna til stærri annarrar afleiðu og minni virks massa

Orkugeil-borðar



- Myndin sýnir samband orku og skriðþunga í hálfleiðara með virkan massa rafeinda $m_e^* = 0.25 m_e$ í leiðniborða og virkan massa hola $m_h^* = m_e$ í gildisborða
- Aðskilnaður borða við $p = 0$ er orkugeilin E_g
- 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) Einangrari

Orkugeil

- Þegar atóm koma saman í þéttefni mynda brautir rafeindanna orkuborða
- Á milli borðanna eru svæði, tiltekin orkugildi, sem rafeindir þéttefnisins 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

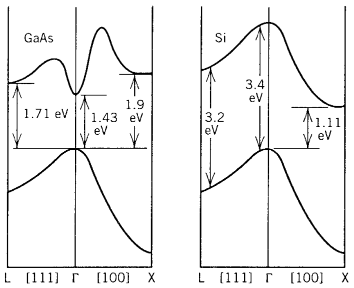
  $$E_{\mathrm{g}} = 1.17 - \frac{(4.73 \times 10^{-4})T^2}{(T + 636)}$$

  fyrir kísil og

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

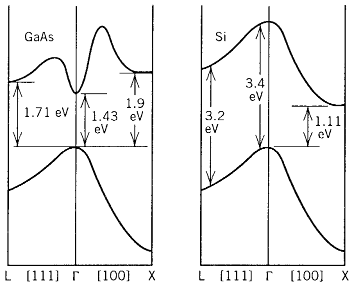
  fyrir GaAs
- Fyrir báða þessa hálfleiðara er $\mathrm{d}E_{\mathrm{g}}/\mathrm{d}T$ neikvætt og orkugeilin minnkar með auknu hitastigi

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

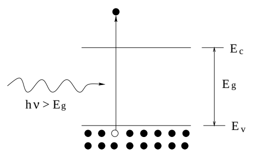


- Fyrir kísil sést að hágildi gildisborða er við $k = 0$ en lággildi leiðniborða er í [100] stefnuna
- Til að flytja rafeind úr gildisborða upp í leiðniborða þarf því að koma til orka ($> E_{\mathrm{g}}$) og breyting þarf að verða í skriðþunga
- Kísill hefur þess vegna **óbeina orkugeil**

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 gildistengi 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

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

$$n = p = n_{\mathrm{i}}$$

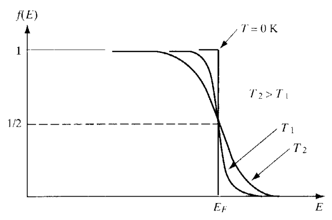
Tölfræði Fermi-Dirac

- Rafeindir í þéttefni hlíta tölfræði Fermi-Dirac

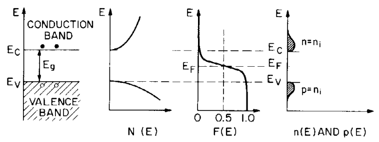
$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_{\mathrm{F}}}{kT}\right)}$$

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

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



Tölfræði Fermi-Dirac



- Nota má Fermifallið til að reikna þéttleika rafeinda og hola í hálfleiðara ef þéttleikar leyfðra ástanda í leiðni- og gildisborða eru þekktir
- Þéttleiki rafeinda í leiðniborða er

$$n = \int_{\infty}^{E_{\mathrm{c}}} f(E)N(E)dE$$

þar sem $N(E)dE$ er ástandsþéttleiki á orkubilinu sem dE spannar

- Ástandsþéttleikinn 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

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

og

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

- Þá er þéttleiki rafeinda í leiðniborða

$$n \approx N_{\mathrm{C}} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{c}} - E_{\mathrm{F}}}{kT}\right)$$

þar sem

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

er **virkur ástandsþéttleiki í leiðniborða**

Tölfræði hleðslubera

- Á sama hátt fæst þéttleiki hola í gildisborða

$$p \approx N_{\mathrm{V}} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{F}} - E_{\mathrm{v}}}{kT}\right)$$

þar sem

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

er **virkur ástandsþéttleiki í gildisborða**

- Nú má setja

$$np = N_{\mathrm{C}} N_{\mathrm{V}} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{g}}}{kT}\right) = n_{\mathrm{i}}^2$$

Tölfræði hleðslubera

- Jöfnurnar má umrita

$$n = n_{\mathrm{i}} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{F}} - E_{\mathrm{i}}}{kT}\right)$$

$$p = n_{\mathrm{i}} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{i}} - E_{\mathrm{F}}}{kT}\right)$$

þar sem E_{i} er eiginorkustigið

- Við stofuhita er

$$N_{\mathrm{C}} = 2.8 \times 10^{19} \quad \mathrm{cm}^{-3}$$

$$N_{\mathrm{V}} = 1.04 \times 10^{19} \quad \mathrm{cm}^{-3}$$

fyrir kísil og

$$N_{\mathrm{C}} = 4.7 \times 10^{17} \quad \mathrm{cm}^{-3}$$

$$N_{\mathrm{V}} = 7 \times 10^{18} \quad \mathrm{cm}^{-3}$$

fyrir GaAs

Tölfræði hleðslubera

- Fermiorkustigið í eiginleiðandi hálfleiðara er

$$E_{\mathrm{F}} = E_{\mathrm{i}} = \frac{E_{\mathrm{c}} + E_{\mathrm{v}}}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_{\mathrm{v}}}{N_{\mathrm{c}}}\right)$$

- Nú er

$$np = n_{\mathrm{i}}^2$$

svo

$$n_{\mathrm{i}}^2 = N_{\mathrm{v}} N_{\mathrm{c}} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{g}}}{kT}\right)$$

og

$$n_{\mathrm{i}} = \sqrt{N_{\mathrm{v}} N_{\mathrm{c}}} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{g}}}{2kT}\right)$$

þar sem

$$E_{\mathrm{g}} = E_{\mathrm{c}} - E_{\mathrm{v}}$$

og

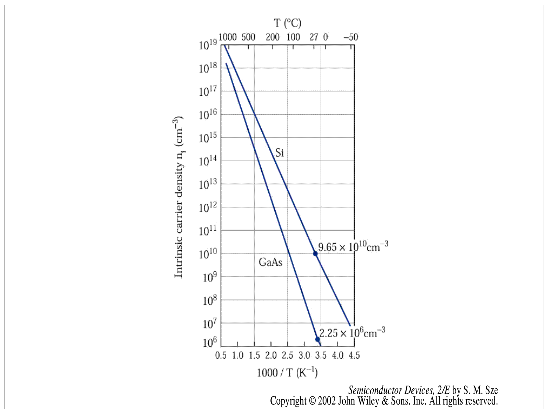
$$n_{\mathrm{i}} = 9.65 \times 10^{9} \quad \mathrm{cm}^{-3}$$

fyrir kísil og

$$n_{\mathrm{i}} = 2.25 \times 10^{6} \quad \mathrm{cm}^{-3}$$

fyrir GaAs

Eigin hálfleiðari



- Eiginþéttleiki í kísli og GaAs sem fall af umhverfu hitastigs

Íbót í hálfleiðurum

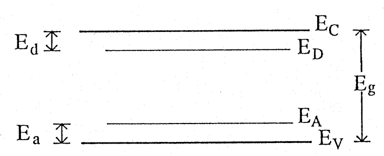
- Rafleiðni hálfleiðara má breyta um mörg stærðarþrep með því að bæta örlitlu magni snefilefna í hreinan kristall og er það nefnt að **íbæta hálfleiðarann**.
- Við lágt hitastig ákvarðast flestir eiginleikar hálfleiðara af íbótinni.
- Íbót getur ýmist verið **rafgjafi** eða **rafþegi**.
- Jónuð rafgjafaíbót gefur þá rafeind í leiðniborðann. Þessar rafeindir taka þá þátt í flutningsferli hálfleiðarans, en jónuð íbótin verður jákvætt hlaðin. Rafgjafar auka þannig leiðni með rafeindum í hálfleiðurum.
- Rafeindirnar eru hremmdar af rafgjöfum við nægilega lág hitastig, sem verða við það óhlaðnir. Þetta er kallað að frysta út leiðnirafeindir.

Íbættur hálfleiðari

- Þegar kristallur er íbættur eru mynduð ný orkustig sem gjarnan sitja í orkugeilinni
- Þegar einu kísilatómi hefur verið skipt út fyrir arsen atóm, sem hefur 5 gildisrafeindir þá er fimmta rafeindin gefin upp í leiðniborðann og kísillinn verður n-leiðandi og arsen er **rafgjafi**
- 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**

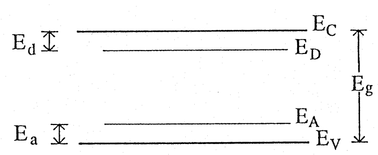
Íbót í hálfleiðurum

- Mikilvægasti eiginleiki íbótar er **jónunarorkan**, það er sú orka, sem þarf til að fjarlægja eina rafeind úr rafgjafa ástandi upp í neðri brún leiðniborða.



- Á myndinni, sem sýnir orkustig hálfleiðara, eru rafgjafa ástöndin staðsett í orkugeilinni.
- Rafgjafaíbót er sögð grunn ef orkustig hennar er nálægt neðri brún leiðniborða, t.d. þegar jónunarorka er lítil í samanburði við orkugeilina.

Íbót í hálfleiðurum



- Rafþegaíbót hefur þann eiginleika að hremma eina rafeind úr kristallinum. Þannig verður rafþeginn neikvætt hlaðin, og hola myndast í gildisborðann.
- Rafþegar í hálfleiðurum eru ábyrgir fyrir leiðni með holum.
- Það hvort gefin íbót er rafgjafi eða rafþegi ákvarðast í flestum tilfellum af stöðu hennar í lotukerfinu.

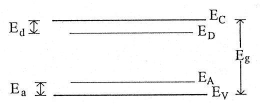
Hálfleiðarar

- 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 rafþegaíbót

$$E_F - E_v = kT \ln\left(\frac{N_v}{N_A}\right)$$

- Oft er hentugt að rita rafeinda- og holuþéttleika sem fall of eiginþéttleika n_i og eiginorkustiginu

$$n = N_C \exp\left[-(E_c - E_F)/kT\right]$$

$$= N_C \exp\left[-(E_c - E_i)/kT\right] \exp\left[-(E_F - E_i)/kT\right]$$

eða

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

og

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

Tölfræði hleðslubera

- Ef hvorutveggja rafgjafa og rafþegaíbætur eru í hálfleiðaranum þá ákvarðar sú íbót sem hefur hærri þéttleika leiðnigerð hálfleiðarans
- Fermiorkustigið stillir sig af til að varðveita hleðslujafnvægi

$$n + N_A = p + N_D$$

Notum

$$np = n_i^2$$

og leysum fyrir hleðsluberaþéttleika 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

$$p_{\rm p} = \frac{1}{2}\left[N_{\rm A} - N_{\rm D} + \sqrt{(N_{\rm A} - N_{\rm D})^2 + 4n_{\rm i}^2}\right]$$

og

$$n_{\rm p} = \frac{n_{\rm i}^2}{p_{\rm p}}$$

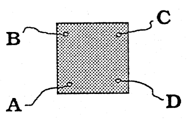
- Yfirleitt er virkur íbótarþéttleiki $|N_{\rm D} - N_{\rm A}|$ mun stærri en eiginþéttleikinn $n_{\rm i}$ svo að

$$n_{\rm n} \approx N_{\rm D} - N_{\rm A} \quad \text{ef} \quad N_{\rm D} > N_{\rm A}$$

og

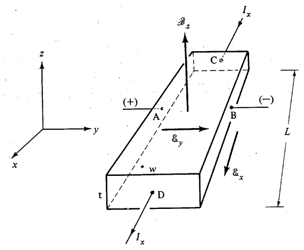
$$p_{\rm p} \approx N_{\rm A} - N_{\rm D} \quad \text{ef} \quad N_{\rm A} > N_{\rm D}$$

Hallhrif í hálfleiðurum



- Hallhrif má nota til að ákvarða
  - Hleðsluberaþéttleika
  - Ríkjandi hleðslubera í efninu
- Ef Hallmælingar eru notaðar til að mæla hleðsluberaþéttleika sem fall af hitastigi má ákvarða örvunarorku ráðandi veilu í efninu
- Ef að auki er mælt eðlisviðnám efnisins má ákvarða hreyfanleika ríkjandi hleðslubera

Hallhrif í hálfleiðurum



- Hleðsluberar sem hreyfast hornrétt á stefnu segulsviðs verða fyrir stefnubreytingu vegna Lorentzkraftsins

$$\mathbf{F} = e(\mathcal{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

er þá kraftur á holu með hleðslu e

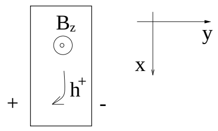
- Nú er

$$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{k}} B_z$$

- Þannig að

$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = -\hat{\mathbf{j}} v_x B_z$$

Hallhrif í hálfleiðurum



- Þannig er

$$F_y = e(\mathcal{E}_y - v_x B_z)$$

- Ef holur eiga að geta flætt í x-stefnu án þess að fá hröðun í y-stefnu vegna $ev_x B_z$ verður að gilda

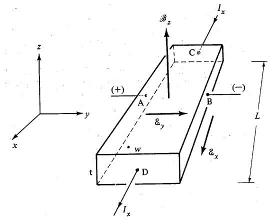
$$F_y = 0$$

sem jafngildir

$$\mathcal{E}_y = v_x B_z$$

- Þetta hefur í för með sér Hallspennu $V_H = \mathcal{E}_y w$

Hallhrif í hálfleiðurum



- Straumurinn um sýnið ræðst af hleðsluberaþéttleika og hraða þeirra

$$I_x = wdpev_x$$

fyrir holur

- Straumþéttleiki er þá

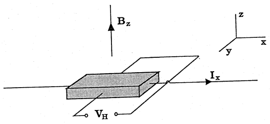
$$j_x = epv_x$$

- Þá er rafsviðið

$$\mathcal{E}_y = v_x B_z = \frac{j_x}{ep} B_z = R_H j_x B_z$$

- Stærðin R_H er nefnd Hallfasti.

Hallhrif í hálfleiðurum



- Hallspennan myndast hornrétt á bæði segulsviðið og strauminn.
- Hallspennan er gefin með

$$V_H = \frac{R_H I_x B_z}{d}$$

þar sem d er þykkt sýnisins í stefnu segulsviðsins, I_x er straumurinn í gegnum sýnið og B_z er segulsviðið hornrétt á sýnið.

- Þar eð stefna Lorentz kraftsins ræðst af hleðslu ríkjandi bera, gefur formerki Hallspennunnar til kynna hvort leiðnin fer fram með rafeindum eða holum.

Hallhrif í hálfleiðurum

- Hallspennan er mæld fyrir þekkt segulsvið B_z og straum I_x og út frá Hallspennunni finnum við Hallfastann
- Hallfastinn R_H er neikvæður fyrir frjálsar rafeindir.
- Við ritum fyrir rafeindir annars vegar

$$R_H = -\frac{1}{ne}$$

og holur hins vegar

$$R_H = \frac{1}{pe}$$

Leiðnimælingar í hálfleiðurum

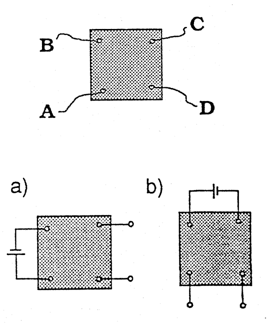
- Eðlisviðnám er skilgreint sem

$$\rho = \frac{Rwd}{L} = \frac{V_{CD}/I_x}{L/wd}$$

og hefur eininguna Ωm.

- Sýna má fram á að hægt sé að mæla eðlisviðnám sýnis með óreglulega lögun ef það uppfyllir eftirfarandi skilyrði:
  1. Snerturnar séu á jaðri sýnisins.
  2. Snertunar séu nægilega litlar.
  3. Sýnið hafi einsleita þykkt.
  4. Yfirborð sýnisins sé einfaldlega samhangandi, það er ekki séu einangruð göt í sýninu.

Leiðnimælingar í hálfleiðurum



- Skilgreint er viðnámið $R_{\mathrm{AB,CD}}$ sem spennumunurinn á milli snerta D og C á straumeiningu sem um snerturnar A og B fer þegar tengt er eins og mynd a) sýnir.
- Þetta er ritað $R_{\mathrm{AB,CD}} = \frac{V_{\mathrm{AB,CD}}}{I_{\mathrm{AB}}}$. Á hliðstæðan hátt er $R_{\mathrm{BC,DA}}$ skilgreint út frá tengingu á mynd b).

Leiðnimælingar í hálfleiðurum

- Sýnt hefur verið að eðlisviðnámið er einkvæmt ákvarðað af $R_{\mathrm{AB,CD}}$ og $R_{\mathrm{BC,DA}}$ sem hlíta jöfnunni

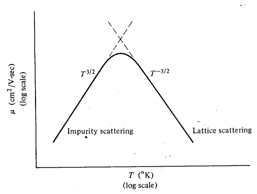
$$\exp\left(\frac{-d\pi R_{\mathrm{AB,CD}}}{\rho}\right) + \exp\left(\frac{-d\pi R_{\mathrm{BC,DA}}}{\rho}\right) = 1$$

  þar sem ρ er eðlisviðnám efnis og d er þykkt sýnisins.
- Til að reikna út eðlisviðnámið er ritað

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2}\frac{R_{\mathrm{AB,CD}} + R_{\mathrm{BC,DA}}}{2}\, f\left(\frac{R_{\mathrm{AB,CD}}}{R_{\mathrm{BC,DA}}}\right)$$

  þar sem f er eingöngu fall af hlutfallinu $\frac{R_{\mathrm{AB,CD}}}{R_{\mathrm{BC,DA}}}$.

Hreyfanleiki



- **Hallhreyfanleikinn** er síðan skilgreindur út frá skilgreiningu

$$\sigma = ne^2\tau_n/m_e = ne\mu_n$$

  þannig að

$$\mu_n = \frac{\sigma}{ne} = R_H\sigma$$

  gildir fyrir rafeindir, og tilsvarandi fyrir holur.

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 veiluþéttleikann og tilsvarandi jónunarorku, það er stöðu veilunnar í orkugeilinni.
- Í hreinum hálfleiðandi kristalli myndast hola í gildisborðann fyrir sérhverja rafeind sem er örvuð 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

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

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

þar sem $N_C(E)$ er ástandsþéttleiki á leiðniborðanum

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

og

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

er ástandsþéttleiki á gildisborðanum. Stuðullin tveir endurspeglar þá staðreynd að hvert orkustig hefur tvær spunastefnur.

Jónunarorkan

- Skoðum nú hálfleiðara sem inniheldur rafvirkar veilur
- 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 veiluástöndum

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

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

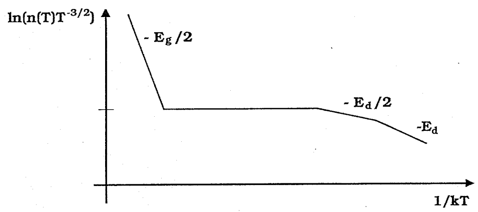
þar sem g_D og g_A eru margfeldnistuðlar rafgjafa og rafþega ástandanna.

- Fimmta jafnan lýsir rafhlutleysi hálfleiðarans

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

Jónunarorkan

- 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 $g_A = 2$.
- Mikilvægt tilfelli er þegar hitastigið er það lágt að $N_D \gg N_A > n$ þá er

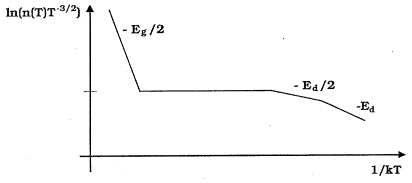
$$n = \frac{N_C(N_D - N_A)}{2N_A}\exp[-E_d/kT]$$

- 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

$$n - p = N_D - N_A$$

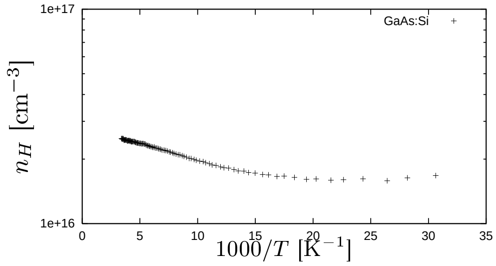
- Flest hálfleiðandi tól eru hönnuð til að vinna við stofuhita, og venjulega eru rafgjafa- og rafþegaíbætur nær að fullu jónaðar í slíkum tólum við það hitastig.

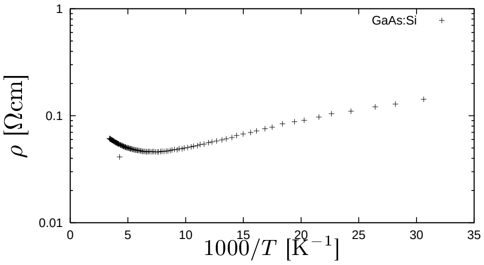
Jónunarorkan



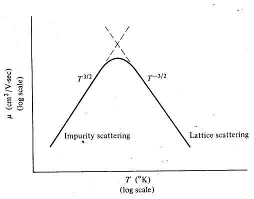
- Skoðum n-leiðandi hálfleiðara ($N_D > N_A$). Framangreindar jöfnur gefa $n(T)$ á hinum ýmsu hitastigsbilum, og segja að graf af $\ln(nT^{-3/2})$ á móti T^{-1} sé nálgað með beinni línu með hallatölu $E_d, E_d/2, 0$ og $E_g/2$ með auknu hitastigi.

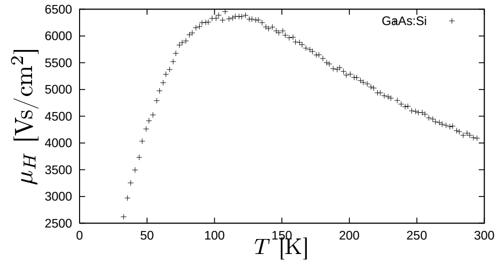
Hallmælingar



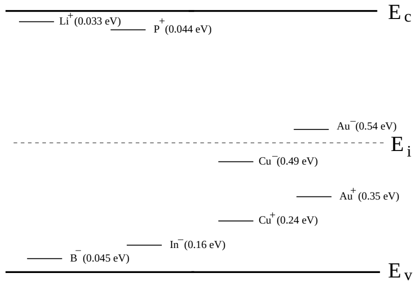


Hreyfanleiki





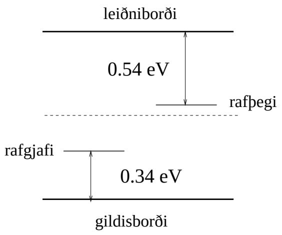
Íbótarveilur í kísli



- 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

Gull í kísli

- Í tilrauninni verður ákvarðaður hleðsluberaþéttleiki, rafleiðni og hreyfanleiki hleðslubera í kísli sem íbættur hefur verið með gulli
- Gull í kísli hefur verið rannsakað í áratugi [6].
- Tvær veilur, sem raktar eru til gullíbótar eru vel þekktar
  - rafþegi 0.54 eV frá leiðniborða
  - rafgjafi 0.35 eV frá gildisborða



Heimildir

[1] D. C. Look, *Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices*, John Wiley & Sons, 1989

[2] B. G. Streetman, *Solid State Electronics*, Prentice-Hall, 1980

[3] J. Bourgoin og M. Lannoo, *Point Defects in Semiconductors II*, Springer Series in Solid-State Sciences, Vol. 35, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1983

[4] L.J. van der Pauw, *Philips Research Reports* **13**, (1958) 1 -9

[5] W.R. Runyan, *Semiconductor Measurements and Instrumentation*, McGraw-Hill Book Company, 1983

[6] C. B. Collins, R. O. Carlson and C. J. Gallagher, *Physical Review* **105** (1957) 1168 - 1173