Verkleg eðlisfræði:

Hallhrif í hálfleiðurum

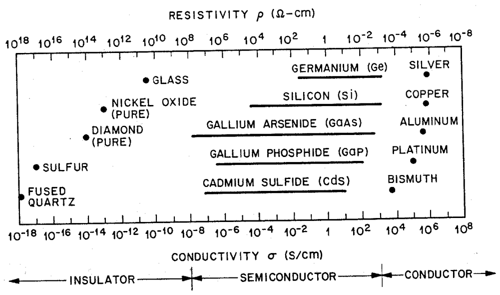
Tilraun 3

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

8. febrúar 2001

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		

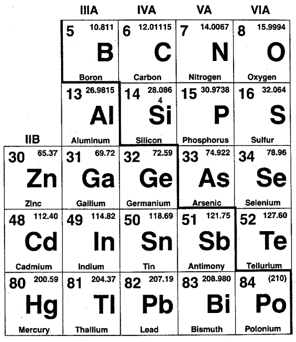
Kísill

Kísill er mest notaða efnið í framleiðslu smárása

Kostir kísils:

- Auðvelt er að oxa kísli 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



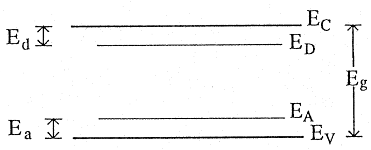
- Kísill kemur fyrir í náttúrunni, um fjórðungur jarðskorpunnar er kísill
- Það er mikilvægasta efnið fyrir rafeindaiðnaðinn
- Kísill er eitt mest rannsakaða frumefnið í náttúrunni.

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.

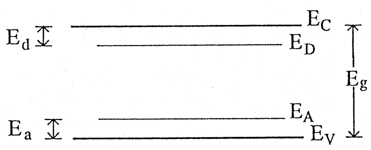
Íbót í hálfleiðurum

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



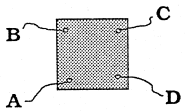
- Á myndinni, sem sýnir orkustig hálfleiðara, eru rafgjafa ástöndin staðsett í orkugeilinni.
- Rafgjafaíbót er sögð grunn ef orkustig hennar er nálægt neðri brún leiðniborða, t.d. þegar jónunarorka er lítil í samanburði við orkugeilina.

Íbót í hálfleiðurum



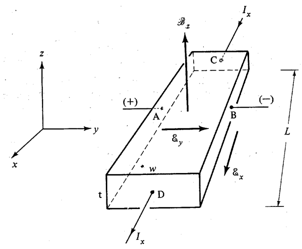
- Rafþegaíbót hefur þann eiginleika að hremma eina rafeind úr kristallinum. Þannig verður rafþeginn neikvætt hlaðin, og hola myndast í gildisborðann.
- Rafþegar í hálfleiðurum eru ábyrgir fyrir leiðni með holum.
- Það hvort gefin íbót er rafgjafi eða rafþegi ákvarðast í flestum tilfellum af stöðu hennar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

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

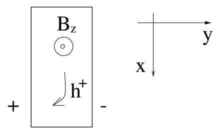
- Nú er

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

- 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

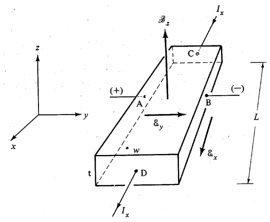
$$F_y = 0$$

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

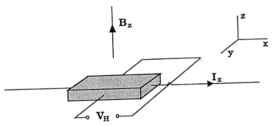
$$j_x = epv_x$$

- 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

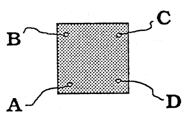
- Eðlisviðnám er skilgreint sem

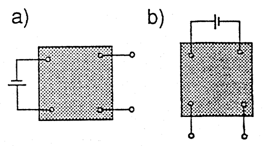
$$\rho = \frac{Rwd}{L} = \frac{V_{CD}/I_x}{L/wd}$$

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 $R_{AB,CD}$ 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 $R_{AB,CD} = \frac{V_{AB,CD}}{I_{AB}}$. Á hliðstæðan hátt er $R_{BC,DA}$ skilgreint út frá tengingu á mynd b).

Leiðnimælingar í hálfleiðurum

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

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

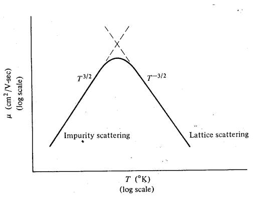
  þar sem ρ er eðlisviðnám efnis og d er þykkt sýnisins.

- Til að reikna út eðlisviðnámið er ritað

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

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

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

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

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

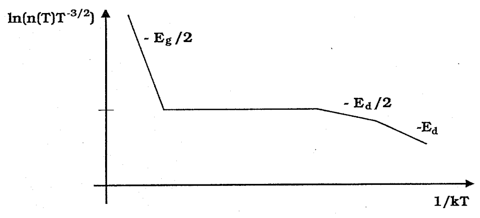
þar sem g_D og g_A eru margfeldnistuðlar rafgjafa og rafþega ástandanna.

- Fimmta jafnan lýsir rafhlutleysi hálfleiðarans

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

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

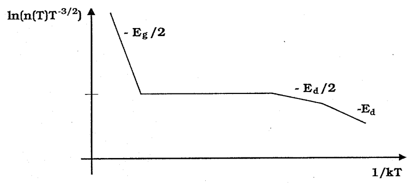
$$n = \frac{N_C(N_D - N_A)}{2N_A} \exp[-E_d/kT]$$

- 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

$$n - p = N_D - N_A$$

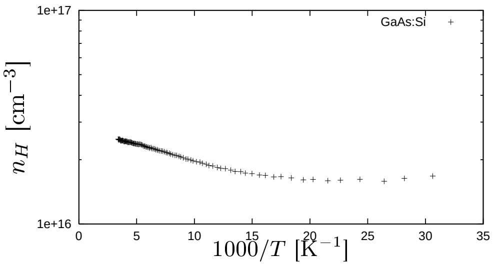
- Flest hálfleiðandi tól eru hönnuð til að vinna við stofuhita, og venjulega eru rafgjafa- og rafþegaíbætur nær að fullu jónaðar í slíkum tólum við það hitastig.

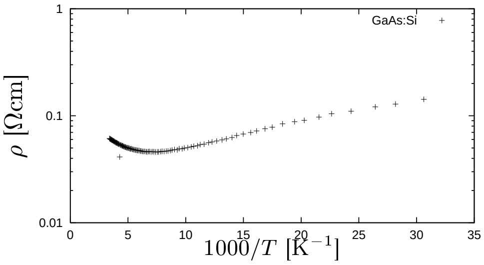
Jónunarorkan



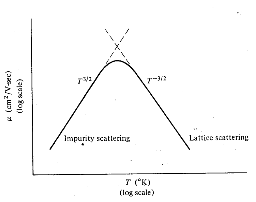
- Skoðum n-leiðandi hálfleiðara ($N_D > N_A$). Framangreindar jöfnur gefa $n(T)$ á hinum ýmsu hitastigsbilum, og segja að graf af $\ln(nT^{-3/2})$ á móti T^{-1} sé nálgað með beinni línu með hallatölu $E_d, E_d/2, 0$ og $E_g/2$ með auknu hitastigi.

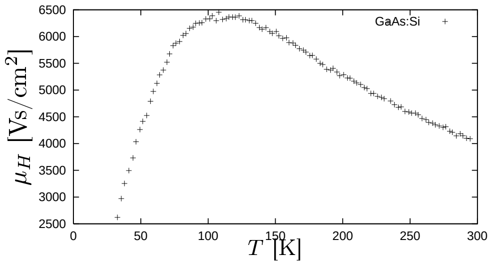
Hallmælingar





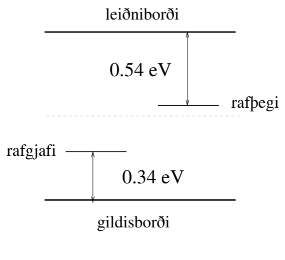
Hreyfanleiki





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