

Framleiðsla smárása:

Sveim

Kaflí 5

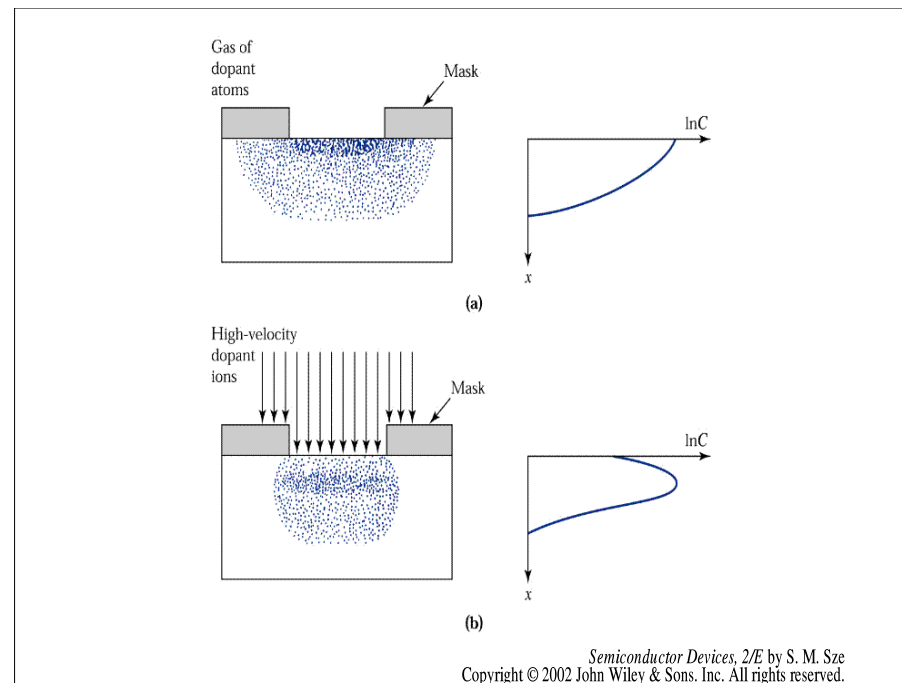
Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

4. vika haust 2016

Íbæting

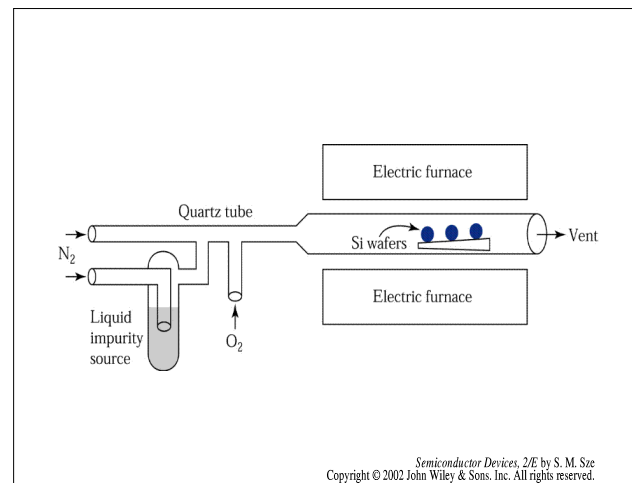
- **Íbæting** er það að koma fyrir tilteknu magni af íbótaratómum í hálfleiðaranum
- **Sveim** og **jónaígræðsla** eru tvær megin aðferðirnar til íbætingar



Íbæting

- Megin tilgangur með íbætingu er að hafa áhrif á rafeiginleika hálfleiðarans
- Þar til uppúr 1970 var íbæting að mestu framkvæmd með sveimi
- Þá er íbótaratómunum komið fyrir á yfirborði hálfleiðarans með útfellingu úr gasfasa
- Íbótarþéttleikinn fellur með fjarlægð frá yfirborðinu og íbótarsniðið ræðst af sveimhitastigi og tíma

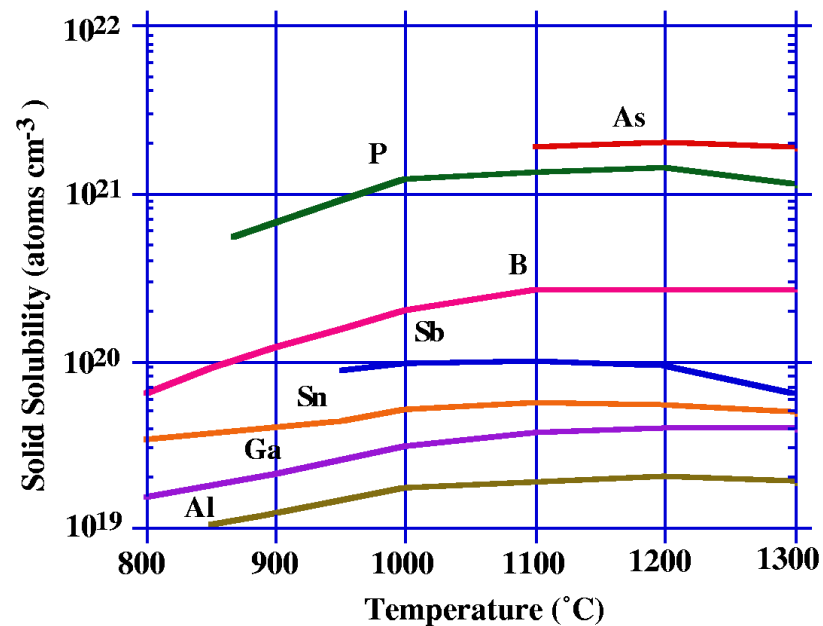
Íbæting með sveimi



- Sveim íbótar inn í hálfleiðara:
 - skífum er komið fyrir inn í kvarsröri í ofni sem hefur afar nákvæma hitastýringu
 - gasblanda með íbótarefnunum er látin flæða um rörið
 - hitastigið er gjarnan 800–1200°C fyrir kísil og 600–1000°C fyrir GaAs

Íbæting með sveimi

- Fyrir kísil er bór vinsælasta íbótin til að mynda p -leiðni en arsen og fosfór til að mynda n -leiðni



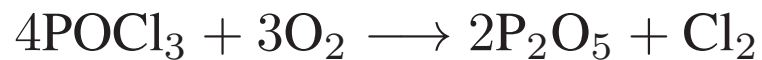
- Þessi þrjú frumefni hafa mikla leysni í kísli og leysnimörk yfir $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ á því hitastigsbili sem oftast er notað

Íbæting með sveimi

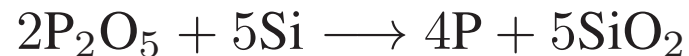
- Þetta má gera á ýmsa vegu
 - Úr storku
 - * BN fyrir bór
 - * P_2O_5 fyrir fosfór
 - * As_2O_3 fyrir arsen
 - Úr vökva
 - * BBr_3 fyrir bór
 - * $AsCl_3$ fyrir arsen
 - * $POCl_3$ fyrir fosfór
 - Úr gasi
 - * B_2H_6 fyrir bór
 - * AsH_3 fyrir arsen

Íbæting með sveimi

- Oftast er þó íbætt úr vökvafasa
- Dæmi um þetta er fosfóribæting

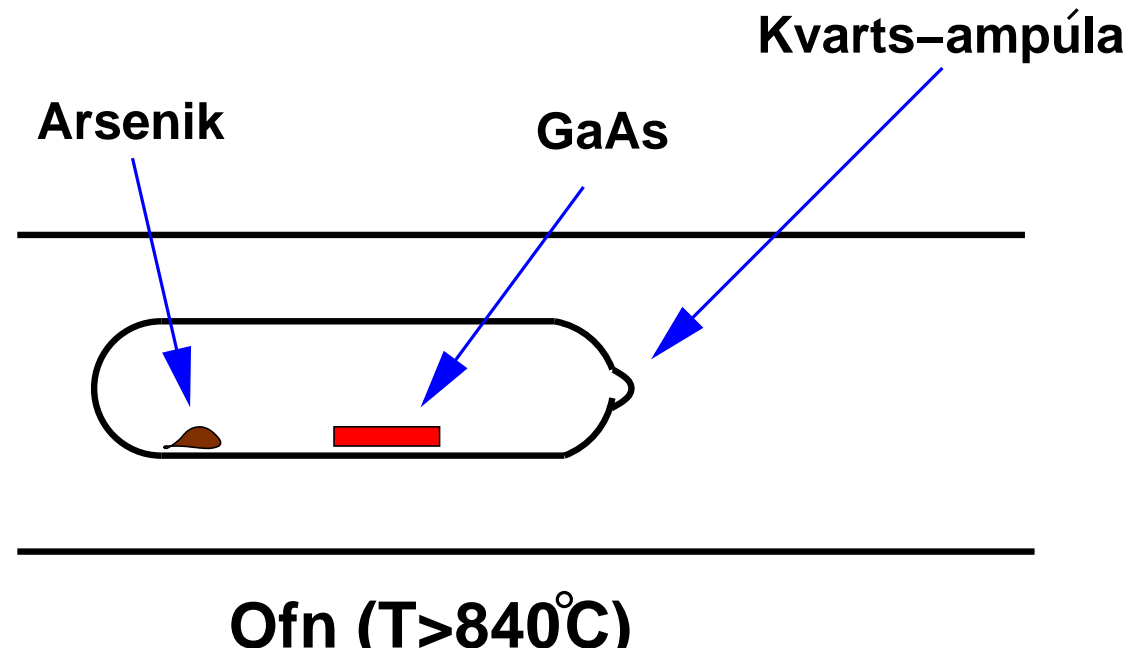


þar sem P_2O_5 myndar gler á kísilskífuna og er rýrt (e. reduced) í fosfór með kísli



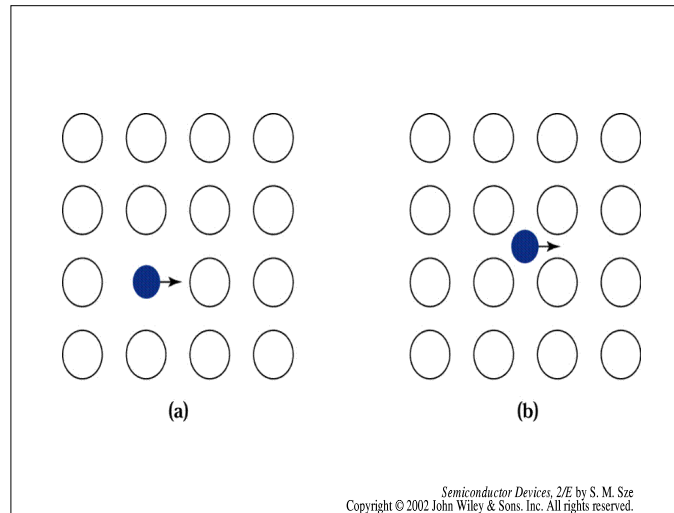
- Fosfórinns sveimar inn í kísilinn og Cl_2 er hleypt í burtu

Íbæting með sveimi



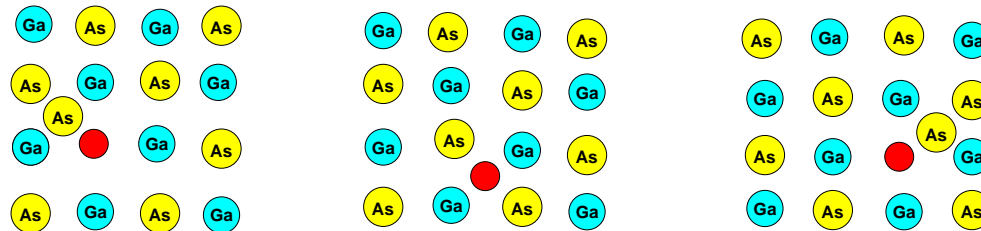
- Þegar gallín arsen er íbætt þarf að viðhalda háum hlutþrýsting á arseni til að hindra uppgufun arsens frá yfirborðinu
- Þetta má gera með því að framkvæma íbætingu í lokaðri ampules undir arsen yfirþrýstingi

Sveimferli

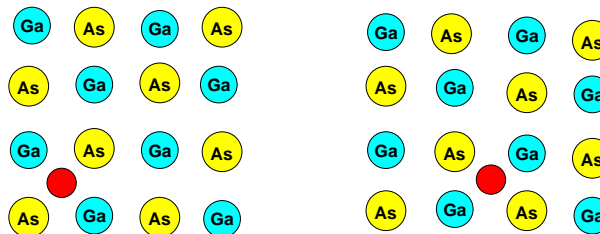


- Við hærri hitastig titra atómin í grindinni um jafnvægisstöðu sína
- Það eru endanlegar líkur á að hýsisatómin fá nægilega orku til að yfirgefa sæti sitt og fari í **milligrindarsæti** og skilji eftir sig **eyðuveilu**
- Sveim í hálfleiðurum má líta á sem færslu atóms (íbótaratóms) um eyðuveilur eða milligrindarsæti

Sveimferli

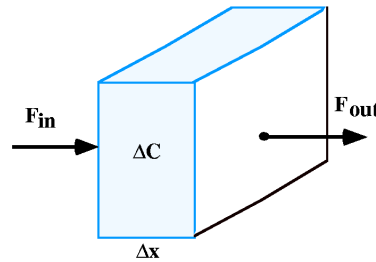


- Þegar íbótaratóm sveimar um með því að setjast í eyðuveilur (grindarsæti) er talað um **eyðuveilusveim**
- Ef atóm flyst um grindina án þess að setjast í grindarsæti er talað um **milligrindarsveim**



- Atóm sem er smærra en hýsisatóm ferðast gjarnan um milligrindarsæti

Íbæting með sveimi



- Við skilgreinum flæði F (e. flux) sem fjölda íbótaratóma sem fara um einingarflöt á tímaeiningu og C sem íbótarþéttleika

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

og D er sveimstuðull

- Drifkraftur sveimsins er þéttleikastuðullinn dC/dx og íbótaratómin hreyfast (sveima) frá háum þéttleika til minni þéttleika

Íbæting með sveimi

- Einvíð samfelldnijafna

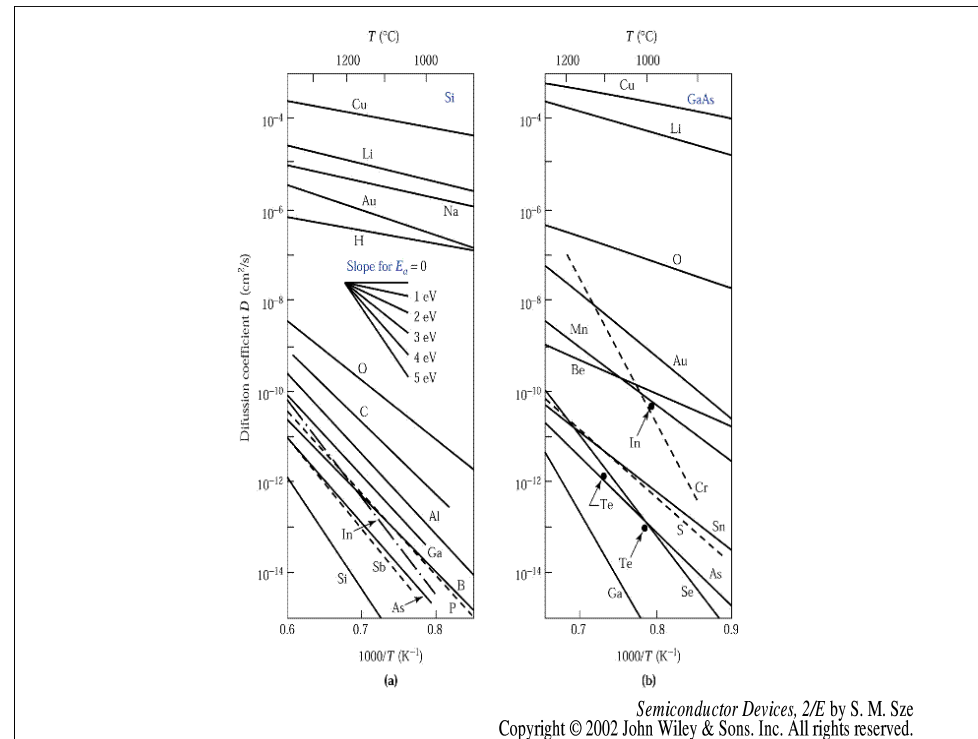
$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

og við lágan íbótarþéttleika er sveimstuðullinn nær óháður íbótarþéttleika þ.a.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

sem er nefnd sveimjafna Ficks

Íbæting með sveimi



- Myndin sýnir mælda sveimstuðla fyrir lágan íbótarþéttleika og algengar íbætur í kísli og GaAs

Íbæting með sveimi

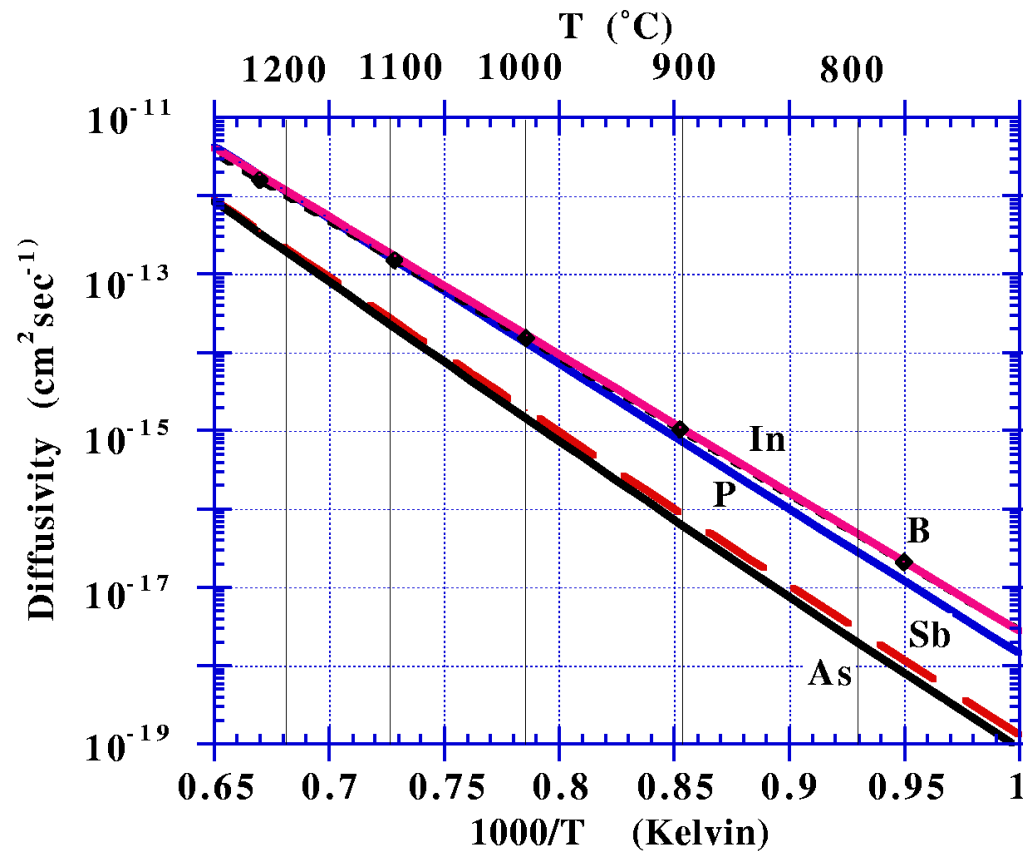
- Sveimstuðla má rita

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

þar sem D_0 er sveimstuðull í cm^2/s framlengdur til óendanlegs hitastigs og E_a er örvunarorka í eV

	Si	B	In	As	Sb	P	Units
D^0	560	1.0	1.2	9.17	4.58	4.70	$\text{cm}^2 \text{ sec}^{-1}$
E_a	4.76	3.5	3.5	3.99	3.88	3.68	eV

Íbæting með sveimi



- Sveimstuðlar fyrir nokkur algeng íbótaratóm í kísli

Íbæting með sveimi

- Ef sveim fer fram um milligrindarsæti ræðst örvunarorkan E_a af orkunni sem þarf til að flytja íbótaratóm frá einu milligrindarsæti til annars
 - Þá er $E_a \sim 0.5 - 2$ eV fyrir bæði kísil og GaAs
- Ef sveim stjórnast af eyðuveilum ræðst örvunarorkan E_a af orkunni sem þarf til að færa atómið og orkunni sem það kostar að mynda eyðuveilur
 - Þá er $E_a \sim 3 - 5$ eV
- Hratt sveimandi atóm eins og Cu í Si og GaAs hafa örvunarorku sem er lægri en 2 eV og sveim fer að mestu um milligrindarsæti
- Fyrir hægt sveimandi atóm eins og As í Si og GaAs er $E_a > 3$ eV og eyðuveilusveim er ráðandi

Íbæting með sveimi

- Snið (e. profile) sveimsins er háð upphafs- og randskilyrðum
- Tvö megin tilfellin eru
 - Fastur yfirborðspéttleiki íbótar
 - Fastur heildar íbótarþéttleiki
- Í fyrra tilfellinu viðheldur gasfasinn föstum styrk við yfirborð hálfleiðarans
- Í síðara tilfellinu er föstu heildarmagni íbótar húðað á hálfleiðara yfirborð

Fastur yfirborðspéttleiki

- Upphafsskilyrðið við $t = 0$ er

$$C(x, 0)$$

sem að segir að upphafspéttleiki íbótar í hýsi hálfleiðaranum er núll

- Randskilyrðin eru

$$C(0, t) = C_s$$

og

$$C(\infty, t) = 0$$

þar sem yfirborðspéttleikinn C_s (við $x = 0$) er óháður tíma

- Síðara randskilyrðið segir að fjarri yfirborðinu séu engin íbótaratóm

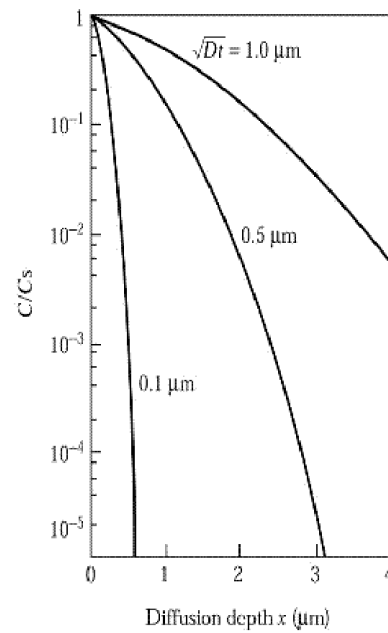
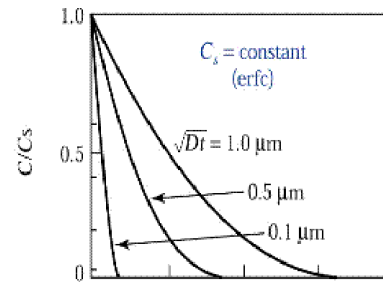
Fastur yfirborðspéttleiki

- Lausn sveimjöfnunnar sem uppfyllir þessi upphafs og randskilyrði er gefin með

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

þar sem \sqrt{Dt} er sveim lengd

Fastur yfirborðspéttleiki



Fastur yfirborðspéttleiki

- Heildarfjöldi íbótaratóma á flatareiningu hálfleiðarans er gefinn með

$$Q(t) = \int_0^{\infty} C(x, t) dx$$

sem er flatarmálið undir sveimsniðinu

- Það má nálga með þríhyrningi af hæð C_s og grunnlínu $2\sqrt{Dt}$

$$Q(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} C_s \sqrt{Dt} \approx 1.13 C_s \sqrt{Dt}$$

- Tengd stærð er stigull sveimsniðsins dC/dx

$$\left. \frac{dC}{dx} \right|_{x,t} = -\frac{C_s}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right)$$

Föst heildaríbót

- Hér er föstu magni íbótar húðað yfirborð hálfleiðarans, sem þunnu lagi, og íbótin sveima síðan inn í hálfleiðarann
- Upphafsskilyrðið er hið sama og áður

$$C(x, 0)$$

sem að segir að upphafspéttleiki íbótar í hýsi hálfleiðaranum er núll

- Randskilyrðin eru nú

$$\int_0^{\infty} C(x, t) dx = S$$

þar sem S er heildarmagn íbótar á einingarflöt og

$$C(\infty, t) = 0$$

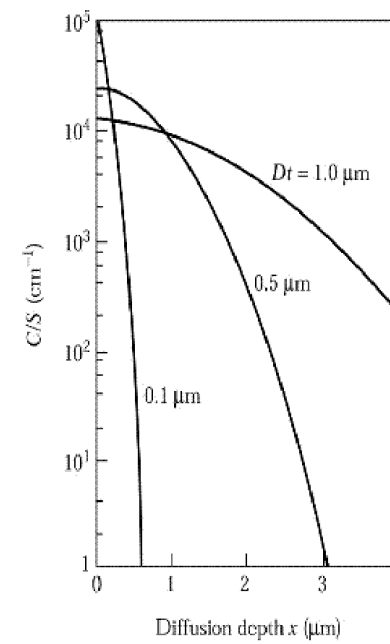
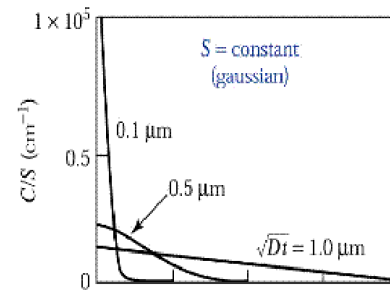
Föst heildaríbót

- Lausn sveimjöfnunnar sem uppfyllir ofangreind skilyrði er

$$C(x, t) = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

- Þessi jafna lýsir Gaussdreifingu
- Þegar íbótin sveimar inn í hálfleiðarann verður yfirborðspéttleikinn að falla ef heildar íbótarþéttleiki er fasti S

Föst heildaríbót



Föst heildaríbót

- Yfirborðspéttleikinn er fallandi og er gefinn með

$$C_s(t) = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}}$$

- Stigull sveimsniðsins er nú

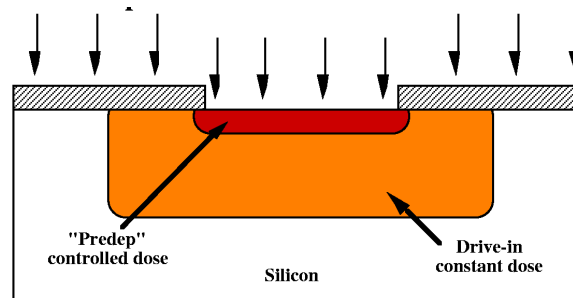
$$\left. \frac{dC}{dx} \right|_{x,t} = -\frac{xS}{2\sqrt{\pi}(Dt)^{3/2}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right)$$

eða

$$\left. \frac{dC}{dx} \right|_{x,t} = -\frac{x}{2Dt} C(x, t)$$

- Stigullinn er núll við $x = 0$ og við $x = \infty$ en tekur hágildi við $x = \sqrt{2Dt}$

Íbæting með sveimi



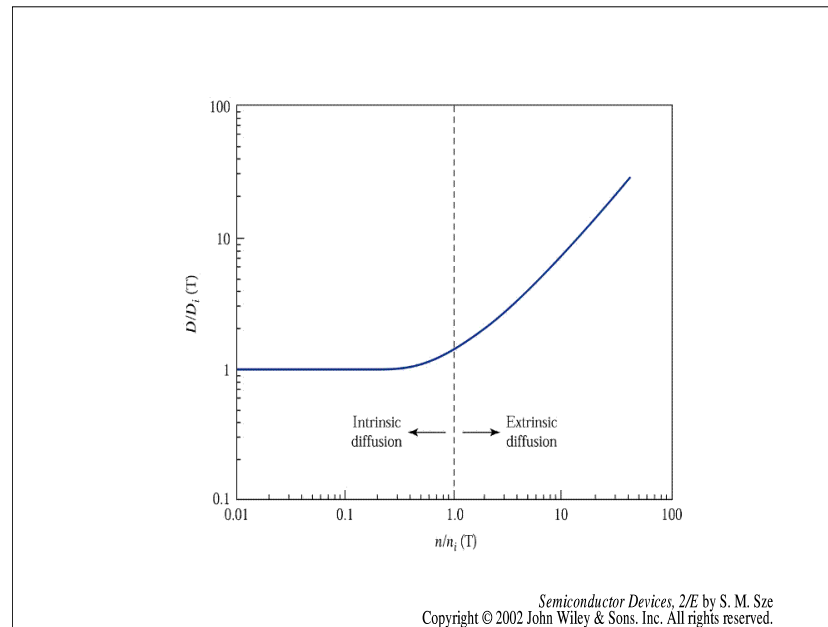
- Við framleiðslu smárása er gjarnan notað tveggja skrefa sveim
- Fyrst er foríbætt með föstum yfirborðspéttleika
- Síðan er íbótin drifin inn (e. drive in) við fasta heildar íbót
- Sveimlengdin \sqrt{Dt} er höfð afar lítil við foríbótina þannig að íbótarþéttleikinn sé aðeins deltafall við yfirborðið

⇒ Dæmi 5.1.

Íbæting með sveimi

- Fram að þessu höfum við skoðað sveimsnið þar sem gert er ráð fyrir að sveimstuðullinn sé fasti
- Það gildir þegar íbótarþéttleiki er lægri en eiginþéttleiki $n_i(T)$ við sveimhitastigið
- Við $T = 1000^\circ\text{C}$ er $n_i \approx 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ fyrir kísil og $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ fyrir GaAs
- Sveim við lágan íbótarþéttleika er gjarnan nefnt eiginsveim (e. intrinsic diffusivity)

Íbæting með sveimi



- Þegar íbótarþéttleiki er hærra en $n_i(T)$ er hálfleiðarinn extrinsic og sveimið sagt extrinsic
- Við þessi skilyrði er sveimstuðullinn háður íbótarþéttleika og sveimsniðin verða afar flókin

Íbæting með sveimi

- Þegar hýsisatóm fær nægilega orku frá grindartitrungi til að yfirgefa grindarsæti myndast eyðuveila
- Eyðuveila getur verið
 - hlutlaus V^0
 - rafþega eyðuveila V^-
 - tvöföld rafþega eyðuveila V^{2-}
 - rafgjafa eyðuveila V^+
 - og svo framvegis

Íbæting með sveimi

- Við væntum þess að eyðuveilubéttleiki hafi svipaða hegðan með hitastigi og hleðsluberabéttleiki

$$C_V = C_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

þar sem C_i er eigineyðuveilubéttleiki, E_F er Fermiorkan, og E_i er eiginorkustig hálfleiðarans

- Þegar sveim íbótarinnar ræðst af eyðuveilum er sveimstuðullinn í réttu hlutfalli við eyðuveilubéttleikann
- Við lágan íbótarþéttleika ($n < n_i$) fellur Fermiorkustigið saman við eiginorkustigið $E_F - E_i$
- Eyðuveilubéttleiki er þá C_i og er óháður íbótarþéttleika

Íbæting með sveimi

- Sveimstuðullinn

$$D \propto C_i$$

er einnig óháður íbótarþéttleikanum

- Við háan íbótarþéttleika ($n > n_i$) flyst Fermiorkan í átt að leiðniborða (fyrir rafgjafaíbót) og liðurinn $\exp[(E_F - E_i)/kT]$ verður stærri en einn
- Þetta veldur aukningu í C_v sem aftur eykur sveimstuðulinn

Íbæting með sveimi

- Þegar sveimstuðullinn breytist með íbótarþéttleika gildir

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

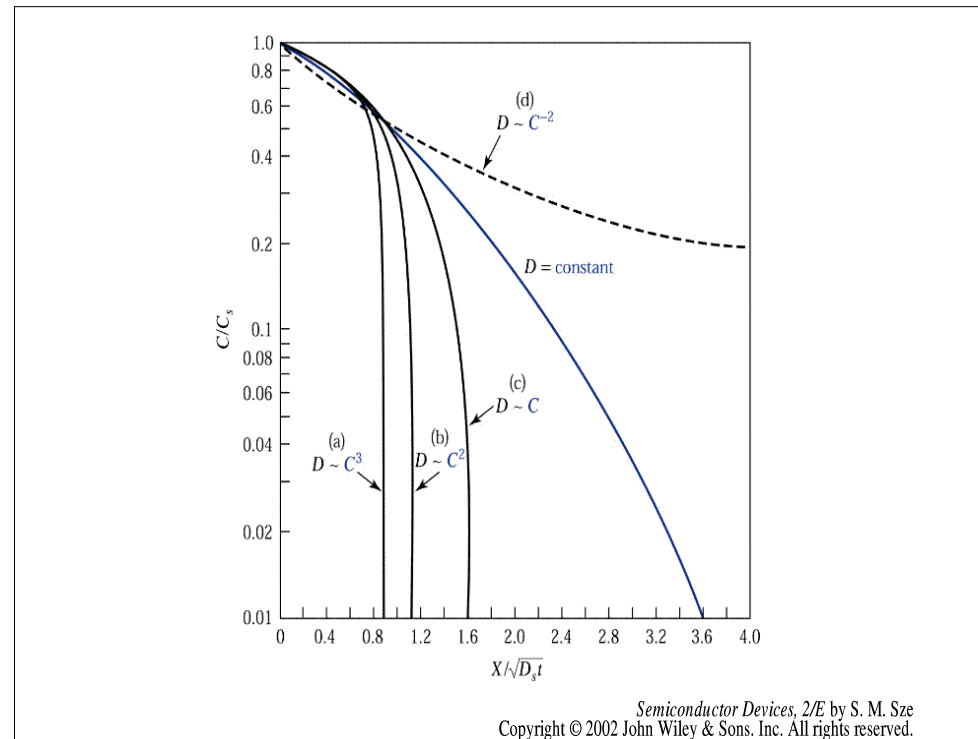
- Gerum ráð fyrir

$$D = D_s \left(\frac{C}{C_s} \right)^\gamma$$

þar sem C_s er yfirborðspéttleiki og D_s er sveimstuðull við yfirborðið

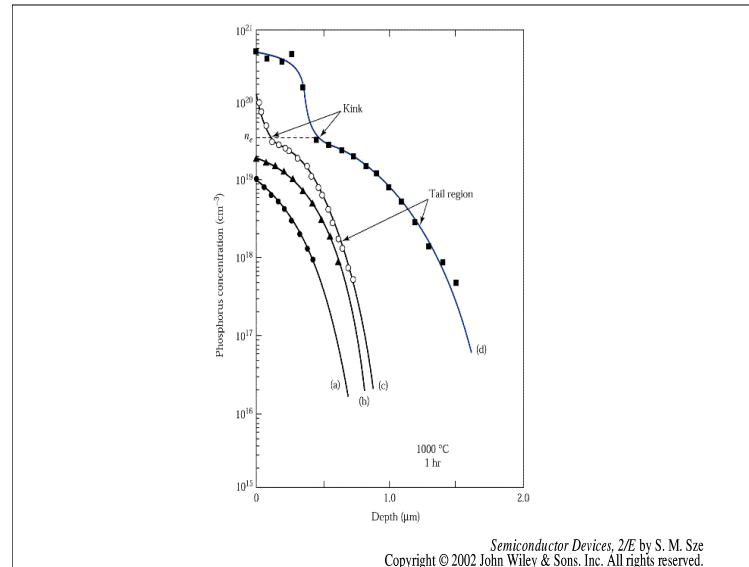
- γ er stuðull sem lýsir hegðan þéttleikans
- Í þessu tilfalli má leysa sveimjöfnuna tölulega
- Ef $\gamma = 0$ er sniðið eins og fyrir fastan íbótarþéttleika
- Fyrir $\gamma > 0$ fellur þéttleikinn hraðar með hækkandi γ

Íbæting með sveimi



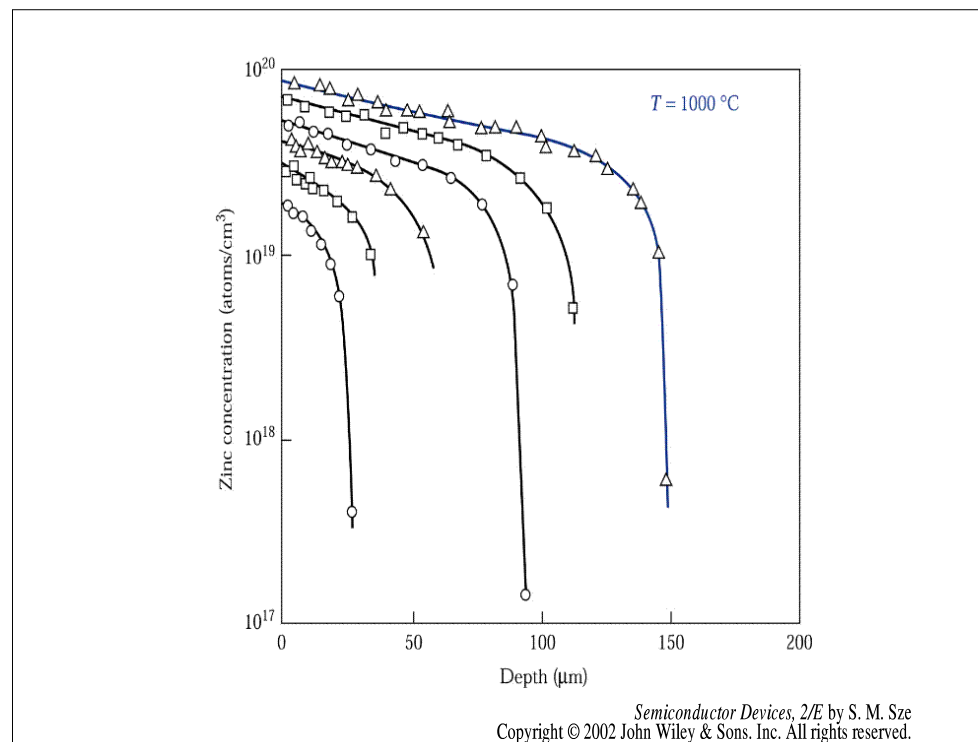
- Mælda sveimpversniðið fyrir bór og arsen í kísli svarar til $\gamma \approx 1$
- Fyrir gull og platínu í kísli svarar sniðið til $\gamma \approx -2$

Sveim P í kísli



- Sveim fosfór í kísli er tengt tvíhlöðnu rafþegaeyðuveilunni V^{2-} og sveimstuðullinn ætti því að fylgja $D \propto C^2$. Það er ekki raunin
- Myndin sýnir sveim fosfórs í kísli fyrir mismunandi yfirborðsíbótapéttleika við 1000°C í 1 klst
- Við hækkandi þéttleika viku sniðið frá erfc sniði

Sveim Zn í GaAs



- Þess er að vænta að sveim í GaAs sé mun flóknara en í kísli þar eð íbótin getur ferðast um bæði gallín og arsen grindarsæti

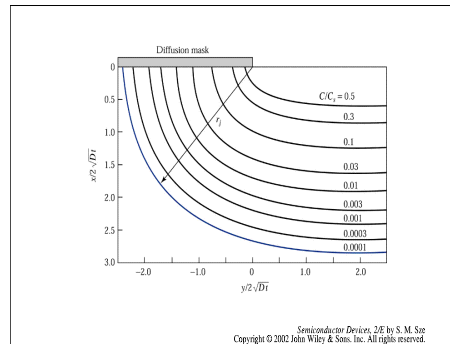
Sveim Zn í GaAs

- Eyðuveilur hafa talsvert hlutverk í sveimferlinu í GaAs þar eð til að mynda bæði p- og n-gerð verða íbótaratómin að sitja í grindarsætum
- Sveim Zn í GaAs hefur verið afar mikið skoðað og

$$D \propto C^2$$

- Jafnvel fyrir lágan þéttleika er sveimið extrinsic þar eð $n_i < 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ við 1000°C

Íbæting með sveimi



- Einvíða sveimjafnan lýsir sveimferlinu nægilega vel nema við brúnir gríma. Íbótin hefur tilhneigingu til að sveima þversum undir brún grímunnar
- Til að fá nákvæmt sveimsnið verður að gera ráð fyrir tvívíðri sveimjöfnu sem leyst er tölulega
- Myndin sýnir jafnþéttleika línur íbótar þegar gert er ráð fyrir sveimstuðli sem er óháður íbótarþéttleika

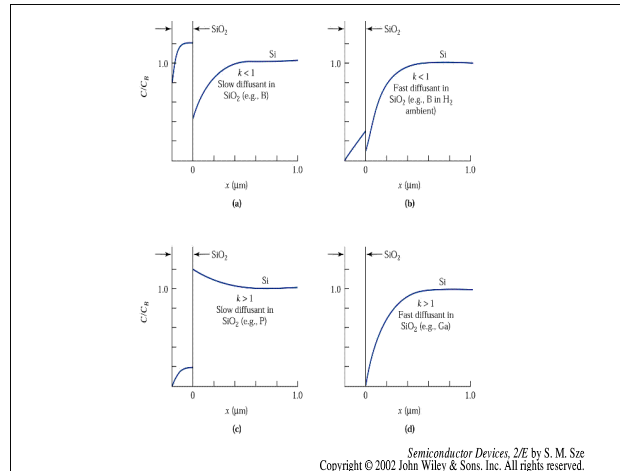
Endurröðun íbótar við oxun

- Þegar eitt efni er ræktað ofan á annað þá dreifist íbótin um bæði efnin uns jafnvægi er náð
- Í jafnvægi er þéttleikahlutfallið fasti,
- Íbót skilst að við samskeyti samkvæmt

$$k = \frac{\text{Jafnvægisþéttleiki íbótar í Si}}{\text{Jafnvægisþéttleiki íbótar í SiO}_2}$$

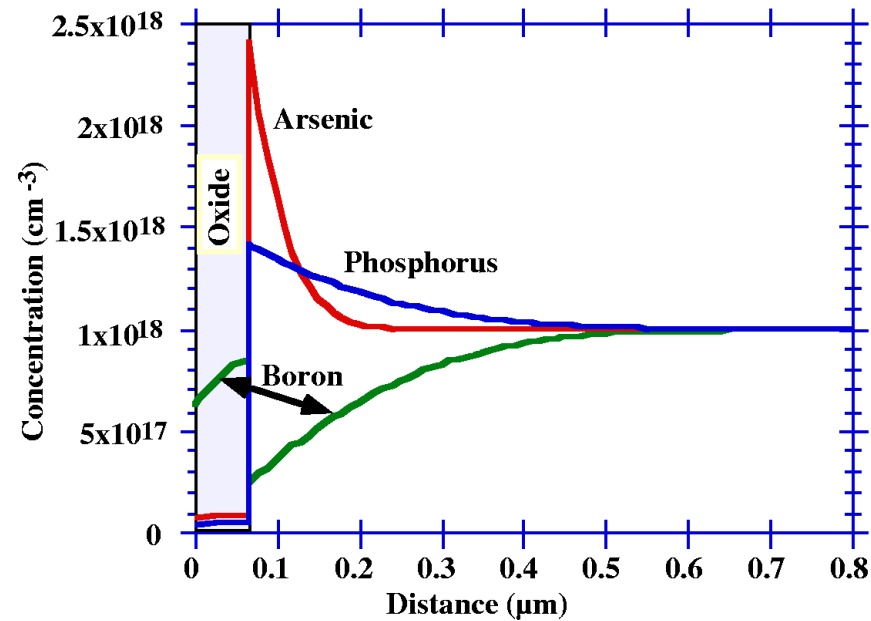
- Íbótin getur líka sveimað hratt um oxíð og sloppið út sem gas. Þetta er vandamál ef sveimstuðull íbótar í kísiloxíðinu er hár
- Ef sveimstuðull íbótar í oxíðinu er lágur eru þessi áhrif óveruleg
- Íbótaratóm nærri kísilyfirborði endurraðast við varmaoxun
- Við varmaoxun færast samskeytin inn í kísilinn sem fall af tíma

Endurröðun íbótar við oxun



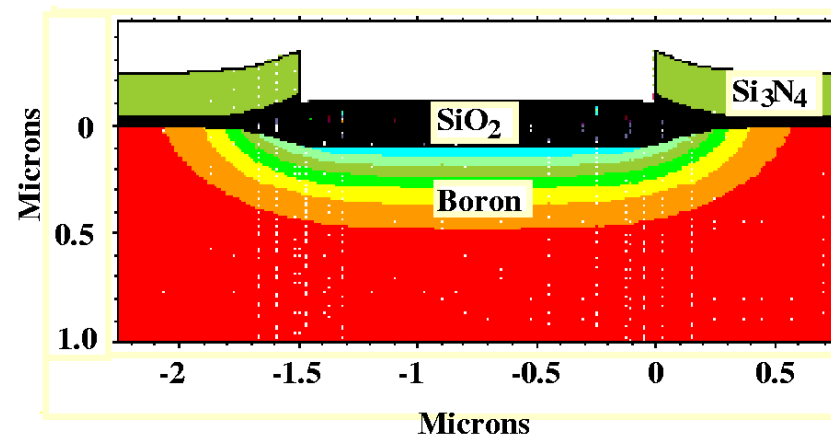
- Fjögur tilfelli eru möguleg:
 - Oxíð tekur upp íbót
 - Sveim í oxíði er hægt (bór)
 - Sveim í oxíði er hratt (bór í H_2 umhverfi)
 - Oxíð hrindir frá sér íbót
 - Sveim í oxíði er hægt (fósfór)
 - Sveim í oxíði er hratt (gallín)

Endurröðun íbótar við oxun



- Íbót getur einnig safnast við samskeytin jafnvel sem einlag
 \implies Dæmi 5.2.

Endurröðun íbótar við oxun



- Við oxun undirlags sem hefur einsleita bór íbót tapast bór inn í oxíðið
- n-gerð af íbót safnast fyrir en bórinn hverfur

Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, John Wiley & Sons, 2 ed., 2002. kafli 13.1 - 13.3
- [2] J. D. Plummer, M. D. Deal and P. B. Griffin, *Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling*, Prentice Hall, 2000, kafli 7
- [3] A. S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, 1967, kafli 3