

Smárásir:

Jónaígræðsla

Kaffi 6

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

4. vika vor 2010

1

Jónaígræðsla

- **Jónaígræðsla** (e. ion implantation) er mest notaða aðferðin til þess að íbæta hálfleiðara
- Þegar koma á íbótartátum inn í kísilskífu hefur **jónaígræðsla** marga kosti umfram sveim
- Við jónaígræðslu er notaður háspennu-agnahraðall sem framkallar háhraða jónageisla sem geta smogið undir yfirborð kísilskífunnar
- Jónaígræðsla er fyrst og fremst notuð til að breyta rafeiginleikum undirlags

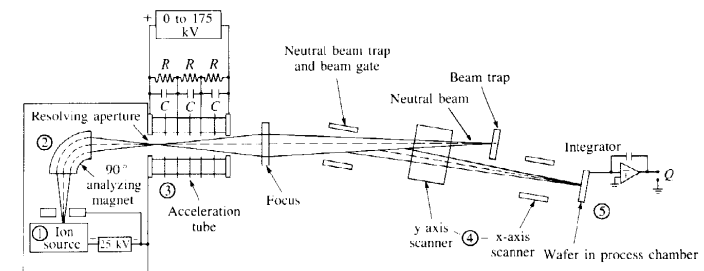
2

Jónaígræðsla

- Þrátt fyrir að verulegar skemmdir verði á kristallinum hefur aðferðin marga kosti:
 - Mikla breidd í íbótarskammti - $10^{11} - 10^{16} \text{ cm}^{-2}$
 - Mjög nákvæm stýring á íbótarskammti
 - Nauðsynleg til nákvæmrar stillingar á þröskuldsspennu MOSFET
 - Grafin lög eru möguleg
 - Margir möguleikar með val á grímum
- Aðferðin hefur þó slæma galla
 - Skemmdir á kristallinum
 - Sveim á íbót þegar skemmdir eru lagaðar með bökun
 - Hleðsla á einangrandi lögum

3

Jónaígræðsla



- Dæmigerð orka jóna er 1 – 1000 keV og **jónaskammtur** (e. ion dose) á bilinu $10^{11} - 10^{16}$ jónir/cm²

4

Jónaígræðsla

- **Jónalind** (e. ion source) vinnur við háa spennu (~ 25 kV) og í henni er myndað rafgas sem inniheldur hina æskilegu íbót auk annarra óæskilegra agna. Bæði má jóna gös með íbótinni eða kvarna upp úr storku. Val á íbót er því mjög opið
- **Massagreininir** (e. mass spectrometer) er segull sem sveigir jónir undir tiltekin horn sem háð er massa þeirra. Jónin sem valin er fer síðan út um op og inn í hraðalinn
- Geislinn er einnig sveigður til þess að óhlaðnar agnir nái ekki til skífunnar
- Í **háspennuhraðlinum** (e. high-voltage accelerator) er aukið við orku jónageislans (allt að 175 keV) og jónum hraðað upp í endanlega orku.

5

Jónaígræðsla

- Bæði hraðallinn og jónalindin vinna á hári spennu með tilliti til skotmarksins, skífunnar. Vegna hættu frá háspennu og mögulegri röntgengeislun, þarf jónalindin og hraðallinn að vera innan verndandi skerms
- Stýriskaut í x- og y-stefnu eru notuð til að sveigja geislann þannig að skanna megi alla skífuna. Þannig má fá einsleita íbót af æskilegu magni
- Kísilskífur eru skotmörk fyrir jónageislann
- Af öryggisástæðum er umhverfi skotmarksins haldið nærri jörð í spennu
- Jónaígræðslan fer fram undir lofttæmi

6

Val íbótarjóna

- Hlaðin ögn sem ferðast með hraða \mathbf{v} í segulsviði \mathbf{B} verður fyrir krafti \mathbf{F} , sem er gefinn með

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- Krafturinn leitast við að snúa ögninni í hringi, en er í jafnvægi við miðflóttakraftinn. Þegar \mathbf{B} er hornrétt á \mathbf{v} , þá er

$$q|\mathbf{v}||\mathbf{B}| = m\frac{|\mathbf{v}|^2}{r}$$

þar sem $m|\mathbf{v}|^2/2 = qV$ og V er hröðunarspenna

- Styrk segulsviðsins \mathbf{B} má stilla til að velja jónaða ögn með tiltekinn massa

$$|\mathbf{B}| = \sqrt{\frac{2mV}{qr^2}}$$

7

Íbótarskammtur

- Kísilskífurni er haldið í góðri rafrænni snertingu við haldarann sem hún hvílir á, þannig að rafeindir geti auðveldlega streymt til og frá skífunni til að hlutleysa ígræddar jónir
- Þennan rafeindastraum má tegra yfir tíma til að finna ígræddan skammt (e. implanted dose)

$$Q = \int_0^T \frac{I}{nqA} dt$$

þar sem I er straumur geislans í amper, A er yfirborðsflatarmál skífu, $n = 1$ fyrir eingilda jón og 2 fyrir tvígilda jón og T er tíminn sem ígræðslan stendur yfir

- Notkun tvígildra jóna tvöfaldar orkusviðið þar sem $E = nqV$

8

Íbótarskammtur

- Meðal kosta jónaígræðslu er nákvæm stýring og endurtakanleiki íbótar svo og lágt hitastig í samanburði við sveim
- Halda má skífunum við tiltölulega lág hitastig við jónaígræðsluna
- Lág framleiðsluhitastig draga úr óæskilegu sveimi íbótaratóma
- Með jónaígræðslu er hægt að nota mun fleiri gerðir íbótar en mögulegt er að fá með sveimi, í raun öll jónanleg frumefni
- Búnaður til jónaígræðslu kostar USD 1 - 2 milljónir og er kostnaðurinn helsti ókosturinn

9

Skotlengd

- Á því orkubili sem áhugavert er fyrir jónaígræðslu má skipta víxlverkun jónarinnar við atóm skotmarksins upp í árekstra kjarnanna og árekstra við rafeindirnar
- Jónin tapar orku vegna Coulomb víxlverkunar við rafeindir á atómum skotmarksins (kísilskífunnar) leiðir til örvunar eða jónunar
- Orkutapi vegna víxlverkunar við rafeindir má lýsa með $S_e(E)$
- Orkutapi vegna fjaðrandi árekstra er lýst með orkutapi á lengdareiningu $S_n(E)$

10

Skotlengd

- Heildar orkutap á lengdareiningu, stöðvunarafli (e. stopping power), er gefið með summunni

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{tot}} = S_n(E) + S_e(E)$$

og vegalengdin sem jónin ferðast er þá

$$\int_0^R dx = R = - \int_E^0 \frac{dE}{(dE/dx)_{\text{tot}}}$$

- Stöðvunarafli vegna kjarna er nær óháð orkunni og fellur með orku fyrir léttar jónir
- Stöðvunarafli vegna kjarna eykst línulega með orku við lága orku og $S_n(E)$ nær hágildi við miðlungsorku

11

Skotlengd

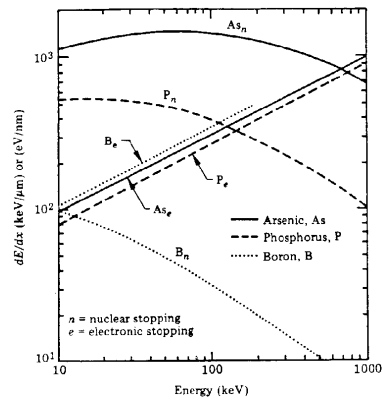
- Við háa orku fellur $S_n(E)$ þar eð hraðar agnir hafa ekki nægan víxverkunartíma við skotmarkið til að orkuskipti verði áhrifarík (e. effective)
- Á orkubilinu sem notað er við jónaígræðslu er stöðvunarafli vegna rafeinda í réttu hlutfalli við kvaðratrótina af orkunni það er í réttu hlutfalli við hraða jónarinnar

$$S_e = k_e \sqrt{E}$$

þar sem stuðullinn k_e er tiltölulega veikt fall af atómmassa og atómtölu, $k_e \approx 10^7$ (eV)^{1/2}/cm fyrir kísil og $k_e \approx 3 \times 10^7$ (eV)^{1/2}/cm fyrir GaAs

12

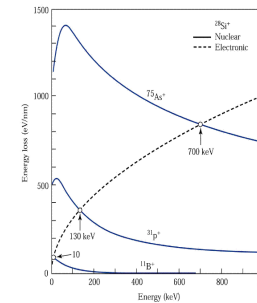
Skotlengd



- Myndin sýnir reiknuð gildi á dE/dx fyrir As, P og B í kísli, sem fall af orku

13

Skotlengd

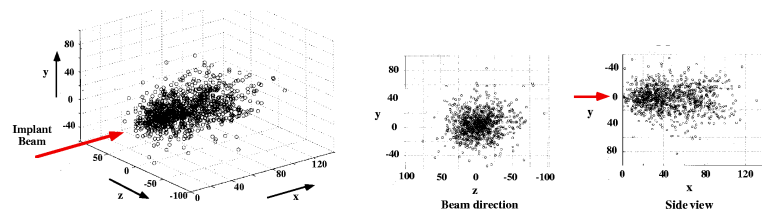


- Bór jónir í kísli tapa orku sinni aðallega vegna víxlverkunar við rafeindir ofan við 10 keV, fyrir fosfórjónir vege þessir þættir jafnt við ~ 150 keV og fyrir arsen við 700 keV
- Í þessum reikningum var gert ráð fyrir myndlausum kísli

14

Skotlengd

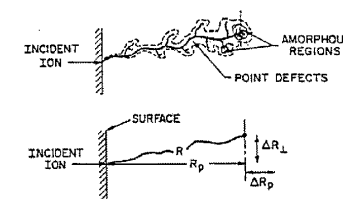
- Til að nýta megi hina nákvæmu stýringu á fjölda ígræddra atóma er mikilvægt að vita hvar atóm er staðsett eftir ígræðslu
- Sérhver víxlverkun kjarna- eða rafeinda dregur úr orku jónarinnar þar til hún að lokum stöðvast í skífumni



- Myndirnar sýna Monte Carlo reikninga fyrir jónir sem skotið er á skífu, 1000 fosfór jónir við 35 keV

15

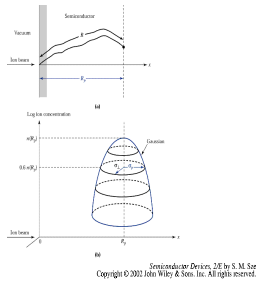
Skotlengd



- Köllum R heildar vegalengdina (e. range) sem jón með massa M_2 ferðast í skotmarkinu áður en hún stöðvast
- Vegna árekstra er braut jónarinnar ekki bein, því er vegalengdin sem jónin ferðast samsíða innkomandi geisla nefnd **skotlengd** (e. projected range) og táknud með R_p
- Vegalengdin sem jónin hefur ferðast hornrétt á innkomandi geisla er hornrétt vegalengd R_{\perp}

16

Skotlengd



- Þar sem fjöldi árekstra sem hver jón verður fyrir er tilviljanakenndur er staðsetning jóna sem höfðu sömu orku og hafa sama massa dreifður í rúminu
- Meðal skotlengd R_p samsvarar dýptinni þar sem flestar jónirnar hafa stöðvast

17

Skotlengd

- Flökktið í stefnu samsíða geislanum er nefnt **rangl** (e. projected straggle) ΔR_p
- Fyrir lágorkujónir gildir

$$R \approx \left[1 + \frac{M_2}{3M_1} \right] R_p$$

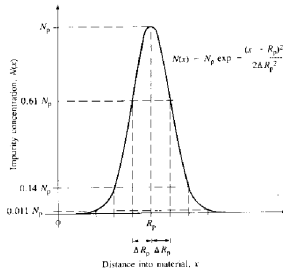
þar sem M_1 er atómmassi skotmarks og

$$\Delta R_p \approx \frac{2}{3} \left[\frac{\sqrt{M_1 M_2}}{M_1 + M_2} \right] R_p$$

- Ef $M_2/M_1 \sim 0.1$ þá er $R_{\perp} \sim \Delta R_p \sim 0.2R_p$
- Þegar $M_2/M_1 = 1$ þá er $R_{\perp} = \frac{1}{2}R_p$ og $R_{\perp} = R_p$ þegar $M_2/M_1 = 10$

18

Skotlengd



- Víxlverkunin í kristallinum hlítir líkindadreifingu, og þversnið íbótarinnar má nálga með líkindadreififalli Gauss

$$N(x) = N_p \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right]$$

19

Skotlengd

- R_p er skotlengd og er jöfn meðal vegalengdinni sem jónin ferðast áður en hún stöðvast
- Mesti þéttleiki íbótarjóna N_p er þar sem $x = R_p$
- Vidd dreifingarinnar er lýst með staðalfrávikinu, ΔR_p sem er nefnt rangl (e. straggle)
- Flatarmálið undir dreififallinu gefur ígræddann skammt

$$Q = \int_0^{\infty} N(x) dx$$

og ef íbótin er öll innan kísilsins

$$Q = \sqrt{2\pi} N_p \Delta R_p$$

20

Skotlengd

- Ígræddur skammtur er gjarnan á bilinu $10^{10} - 10^{18} \text{ cm}^{-2}$
- Skammta á bilinu $10^{10} - 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ er þörf til að stilla megi af þröskuldsspennu í MOS tækni, það er nær ómögulegt að gera með sveimi
- Þegar brunnar eru myndaðir fyrir CMOS þarf skammtastærðin að vera nákvæmt ákvörðuð

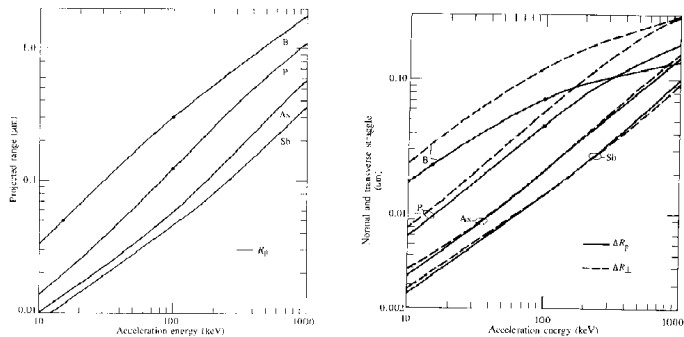
21

Skotlengd

- Ígræddan skammtur má stilla með nákvæmni upp á nokkur prósent. Þannig má framleiða viðnám með málvik (e. tolerance) upp á nokkur prósent með jónaígræðslu en til samanburðar myndi sveim gefa málvik upp á um 20 %
- Skotlengd ræðst af orku jónanna, sem og massa og massatölu jónarinnar og atómanna í skotmarkinu
- Líkan af skotlengd og rangli var sett fram af Lindhard, Schraff og Schiott og er nefnd LSS fræði
- Líkanið gerir ráð fyrir að ígrætt sé myndlaust efni þar sem röðum atóma í skotmarkinu er tilviljanakennd

22

LSS reikningar



- Myndin sýnir LSS reikninga fyrir projected range og straggle fyrir antímon, bór, fosfór og arsen í myndlausan kísil og kísiloxíð

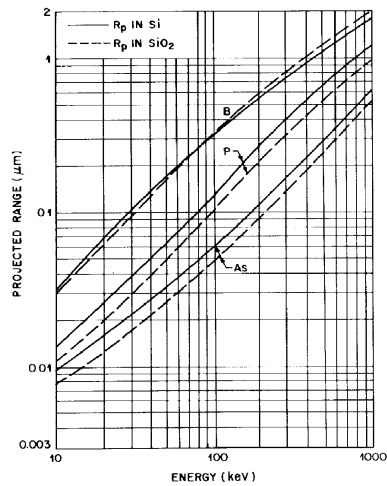
23

LSS reikningar

- Skotlengd og rangl eru nær því í réttu hlutfalli við orku jóna á bilinu 10 – 1000 keV, þó svo að ólínuleiki sé greinilegur
- Fyrir gefna orku hafa léttari agnir meiri hraða er þau lenda á yfirborði skífu og ferðast því lengra inn í skífuna
- Niðurstöðurnar sýna að skotlengd í kísil og kísiloxíð er nærri því sú sama og við gerum ráð fyrir að stöðvunarafli (e. stopping power) kísil oxíðs sé hið sama og kísils

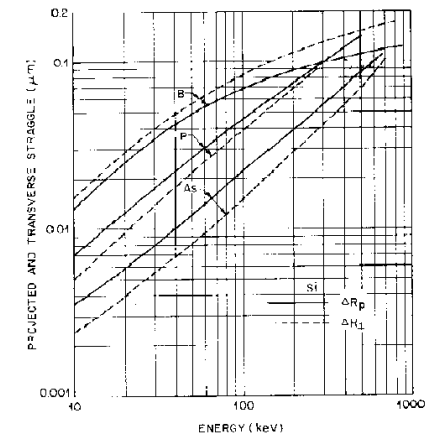
24

LSS reikningar



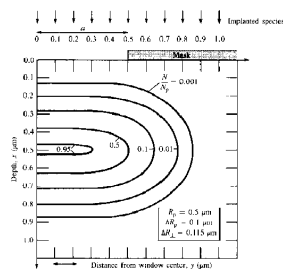
25

LSS reikningar



26

Valkvæm ígræðsla



- Oftast er æskilegt að fá íbótina aðeins í tiltekin svæði í skífunni
- Gluggar eru þá opnaðir í þröskuldsefnið hvar sem íbæta skal

27

Valkvæm ígræðsla

- Í miðjum glugganum er dreifingu íbótar lýst með

$$N(x) = N_p \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right]$$

en nær brúnunum fellur dreifingin en nær undir brún gluggans eins og sést á myndinni

- Heildardreifingunni er nú lýst með

$$N(x, y) = N(x)F(y)$$

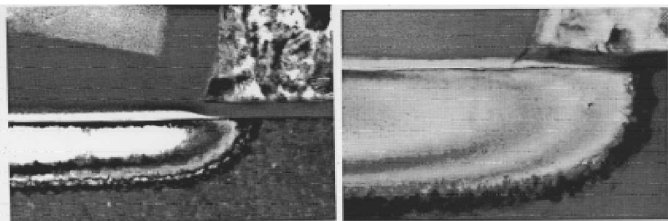
þar sem

$$F(y) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{(y - a)}{\sqrt{2}\Delta R_{\perp}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{(y + a)}{\sqrt{2}\Delta R_{\perp}} \right) \right]$$

þar sem ΔR_{\perp} er nefnt þversum rangl (e. transverse straggle)

28

Valkvæm ígræðsla

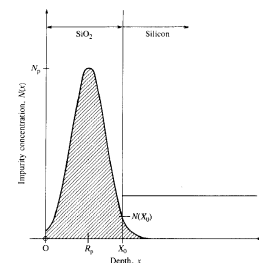


Alvis et al. (1996)

⇒ Dæmi 6.1.

29

Valkvæm ígræðsla



- Þegar gríma er notuð við ígræðslu er mikilvægt að íbótin breyti ekki íbótarþéttleikanum í kíslinum undir þröskuldslaginu
- Á myndinni sést hvernig lag af kísiloxíði á yfirborðinu
- Íbótin er þá ígrædd inn í skífuna þannig að mestur íbótarþéttleiki sé í kísiloxíðinu

30

Valkvæm ígræðsla

- Til þess að koma megi í veg fyrir að íbótarþéttleiki kísils breytist, skal ígræddur þéttleiki vera minni en 1/10 af bakgrunnsþéttleika við samskeytin milli kísils og kísiloxíðs

$$N(d_0) < N_B/10$$

eða

$$N_p \exp \left[- \left(\frac{(d_0 - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right) \right] < N_B/10$$

31

Valkvæm ígræðsla

- Leyst fyrir d_0 gefur þetta minnstu oxíð þykkt

$$d_0 = R_p + \Delta R_p (2\ln(10N_p/N_B))^{1/2}$$

eða

$$d_0 = R_p + m\Delta R_p$$

- Þykkt oxíðsins verður að vera í það minnsta skotlengdin að viðbættu m sinnum ranglið
- Oxíð sem hefur þykkt sem nemur skotlengdinni að viðbættu 6 földu rangli ætti að duga sem gríma við flestar ígræðslur
- Kísiloxíð og kísilnítíð eru gjarnan notuð sem þröskuldsefni við ígræðslu

⇒ Dæmi 6.2.

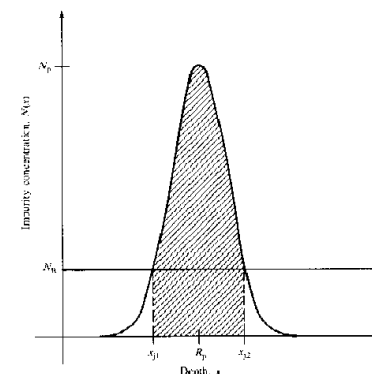
32

Valkvæm ígræðsla

- Þar sem jónaígræðsla er lág-hita ferli má nota ljósviðnámslag og ál, sem ekki þola hitun vegna mögulegs sveims, sem grímu við jónaígræðslu
- Kísilnítíð er mun virkari þröskuldur en kísiloxíð og þarf þröskuldur úr kísilnítíði aðeins 85 % af þykkt SiO_2 til að gera sama gagn
- Ljósviðnámslag er hins vegar lakara í að stöðva jónir og þarf það að vera 1.8 föld þykkt SiO_2 til að gera sama gagn
- Málmar hafa það mikinn þéttleika að jafnvel mjög þunnt lag virkar sem gríma fyrir flestar ígræðslur

33

Skeytadýpt og sheet viðnám



- Jónaígræðslu er oft beitt til að mynda grunn pn skeyti fyrir hin ýmsu tól

34

Skeytadýpt og sheet viðnám

- Þversnið íbótar má nálgast með Gauss dreifingu og dýpt skeytanna er fundin með því að finna hvar þéttleiki ígræddu atómanna er jafn bakgrunninum eða

$$N_p \exp \left[- \left(\frac{(x_j - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right) \right] = N_B$$

- Sé þetta leyst fæst

$$x_j = R_p \pm \Delta R_p (2\ln(N_p/N_B))^{1/2}$$

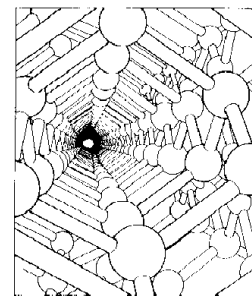
og báðar lausnirnar geta haft merkingu

- Oft er mestur þéttleiki íbótar látinn verða rétt við yfirborð kísilskífunnar, þá hefur myndast þar sheet viðnám

⇒ Dæmi 6.3.

35

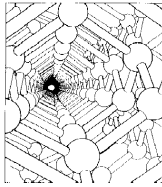
Skemmdir og hitun



- Í LSS reikningunum hér að framan var gert ráð fyrir að skotmarkið væri myndlaust
- Þetta er rétt fyrir varmaoxað kísiloxíð og kísilnítíð og margar þunnar málmhúðir

36

Skemmdir og hitun

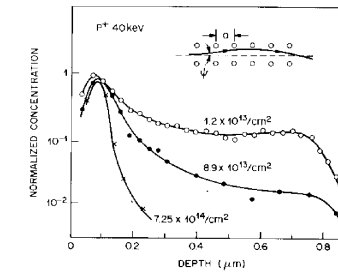


- Regluleg röðun atóma í kristallagrind skilur eftir opin rúm í kristallinum
- Myndin hér að ofan sýnir útsýni í $\langle 110 \rangle$ -stefnu kísilgrindar
- Innkomandi jónir geta því sloppið framhjá atómum kristallagrindarinnar og borist mun dýpra inn í efnið en LSS reikningar segja til um
- Víxlverkun við rafeindir mun þó á endanum stöðva jónirnar

37

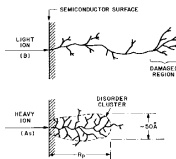
Skemmdir og hitun

- Á myndinni hér að neðan sjást áhrif þessa, fosfór er ígræddur með 40 keV inn í kísilskotmark fyrir mismunandi stefnur á $\langle 100 \rangle$ yfirborð
- Einnkenni myndlauss yfirborðs fást með því að hafa um það bil 7° halla á innkomandi geisla miðað við yfirborðið



38

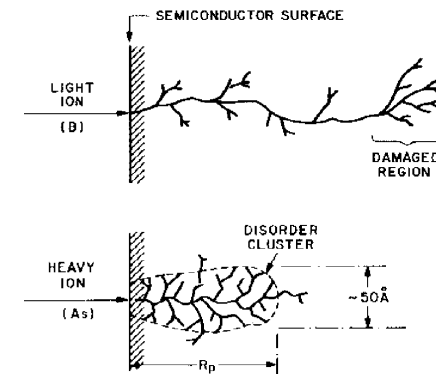
Skemmdir og hitun



- Innkomandi jónin getur kýlt kísilatóm úr grindinni, og valdið skemmdum á ígrædda svæði kristallsins
- Þessi útkýldu atóm geta tekið til sín mikinn hluta af orku innkomandi jónar
- Þau geta þess vegna valdið keðjuverkun og kýlt önnur atóm út úr grindinni og svo koll af kolli
- Jónin skilur eftir sig óreglu tré (e. tree of disorder) á braut sinni

39

Skemmdir og hitun



- Þessi óreglutré fyrir léttar jónir eru ólík óreglutrjúm fyrir þungar jónir eins og sjá má á mynd

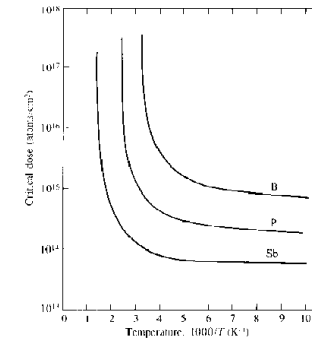
40

Skemmdir og hitun

- Megnið af orkutapi léttra jóna stafar af víxlverkun við rafeindir og því verða ekki kristallaskemmdir
- Fyrir þungar jónir er orkutapið að mestu vegna árekstra kjarna og skemmdir verða miklar
- Ef ígræddi skammturinn er nægilega stór verður ígrædda svæðið myndlaust
- Fyrir þyngri atóm þarf minni skammt en fyrir léttari atóm til að fá myndlaust efni
- Skemmdir vegna ígræðslu má fjarlægja með hitun (e. annealing)

41

Skemmdir og hitun



- Myndin sýnir hvaða skammt íbótar þarf til að fá myndlaust kísillag fyrir nokkur íbótaratóm sem fall af hitastigi

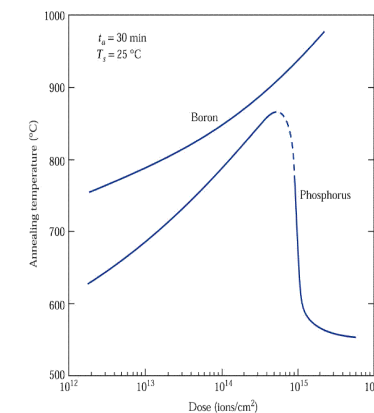
42

Skemmdir og hitun

- Vegna þessara skemmdu svæða eru efniseiginleikar hálfleiðaranna eins og hreyfanleiki og líftími hleðslubera verulega skertir
- Til að gera ígrædd atóm rafvirk og endurheimta hreyfanleika sem og aðra efniseiginleika verður að hita hálfleiðarana
- Eftir ígræðslu er skífan hituð upp í 800 – 1000 °C í um 30 mín
- Við þetta hitastig færast kísilatómin aftur í grindarsæti sín, jafnframt geta þá íbótaratóm sest í grindarsæti
- Eftir hitunina er allur íbótarskammturinn orðinn rafvirkur, nema ef íbótin er meiri en sem nemur 10^{19} cm^{-3}
- Hitun í 30 mín við 1000 °C veldur umtalsverðri dreifingu íbótar vegna sveims

43

Skemmdir og hitun



- Myndin sýnir bökunarhitastig sem fall af íbótarskammti sem nægir til að 90 % af íbótarskammtinum sé rafvirkur

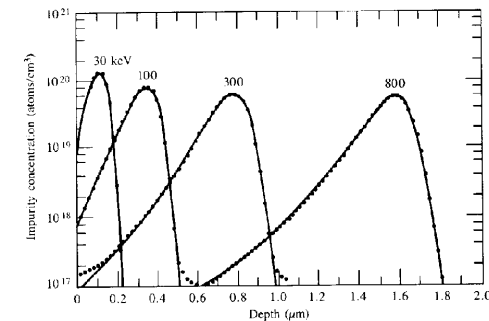
44

Skemmdir og hitun

- Þekkt er að myndlaust efni má hita við lægri hitastig og fá kristöllum, sem þá er nefnt lagvöxtur úr storku (e. solid phase epitaxy)
- Kristallað undirlagið virkar þá sem sæðiskristallur fyrir endurkristöllum myndlausa lagsins sem myndast með um 500 Å/min við 600 °C
- Lágorku arsen ígræðslu er beitt til að mynda grunn myndlaus lög sem eru hituð þannig að lagvöxtur úr storku myndi grunn, skörp skeyti
- Bór er það léttur að lagið verður ekki myndlaust, nema þá að skotmarkið sé kælt, bór er því gjarnan ígræddur sem BF₂ sameind

45

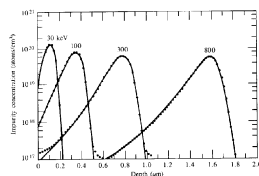
Skemmdir og hitun



- Nákvæm skoðun á lögun íbótardreifingarinnar eftir ígræðslu sýnir að hún víkur frá Gaussdreifingu

46

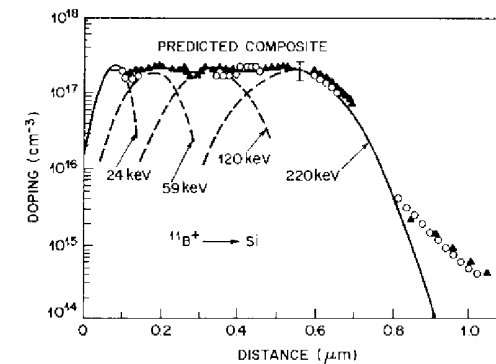
Skemmdir og hitun



- Þegar léttar jónir eins og bór rekast á kísilatóm verða þau fyrir endurkasti og því er meira af íbótaratómum á yfirborðshlið dreifingarinnar
- Þung atóm eins og arsen hendast fram á við og fylla dreifinguna nær undirlaginu
- Fyrir orku neðan við 200 keV er lýsir Gauss dreifing mjög vel dreifingu íbótar

47

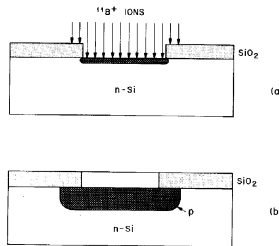
Skemmdir og hitun



- Oft þarf að fá íbótarpversnið sem ekki er Gauss dreifing
- Með nokkrum ígræðslum má fá flatt íbótarpversnið

48

Foríbæting

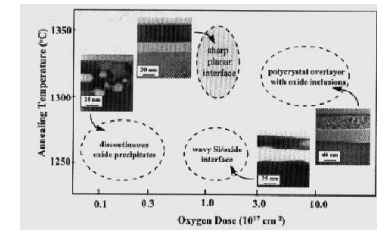


- Ígræðsla er oft notuð til að foríbæta, þar sem nákvæm stýring er á magni íbótar
- Myndin sýnir háskammtaígræðslu gerða í glugga gerðan í oxíð
- Eftir forígræðslu er íbótin dregin inn með sveimi og efnið endurkristallað um leið

49

SPIMOX

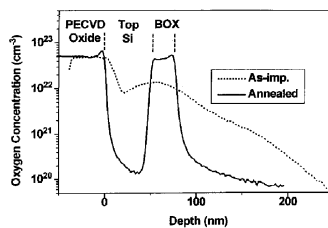
- Dæmi um notkun jónaígræðslu er framleiðsla á kísli-á-einangrara (e. silicon-on-insulator (SOI)) með ígræðslu súrefnis (e. separation by implantation of oxygen (SIMOX)) eða (e. separation by plasma implantation of oxygen (SPIMOX)) þar sem ígrætt er úr rafgasi (e. plasma ion implantation (PIII))



X. Lu, *Appl. Phys. Lett.*, **70** (1997) 1748

50

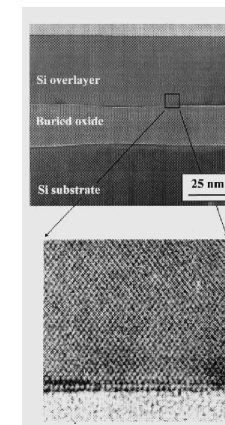
SPIMOX



- Hér er þversnið súrefnisþéttleika í kísilskífu eftir ígræðslu, fyrir og eftir hitun
- Við hitun safnast súrefnið saman og myndar hulið oxíðlag með skörpum SiO₂/Si skeytum
- SOI samanstendur af kristölluðum kísli 50 nm þykkum og huldu oxíðlagi 25 nm af þykkt

51

SPIMOX



- XTEM örmynd af SOI sem myndað var með SPIMOX við -60 keV

52

Heimildir

- [1] R. C. Jaeger, *Introduction to microelectronic fabrication*, Addison-Wesley, 1988, kafi 5
- [2] S. M. Sze, *Semiconductor devices: Physics and technology*, John Wiley & Sons, 2 ed., 2002. kafi 13.4 - 13.6
- [3] M. D. Giles, Ion Implantation, in *VLSI Technology*, 2nd edition, editor S. M. Sze, McGraw-Hill, 1988
- [4] X. Lu, S. K. Iyer, J. Liu, C. Hu, N. W. Cheung, J. Min and P. K. Chu, Separation of Plasma Implantation of oxygen to form silicon on insulator, *Applied Physics Letters*, **70** (1997) 1748 – 1750
- [5] M. T. Robinson, Basic physics of radiation damage production, *Journal of Nuclear Materials*, **216** (1994) 1 – 28
- [6] R. Alvis, S. Luning, L. Thompson, R. Sinclair and P. Griffin, Physical characterization of two-dimensional doping profiles for process modeling, *Journal of Vacuum Science & Technology B* **14** (1996) 231-235