

Ræktun þunnra hálfleiðandi húða

Jón Tómas Guðmundsson^{a,b} og Sveinn Ólafsson^b

^aVerkfræðideild Háskóla Íslands, ^bRaunvísindastofnun Háskólans

Vefútgáfa: 21. maí 2003

Ágrip – Þunnar húðir eru ræktaðar á bolefni (undirlag) til að fá fram nýja eiginleika sem ekki eru til staðar í bolefni. Að auki má fram ýmsa eiginleika með því að rækta nokkur lög ólíkra efna. Fjallað er um tvær aðferðir til ræktunar þunnra hálfleiðandi húða; lagvöxt úr vökvasa og ræktun með sameindaúðun. Ræktun þunnra húða með útfellingu úr vökvasa er gjarnan notuð til að rækta III-V hálfleiðara og skyld melmi eins og GaAs og $Al_xGa_{1-x}As$. Með sameindaúðun má rækta húðir sem eru örfá atómlög að þykkt með afar nákvæmri stýringu á íbót og efnasamsetningu.

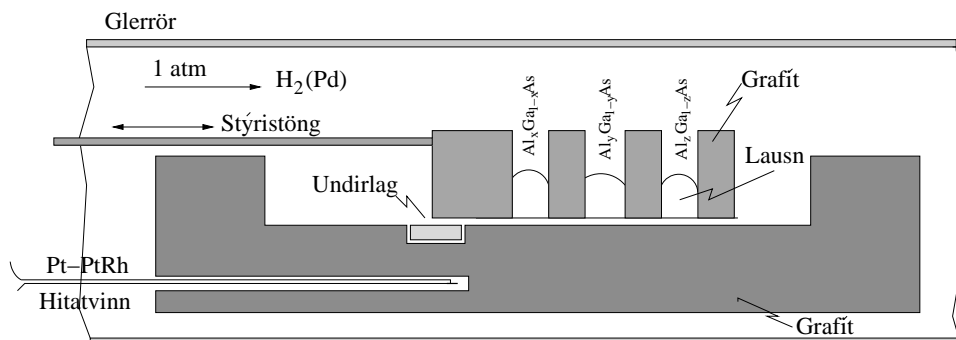
1. Inngangur

Þunnar húðir á bolefni (undirlag) gefa eiginleika sem ekki eru fyrir hendi í bolefni. Einnig má fá fram ýmsa eiginleika með því að rækta fjölmörg lög ólíkra efna. Nanómetra þykk einkristölluð lög af hálfleiðandi efnum með mismunandi eiginleika ræktuð hvert ofan á annað mynda ofurgrind þar sem rafeiginleikarnir ráðast af lotu laganna fremur en af lotu atómanna í hverju lagi.

Hálfleiðari er þéttfni sem hefur rafleiðni sem liggur á milli leiðara og einangrara. Dæmi um hálfleiðara eru kísill, german og gallín arsen. Leiðni hálfleiðara má breyta um margar stærðargráður með því að íbæta kristallinn með atómum ólíkum þeim atómum sem byggja upp kristallagrindina. Hreinn hálfleiðari hefur afar litla leiðni við lágt hitastig, en hún eykst ef lýst er á hálfleiðarann eða hann hitaður upp. Til að breyta leiðninni í nothæf gildi má íbæta hýsinn með tilteknu magni óhreininda. Í hálfleiðara af p -gerð er kristallurinn íbættur með aðskota atómum sem hafa einni færri gildisrafeindir en hýsisatómið. Þegar þessu atómi er komið fyrir í kristallagrindinni myndast hola þar sem rafeindin ætti að vera. Þessi atóm eru nefnd rafþegar. Í hálfleiðara af n -gerð er kristallurinn íbættur með aðskota atómum sem hafa eina ytri rafeind umfram hýsisatómið. Þegar slíku atómi er komið fyrir í kristallagrindinni er þessari auka rafeind ekki deilt með nágretta atómum og hún

getur þess vegna ferðast frjálts um kristallagrindina. Þessi atóm eru nefnd rafgjafar.

Lagvöxtur (e. epitaxy) er það nefnt þegar einkristallað undirlag stýrir ræktun nýs lags þannig að kristallurinn verður samfelldur. Til þess þurfa grindarlengdir ræktaða lagsins og undirlagsins að vera mjög svipaðar. Lagvöxtur er eitt grunnferlið í framleiðslu hálfleiðaratóla. Ræktun fer fram við hitastig sem er miklu lægra en bræðslumark efnisins (30 – 50% lægra). Lagvöxt má fá úr storku, vökvasa (e. liquid phase epitaxy (LPE)), gasfasa (e. vapour phase epitaxy (VPE), chemical vapour deposition (CVD)) eða með sameindaágræðslu (e. molecular beam epitaxy (MBE)). Storknu frumefni er þá komið á gaskennt form áður en það er flutt að yfirborðinu. Þetta má gera með hitun eða orkuríkum rafeindum, ljóseindum eða jákvæðum jónum (spætun). Stundum er þéttfni breytt í gas með efnafræðilegum aðferðum. Einnig má koma sáðkristallinum (undirlaginu) fyrir í snertingu við vökvabráð, sem er mettuð af íefnum (e. constituents) hálfleiðarans og rækta lag úr vökvasa þegar lausnin er kæld. Meðan ræktunin stendur yfir er óhreinindaatómum (íbótaratómum) bætt í gasið eða vökvann. Íbótin ákvarðar raf- og ljóseiginleika ræktaða lagsins. Efnasamsetning, íbótarþéttleiki, þykkt húðarinnar og fjöldi laga ákvarðar eiginleika kristallsins. Sem dæmi um algenga samsetta hálfleiðara má nefna gallín-arsen, ál gallín-arsen, gallín fosfíð og indín gallín fosfíð.



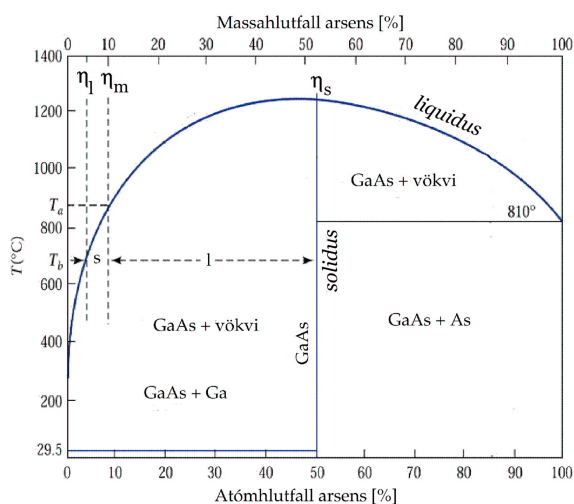
Mynd 1. Lagvöxtur úr vökva-fasa. Undirlaginu er rennt undir brunna sem innihalda bráð. Bráðin í brunnum getur verið með mismunandi frumefnahlutföll t.d. getur hlutfall Al og Ga verið breytilegt. Þegar ræktað er $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ eru íefnir oftast leyst upp í gallínbráð. Dæmigerður ræktunarhraði er $0.1 \mu\text{m}/\text{mín}$ og ræktunarhitastig er á bilinu $700 - 900^\circ\text{C}$.

Talsverð uppbygging hefur átt sér stað í ræktun-
artækni við Raunvísindastofnun Háskólans á nokkrum undanförunum árum. Hér verður fjallað um tvær aðferðir til ræktunar þunnra hálfleiðandi húða sem notaðar eru við Raunvísindastofnun Háskólans. Fyrst er fjallað um lagvöxt úr vökva-fasa, til ræktunar á ál gallín-arsen og síðan er fjallað um sameindaúðun.

2. Ræktun úr vökva-fasa

Ræktun laga úr vökva-fasa á kristölluð undirlög byggir á útfellingu úr vökva-fasa. Undirlaginu (sáðkristallinum) er þá komið í snertingu við vökvalausn mettaða íefnum húðarinnar og kristallurinn grær við útfellingu. Þetta er notadrjúg aðferð til að rækta gallín-arsen og skyld III-V efnasambönd og melmi [Astles, 1990]. Þegar III-V hálfleiðari er ræktaður er lausnin oftast málmur og frumefni úr lotu III, þ.e. gallín eða indín er leysir og frumefni úr lotu V er uppleysta efnið, þ.e. fosfór eða arsen. Í raun eru III-V hálfleiðarar (GaAs eða InP) leystir upp í málminum.

Brunnar eru gerðir í háhreina grafítblokk eins og sjá má á mynd 1. Í þeim er íefnum hálfleiðarans komið fyrir. Undirlagið situr á sleða úr háhreinu grafíti. Sleðinn er færður undir brunna. Þessu er komið fyrir í ofni undir H_2 flæði. Á meðan æskilegu ræktunarhitastigi er náð er undirlagið hulið með grafíti. Þegar óskhitastigi er náð er undirlagið sett undir fyrsta brunna og hitastig ofnsins lækkað með ákveðnum hraða ($0.1 - 1^\circ\text{C}/\text{mín}$) eða í skrefum. Við þetta byrjar lagvöxtur gallín-arsens á undirlagið. Dæmigerður ræktunarhraði er $0.1 \mu\text{m}/\text{mín}$. Til að stöðva ræktunina er undirlagið fært undan brunnum. Fleiri lög eru



Mynd 2. Fasalínurit fyrir tvíundakerfið Ga-As.

ræktað með því að flytja undirlagið undir aðra brunna. Þannig má t.d. rækta lög með mismunandi Al og Ga hlutfalli og mynda fjölsamkeyti. Ræktun úr vökva-fasa gefur húðir með lágan veilupéttleika og stýring á efnahlutföllum er afar góð. Ókostur við þessa tækni er að uppleysanleiki takmarkar allverulega þau efni og efnasambönd sem rækta má.

Til að rækta úr vökva-fasa þarf að leysa efnið, sem rækta skal, upp í lausn. Lausnin þarf að hafa bræðslu-mark allnokkru lægra en hálfleiðaraundirlagið sem rækta skal á. Við gallín-arsen ræktun er arsen oftast leyst upp í gallínbráð. Fyrir gefið hitastig, mettar tiltekið magn af gallín-arsen bráðina og myndar jafnvægislausn. Þetta tiltekna magn er gefið með *liquidus*

línunni á fasalínuriti fyrir Ga-As kerfið sem er sýnt á mynd 2. Við kælingu á bráð niður fyrir *liquidus* línuna verður útfelling. Skoðum nú fasalínurit Ga-As kerfisins nánar og gerum ráð fyrir bráð sem upphaflega hefur massahlutfall arsens η_m sé kæld frá T_a (eftir *liquidus* línunni) niður í T_b . Við T_b er M_1 massi bráðinnar, M_s massi þéttfnis (þ.e. GaAs) og η_l og η_s eru massahlutföll arsens í vökva og þéttfni. Massi arsens í bráð er $\eta_l M_1$ og þéttfnis $\eta_s M_s$. Þar sem heildarmassi arsens er $(M_1 + M_s)\eta_m$ fæst

$$\eta_l M_1 + \eta_s M_s = (M_1 + M_s)\eta_m \quad (1)$$

eða

$$\frac{M_s}{M_1} = \frac{\text{massi GaAs við } T_b}{\text{massi vökva við } T_b} = \frac{\eta_m - \eta_l}{\eta_s - \eta_m} = \frac{s}{l} \quad (2)$$

þar sem s og l eru lengdir tveggja lína sem mældar eru frá η_m að *liquidus* og *solidus* línunum. Lítið hlutfall ($\sim 10\%$ hér) bráðinnar hefur storknað.

2.1. Ræktunaraðferðir

Við lagvöxt úr vökvaþasa þarf arsen að sveima í bráðinni um jaðarlag af þykkt δ að yfirborðinu þar sem það kemur fram sem lagvöxtur [Hsieh, 1974]. Í einni vídd hefur sveimjafnan formið

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

þar sem D er sveimfasti arsens í gallín lausn. Magn uppleysta efnisins sem flyst að yfirborðinu um jaðarlagið og fellur út á flatareiningu undirlags er gefið með M

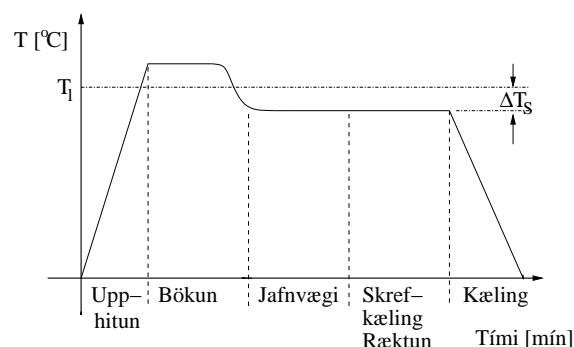
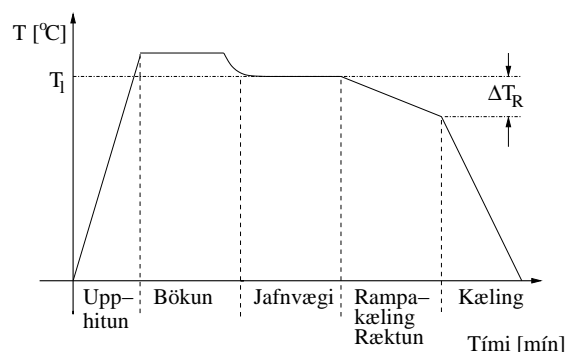
$$M = \int_0^t D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} dt. \quad (4)$$

Þykkt ræktaða lagsins er gefin með

$$x_o = \frac{M}{C_s} \quad (5)$$

þar sem C_s er þéttleiki uppleysta efnisins í ræktaða laginu.

Algeng leið til ræktunar úr vökvaþasa er rampakæling (kæling – í – jafnvægi). Lausnin er þá upphaflega mettuð með gallín-arsen við hitastigið T_1 og massahlutfall arsens η_m . Undirlagi, sem einnig er við T_1 , er rennt undir lausnina í brunninum og hitastig lausnarinnar lækkað rólega um ΔT_R með kælingarhraðanum R °C/min. Við það verður lausnin yfirmettuð en færast í jafnvægi með útfellingu, sem kemur fram sem lagvöxtur á gallín-arsen. Ræktun heldur



Mynd 3. Hitastig sem fall af tíma fyrir efri rampakælingu og neðri skrefkælingu við lagvöxt úr vökvaþasa.

áfram svo lengi sem undirlagið er í lausninni og lausnin er yfirmettuð.

Við rampakælingu, þar sem kælihraði er gefinn með R er þéttleikinn

$$C(0, t) = C_1 - Rt/m \quad (6)$$

þar sem $m = dT_1/dC_1$ er hallatalan á *liquidus* línunni. Jaðarskilyrði er $C(x, 0) = C_1$ þar sem C_1 er þéttleiki við $x = \delta$. Lausn sveimjöfnunnar við þessi jaðarskilyrði er [Crank, 1975]

$$C(x, t) = C_1 - 4 \frac{R}{m} t i^2 \operatorname{erfc}(\xi) \quad (7)$$

þar sem

$$\xi = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (8)$$

og

$$4i^2 \operatorname{erfc}(\xi) = (1 + 2\xi^2) \operatorname{erfc}(\xi) - \frac{2\xi}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) \quad (9)$$

Hér er

$$\operatorname{erfc}(\xi) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi \exp(-y^2) dy. \quad (10)$$

Með því að tengja jöfnur (4), (5) og (7) fæst að

$$x_o = \frac{4}{3} \left(\frac{R}{mC_s} \right) \left(\frac{D}{\pi} \right)^{1/2} t^{3/2}. \quad (11)$$

Þykkt lagsins vex eins og $t^{3/2}$ og vaxtarhraðinn dx_o/dt eykst eins og $t^{1/2}$.

Önnur leið er að lækka hitastigið í skrefum, skref – kæling. Gallín lausn er mettuð með gallín-arsen við T_1 . Hitastigið er þá lækkað um nokkrar gráður (milli 5 og 20 °C) niður í T_s og bráðin verður yfirmettuð. Undirlaginu er nú komið fyrir í bráðinni þar sem því er haldið við hitastigið T_b . Upphaflega hefst storknun vegna þess að bráðin er yfirmettuð. Lausnin tapar smám saman arseni og vaxtarhraðinn fellur með tíma. Í skref-kælingu eru jaðarskilyrðin

$$C(x, 0) = C_1 \quad (12)$$

$$C(0, t) = C_1(0) \quad (13)$$

og lausnin á sveimjöfnunni því

$$C - C_1(0) = (C_1 - C_1(0)) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (14)$$

og þar með er

$$x_o = \frac{2(C_1 - C_1(0))}{2C_s} \left(\frac{D}{\pi} \right)^{1/2} t^{1/2}. \quad (15)$$

Í skref-kælingu vex þykkt ræktaða lagsins eins og $t^{1/2}$ en ræktunarhraðinn er í réttu hlutfalli við $t^{-1/2}$, þ.e. minnkar með tíma. Ræktun með rampakælingu gefur ekki eins einsleitir húðir og skrefkæling gerir, sér í lagi ef munur er á grindarlengdum ræktaðrar húðar og undirlags. Einnig er erfiðara að fá fram húð með sömu eiginleika við endurtekna rampakælingu sem stafar af því að hún er næmari fyrir hitastigsflökti í ofninum [Hsieh, 1974]. Rampakæling er þó afar mikið notuð, sér í lagi þegar ræktaðar eru þykkar húðir ($> 5 \mu\text{m}$) [Astles, 1990].

2.2. Verkefni

Ræktunarbúnaðurinn á Raunvísindastofnun er sýndur á mynd 4. Hann er settur upp til ræktunar á $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Dæmi um verkefni er könnun á sætarskiptum kísilíbótar í GaAs við bökun. Ræktaðar eru þunnar kísilíbættar GaAs húðir á hálfleinangrandi GaAs undirlög (á (100) sléttu). Þá er bráðinn Ga-málmur mettaður af As og ákveðnu magni

af kísli bætt út í bráðina. Ræktaðar eru kísilíbættar húðir við 700 °C til að gefa p -leiðni og við 850 °C til að gefa n -leiðni. Bökun á p -leiðandi sýnunum við 840 °C umbreytir þeim í n -leiðandi sýni. Samanburður á nýræktuðum p -leiðandi sýnum og sýnum sem eru n -leiðandi eftir bökun bendir til að leiðnibreytingin stafi af færslu á kísilíbót úr As sæti, sem gefur p -leiðandi efni, yfir í Ga sæti, sem gefur n -leiðandi efni. Þessar leiðnibreytingar hafa verið skoðaðar með leiðni- og Hallmælingum [Svavarsson et al., 2001]. Þá hefur ljómunarmælingum einnig verið beitt til að skoða breytingar á ljóseiginleikum [Svavarsson et al., 2002].

Í öðru verkefni er fengist við vetnisíbætingu á fjölsamskeytum $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ og GaAs. Ræktuð eru fjölsamskeyti, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ á GaAs og húðin íbætt í vetnisrafgasi. Skoðuð eru áhrif vetnisíbætingarinnar á rafeiginleika og borðabognun við samskeytin [Ólafsson et al., 1999].

3. Sameindaúðun

Sameindaúðun (e. Molecular beam epitaxy (MBE)) er aðferð til að rækta þunnar húðir lagvexti. Sameindaúðun er það nefnt þegar ein eða fleiri bunur af atómum eða sameindum hvarfast við kristallað yfirborð undirlags við ofurlofttæmi ($\sim 10^{-8}$ Pa) og mynda þunna kristallaða húð. Með sameindaúðun má rækta þunnar húðir með nákvæmni upp á eitt atómlag og rækta efni og efnasambönd sem spanna oxíð, hálfleiðara og málma. Sameindaúðun var þróuð um 1970 sem aðferð til lagvaxtar samsettra hálfleið-

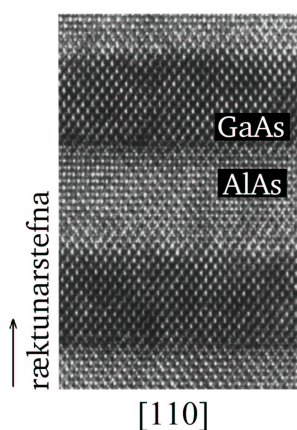


Mynd 4. Tækjabúnaður til ræktunar gallín–arsen húða úr vökvafasa.

ara [Cho, 1971, Arthur, 2002]. Sameindaúðun er enn mest notuð til ræktunar á samsettum hálfleiðurum, vegna mikilvægi þeirra í nútíma hátækni. Hálfleiðandi húðir ræktaðar lagvexti gegna mikilvægu hlutverki í rafeindatólum. Sér í lagi er sameindaúðun mikilvæg við þróun ljósrafeindatóla [Henini, 1997].

Með sameindaúðun er hægt að stýra bæði efna-samsetningu og íbótarpéttleika hinna ræktuðu húða með afar mikilli nákvæmni. Í þeim má fá fram rafeiginleika sem eru ólíkir eiginleikum undirlags-ins, hærri hleðsluberapéttleika, lægri veilupéttleika og ólíka íbótareiginleika. Rækta má hágæðalög með mjög skörpum skeytum, af nákvæmri þykkt, af tiltek-inni blöndu frumefna og með vel ákvarðaðan íbótarpéttleika. Þannig má mynda einkristölluð lög sem eru aðeins nokkur atómlög að þykkt. Rækta má fjölsamskeyti (e. heterostructures) úr lögum sem eru frá broti úr μm niður í eitt atómlag á þykkt.

Fjölsamskeyti eru samskeyti milli tveggja ólíkra hálfleiðara. Algengast er að fjölsamskeyti séu ræktuð úr lögum af $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ þar sem x er mæli-kvarði á hlutfall áls og gallíns og hleypur frá $x = 1$ fyrir AlAs og niður í $x = 0$ fyrir GaAs. Orkugeil hálfleiðarans breytist með x þannig að mynda má mætisbrunna á samskeytum laga með ólík x . Fyrir $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ breytist grindarfastinn afar lítið við breytingu á hlutfalli áls og gallíns, sem er ótvíræður kostur við ræktun fjölsamskeyta. Mynd 5 sýnir fjöl-samskeyti AlAs/GaAs, en á henni má greina fjögur



Mynd 5. Fjölsamskeyti AlAs/GaAs ræktuð með sameindaúðun skoðuð með gegnskíni rafeindasmásjá. Þrátt fyrir að samskeytin séu afar skörp má sjá að stöku ál atóm situr í Ga sæti og ófugt [Braun et al., 1997].

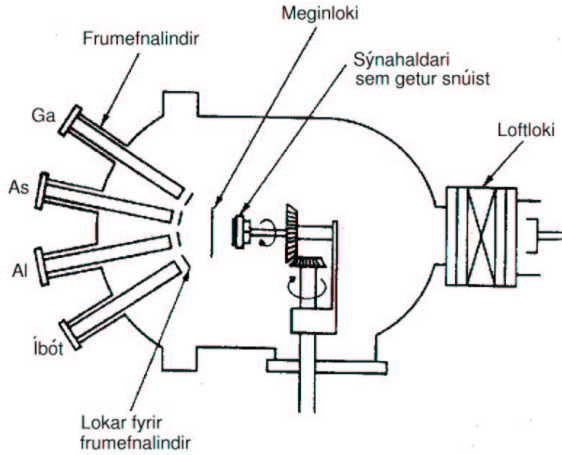
samskeyti á milli AlAs og GaAs laga. Samskeytin eru afar skörp en þó má greina Ga atóm í Al sæti [Braun et al., 1997]. Þegar nanómetra þykk lög af hálfleiðandi efnum með mismunandi eiginleika, eins og GaAs og $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, skiptast á í ræktun fæst of-urgrind þar sem rafeiginleikarnir ráðast af lotu lag-anna fremur en af lotu atómanna í grindinni. Með slík-um fjöllaga húðum má framkalla efni með aðra eigin-leika en þekktir eru í bolefniinu.

3.1. Ræktun með sameindaúðun

Við sameindaúðun eru frumefnunum beint að undir-laginu sem sameindabunum og þau felld út sem þunn-ar húðir á hitað kristallað undirlag. Þessar sameinda-bunur eru myndaðar með uppgufun frumefnanna frá frumefnalind (Knudsen cell). Hitastig hverrar lind-ar er stillt til að gefa tiltekinn hlutþrýsting og frum-efnaflæði. Til að fá háhreinar húðir þurfa lindirnar að vera ofurhreinar og ræktunarferlið að fara fram í ofur-lofttæmi. Í þessu ofurlofttæmi hafa frjálstu frumeind-irnar langan meðalspöl og árekstrar við aðrar frum-eindir eru sjaldgæfir þar til þær rekast á undirlag-ið. Með tölvustýringu á lokum má stjórna því hvaða frumeindabunum er beint að undirlaginu.

Sameindaúðunarkerfi samanstendur gjarnan af þremur lofttæmiklefum; ræktunarklefa, biðklefa og sýnaskiptaklefa. Sýnaskiptaklefinn er notaður til að skipta megi um sýni án þess að rjúfa lofttæmi til hinna klefanna. Í biðklefanum eru sýni undirbúin fyrir rækt-un, sýni geymd og þau greind. Mynd 6 sýnir klefa til ræktunar á GaAs og skyldum III–V efnasamböndum eins og $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Frumefnalindir fyrir gallín og arsen og íbótarefni eru í ofurlofttæmi ($\sim 10^{-10}$ Torr). Sýnahaldarinn snýst samfelld til að fá jafnan lagvöxt (þ.e. $\pm 1\%$ í íbót og $\pm 0.5\%$ í þykkt). Hitastig undir-lagsins við ræktunina er 300 – 900 °C. Áður en rækt-að er á yfirborðið þarf að hreinsa það. Það má gera með bökun eða lágorku jónageisla (eðalagas) til að spæta úr yfirborðinu. Yfirborðið er síðan lagað með hitun. Til að fjarlægja leifagas liggur umgjörð kæld með fljótandi köfnunarefni (77 K) á milli sýnahaldara og veggja klefa.

Flæði sameinda frá frumefnalindinni ræðst af orkudreifingu sameindanna. Ef gert er ráð fyrir að orka sameindanna sé Maxwell-dreifð má rita flæðið



Mynd 6. Ræktunarklefi sameindaúðunarkerfis. Frumefnalindir beina sameindageislum að undirlaginu sem að situr á sýnahaldara sem er hitaður og getur snúist.

sem fall af mólmassa sameindanna og hitastigi sem [Sze, 2002]

$$\phi = n \left(\frac{kT}{2\pi M} \right)^{1/2} \quad (16)$$

og tengja við gasþrýsting með kjörgasjöfnunni

$$\phi = \frac{p}{\sqrt{2\pi M kT}} = 3.51 \times 10^{22} \left(\frac{p}{\sqrt{MT}} \right) \quad (17)$$

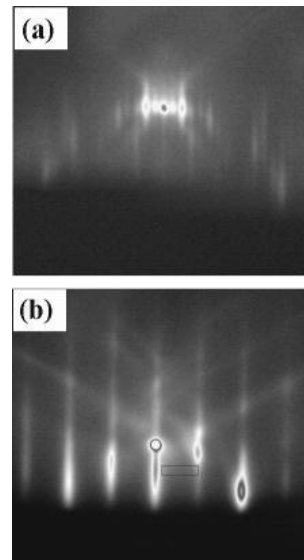
þar sem p er þrýsingur í Torr, k er fasti Boltzmann og M er mólmassi. Gerum ráð fyrir frumeindalindum sem hafa yfirborðsflatarmál 2 cm^2 og eru í 10 cm fjarlægð frá undirlaginu. Lindirnar eru fylltar með gallíni annars vegar og arseni hins vegar og hitaðar upp í 900°C . Við þetta hitastig er gufuþrýstingur gallíns 4.2×10^{-4} Torr. Gufuþrýstingur arsens er talsvert hærri við þetta hitastig eða 8.3×10^{-3} Torr. Vaxtarhraða gallín-arsen er stýrt af komutíma gallíns til yfirborðsins. Þá er flæði gallíns reiknað með jöfnu (17) sem $3.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}/\text{s}$. Yfirborðspéttleiki gallín atóma er um $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ og meðalþykkt einlags um 0.28 nm . Vaxtarhraði gallín-arsens er þá

$$\frac{dx}{dt} = \frac{3.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}/\text{s} \times 0.28 \text{ nm}}{6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}} \simeq 9.2 \text{ nm}/\text{min}$$

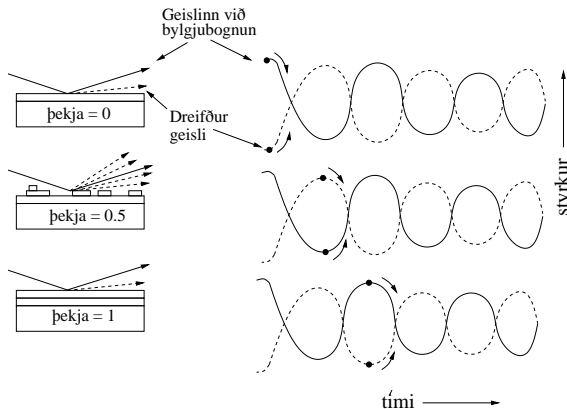
sem er fremur lítill ræktunarhraði. Þessi litli ræktunarhraði gefur færi á að breyta snögg um efnasamsetningu því loka má fyrir sameindageisla á broti úr sekúndu.

3.2. Greiningartækni

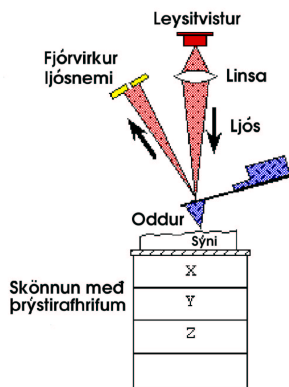
Til að fylgjast með ræktuninni er mest notuð tækni sem byggir á dreifingu háorku rafeinda (e. reflection high-energy electron diffraction (RHEED)). RHEED gefur upplýsingar um lotu yfirborðsins og hrjúfleika. Með þessari tækni má kvarða ræktunarhraðann, skoða áhrif ræktunarhitastigs, fylgjast með hreinsun oxíðs af yfirborði, fá upplýsingar um hreyfifræði ræktunar og skoða röðun frumeinda á yfirborðinu. Rafeindabyssa sendir frá sér $10 - 30 \text{ keV}$ rafeindir (deBroglie bylgjulengd er á bilinu $0.12 - 0.07 \text{ \AA}$), sem lenda á yfirborði sýnisins undir litlu horni ($\sim 0.5 - 3$ gráður). Rafeindabyssan beinir rafeindunum á blett með $\sim 100 \mu\text{m}$ þvermál. Rafeindirnar speglast af yfirborðinu og lenda á fosfór skjá og raðast í mynstur sem er einkennandi fyrir speglun og bylgjuvíxlun og er lýsandi fyrir kristallagerðina. Mynstrið sem fram kemur er röð ráka eins og sjá má á mynd 7. Fjarlægð á milli ráka er mælikvarði á grindarfasta grindareiningar á yfirborðinu. Ef yfirborðið er flatt er mynstrið skarpt en myndin verður þokukennari ef yfirborðið er hrjúft. Með myndavél og skjá má fylgjast með ræktuninni á rauntíma. Sveiflutíðni styrks í RHEED merkinu má nota sem beina mælingu á ræktunarhraðanum [Van Hove et al., 1983]. Lotan í sveiflunni



Mynd 7. RHEED mynstur frá GaAs(311)B yfirborði tekið (a) undir $[233]$ og (b) undir $[011]$ áttarhorni. [Wang et al., 2001].



Mynd 8. Lotan í RHEED merkinu svarar til tímans sem það tekur að rækta eitt atómlag. Sveiflurnar stafa af lotubundnum breytingum á yfirborðinu, þegar ræktað lag kjarnast, og þekur fullkomlega yfirborð lagsins sem á undan var komið.



Mynd 9. Kraftsjáin beitir hvassri nál sem hangir í fjaðrandi svifbita. Yfirborðið er skannað undir nemann með þrýstirafhrifum og færsla nálarinnar er numin með speglun á leysi-geisla frá svifbitanum.

svarar til tímans sem tekur að rækta eitt atómlag. Sveiflurnar stafa af lotubundnum breytingum á yfirborðinu, þegar ræktað lag kjarnast, og þekur fullkomlega yfirborð lagsins sem á undan var komið eins og sjá má á mynd 8.

Kraftsjá (e. atomic force microscope (AFM)) beitir hvassri nál sem er fest á fjaðrandi svifbita eins og sjá má á mynd 9. Nálin snertir yfirborðið þannig að hún verður fyrir örliðlum víxlverkunarkrafti (af stærðargráðunni nanó newton). Nálin er færð eftir yfirborðinu á línunum og föstum krafti er viðhaldið á milli nemans og sýnisins. Kraftsjáin nemur færslu oddsins, og við-

heldur föstum snertikrafti (vegna breytileika í stífni og landslagi (e. topography) yfirborðsins). Þessi færsla er numin með speglun á leysi-geisla frá svifbitanum. Kraftarnir ráðast af víxlverkun atómanna í nemanum og á yfirborðinu. Þessi víxlverkun er aðdráttarkraftur fyrir langar fjarlægðir vegna van der Waals víxlverkunar. Fyrir styttri fjarlægðir kemur til fráhrindikraftur sem á upptök sín í einsetulögmáli Pauli. Með kraftsjá má fylgjast með ræktuninni, myndun eyja og hjalla-myndun sem eru atómlag á hæð.

3.3. Tækjabúnaður

Sameindaúðunarkerfið sem nú er í uppsetningu á Raunvísindastofnun Háskólans var áður notað við Konunglega Tækniháskólann í Stokkhólmi til ræktunar á þunnum oxíð-húðum og ofurleiðurum [Brazdeikis, 1996]. Það er byggt á VG Semicon V80H MBE kerfi og Omicron AFM einingu. Það samanstendur af fjórum lofttæmiklefum sem hver um sig eru með óháðar lofttæmidælur. Klefarnir eru sýna-skiptaklefi, undirbúningsklefi, klefi fyrir kraftsjá og ræktunarklefi. Þrjú síðastnefndu klefarnir eru við of-urlofttæmi. Í ræktunarklefanum er 15 keV RHEED þannig að fylgjast má með ræktun á rauntíma. Í ræktunarklefanum eru sæti fyrir sjö frumeindalindir af Knudsen gerð. Ræktunarklefinn er búinn 400l/s jónadælu og 1000l/s hverfidælu (Varian Turbo – V1000A). Sýnahaldarinn getur snúist samfelld og honum má halda við 900 °C. Undirbúningsklefinn inniheldur hitara sem getur náð 1300 °C fyrir afgösum undirlags.

4. Lokaorð

Fjallað hefur verið um búnað og tækni til ræktunar þunnra hálfleiðandi húða sem notaður er á Raunvísindastofnun Háskólans. Aðferðirnar sem fjallað var um eru ólíkar í eðli sínu. Hvor um sig hafa þessar aðferðir sína kosti og galla. Ræktun með sameindaúðun og ræktun úr vökva-fasa hafa þann ókost að eftir að hafin hefur verið ræktun úr tilteknum efna-samböndum verður því ekki breytt nema með ær-inni fyrirhöfn og tilkostnaði. Ræktun úr vökva-fasa er hraðvirk leið, sem hefur kosti í iðnaðarframleiðslu en ræktunarhitastigið er hátt sem getur haft í för með sér sveim íbótar í bolefnninu. Ræktun úr vökva-fasa hefur þann kost að vera mun ódýrari en ræktun með sameindaúðun bæði hvað varðar tækjabúnað og rekstrar-kostnað. Eftir ræktun úr vökva-fasa er yfirborðið frem-

ur óslétt og erfitt er að stýra þykkt húðarinnar. Þegar ræktað er með sameindaúðun fæst stýring á þykkt húðarinnar upp á eitt atómlag. Sameindaúðun er hins vegar dýr og erfið í framkvæmd og þarf flókin tækjabúnað. Þessar tvær aðferðir eru fyrst og fremst notaðar til ræktunar hálfleiðara og þá einkum samsettra III–V og II–VI hálfleiðara.

Þakkir

Tækjabúnaður til sameindaúðunar var færður Háskóla Íslands að gjöf af Anders Flodström rektor Konunglega Tækniháskólans í Stokkhólmi. Honum eru færðar þakkir fyrir höfðinglega gjöf og margvíslega aðstoð. Uppbygging tækjabúnaðar fyrir ræktun hefur verið styrkt af Bygginga- og tækjakaupasjóði Rannís, Rannsóknarsjóði Háskóla Íslands og Nýsköpunarsjóði Námsmanna. Að auki hafa einstök verkefni verið styrkt úr Vísindasjóði Rannís og Rannsóknarnámssjóði.

Summary Thin films are deposited onto a substrate to achieve new properties that are not available in the bulk material. Furthermore, additional functionality can be achieved by depositing multiple layers of different materials. We discuss two methods to grow thin semiconducting films, liquid phase epitaxy (LPE) and molecular beam epitaxy (MBE). LPE is most commonly used to grow III–V semiconductors such as GaAs and related alloys $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. MBE was developed to grow high-purity epitaxial layers of compound semiconductors. MBE can produce high quality layers with abrupt interfaces and excellent control of thickness. We describe the two different growth techniques and the LPE and MBE systems used at the Science Institute, University of Iceland.

Heimildir

Arthur, J. R. (2002). Molecular beam epitaxy. *Surface Science*, 500:189–217.

Astles, M. G. (1990). *Liquid-Phase Epitaxial Growth of III-V Compound Semiconductor Materials and their Device Applications*. Adam Hilger, Bristol.

Braun, W., Trampert, A., Däweritz, L., and Ploog, K. H. (1997). Nonuniform segregation of Ga at AlAs/GaAs heterointerfaces. *Physical Review B*, 55:1689–1695.

Brazdeikis, A. (1996). *Epitaxial Oxide Thin Films - Synthesis and Characterization of Some High-Temperature Superconductor-Related Materials*. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Cho, A. Y. (1971). Film deposition by molecular-beam techniques. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 8:S31 – S38.

Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, Oxford.

Henini, M. (1997). Molecular beam epitaxy: From research to manufacturing. *Thin Solid Films*, 306:331–337.

Hsieh, J. J. (1974). Thickness and surface morphology of GaAs LPE layers grown by supercooling, step-cooling, equilibrium-cooling, and two-phase solution techniques. *Journal of Crystal Growth*, 27:49–61.

Ólafsson, H. Ö., Guðmundsson, J. T., Svavarsson, H. G., and Gíslason, H. P. (1999). Hydrogen passivation of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ as studied by surface photovoltage spectroscopy. *Physica B*, 273–274:689–692.

Svavarsson, H. G., Guðmundsson, J. T., Gudjonsson, G. I., and Gíslason, H. P. (2001). The effect of Si site-switching in GaAs on electrical properties and potential fluctuations. *Physica B*, 308–310:804–807.

Svavarsson, H. G., Guðmundsson, J. T., Gudjonsson, G. I., and Gíslason, H. P. (2002). Potential fluctuations and siteswitching in Si-doped GaAs studied by photoluminescence. *Physica Scripta*, T101:114–118.

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

Van Hove, J. M., Lent, C. S., Pukite, P. R., and Cohen, P. I. (1983). Damped oscillations in reflection high energy electron diffraction during GaAs MBE. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 1:741–746.

Wang, Z. M., Däweritz, L., and Ploog, K. H. (2001). Molecular-beam epitaxial growth and surface characterization of GaAs(311)B. *Applied Physics Letters*, 78:712–714.

Um höfundana: Jón Tómas er dósent í rafmagnsverkfræði við verkfræðideild HÍ. Sveinn er sérfræðingur á eðlisfræðistofu Raunvísindastofnunar.

Verkfræðideild HÍ, Hjarðarhaga 6
Raunvísindastofnun Háskólans, Dunhaga 3
IS-107 Reykjavík
tumi, sveinol@raunvis.hi.is

Móttekin: 22. apríl 2003