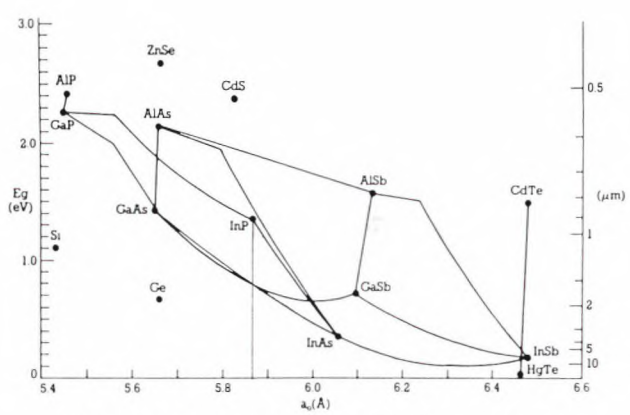
Dyrkning af tyndfilmsstrukturer til opto-elektroniske komponenter

Jesper Hanberg, Teleteknisk ForskningsLaboratorium

Indledning

Ønsker man i dag at overføre store informationsmængder ved en høj hastighed, sker det via optiske fibre (eller lysledere), der har en potentiel stor transmissionskapacitet. For at kunne udnytte lyslederens muligheder kræves dels en sender, som er i stand til at omsætte informationen, i form af elektriske signaler, til lyssignaler og dels en modtager, der laver en konvertering den anden vej - fra lys til elektrisk signal. Som sender henholdsvis modtager bruges lasere og fotodioder baseret på halvledende krystaller.

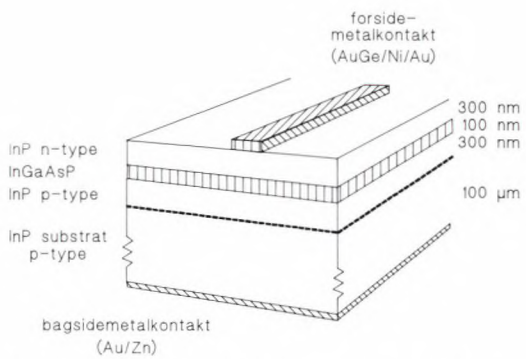
Da lysledere, som nævnt i KVANT nr. 1[1], har den mindste dæmpning omkring en bølgelængde på 1550 nm, vil man gerne have lasere, der udsender lys med denne bølgelængde. For en halvlederlaser sker lysudsendelsen ved elektronovergange fra ledningsbåndet til valensbåndet. Bølgelængden, λ, af det udsendte lys svarer derfor omtrent til energigabet, E_g, i halvlederen: $E_g = hc/\lambda$, hvor h og c er henholdsvis Plancks konstant og lyshastigheden i vacuum.



Figur 1. Energigab som funktion af gitterkonstant for en række halvledere.

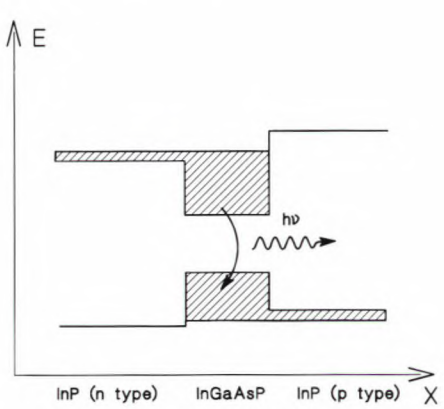
En egnet halvleder skal derfor have et direkte båndgab på cirka 0.80 eV. Figur 1 viser energigabet (og den dertil svarende bølgelængde) mod gitterkonstanten for forskellige halvledere. I figuren er der også indtegnet en lodret linie for en gitterkonstant på 5.869 Å, svarende til gitterkonstanten for InP. Ved passende blandinger af indium, gallium, arsen og fosfor (In, Ga, As, P) er det muligt at lave halvledere, der passer til denne gitterkonstant og har et energigab (afhængigt af materialesammensætningen) i intervallet fra 1.35 eV for InP til 0.75 eV for $In_{0.53}Ga_{0.47}As$. Det er halvledere af denne type, der bruges til opto-elektroniske komponenter ved 1550 nm.

Halvlederlaseren



Figur 2. Simpel InGaAsP/InP laserdiode. Bredden og længden er typisk omkring 300 μm og 500 μm.

I figur 2 er der skematisk vist en simpel halvleder laserdiode. Som det ses består strukturen af en pn overgang i InP, hvor der midt mellem p og n lagene er et tyndt lag af InGaAsP. Laservirkningen sker ved, at man med en strøm i pn overgangens lederetning opnår inversion i InGaAsP-laget, se figur 3. Samtidig fungerer komponentens endeflader som delvist reflekterende spejle i en laserkavitet. Det er af største vigtighed at halvlederkrystallen er meget perfekt ned igennem strukturen, og at det aktive lag har meget få urenheder, idet urenheder vil give anledning til elektron-overgange, der enten ikke udsender lys eller udsender lys med en forkert bølgelængde.



Figur 3. Båndgabsdiagram for aktiv InGaAsP/InP laserdiode.

Dyrkningsmetoder

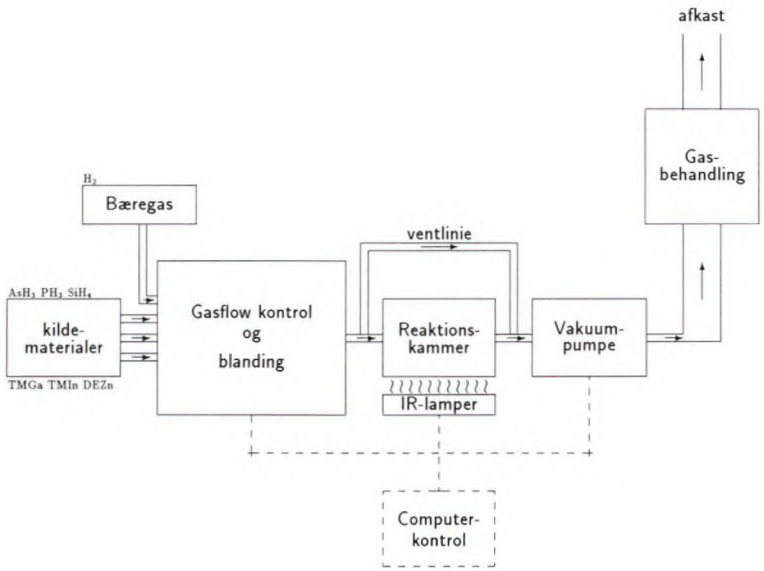
Der findes en række forskellige metoder til at lave tynde halvlederkrystallag. Af de bedst kendte kan nævnes Liquid Phase Epitaxy (LPE), Molecular Beam Epitaxy (MBE) og Metal Organic Vapour Phase Epitaxy (MOVPE). Hver af metoderne har sine fordele og ulemper.

Med LPE kan man for eksempel lave næsten perfekte enkeltkrystaller, men det er meget svært at gøre det på store substrater. Typisk er et substrat til LPE 10 mm x 10 mm, mens substrater til MBE og MOVPE er 2'' eller 3'' (cirka 50 mm og 75 mm) i diameter. Med LPE er det også meget svært at lave bratte overgange mellem forskellige materialer.

MBE teknikken giver en meget god kontrol over dyrkningen, men der er driftsmæssige problemer med brugen af fosfor i systemet.

MOVPE betragtes som den bedste dyrkningsteknik til InGaAsP baserede strukturer, på trods af den også er den mest komplicerede. I processen bruges der nogle meget giftige stoffer (arsin, phosphin og organiske metal-forbindelser), hvorfor der må tages hensyn til dette ved apparatets opbygning.

I det følgende vil jeg give en beskrivelse af det MOVPE anlæg, som i foråret 1989 blev installeret på TFL, samt beskrive dyrkningsprocessen.



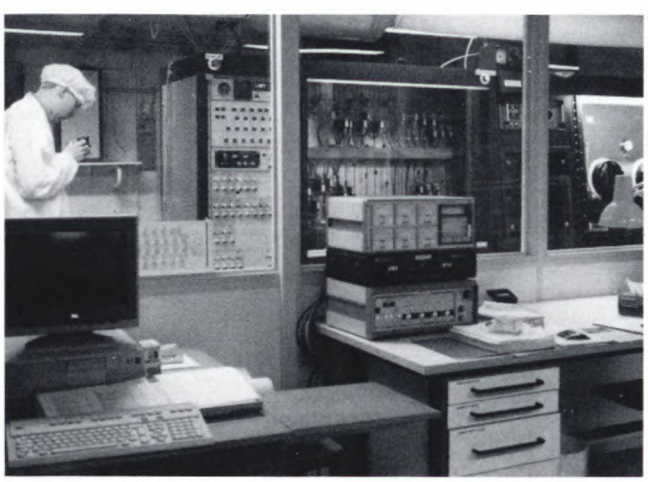
Figur 4. Skematisk diagram af MOVPE-anlæg

MOVPE

Forskningen indenfor MOVPE blev startet af Manasevit[3] i slutningen af 1960'erne. Første del af navnet kommer fra de Organiske Metalforbindelser, som er den ene type kildemateriale, der bruges i processen. VPE kommer af, at krystallagene bliver udfældet fra en gasfase (Vapour Phase) af kildematerialerne, og at lagene bliver dyrket med samme krystalstruktur som substratet (Epitaksielt).

Til dyrkning af InGaAsP baserede halvledere med MOVPE, bruger man typisk de organiske metalforbindelser trimethylindium (TMIn eller $In(CH_3)_3$) og trimethylgallium (TMGa eller $Ga(CH_3)_3$) som kildematerialer for indium og gallium. Arsen og fosfor fås fra arsin (AsH_3) og phosphin (PH_3). Vigtige kriterier ved valg af disse kildematerialer er stoffernes damptryk og renhed.

I figur 4 er der vist et skematisk diagram af et MOVPE-system. Princippet i anlægget er følgende: ved hjælp af en bæregas, som oftest brint, ledes kildematerialerne gennem rustfri stålrør til et gasblandingspanel. Her er det muligt at kontrollere mængden af de enkelte materialer meget nøjagtigt, således at man kan blande stofferne i bestemte forhold. Fra blandingspanelet ledes gasblandingen videre til reaktionskammeret, hvori substratet (InP) er anbragt. Substratet er opvarmet til 500-700 °C enten ved brug af en højfrekvent induktions-spole eller med infrarøde lamper. Herefter ledes gasserne videre gennem en pumpe til et gasbehandlingsanlæg, hvor de giftige stoffer neutraliseres. For at muliggøre meget hurtige skift mellem forskellige materialesammensætninger, kan man vælge at lede nogle af materialerne uden om reaktionskammeret. Indstillingen af gasflow, ventiler, substrattemperatur, tryk i reaktionskammeret m.m. kan altsammen styres fra en computer.



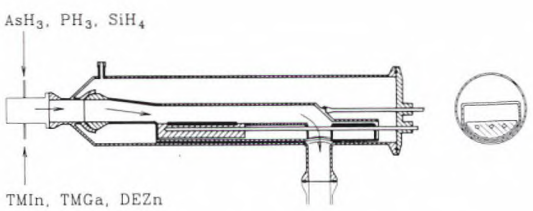
Figur 5. Billede af TFL's MOVPE-anlæg.

TFL's MOVPE-anlæg kan ses på billedet i figur 5. Anlægget er leveret af det tyske firma Aixtron. Udover de ovennævnte kildematerialer er der mulighed for at dotere lagene med Si og Zn for henholdsvis n og p type halvledere, ved brug af kildematerialerne silan (SiH_4) og diethylzink (DEZn, $Zn(C_2H_5)_2$) .

Selve reaktionskammerets udformning er vigtig for at få ensartede lag. Der tilstræbes et design, der resulterer i en laminar gasstrøm gennem cellen uden ''gaslommer''.

Gaslommer i reaktionskammeret vil medføre, at man ved skift i gassammensætningen vil få en slags hukommelseseffekt, som umuliggør skarpe overgange mellem forskellige materialesammensætninger.

I TFL's anlæg består reaktionskammeret af et horisontalt kvartsrør med rektangulært tværsnit. Dyrkningstrykket i kammeret er normalt 20 mbar, og prøverne er placeret på en grafitholder, der varmes op til 640 °C med infrarøde lamper. Figur 6 viser en tegning af reaktionskammeret. Som det ses, er der uden om det rektangulære kvartsrør et cylindrisk kvartsrør. Dette er nødvendigt fordi det firkantede kvartsrør ikke kan modstå forskellen mellem procestryk og atmosfæretryk.



Figur 6. Tegning af reaktionskammeret i TFL's MOVPE-anlæg.

Dyrkningsmekanisme

For at forstå hvorledes udfældelsen af de dyrkede halvlederlag sker i MOVPE-processen, er det nødvendigt at tage mange forhold i betragtning.

Man kan opstille modeller for, hvor stor tilvækstsrate et givet materiale vil have som funktion af dyrkningstemperatur, gasflow, tryk med mere. Dette sker ved at studere transportmekanismerne samt de indgående stoffers mulige kemiske reaktioner, deres reaktionshastighed og de termodynamiske ligevægte. Disse modeller er imidlertid meget omfattende, og da de som oftest indeholder et utal af simplificationer og antagelser, er den opnåede overensstemmelse med eksperimenter mere kvalitativ end kvantitativ.

Generelt har man dog fundet, at der findes tre områder i dyrkningstemperatur, hvor tilvækstraten er styret af forskellige mekanismer.

For lave temperaturer (fra stuetemperatur til cirka 500 °C) er de kemiske reaktionshastigheder begrænsende for tilvæksthastigheden. Man finder her, at tilvækstraten vokser med stigende temperatur.

I et mellemområde fra ca. 500 °C til ca. 800 °C, bliver tilvækstraten begrænset af den hastighed, hvormed nyt materiale kommer frem til substratoverfladen, hvilket under normale betingelser igen er begrænset af stoffernes diffusionshastighed. Herved bliver tilvækstraten stort set temperaturuafhængig, og det er derfor i dette temperaturområde en dyrkning normalt foretages. Ydermere stiger tilvækstraten proportionalt med masseflowet af gruppe-III kildemateriale, hvilket gør det let at opnå den tilvæksthastighed, man ønsker.

For højere temperaturer end 800 °C, falder tilvækstraten med voksende temperatur, hvilket skyldes en øget afdampning fra substratoverfladen.

Materiale fremstilling

Inden man kan påbegynde at fremstille en egentlig komponent, skal man kende tilvækstraterne for de forskellige materialer, doteringsniveauer, samt vide hvilken gassammensætning, der giver den rette bølgelængde og gittertilpasning. Desuden skal man, for at få så homogene lag som muligt, have fundet den ideelle kombination af temperatur, totalt gasflow og tryk. Da det jævnfør ovenstående er svært, at lave præcise modeller for dette, udgør kalibrering af MOVPE-apparaturet en væsentlig del af arbejdet.

Kalibreringen sker ved at lave en masse dyrkninger under forskellige dyrkningsbetingelser, og derefter karakterisere prøverne. Til at karakterisere prøverne bruges forskellige målemetoder, blandt andet Hall- og resistivitetsmålinger, *CV* (kapacitets-spænding) profilering, fotoluminscens og røntgendiffraktometri.

Som et eksempel vises målinger foretaget på vores højopløsnings røntgendiffraktometer. Dette måleinstrument er indkøbt igennem rammeprogrammet ''Mikrostrukturer i III-V halvledere'', som TFL deltager i sammen med Fysisk Laboratorium, HCØ, Laboratoriet for Halvlederteknik, DtH og Det fysiske Institut, Århus Universitet. Resultaterne giver samtidig et indtryk af, hvor langt vi er kommet med krystaldyrkningsteknologien på TFL.

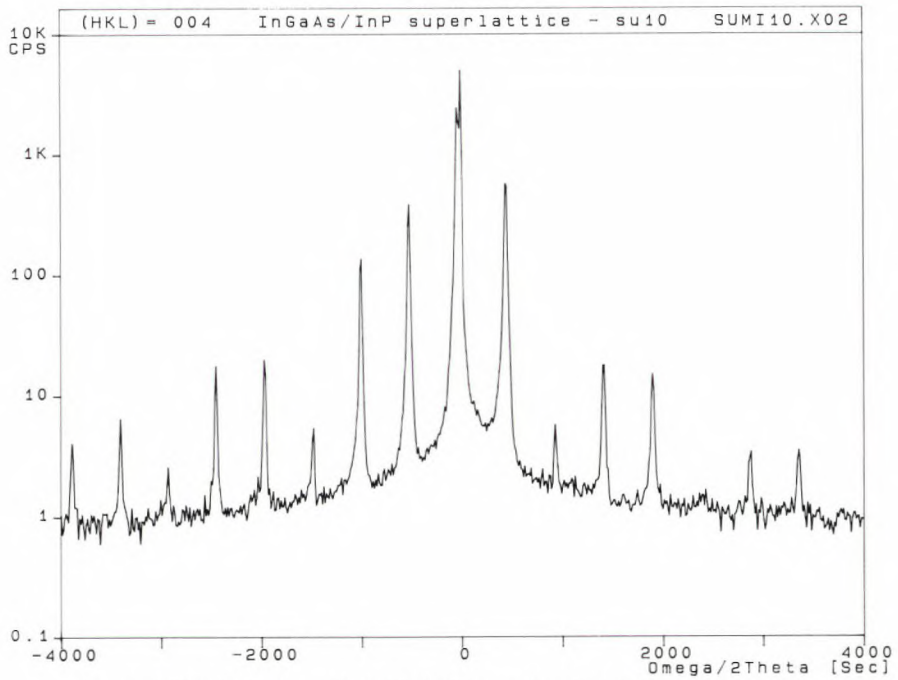
Målingerne er foretaget på tyndfilmsstrukturer, bestående af 25 skiftende lag af InP og gittertilpasset InGaAs dyrket på et InP substrat. Denne struktur udgør et såkaldt supergitter, som giver anledning til et meget karakteristisk diffraktionsspektrum. Det optagne spektrum[2] ses i figur 7. Først og fremmest kommer der to tætliggende toppe som skyldes Bragg-diffraktion fra krystalplanerne med (004) orienteringen. Der er to centrale toppe, fordi InGaAs lagene ikke er fuldstændigt gittertilpasset til substratet. Den observerede afvigelse svarer til en mistilpasning på 0.028 %. Ydermere ses en række mindre toppe omkring de to centrale toppe. Disse toppe skyldes supergitteret, og ved at måle afstanden mellem to på hinanden følgende toppe, kan man beregne perioden i gitteret. Bragg-betingelsen giver nemlig at perioden er

$$d = \frac{\lambda_{xray}}{2(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)} \approx \frac{\lambda_{xray}}{2\Delta\theta\cos\theta}$$

hvor λ_{xray} = 1.5406 Å er bølgelængden af røntgenstrålingen, og θ_1 og θ_2 er diffraktionsvinklen (i radianer) for de to toppe. $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ og $\theta \approx \theta_1 \approx \theta_2$.

Resultatet bliver en tykkelse på 39 nm.

Kigger man nærmere på spektret, kan man se at toppene varierer i intensitet. Lægges en indhyldningskurve ind for toppene, kan man finde endnu en periode, som, med nogen usikkerhed, giver en tykkelse på 13 nm. Dette svarer til tykkelsen af InP lagene, og skyldes at røntgenstrålen bliver diffrakteret forskelligt af InP og InGaAs lagene.



Røntgendiffraktionsspektrum for InP/InGaAs supergitter. Den højeste top ligger ved en vinkel på 31.09°. Enhederne på akserne er henholdsvis buesekunder (Sec) og antal tællinger pr. sekund (CPS).

Ovenstående resultater er et vigtigt skridt i retningen af selv at kunne fremstille avancerede opto-elektroniske komponenter i Danmark. Et mål som TFL har sat sig for at kunne være med i fronten af forskningen indenfor telekommunikation.

Refererencer:

1. C. Larsen. Kvant **1** nr.1, 10, (1990)
2. Krystaldyrkning og målinger er foretaget i samarbejde med Peer Tidemand Petersson og Jørgen Møller Nielsen begge TFL.
3. H. M. Manasevit and W. I. Simpson. J. Electrochem. Soc. **12**, 156 (1968)

TFL er det fælles teletekniske forskningslaboratorium for Statens Teletjeneste og de regionale televirksomheder i Danmark. TFL arbejder med den langsigtede forskning på telekommunikationsområdet. Forskningsaktiviteterne er koncentreret indenfor følgende fire områder:

- Telesystemer
- Telekommunikations programmer
- Optisk kommunikation
- Signalbehandling



Jesper Hanberg Ph.D. i faststoffysik fra Fysisk Laboratorium, H. C. Ørsted Instituttet 1987. Arbejdede blandt andet med kvante-Hall-effekten og svag lokalisering i inversionslag i silicium MOSFETs. Ansat i optogruppen hos TFL i 1988, hvor han har været med til at etablere et laboratorium for III-V halvledere. Arbejder blandt andet med materialefremstilling med MOVPE.