

# Fiberlasere.

Christian Larsen, Lycom A/S.

## Indledning

I 1973 blev det hos Bell Laboratories vist<sup>1</sup>, at man ved at tilsætte kernen af en optisk fiber små mængder af en sjælden jordarts metal, neodymium, kunne fremstille en fiberlaser, d.v.s. et stykke optisk fiber, der i sig selv udgør en laser. Resultatet med neodymium fra 1973 var bemærkelsesværdigt, men viste sig dog at have begrænset kommerciel interesse. De bølgelængder, hvor det var muligt at opnå en laservirkning, ligger nemlig ikke i umiddelbar nærhed af de bølgelængder, der er interessante (d.v.s. har lave tab) for fiber kommunikation.

Indenfor de sidste år er interessen for fiberlasere imidlertid vokset stærkt, idet det har vist sig muligt at fremstille fibre doteret med en anden sjælden jordart, erbium, der laser omkring 1535 nm, tæt på den bølgelængde, som anvendes i kommunikationssystemer nemlig 1550 nm.

Udviklingen inden for fremstilling af sædvanlige optiske fibre til kommunikation har ført til, at man i dag kan fremstille fibre baseret på silica-glas med dæmpninger, der er tæt på det teoretisk bedst mulige. For disse fibre findes den mindste dæmpning (0,2 dB/km) omkring 1550 nm, hvorfor denne bølgelængde er anvendt til kommunikation.

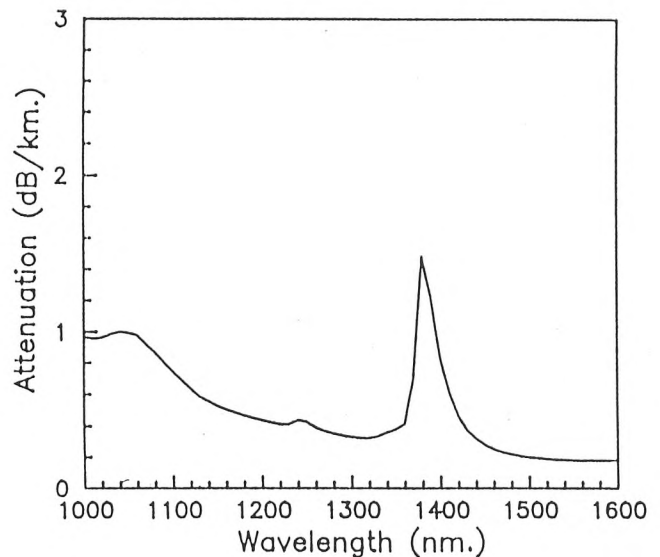
Dæmpningen,  $a$ , i en fiber måles sædvanligvis i dB/km:

$$a = 10 \log ( I_i / I_o ) / L,$$

hvor  $I_i$  er lys ind i fiberen,  $I_o$  er lys ud af fiberen og  $L$  er længden af fiberen. Det ses at et tab på 30 dB svarer til at lysets intensitet er blevet reduceret med en faktor 1000.

En typisk dæmpningskurve for en fiber er vist i figur 1. Det ses at dæmpningen vokser mod lavere bølgelængder, dette skyldes Rayleigh spredning. For bølgelængder større end ca. 1550 nm vil dæmpningen også stige, som følge af lysets vekselvirkning med gitter-svingninger i fiberen, de såkaldte fononer. Absorptionen ved 1385 nm og 1250 nm skyldes eksitationer af Si-OH bindinger. Brint optræder som en forurening i glas-set og giver altså forøgede tab i fiberen.

Transmission over afstande op til 150 km er mulig uden at lyset dæmpes mere end at det digitale signal stadig kan detekteres. Dette mål afhænger naturligvis af flere ting. Udover dæmpning i fiberen, afhænger det af den effekt det er muligt at overføre til fiberen fra

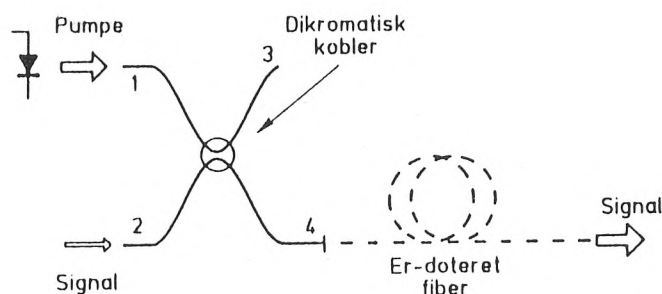


Figur 1 Spektral dæmpningskurve.

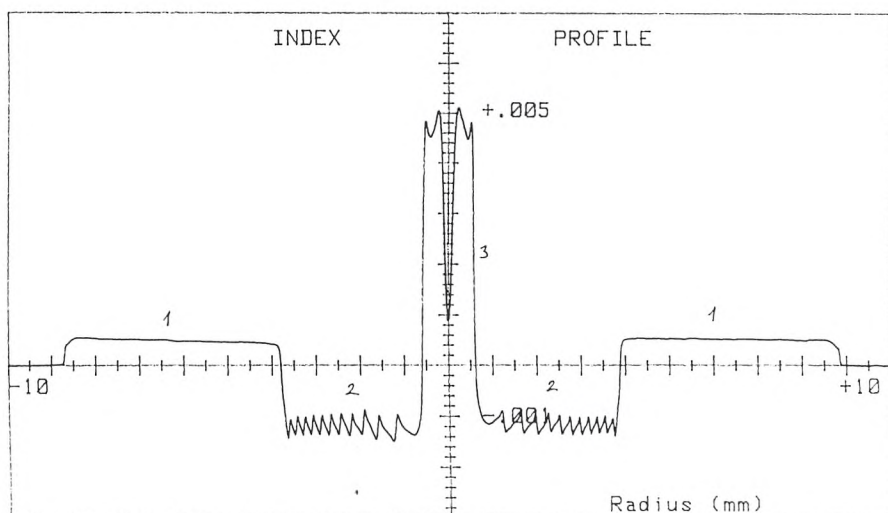
signal laseren, og det afhænger af, hvor god ens detektor er.

Et praktisk eksempel på et 150 km optisk fiber kabel, er det kabel der forbinder Stevns med Bornholm. Det er altså muligt at detektere signalet selvom det er dæmpet 30 dB (150 km fiber med 0,2 dB/km).

Ønsker man at sende over større afstande må signalet forstærkes undervejs. Dette forgår i dag elektronisk ved at signalet detekteres, det regenereres og forstærkes elektrisk og sendes videre ved hjælp af en ny signal laser. Dette er en kompliceret og dyr proces. Optisk forstærkning, hvor



Figur 2 Princip for fiberoptisk forstærker.



Figur 3 Brydningsindex igennem en single mode fiber.

signalet bevares som lys, er teknisk langt mindre kompliceret.

Princippet bag den optiske forstærker er skitseret på figur 2. En aktiv fiber ca. 10-100 m doteret med erbium, pumpes ved, at lys fra pumpelaseren sammen med signalet sendes gennem en fiberkobler ind i den aktive fiber. Der er ingen spejle i opstillingen til at give feed back til den aktive fiber, den kan derfor ikke lase. Men idet der passerer en optisk puls gennem den aktive fiber vil pulsen selv give anledning til stimuleret emission og pulsen forstærkes. Rekordforsøg har vist at det er muligt at opnå 47 dB forstærkning - mere end de 30 dB der tabes i det ovenfor omtalte Bornholmskabel.

I 1987 indledte Lycom, der fremstiller optiske fibre, og Jydsk Telefon et samarbejde<sup>2</sup> om at udvikle en fiberforstærker. Dette samarbejde er i dag udvidet så også NKT, der fremstiller optiske kabler og kommunikationsudstyr, DTH og Statens Teletjeneste deltager i dette projekt med økonomisk tilskud fra "Det Materiale teknologiske Udviklingsfond".

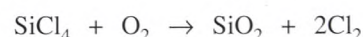
### Fremstilling af fibre.

Brydningsindex målt på tværs gennem en standard optisk fiber er vist på figur 3. Fiberen består af tre dele: et substratrør (1 på figur 3), en deponeret kappe (2) og inderst en kerne (3). For at lede lyset har kernen i en optisk fiber et højere brydningsindex end den omgivende kappe. Forskellen mellem brydningsindex i kerne og kappe er 0,3 %.

Glasset, lyslederen består af, er primært SiO<sub>2</sub>, og for at hæve eller sænke brydningsindex tilsættes små mængder af henholdsvis Ge eller F.

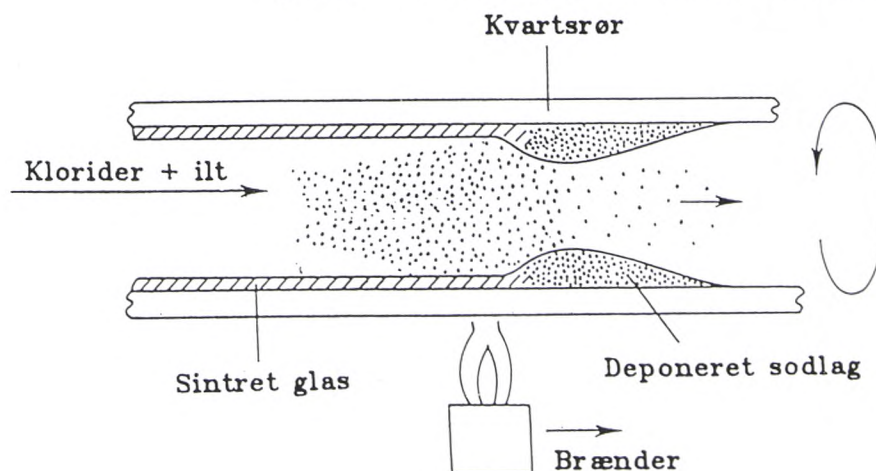
Den metode, som Lycom anvender til fremstilling af den massive glasstang, der er grundlaget for den optiske fiber (præformen), er MCVD-processen, Modified Chemical Vapor Deposition.

Udgangspunktet er et kvartsrør med en diameter på nogle få centimeter. På indersiden af dette deponeres lag på lag af glas, hvis sammensætning og dermed brydningsindex kan kontrolleres præcist. Røret opvarmes af en brintbrænder, der bevæges langs røret, idet røret roterer. Igennem røret sendes en blanding af siliciumtetraklorid og ilt, der ved opvarmning reagerer og danner siliciumoxid og klor:



Partikler af siliciumklorid afsættes på indersiden af kvartsrøret og danner et fint sodlag, som sintres til klart glas idet brænderen passerer og opvarmer røret til en temperatur omkring 1900-2000 °C (se figur 4).

Siliciumtetraklorid er ved stuetemperatur en væske, og dampe heraf ledes gennem røret ved at lade ilt boble gennem væsken. Ilt fungerer altså også som en bæregas for



Figur 4 MCVD processen.

siliciumtetraklorid. Udover  $\text{SiCl}_4$  tilsættes små mængder af  $\text{POCl}_3$ ,  $\text{GeCl}_4$  eller fluor, hvorved brydningsindexet i lyslederen kan ændres.

Efter deponeringen varmes røret kraftigt op og glassets overfladespænding vil få røret til at trække sig sammen til en massive glasstang. Selve fiberen trækkes af præformen ved opvarmning af denne til ca.  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ . Standard fibre har en yderdiameter på  $125\text{ }\mu\text{m}$  og er belagt med en acrylcoating, der har en yderdiameter på  $250\text{ }\mu\text{m}$ .

### Fremstilling af dotede fibre.

For at fremstille fibre med sjældne jordarter ville det være naturligt at inkludere de sjældne jordarters klorider i MCVD-processen. Dette lader sig desværre ikke gøre, da disse klorider har et smeltepunkt omkring  $7\text{-}800\text{ }^\circ\text{C}$ .

Den metode Lycom anvender til fremstilling af fiberlasere kaldes SODOF, Solution-DOped-Fibers, og kan beskrives i følgende trin, som MCVD-processen udvides med:

- Efter deponering af kappe deponeres kernen. Dette gøres ved lav temperatur  $1600\text{-}1700\text{ }^\circ\text{C}$ , hvorved der deponeres et sodlag af usintret siliciumoxid.
- Præformen fjernes fra drejebænken og anbringes i en vandig opløsning af sjælden jordarts klorider. Ved at variere opløsningens sammensætning og evt. også tilføje  $\text{AlCl}_3$  eller andre klorider kan fiberens sammensætning kontrolleres.
- Efter at sodlaget er blevet gennemvædet anbringes præformen igen i drejebænken. Tørringen sker ved at den varmes op og der ledes klor og ilt gennem røret. Herefter sintres sodlaget og den sædvanlige procedure med sammenklapning af røret fortsættes.

Lycom fremstiller fibre, hvor kernen er doteret med sjældne jordarter i koncentrationer fra  $50\text{ ppm-}1,5\text{ }\%$ .

### Fiberegenskaber.

Som omtalt er  $\text{Er}^{3+}$  den mest interessante ion i forbindelse med den optiske fiberforstærker. Energieniveauerne for Er er vist i figur 5. Elektronerne i den ufyldte 4f-skal i de sjældne jordarter giver anledning til disse overgange. De enkelte niveauer er multipletter, og de elektriske felter fra de omgivende ioner giver anledning til en Stark opsplitning af hver enkelt multiplet. Da glas er et amorft stof vil omgivelserne til de enkelte ioner være forskellige fra ion til ion, og opsplitningen er derfor ikke den samme for alle ioner. Linierne i absorptionsspektret for Er i glas bliver brede uden skarpe toppe. Dette er i modsætning til

tilsvarende absorptioner i YAG-lasere, hvor de sjældne jordarter er placeret i et regelmæssigt krystallinsk gitter, der giver anledning til den samme Stark opsplitning for alle ioner.

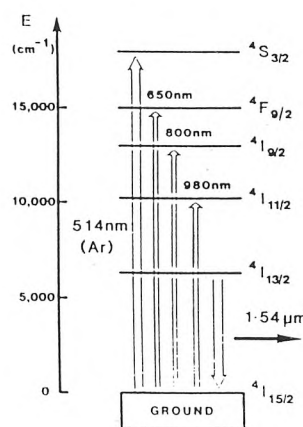
Er-lasere er som angivet i niveaudiagrammet en tre-niveau laser.  $\text{Er}^{3+}$ -ionen pumpes gennem f.eks. én af overgangene  $650\text{ nm}$ ,  $800\text{ nm}$  eller  $980\text{ nm}$  op til niveauet  $4I_{13/2}$ , der har en relativ lang levetid,  $10\text{ ms}$ . Eventuelt pumpes direkte op til den øvre laser-multiplet ved at pumpe med  $1480\text{ nm}$ .

Umiddelbart har pumpebølglængden,  $800\text{ nm}$ , været tiltrækkende at bruge da der til denne bølglængde kan fås billige laserdioder. Uheldigvis er pumpeeffektiviteten ringe på grund af "excited state absorption". Elektroner i det øvre laser-niveau er i stand til at absorbere  $800\text{ nm}$  lys og denne energi vil gå til spilde i form af fononer.

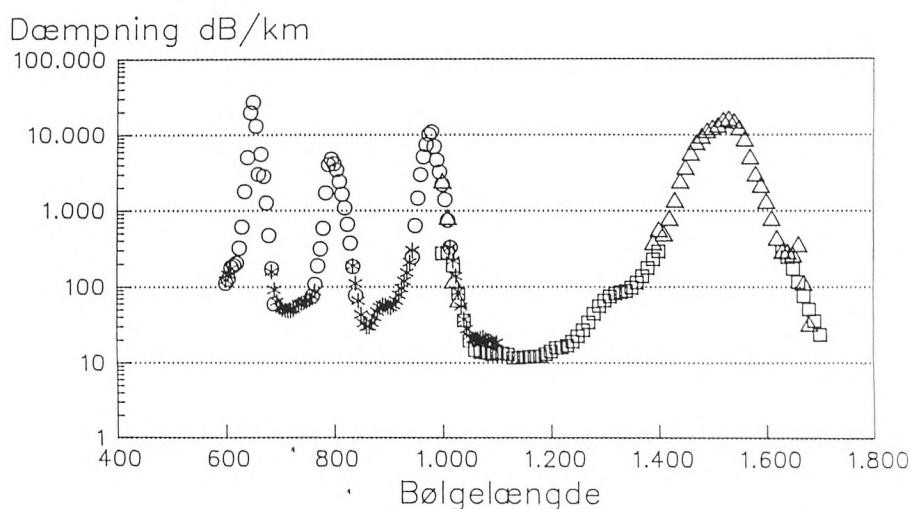
Ved  $650\text{ nm}$  og lavere bølglængder er det ikke muligt at få halvlederlasere med tilstrækkelig effekt ( $>10\text{ mW}$ ). Der er derfor kun to muligheder tilbage som pumpe for fiberforstærkeren, nemlig  $980\text{ nm}$  og  $1480\text{ nm}$ . For begge pumpebølglængder er der opnået anseelig forstærkning, ca.  $40\text{ dB}$  for pumpeeffekter omkring  $20\text{-}50\text{ mW}$ . Lavest pumpeeffekt er nødvendig ved  $980\text{ nm}$ .

### Fremstilling af fiberforstærkere.

Det er for nylig blevet vist at det er muligt at have optisk transmission over  $2200\text{ km}$  med brug af optiske fiberforstærkere<sup>3</sup>. Til dette forsøg blev der anvendt 26 fiberforstærkere og kommunikationsfibre var af en type med meget lav dispersion, der kunne give anledning til pulsfor-



Figur 5 Energieniveauer i  $\text{Er}^{3+}$ .



**Figur 6** Spektral dæmpningskurve målt for Er-doteret fiber. P.g.a. de store variationer i dæmpning, må der måles på varierende længder af fiber, fra 100 meter ned til få centimeter.

bredning, ved 1550 nm.

Fiberforstærkeren er dog endnu ikke en komponent der kan købes. Men der er i England og i Japan fremstillet prototyper af den, og det vil ikke vare længe før den er fuldt færdig udviklet og levetidstestet.

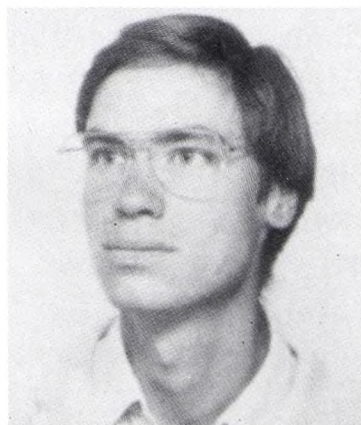
Anvendelsen af fiberforstærkeren vil komme om 1-2 år, når den er fuldt udviklet. Og med tiden bliver det endnu mere fordelagtigt at udnytte den, fordi bit-hastigheden i transmissions systemerne hele tiden stiger, og her kan den optiske forstærkning følge med til en billigere pris end den elektroniske forstærkning.

Det skal nævnes at der findes en konkurrerende teknologi til fiberforstærkeren, nemlig den halvleder baserede optiske forstærker. Princippet er det samme som ved fiberforstærkeren, blot er den aktive fiber skiftet ud med en halvlederlaser. I øjeblikket ser det ud til at fiberforstærkeren er den mest fordelagtige, den kan direkte splejse sammen med kommunikationsfibren og har derfor ingen tab ved ud- og indkobling af signalet. Halvlederlaseren har problemer med kobling til fibrene, desuden er bølgelederen rektangulær i en halvleder, dette betyder, at de to polarisationsretninger af lyset ikke vil opnå den samme forstærkning.

I det ovenfor omtalte samarbejdsprojekt mellem Lycom, Jydsk Telefon, NKT og DTH, er det målet at fremstille en fiberforstærker. Der er allerede blevet demonstreret<sup>4</sup> forstærkning helt op til ca. 30 dB, og det er håbet, at vi inden længe vil kunne deltage med en første version af en optisk forstærker i et højhastigheds transmissions forsøg.

*Referencer:*

1. J. Stone and C.A.Burrus, Appl. Phys. Lett. **23**, 388 (1973).
2. Christian Larsen og Kristen Dybdal, DOPS-NYT **1**, 9 (1989).
3. S. Saioto et al.: An over 2200 km coherent transmission experiment at 2.5 Gbit/s using erbium-doped-fiber amplifiers; OFC '90, PD2-1 (1990).
4. Kristen Dybdal, Jydsk Telefon har udført disse forsøg.



*Christian Larsen er Ph.D. i faststoffysik fra Risø/H.C.Ørsted Institutet, 1987. Hos Lycom arbejder han hovedsageligst med dotering af optiske fibre til brug i f.eks. fiberforstærkere.*