

FIBEROPTIK

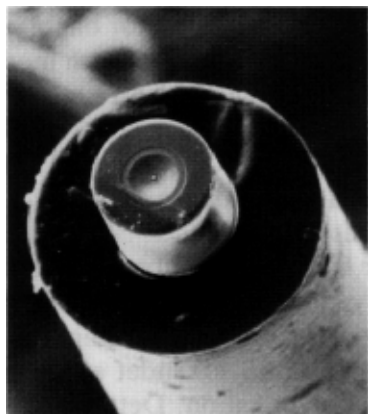
Framtidens kommunikationsmedium

Ett arbete av: Mattias Andersson
Naturvetenskaplig linje
Filbornaskolan, Helsingborg 1995

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid
Inledning	3
Historik	4
Tekniska data	
2.1 Ljusledning	6
2.2 Fiberns acceptans	6
2.3 Ljusförluster	7
2.4 Bandbredd	8
2.5 Framställning av optiska fibrer	9
2.6 Optokablar	11
2.7 Ljuskällor och detektorer	12
Optisk omkoppling	
3.1 Allmänt	14
3.2 Optisk omkopplingsteknik	14
3.3 Omkopplingssystem	15
3.4 Tänkbara tillämpningar	17
3.5 Framtidsvision OCX contra DXC	18
Optisk förstärkning	
4.1 Allmänt	19
4.2 Komponenter	19
4.3 Teori	20
4.4 Systemtillämpningar	22
4.5 Utvecklingstrend	24
Tillämpningar	
5.1 Allmänt	25
5.2 Telekommunikation	25
5.3 Videoöverföring	28
5.4 Övrigt	29
Avslutning	32
Källförteckning	33

Inledning



Fiberoptiken har på senare tid revolutionerat telekommunikation, sjukvård och industriell hantering på ett lavinartat vis. Tekniken är förvisso inte helt ny, men under det senaste årtiondet har de grundläggande tekniska förutsättningarna lagts för en framgångsrik fiberoptisk revolution. Fiberoptiken har man kanske främst hört talas om i samband med telekommunikation, men den används även inom sjukvård och industri. Anledningen till att jag har valt att jobba med fiberoptik i mitt specialarbete är just den att man inte

har hört några detaljer om tekniken. Inga begränsningar eller förutsättningar. Detta arbetet skall ta upp grunderna, ta en titt på förutsättningar och begränsningar samt ge exempel på praktiska användningsområden.

Jag skulle vilja tacka Leif Östlund på Telia Research AB och Leif Stensland på Ericsson Cables AB för hjälp med att samla materiel och underlättande information, Håkan Linder på Filbornaskolan för gott samarbete, Familjen Anderberg för lånet av deras dator, och speciellt Linda Anderberg för hennes enorma stöd och tjtande på mig, samt alla övriga personer som stöttat och hjälpt mig i mitt arbete.

Historik

Utan påverkan går ljus rakt fram. Linser och speglar kan visserligen bryta och reflektera ljuset i olika riktningar, men mellan dessa punkter går ljuset i spikraka linjer. I kameror och andra optiska konstruktioner som kikare och teleskop är detta en förutsättning, men det finns även tillfällen, exempelvis inom sjukvård och industri, då man skulle vilja se runt hörn och det är då som fiberoptiken kommer in i bilden.

Problemet med att leda ljus uppstod långt innan lösningen kom. Kort efter det att Thomas Edison uppfunnit glödlampan, patenterade en ingenjör vid namn William Wheeler ett system för att leda ljus ut i olika rum i byggnader (fig. 1). Systemet blev dock aldrig någon framgång, delvis på grund av att den vanliga glödlampan skulle visa sig vara så praktisk. Och även om man hade försökt att använda uppfinningen mer praktiskt, skulle det troligtvis visat sig att den levererade för lite ljus. Men idén skulle komma fram gång på gång tills den slutligen ledde till den optiska fibern.

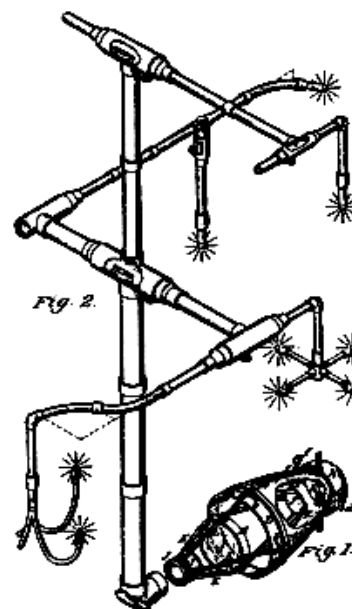
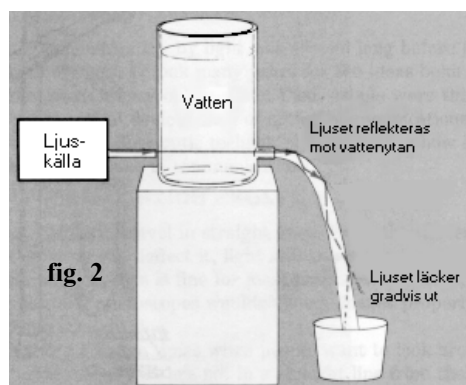


fig. 1

Totalreflektion, den grund som fiberoptik bygger på, var känd långt innan Wheeler's tid. Genom detta fenomen kan ljus hållas kvar inne i glas eller dylikt material som har högre densitet än luft. Om ljuset träffar materialet med en liten vinkel relativt materialet, kan det inte passera ut, utan reflekteras in i materialet igen. Detta fenomen var nog känt långt innan, men det nådde inte ut till den stora massan förrän i mitten på 1800-talet då John Tyndall använde det. Han utförde ett experiment där han ledde in ljus i en vattenbehållare i höjd med en påmonterad ventil (fig. 2). När han sedan öppnade ventilen och vattnet flödade ut i en halvbåge, följde ljuset med inuti vattenstrålen. Men på grund av turbulensen i vattenstrålen, så läckte största delen av ljuset ut.



I USA höll en forskare på att utveckla vad han kallade Photophone, en slags telefon som använde ljus istället för elektricitet, för att överföra tal. Denna forskare var Alexander Graham Bell, det vill säga samma person som uppfann den vanliga telefonen. Den elektriska telefonen fungerade visserligen, men Bell var besatt av idén att överföra tal trådlöst. 1880 visade han att det var möjligt för ljus att överföra tal trådlöst. Detta gjordes genom variationer i ljusstyrkan. Detta var den första formen av trådlös kommuni-

kation någonsin, men tekniken skulle visa sig vara opraktisk eftersom allt för mycket kunde komma i vägen för ljusstrålen.

Nästa problem som forskarna stötte på, efter att de väl kommit fram till att leda ljus genom glas, var att ljuset kunde läcka ut när glasfibern rörde vid något annat än luft. Detta var ett stort problem eftersom fibern givetvis inte kunde hänga i luften av sig själv. Lösningen kom på 1950-talet då Brian O'Brien i USA och Harry Hopkins och Narinder Kapany i England började experimentera med olika sätt att leda ljus. Dom kom fram till en fiber som bestod utav två lager. Ljuset skulle föras fram genom det inre lagret, kärnan, manteln utanför skulle hålla ljuset kvar inne i fibern och förhindra att det läckte ut, detta tack vare att brytningsindexet på mantelmaterialet (liksom luft) var lägre än kärnans material.

O'Brien tog med sig idén om mantlade fibrer när han blev forskningsledare på American Optical Co. Han intresserade sig för bildöverföring. En ensam fiber skulle blanda ihop ljuset från olika delar av bilden, och kunde därför inte användas. Men genom att fästa ihop flera fibrer, kunde man överföra en bild. Kravet var bara att fibrerna hade samma inbördes placeringar i båda ändar.

En viktig grundläggande begränsning återstod dock: Fibrerna absorberade för mycket ljus. Dessa höga förluster kunde accepteras när det bara handlade om att överföra ljus ett par meter, men efter så lite som 10 meter återstod bara 10% av det ingående ljuset. I början ansågs detta inte vara något problem, eftersom man inte försökte överföra ljuset några längre sträckor. Men när Theodore H Maiman demonstrerade sin laser på 1960 talet, stimulerades utvecklingen av fibrerna. Man utvecklade bland annat linser som kunde koncentrera ljuset in i fibrerna för att få mer ingående ljus i systemet.

Det skulle visa sig i en undersökning som utfördes av Charles K Kao och George Hockham, att det inte var glasets egenskaper i sig som utgjorde begränsningen, utan föroreningar i glaset. Det var dessa som gjorde att ljusstrålen bröts itu inuti glaset. Genom att ta bort dessa föroreningar, beräknade man att 10% av ljuset skulle återstå efter så mycket som 500 meter. Detta verkade fantastiskt då, men det skulle visa sig att deras beräkningar var allt för blygsamma. När Kao's och Hockham's idéer publicerades, ledde detta till en världsomspännande tävling på att framställa bättre fibrer. De första som bröt den teoretiska gräns som Kao och Hockham hade lagt fram var Robert Maurer, Donald Keck och Peter Schultz år 1970. Det dröjde inte länge förrän andra kom fram till lika bra fibrer, och även bättre. Förlusterna pressades så längre och längre ned. I dagens bästa optiska fibrer återstår 10% av det ingående ljuset efter så långa sträckor som 50 km. Detta är en av anledningarna till att fiberoptiken håller på att bli grunden för telekommunikation på långdistans.

Tekniska data

2.1 Ljusledning

De två huvuddelarna i en optisk fiber är kärnan och manteln. Kärnan är den inre delen i vilken ljuset leds. Manteln omger kärnan fullständigt, och håller kvar ljuset inuti kärnan. Kärnans brytningsindex är större än mantelns vilket leder till att ljusstrålar inne i kärnan som träffar gränsytan mot manteln, reflekteras tillbaka in i kärnan genom totalreflektion.

Skillnaden mellan kärnans och mantelns brytningsindex behöver inte vara stort, det räcker med en skillnad på 1% för att förhållandet mellan de olika brytningsindexen skall bli 0.99 vilket ger värdet på den kritiska vinkeln α enligt:

$$n_1 \times \sin \alpha_1 = n \times \sin \alpha \quad (\text{fig. 3})$$

Värdet på α blir då ungefär 82° vilket innebär att ljusstrålar som träffar gränsytan med en infallsvinkel, θ , mindre än 8° kommer att reflekteras tillbaka in i kärnan.

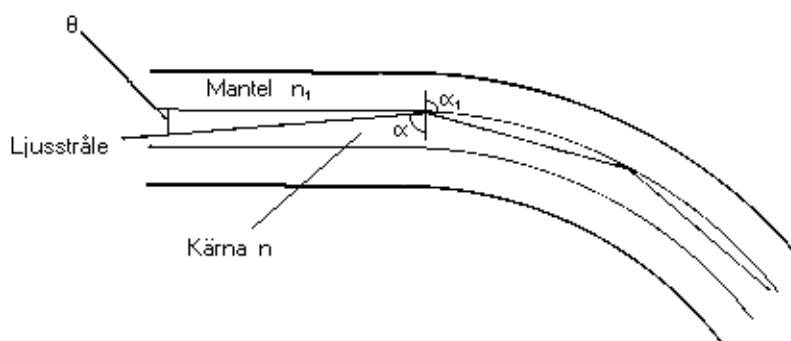


fig. 3

2.2 Fiberns Acceptans

En optisk fiber består, som jag redan nämnt, av en kärna och en mantel med något lägre brytningsindex. Det finns i huvudsak tre typer av fibrer; stegindexfibrer, gradientindexfibrer och singelmodfibrer. Skillnaden mellan en singelmodfiber och en multimodfiber, är endast den att singelmodfiberns kärna är betydligt mindre - endast $8 \mu\text{m}$ mot $50 \mu\text{m}$ hos multimodfibern. Deras olika egenskaper, som jag senare skall gå in på, gör att de används inom olika områden i näringslivet. Samtliga typer av fibrer är lika så tillvida att kärnan och manteln normalt består av glas eller kvartsglas och att de skyddas av ett primärskydd, bestående av plast.

Skillnaden mellan gradientindexfibern och stegindexfibern är att ljuset bryts genom totalreflektion i gränsytan mot manteln i stegindexfibern, medan den i gradientindexfibern bryts genom totalreflektion på grund av linsverkan i kärnan.

Det finns givetvis begränsningar för hur mycket ljus som kan komma in i och ledas av fibern. Ljuset måste komma med en mindre vinkel än acceptansvinkeln θ_c , som fås enligt följande formel:

$$\theta_c = \sqrt{n_0^2 - n_1^2} = \sin \theta_c = n_0 \times \sin \theta \quad (\text{fig. 4})$$

NA kallas fiberns numeriska apertur och är det samma som acceptansvinkeln, θ_c . Vinkeln θ är samma vinkel θ i föregående kapitel. Detta samband kan användas även för gradientindexfibrer, men eftersom n_1 ej är konstant för denna typ av fiber, definieras NA med samma formel men med $n_1 = \max(n_1(r))$. Eftersom stegindexfibrer vanligen har minst $NA = 0,3$ och $\theta_c = 18^\circ$, medan gradientindexfibern har $NA = 0,2$ och $\theta_c = 12^\circ$, så kan den förstnämnda ta emot ca 5 ggr mer ljus, och eftersom fibrernas kärnor har blivit standardiserade till $100 \mu\text{m}$ respektive $50 \mu\text{m}$ innebär detta att förhållandet i praktiken blir ännu större, närmare 20 ggr. Därav användningen av halvledarlaser som ljuskälla inom telekommunikationen, eftersom man i början använde sig av gradientindexfibrer som kräver ett mera koncentrerat strålknippe. I system för datakommunikation med stegindexfibrer kan dock större brett strålande lysdioder fungera utmärkt.

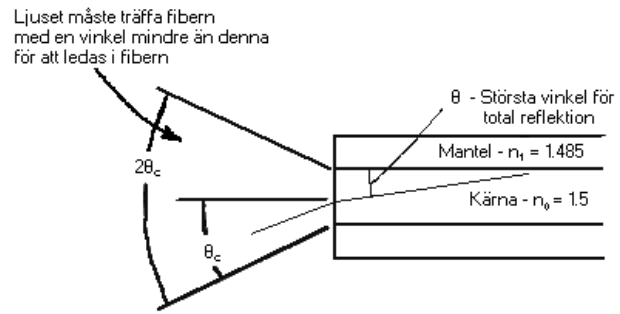


fig. 4

2.3 Ljusförluster (dämpning)

I dagens fiberoptiska system, exempelvis för telekommunikation, har fibrerna väldigt låga förluster. Den typiska standardfibern har förluster under 3 dB/km vid en ljusvåglängd på 850 nm , eller nästan 0.8 dB/km vid 1300 nm . Singelmodfibrer har ännu lägre förluster, vilket är ett av de främsta skäl till att man nu övergår till dessa inom telekommunikation. Den optiska fibern är faktiskt det mest transparenta material som tekniken och naturen kan erbjuda.

Från början var ju, som jag redan nämnt, förlusterna höga i fibrerna, men det har visat sig att dessa höga förluster främst berodde på metallföroreningar i glasets. Det var i partiklar av exempelvis järn, koppar, krom och mangan som ljuset "absorberades". Det som hände var att ljus som träffade på partiklar av detta slag bytte riktning, och på så sätt fick majoriteten av strålarna större vinkel än den som gav totalreflektion, vilket ledde till att ljuset bröts ut ur fibern. Det värde man får lägga till på dämpningen för varje sådan partikel är 1 dB/km för 1 ppb (eng; part per billion, 10^{-9}). Dessa föroreningar är fortfarande den dominerande orsaken till fiberförluster i traditionella fibrer medan kvarts fibrer framställda med CVD metoden (se fiberframställning) i stort sett saknar metallföroreningar.

I fibrer av kvartsglas är det andra faktorer som sätter den lägre gränsen för förlusterna. Kvartsglas är ett så kallat amorft material, vilket innebär att tätheten varierar kring ett medelvärde. Dessa variationer orsakar så kallad Rayleigh-

spridning, en sorts dipolspridning, vars effekt varierar som $1/\lambda^4$. Denna typ av spridning dominerar således vid korta våglängder.

Toppen i dämpningsdiagrammet (fig. 5) beror på vibrationsövergången mellan den lätta protonen och syreatomen i föreningar av

OH-grupper. Med försumbara mängder av OH-grupper kommer undre gränsen för dämpning i kvartsglas ligga vid 1550 nm och vara ungefär

0.15 dB/km . Det ska påpekas att dessa gränser dock ständigt har fått sänkas allt eftersom man fått nya och bättre material. Ett nyligen upptäckt problem,

är att vätgas tycks ha förmågan att tränga in i fibrer och bilda nya OH-grupper. Problemet har dock främst påträffats hos äldre fibrer med höga halter av fosfor.

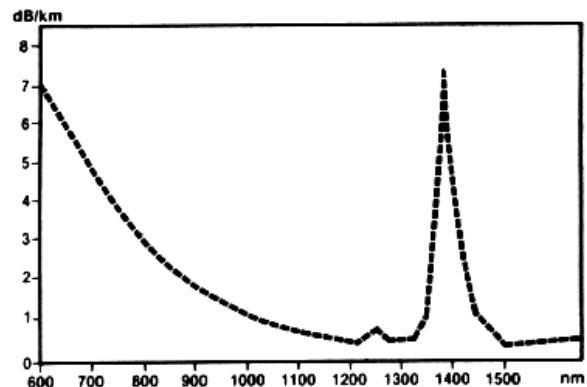


fig. 5

2.4 Bandbredd (pulsbreddning)

Överföringshastigheten i ett PCM (puls-kod-modulation) system begränsas av det faktum att två ljusimpulser inte får överlappa varandra på mottagarsidan. När ljusimpulser överförs långa sträckor i en fiber, kan det inträffa att de överlappar varandra när de kommer fram. Orsakerna till detta fenomen är följande två processer:

När en ljusimpuls rör sig i en stegindexfiber har strålen alltid konstant hastighet (utom i totalreflektionspunkten). Dispersionen kommer sig i detta fall av att pulserna får olika lång väg att gå, vilket syns tydligt i fig. 6. I en stegindexfiber med $NA = 0,3$ blir en kort puls breddad med 60 ns på en kilometer, vilket betyder att maximala bandbredden (pulsrepetitionsfrekvensen) blir ca 7 MHz. Denna band-

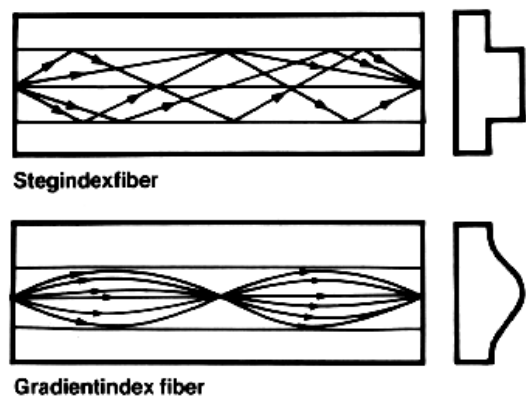


fig. 6

bredd duger väl i mindre krävande system med kortare överföringssystem. Om man dock vill överföra information snabbt över långa sträckor är gradientindexfibern att föredra. Även i dessa går ljusstrålar med större infallsvinkel en längre väg än strålar med mindre vinkel, men detta kompenseras av att i kärnans yttre kanter, där ljusstrålarna får gå en längre sträcka, är brytningsindexet lägre, vilket medför att hastigheten för ljusstrålen är högre. På detta sett kompenseras den extra sträcka som ljuset får gå. Typiska värden på pulsbreddning och bandbredd för kommersiella gradientindexfibrer är $0,8 \text{ ns/km}$

respektive 600 MHzkm. Den höga bandbredden på gradientfibrer var en viktig anledning till att dessa kom att användas inom telekommunikation.

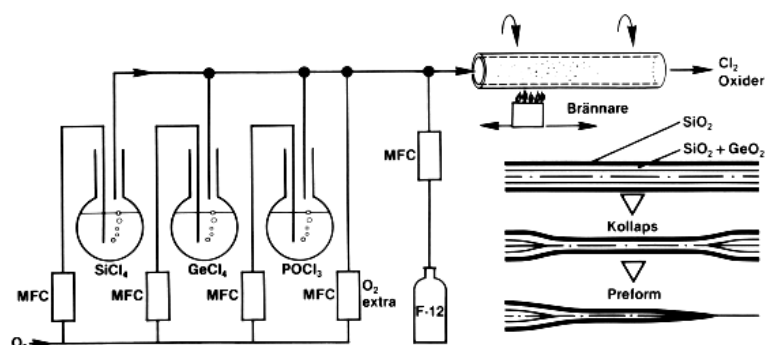
Den andra processen är ett fenomen som kallas materialdispersion, det vill säga det faktum att hastigheten i alla material helt enkelt varierar för olika våglängder. Eftersom man inte kunnat framställa någon ljuskälla som sänder ut endast en våglängd, erhåller man alltid en viss pulsbreddning på grund av materialdispersion. Den faktor som är intressant med avseende på materialdispersionen är andraderivatan av brytningsindex med avseende på våglängden. Koefficienten för materialdispersionen blir vid 850 nm 80 ps/km/nm medan den vid 1300 nm blir nära noll. Detta betyder i praktiken att om man har en lysdiod som sänder ut ljus med våglängden 850 nm och med en spektral bredd på 20 nm förorsakar en pulsbreddning på $1,6 \text{ ns/km}$ vilket medför en begränsning av bandbredden till 300 MHzkm, endast avsedd på materialdispersionen. Med en laser som ljuskälla med en våglängd på 1300 nm blir dock materialdispersionen i stort sett försumbar.

2.5 Framställning av optiska fibrer

Under fiberns utveckling har givetvis ett stort antal framställningsmetoder utprovats, men de metoder som nu dominerar, baserar sig på den så kallade CVD-processen (Chemical Vapour Deposition). I denna metod framställs kvartsglas genom en kemisk reaktion i en het zon enligt;



Genom de olika sätt som man använder för att fånga upp kvartsglaspulvret som man får vid denna process, har de olika idag använda processerna fått sina namn. I OVP- och VAD-processen samlar man upp pulvret på utsidan av en stav, medan man vid den i Skandinavien mest använda processen, MCVD-processen, samlar upp kvartsglaspulvret på insidan av ett kvartsrör. De metoder jag tänker beskriva är MCVD-processen och dubbeldegelmetoden.



Genom att dopa kvartsmaterialet kan man uppnå olika önskade förbättringar av kvartsglasets. Genom att till exempel blanda SiCl_4 med GeCl_4 kan man uppnå ett högre brytningsindex än det för rent kvartsglas. Om man däremot tillsätter freon, $\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_2$, får man ett lägre brytningsindex. Det deponeras så mycket som 60 lager av den önskade tillsatsen för multimodfibern och 20 st för singel-

modfibern. För att erhålla ett jämnt skikt, förflyttas den heta zonen över röret (fig. 7). Den höga renheten kan åstadkommas genom att utgångsämnenen i denna process är vätskor och gaser. Genom att linjärt öka dopningen av GeO_2 för varje lager, erhålls den paraboliska indexfördelningen som man vill ha. Genom att värma upp röret efter det att alla lager deponerats, fås det att dra ihop sig på grund av ytspänningen till en massiv stav, den så kallade preformen (fig. 7). Preformen görs sedan till en fiber genom att man drar ut den. Fiberns tjocklek varierar genom att variera dragkraften. Fibern beläggs sedan med ett primärskydd av silikongummi, som kan lindra så kallad mikroböjning. Mikroböjning är vad det låter som, små böjningar av fibern som kan resultera i att ljuset "försvinner" ut i manteln. En färdig fiber med samtliga skydd kan se ut som fig. 8 visar.

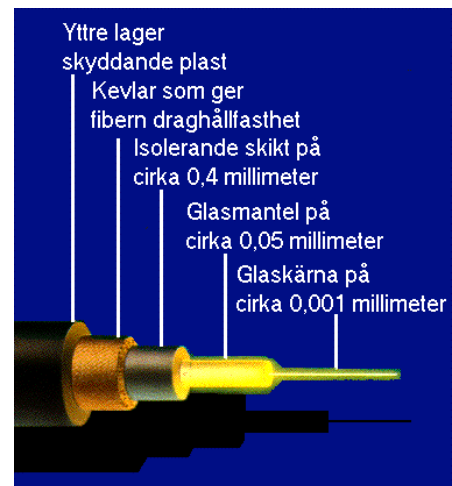


fig. 8

Fibrer för datakommunikation, lokala nät och industriella ändamål kan också framställas med billigare processer. Vid sidan av CVD-metoden används (1984) även dubbeldegelmetsoden (the DC method) på Sieverts Kabelverk. Detta är en av de alternativa processerna för framställning av fibrer för mindre krävande system. Istället för att använda sig av gaser och vätskor, använder man här högrena material. Man fyller en dubbeldegel, av platina, med två olika glassorter, en för kärnan och en för manteln (fig. 9). Glasets rinner ut genom ett hål i botten på degel, varvid det sträcks ut till önskad tjocklek. Renheten blir dock i vid denna metod beroende dels på hanteringen och dels på utgångsmaterialen, och man kan alltså inte uppnå de låga värden på dämpningen som vid CVD-metoden. DC-fibrerna har typiska dämpningsvärden på $10\text{--}12 \text{ dB/km}$, och är av stegindextyp vilket innebär att bandbredden blir ca 15 MHz km , vilket är relativt lite.

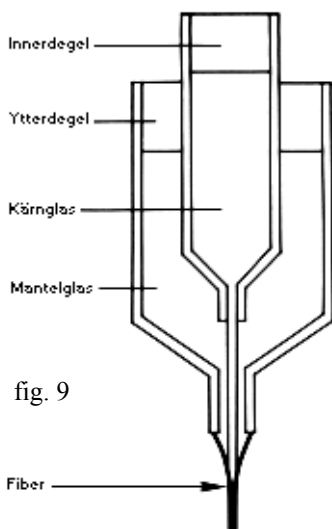


fig. 9

2.6 Optokablar

Den optiska fibern är förvisso otroligt liten, men man kan givetvis inte lägga ner den bara som den är. Man måste lägga fibrerna i kablar för att de skall bli hanterbara vid förläggning och annan hantering, eftersom den då måste skyddas

mot såväl mekanisk som miljömässig åverkan. Detta innebär dock att man måste välja konstruktion av kabeln så att den påverkan på fibern som uppkommer på grund av kabelmaterialet minimeras. De två huvudprinciperna

som används utgår från fast eller löst sekundärskydd.

Sekundärskyddet tillverkas i så kallade plasticsprutor, där fibern löper genom ett spruthuvud (fig. 10), varpå plasten antingen bildar ett rör runt fibern (löst sekundärskydd), eller fäster direkt på fibern (fast sekundärskydd). Flera fibrer läggs i vissa fall i samma rör, för att på detta sätt öka den totala

fibertätheten i kabeln. För att förhindra att fukt transporteras genom kabeln, fyller man sedan ut tomrummet inuti röret med någon typ av fett. De sekundärskyddade fibrerna sätts därefter samman till en kabel genom att de läggs i spiral kring ett hårdare material, som får tjäna som dragavlastare (fig. 11). Även vid denna process, fyller man ut tomrummet med vasselín eller liknande för att utestänga fukt. Man kan även lägga till fuktskydd i form av aluminiumfolie, och för att avsluta kabeluppbyggnaden lägger man på ett lager plast som ytermantel, vanligen av polyeten. Kabeln kan prepareras med exempelvis armeringar, bärlinor eller brandsäker mantel, för användning inom speciella områden.

En viktig sak man måste ta hänsyn till under val av framställningsmetod samt vid framställningen, är det faktum att fibrerna har mycket mindre möjlighet att ändra sin längd än vad de övriga plastmaterialen i kabeln har. På grund av fibrernas mikroböjbarhet, måste sådana konstruktionslösningar användas, så att fibern inte påfrestas i sidled. Även påfrestningar i längdled måste undvikas under installation och användning, annars kan fiberbrott uppstå. Problemet löses i lösmantlade fibrer på så vis att när kabeln befinner sig i normal driftstemperatur, ligger fibrerna i mitten av sina rör. Om kabeln utsätts för högre temperatur än normalt, förlängs kabeln på grund av att plastmaterialen expanderar. Detta löser dock fibrerna genom att glida i sina rör så att de placerar sig närmare kabelns mitt. På motsvarande vis glider de ut mot kabelns ytterkanter vid lägre temperaturer, då kabeln blir kortare. De temperaturer som detta fungerar inom, är beroende av rörens och spiralbanans diameter. Under och över dessa gränstemperaturer, kommer fibern att tryckas mot den inre respektive yttre rörväggen, vilket medför mikroböjningar och därmed ljusförluster. Inom det "fönster" som de båda gränstemperaturerna skapar, fungerar dock fibern normalt och i stort

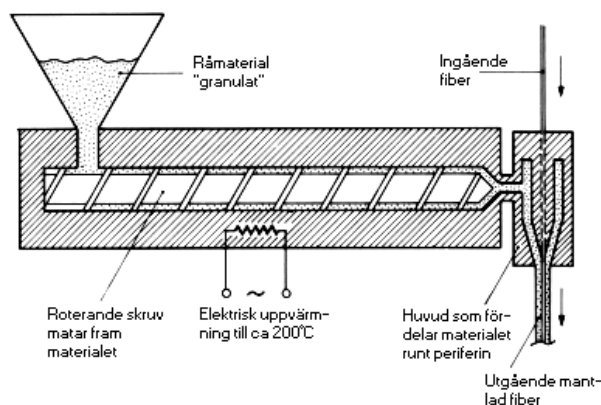


fig. 10

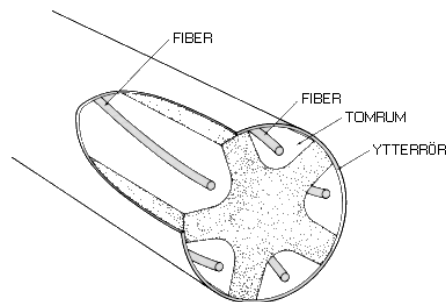


fig. 11

sett utan förändringar i dämpning. Motsvarande fönster kan skapas även för kablar bestående av fast mantlade fibrer. Om fibern i normalt tillstånd befinner sig i ett sträckt tillstånd, kommer den att fungera ända ner till det att dragkraften övergår till tryckkraft.

2.7 Ljuskällor och detektorer

Ljuskällor och detektorer utgör väl anpassade delar i en fiberoptisk länk, inte bara i förhållande till fibern men också i förhållande till varandra, och de måste därför anpassas väl till systemet. På grund av detta används nästan uteslutande halvledarlasrar i dessa sammanhang.

Ljuskällor

De ljuskällor som främst används inom fiberoptiken är LED:s (Light Emitting Diode) och LD (Laser Diode). LED:s används främst vid korta avstånd och relativt låg överföringskapacitet, medan laserdioderna används för långa avstånd och hög kapacitet. Dessa dioder är konstruerade så att elektroner och hål kommer in från var sida och vandrar mot ett så kallat aktivt skikt, där de tillsammans kommer att generera fotoner, dvs ljus. Detta betyder att ljuset som genereras är proportionellt mot den ström som går genom dioden. Våglängden bestäms av bandgapet i de halvledarmaterial som används i dioden. Man kan utforma en LED som exempelvis en "Burrus-diod" (fig. 12), där man får en god ljusinkoppling genom att etsa ur det övre skyddslagret (GaAs substratet på bilden) och i detta limma fast fibern direkt mot det aktiva området. I en laserdiod, som är uppbyggd på ett likartat sätt (fig. 13), återkopplas en del av det genererade ljuset genom reflektion i laserchipets ändytor. Detta ljus frambringar nya elektron-hålreaktioner och på detta vis tvingas allt ljus att gå i den smala kanalen. På detta sätt får man en ljuskälla med mycket liten emitterande yta som dessutom ger en smal ljuskon. Detta är något som man eftersträvar inom fiberoptiken eftersom det innebär att det blir mycket lättare att koppla in ljuset i en fiber. En annan fördel med laserdioder i förhållande till LED:s, är att den förstnämnda är mycket smalare spektralt, det vill säga det ljus som emitteras ligger inom ett mindre intervall av våglängder, vilket betyder att materialdispersionen minskar. Det finns dock fördelar även med LED:s, dessa är bland annat mycket pålitligare än laserdioderna. LED:s har längre driftstider,

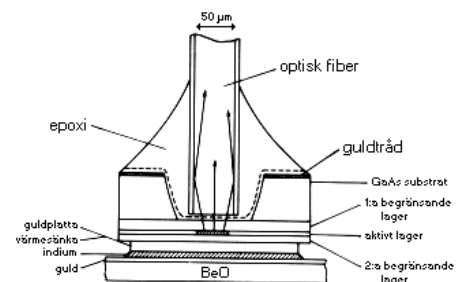


fig. 12

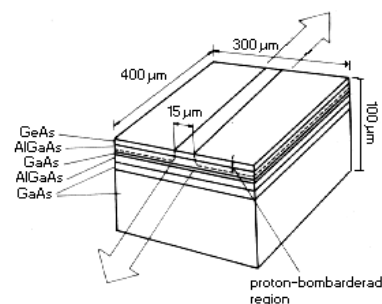


fig. 13

vilket gör att de ej behöver bytas ut lika ofta. De är även mindre känsliga för temperaturväxlingar. Laserdioden förändrar förhållandet mellan emitterat ljus och tillförd spänning under hela sin livslängd, vilket innebär att kontinuerlig mätning och kalibrering är nödvändig. Hos en laserdiod är inte heller förhållandet mellan emitterat ljus och tillförd spänning linjärt, utan det krävs en viss s.k. tröskelspänning innan det emitteras tillräckligt med ljus. Denna tröskelspänning ökar hela tiden med årens lopp. Detta gör att laserdioden passar bättre för pulsgenerering (digital kodning) än i analog modulering, eftersom det i digitala sammanhang endast handlar om att urskilja 1 från 0. LED:s kan dock på grund av sin linjäritet användas till både digital och analog modulering.

Detektorer

Liksom det finns två olika typer av ljuskällor att välja på, så finns det ljus två typer av detektorer att välja mellan: PIN-dioder och lavinfotodioder (APD = Avalanche Photo Diode). Fotodioderna fungerar mer eller mindre bakvänt i förhållande till ljusdioden, i fotodioden skapar fotoner elektron-hål-par istället för att skapas av dylika, en impuls uppkommer på grund av att dessa laddningsbärare då kan leda elektrisk ström. Dioderna har speciella skikt i vilka merparten av ljuset absorberas, s.k. I-skikt. Lavindioden är extra känslig på grund av att den har en hög spänning liggande över I-skiktet, varpå de frigjorda elektronerna accelereras och på detta vis ger upphov till nya elektron-hål-par genom växelverkan med gittret. Detta inneär att signalen förstärks redan i mottagardioden, vilket givetvis kan vara fördelaktigt, men det innebär samtidigt att lavindioden blir beroende av en hög drivspänning. Vidare är denna typ av fotodiod också mer ljuskänslig en PIN-diod.

Optisk omkoppling

I följande två kapitel kommer jag att gå igenom de för tillfället viktigaste områdena inom fiberoptiken, nämligen optisk omkoppling och optisk förstärkning. Anledningen till att dessa två områden får egna kapitel, är att fibertekniken kommit så långt, att det i dagens läge inte längre är fibrerna som begränsar, utan kringutrustningen.

3.1 Allmänt

De tre huvudprinciperna för optisk omkoppling är rumsomkoppling (space-division,SD), tidsomkoppling (time-division,TD) och våglängdsomkoppling (wavelength-division,WD). Den vanligaste omkopplingsmetoden är rumsomkoppling. Med denna metod kopplar man ljus från en inkommande optisk signal till någon av de utgående. Detta betyder att omkopplingen är oberoende av överföringshastighet, kodformat och den optiska våglängden. Det är vidare den mest utvecklade omkopplingstekniken, och den används idag för att kunna utnyttja de båda övriga principerna. Nät och omkopplingssystem kan indelas i två typer; centraliserat och distribuerat. I centraliserade system sker all omkoppling i lokalstationer och i distribuerade sker omkopplingen hos abonnenten, liknande det urval som du gör hemma när du ställer in TV-kanal eller radiokanal.

3.2 Optisk omkopplingsteknik

Tidsomkoppling

I TSI-system (Time-Slot interchange) krävs fördröjningsledningar eller optiska minnen, dessa komponenters utförande är beroende av bitlucka eller paketlängd, och därvid blir man hänvisad till vissa förutbestämda system. Ett sätt att skapa TSI-system är att helt enkelt använda olika långa optofibrer. På detta sätt blir fördröjningen helt naturligt direkt proportionellt beroende av längden på fibern. Eftersom tidsfördröjningens storlek är beroende på bitluckans längd, medför denna systemlösning dock att längden på fibern ökar kraftigt vid minskad överföringshastighet. Vid 155 Mbit/s skulle en fiber för tidsomkoppling behöva vara så lång som 1,9 m, medan den vid $2,5 \text{ Gbit/s}$ bara skulle bli 0,12 m lång. I sådana system väljer man rätt fiberlängd med hjälp av en rumsswitch och fiberlängderna är i vanliga fall ännu längre, eftersom man vanligtvis kopplar på ram- eller paketstorlek.

En annan metod är att använda ett byggblock som består av en enkel 2x2 switch (2 omkopplare med vardera 2 in- och utgångar), en fördröjningsfiber och en optisk förstärkare. Med denna lösning bestäms fördröjningen genom hur många varv i fördröjningsfibern som signalen går innan den kopplas ut igen.

Optiska minnen skulle också kunna fungera utmärkt, men de har inte ansetts vara ett praktiskt alternativ, efter som de skulle kräva en ansevärd mängd elektronik. Det behövs även mer forskning och utveckling inom detta område...

Våglängdsomkoppling

Våglängdsomkopplingen däremot är betydligt enklare att lösa. Man kan t.ex. använda s.k. våglängdsrangering, dvs man delar upp de inkommande ljussignalerna i respektive våglängd. Detta sker med hjälp av fasta eller avstämbara filter, passiv respektive aktiv rangering. När uppdelningen är gjord, skickas sedan signalerna till respektive utgång. Vid aktiv rangering är dessa utgångar valbara med hjälp av en rumsswitch, medan de vid passiv rangering är fasta, detta kallas även för självrangering. Problem uppstår dock när flera signaler med liknande våglängder kommer in samtidigt till omkopplaren, och följaktligen skall ut på samma fiber. Våglängdskonverterare skulle vara idealiska komponenter att ta till för att lösa detta problem. Enda problemet är att några sådana komponenter finns inte, utan man får lösa problemet genom att exempelvis konvertera om den optiska signalen till elektrisk signal, rangera den, och sedan konvertera tillbaka den till optisk form igen. Detta medför dock komplicerade system, och dessutom tappar då systemet sitt oberoende.

3.3 Omkopplingssystem

Switchkärna

Vid rumsomkopplingen, som är den grundläggande principen, används som bekant en så kallad rumsswitch. Denna består av en switchkärna, som i större utförande kallas för switchmatris, eftersom de är uppbyggda av grund switchar typ 1x2 eller 2x2. Det finns tre huvudstrukturer i uppbyggnad; koordinatväljar-, träd- och "lattice"-struktur (fig. 14). Enklast i uppbyggnad och funktion är koordinatväljar- och trädstrukturerna.

Vidare kan switchmatrisen / switchkärnan vara uppbyggd av ett opto-mekaniskt system, bestående av stegmotorer som kopplar om fiberdon. Detta medför dock längre omkopplingstider, upp emot flera sekunder. Man kan alternativt bygga upp matrisen med en optokrets med integrerade vågledare och switchelement, som presterar mycket kortare omkopplingstider, ungefär kring ett tiotal nanosekunder. Det är i princip endast styrsystemet som sätter gränsen

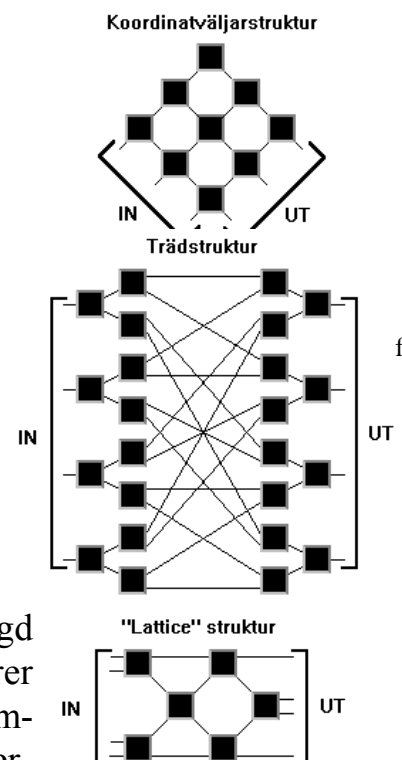


fig. 14

vid sådana konstruktioner. Konstruktions principerna är i huvudsak tre stycken; optofiber mekanisk, bulk optik och integrerad optik.

Optofiber mekanisk

Här användes en switch som består av ett antal nakna fibrer som sitter fast i vissa flyttbara fiberdon, som flyttas i förhållande till varandra med hjälp av stegmotorer eller med annan elektromekanisk kraft. Omkopplingstiderna blir dock även här relativt långa, ungefär 25 ns. En konstruktion där fiberdonen är styrda av stegmotorer, och på så sätt kan fjärrstyras, kallas FXC (fiber cross-connect). En fördel med denna typ av omkopplare är att den står kvar i samma läge under och efter ett strömbrott, eftersom drivspänningen endast behövs vid omkopplingen. En stor nackdel med konstruktionen är dock att större omkopplingar kan ta ända upp till 10 sekunder.

Bulk-optik

En bulk-optisk switch är uppbyggd av ett linssystem, prismor och någon form av elektrooptisk styrning. Styrning och kontroll sker med hjälp av till exempel hologram eller flytande kristaller. Även om man på senare tid lyckats pressa ner storleken på dessa switchar, medför bulk-optiken, inte helt överraskande, stora och komplexa system. Det är dessa switchar som man ibland lite oriktigt kan höra talas om som optiska datorer.

Integrerad optik

Det är enkelt att tillverka vågledare i litiumniobat och ämnet har utmärkta elektrooptiska egenskaper. Det är detta man utnyttjar då man med hjälp av ett pålagt elektriskt fält påverkar åt vilket håll ljuset går i förgreningarna, och på så vis kopplar om signalerna. Litiumniobat har låga vågledarförluster ($0,5 \text{ dB/cm}$) och inkopplingsförluster, men det stora antalet böjar och korsningar i större system leder till höga totalförluster, från ett fåtal dB upp till ca 10 dB för en 4x4 matris. Något som också gör dessa komponenter till en något osäker investering än så länge, är att man inte riktigt vet hur pass mycket litiumniobatets stabilitet påverkas över längre tidsperioder.

Modulatorer, fasvridare, optiska polarisationsvridare och omkopplingsmatriser är exempel på aktiva kretsar tillverkade i litiumniobat. Just modulatorer är idealiskt att tillverka av litiumniobat, eftersom de då helt saknar oönskade spektrala fenomen. Ytterligare ett exempel är akusto-optiska filter, sk. AOFT, i vilka man utnyttjar den akusto-optiska effekten hos litiumniobat. Detta innebär att man med hjälp av en pålagd akustisk våg (på 100-tals MHz) kan ändra brytningsindexet på materialet. I och med det kan man avstämma filtret till den för

tillfället önskade våglängden, och genom att lägga på flera olika ljudvågor kan man sålla bort många vågländer samtidigt. AOFT är en komponent som troligtvis kommer att betyda mycket inom våglängdsomkoppling i framtiden.

Vågledare och switchar i halvledarmaterial

Man kan även tillverka integrerade optiska vågledare och switchar av indiumfosfid- och galliumarsenidbaserade material, fördelen med detta är främst att man kan tillverka halvledare med ett bandgap som överensstämmer med det aktuella våglängdsområdet, detta görs genom att variera sammansättningen i materialet. Fotodioder, lysdioder och laserdioder är ett par typiska exempel, så även switchmatriser med laserförstärkare som switchelement (sk SCLA).

Visserligen innebär tillverkning i indiumfosfid att komponenten får något högre förluster än liknande strukturer i litiumniobat, men en stor fördel är dock att man kan integrera laserförstärkare tillsammans med vågledarstrukturer vilket i praktiken möjliggör tillverkning av switchmatriser helt utan förluster, och dessa blir dessutom endast en tiondel så stora som litiumniobatswitcharna blir. Förutom dessa fördelar har indiumfosfid-tillverkade komponenter större tillförlitlighet och lägre optiska förluster samt lägre elektriska drivströmmar.

Ericsson var 1991 först med att visa en 2x2 switchmatris i indiumfosfid med fyra stycken laserförstärkare som aktiva switchelement. Matrisen uppvisade låg inkopplingsförlust men något höga vågledarförluster. Men genom förfinad tillverkningsprocess kunde man ett år senare presentera den första helt förlust fria optoswitchen, en 4x4 switchmatris bestående av 24 stycken SCLA-grindar. Målet är dock att uppnå switchstorlekar om 16x16, kanske till och med 32x32, om detta har blivit gjort vet jag dock dessvärre inte, men forskningen och utvecklingen går dit hän.

3.4 Tänkbara tillämpningar

Ett eventuellt tillämpningsområde för OXC-tekniken (Optical cross-Connect) kan vara skyddsomkoppling och olika rangerings- eller dirigeringsfunktioner. Eftersom omkopplingen i dessa fall endast gäller det fysiska nätet betyder detta att OXC-komponenterna inte behöver bytas ut när man uppgraderar till högre överföringshastighet. Nätlösningar är givetvis geografiskt bundna och beroende även på behoven. Till att början med kommer OXC-tekniken troligtvis bara att tillämpas i långdistans- och mellandistansnätet, i lokalnätet lär det inte vara aktuellt förrän kapacitetsbehovet överstiger flera Gbit/s

Skydd av trafik

För att rädda eller skydda trafik vid till exempel kabelbrott och laserfel förekommer skyddsomkoppling. Omkopplingen sker idag elektriskt med omfattande utrustning, kompletteras noderna i nätet med OXC-system dirigerar man vid fel om hela flödet till reservvägar, på så sätt "räddar" man hela flödet utan att behöva bryta ner flödet i lägre delflöden. På detta sätt kan även OXC-tekniken med fördel användas vid kabelunderhåll.

3.5 Framtidsvision OXC contra DXC

Introduktionen av SDH med DXC kommer att ge stor möjlighet till att skapa ett flexibelt optiskt transportnät. Skyddsomkoppling kommer att bli en form av omrangering med bibehållen övervakning av trafiken, med denna teknik kan man dock inte rädda all trafik samtidigt. Denna typ av omkoppling och omrangering blir effektiv med hjälp av elektroniska system, och därför är det svårt att utifrån effektivitets- och kostnadssynpunkt motivera ett införande av OXC-tekniken i dagens läge. Det är först när systemen växer till 10 Gbit/s som OXC kan bli ett komplement till DXC. I DXC kommer då alla de nödvändiga rangeringsfunktionerna på lägre nivå, medan OXC tar hand om enklare rangering och dirigering men framför allt snabb skyddsomkoppling. Anledningen till att OXC endast används i liten skala inom rangering och dirigering, är att detta klaras mycket bättre av DXC, och det finns ingen anledning att låta OXC sköta det som DXC gör bättre. Styrningen i dessa system kommer att ske från centrala styrenheter, men för att få snabbare omkopplingar kommer det att ske en viss omkoppling lokalt vid switcharna. Större rangering och dirigering sker från det överordnade styrsystemet.

Framtida utbyggnad

Det som eventuellt kommer att leda till ett behov av optiska omkopplingssystem är givetvis behovet av högre kapaciteter och flexibilitet. Inom den snaraste framtiden kommer dock OXC snarast bli ett komplement, eftersom behoven inom överskådlig framtid troligtvis kommer att ligga inom den elektroniska teknikens gränser. Det digitala systemet kan nämligen presterar upp till 40 Gbit/s, genom så kallad tidsmultiplexering av fyra 10 Gbit/s flöden. Den optiska multikanaltekniken kan dock i framtiden skapa möjligheten till utökad kapacitet, där den optiska våglängdsmultiplexeringen och den optiska omkopplingen blir mer än ett komplement. Ett sådant rikstäckande transport- och accessnät tros dock inte vara möjligt förrän några år in på 2000-talet, men som sagt - tekniken är expansiv och likaså behoven, så dessa antagande kan vara inaktuella redan om ett par år.

Optisk förstärkning

4.1 Allmänt

Optiska förstärkare är idag, tillsammans med optiska omkopplare, de hetaste komponenterna inom fiberoptiken. Optiska förstärkare kommer att möjliggöra ett helt nytt sätt att bygga systemen. Sedan 1960-talet, då lasern uppfanns, har det pågått experiment för att framställa effektiva, robusta och billiga lasrar vid intressanta våglängder. Vid universitetet i Southampton, England, gjorde man på 1980-talet en del lyckade försök med dopade fibrer för att uppnå förstärkning. Försök med dopade fibrer hade ägt rum redan på 60-talet, men på grund av de höga förlusterna i fibrerna på den tiden, lades idén ner. Men 1987 redovisades för första gången försök med erbiumdopade fibrer.

En optisk förstärkare består av en fiber dopad med till exempel erbium. En pumplaser “pumpar” in ljus, som exciterar erbiumatomerna. När de sedan utsätts för en ljussignal av passande våglängd, kommer dessa atomer att falla tillbaka till sitt grundtillstånd, varpå en foton med samma våglängd och samma rörelse riktning som den infallande emitteras. Detta leder till att den inkommande signalen förstärks allt eftersom den stöter på exciterade erbiumatomer. För att få in

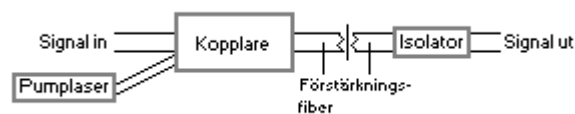


fig. 15

pumpljuset från lasern och för att inte dränka signalen i optiskt brus, behövs en kopplare respektive ett filter (fig. 15).

4.2 Komponenter

Fibern

Aktiva fibrer är i grunden en singelmodfiber där man krympt ner kärnan till 5 - 8 μm , istället för 9 μm . Fibern är vidare dopad med exempelvis erbium. Koncentrationen är dock väldigt låg, endast 10 - 200 ppm, för att jonerna inte skall störa varandra. De längder man använder är 10 - 100 m eftersom dessa enkelt kan rullas ihop och läggas inuti förstärkaren.

Kopplare

Dessa komponenter måste utformas för att kunna leda in flera våglängder samtidigt i samma fiber, så kallad våglängdsmultiplexing. För att uppnå dessa egenskaper, utformas kopplarna vanligtvis som en smält fiberkopplare. I dessa kan mycket låga förluster uppnås, ända ner till ett fåtal procent. På samma sätt tillverkas kopplare som bara tappar ut en del av ljuset, dessa använder man till övervakning av systemet.

Pumplasar

Halvledarlasrar tillverkas idag främst inom 1500 nm-området vilket, efter en liten modifikation till 1480 nm, lämpar sig väl till pumpning av erbiumdopade fibrer. Genom forskning och utveckling har man kunnat framställa lasrar med uteffekter väl över 100 mW och med bibehållen en god livslängd. Det har dock visat sig svårare att utveckla lasrar för den mer intressanta våglängden på 980 nm. Vid denna våglängd finns det nämligen inget lämpligt halvledarmaterial. Men med hjälp av så kallad kvantbrunnsteknik, har man nu lyckats framställa lasrar med just denna våglängd. Dock vet man inte säkert hur lång livslängd dessa lasrar har, men tester pågår.

Optiska isolatorer

Den idealiska optiska likriktaren kan inte existera, den enda optiska effekt som inte fungerar lika i båda riktningarna är Faradayrotation. Detta innebär att vissa material som placeras i magnetfält vrider ljusets polarisationsriktning. Med hjälp av en sådan kristall kan man låta det inkommande ljuset passera rakt in i nästa fiber, men i motsatt riktning kommer ljuset att böjas ut skarpt mot fibermanteln, vilket innebär att det kommer att dämpas bort. Färdiga isolatorer har förluster i framriktningen på 1 dB och i backriktningen på över 30 dB.

Kostnader

Priserna på komponenterna har hitintills varit höga på grund av höga utvecklingskostnader och små partier, men pumplasar och dopade fibrer är egentligen inte mycket svårare att framställa än konventionella lasrar och fibrer, varför priset på dessa produkter troligtvis kommer att falla i takt med ökad tillverkning. Isolatorn är dock en invecklad komponent som kräver hög precision vid tillverkning och montering, och därav kommer den också i framtiden vara den dyraste komponenten i optiska förstärkare.

4.3 Teori

Elektronerna i erbiumatomerna har en stark förmåga och vilja att absorbera energin i infallande ljus. Om energin i dessa fotoner direkt svarar mot energiskillnaden mellan två energinivåer, leder det till att atomerna exciteras. Normalt så faller elektronerna genast tillbaka till sitt grundtillstånd, men mellan vissa nivåer och grundtillståndet, är denna övergång "förbjuden", man säger att elektronen befinner sig i ett metastabilt tillstånd. Elektronen förblir givetvis inte i denna fas hur länge som helst, utan faller tillbaka redan efter några mikro- eller millisekunder. Erbiumjoner i glas stannar dock i detta tillstånd under hela

11 ms. Under tiden som elektronen befinner sig i det metastabila tillståndet kan den stimuleras till att återgå till sitt grundtillstånd av en inkommande foton med passande energi, varpå en foton med samma våglängd och rörelseriktning som den inkommande emitteras. Om elektronen inte stimuleras, kommer den att falla tillbaka av sig själv efter ett tag, då kommer även en foton att falla ut, som givetvis kommer att förstärkas av efterföljande erbiumatomer. Det ljus som emitteras på detta sätt orsakar brus i fibern, men eftersom det inte har samma våglängd som signalljuset, kan det filtreras bort med ett optiskt filter.

Prestanda

Vid laboratorieexperiment har man uppnått hela 45 dB förstärkning relativt lätt, i praktiken är detta dock en ohanterbart hög förstärkning. Normalt förstärker man signalen med ca 20 - 30 dB. Mätningen utgör här en viktig begränsning, den bestämmer hur hög utsignal man kan få ur förstärkaren utan att förstärkningen sjunker för mycket. Denna faktor bestäms främst av den tillgängliga pumpeffekten, med en pumpeffekt på 100 mW kan man nå en mättnadseffekt på 30 mW. Till skillnad från andra förstärkare genererar en fiberförstärkare ingen distorsion och ingen överhörning. Vidare blir bandbredden väldigt stor, över 1000 GHz, eftersom det inte finns någon tidsfördröjning i dessa förstärkare, man behöver således inte byta ut alla förstärkare om man övergår till högre överföringshastigheter.

4.4 Systemtillämpningar

Det är framförallt inom det fiberoptiska lokalnätet som optiska förstärkare kommer att förändra uppbyggnaden, även sjökabelsystem är en intressant tillämpning. Tack vare möjligheten att få ut lågt brus, hög uteffekt och hög förstärkning lämpar sig fiberförstärkare till flera olika tillämpningar. Dessa goda egenskaper är dock svåra att prestera i en och samma förstärkare, varpå förstärkarna oftast får optimeras för ett visst ändamål. Man kan till exempel använda fiberförstärkare som effektförstärkare direkt efter lasern för att få hög effekt in i fibern, eller som förförstärkare precis innan en detektor, som linjeförstärkare när avstånden är långa, eller som för kompensering av förgreningsförluster (fig. 16).

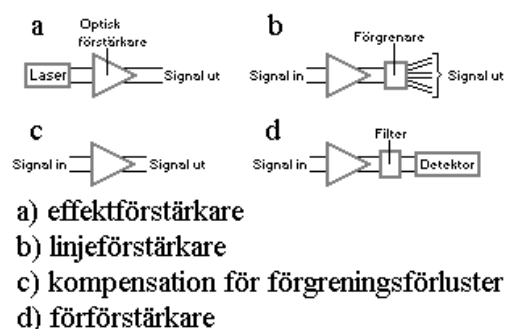


fig. 16

Det som främst skiljer en fiberförstärkare från en konventionell regenerator, är det faktum att en regenerator måste omvandla den optiska signalen till elektrisk signal för att sedan åter göra om den till optisk. Detta innebär att regenera-

torn måste anpassas till överföringshastigheten, något som man ej behöver göra med fiberförstärkaren, som för övrigt även kan förstärka flera våglängder samtidigt. En nackel med fiberförstärkaren är dock att dispersionen ackumuleras i systemet eftersom konventionella singelmodfibrer har hög dispersion kring just 1550 nm. En regenerator skulle här "koda av" den breddade signalen och skicka ut en ny "fräsch" signal. Eftersom fiberförstärkaren förstärker alla inkommande ljusimpulser, innebär detta att dispersionen bara ökar och ökar. Därför används numera så kallade dispersionsskiftade fibrer tillsammans med fiberförstärkare, dessa fibrer har ytterst liten dispersion vid 1300 - 1550 nm.

Sjökabelsystem

Man kan dela in sjökabelsystemen i tre kategorier; kort-, medel- och långdistans. I alla tre fallen utgör fiberförstärkare intressanta alternativ med kostnadsbesparingar och flexibla lösningar som följd. När man pratar om kortdistanssystem menar man de system i vilka man inte behöver några förstärkare under vattnet, så kallade "våta" förstärkare. För att överbygga de avstånd det här handlar om använder man sig i stället av optiska förstärkare som effektförstärkare och som förförstärkare. När man kommer upp till medeldistansnäten kan det dock vara nödvändigt med ett fåtal "våta" förstärkare. Optiska förstärkare har här den stora fördelen att de inte är beroende av sändningarnas innehåll eller bithastighet, vilket medför stora besparingar vid en eventuell uppgradering av systemet. Man kan även höja prestandan i systemet genom att köra med ett flertal olika våglängder samtidigt, så kallad våglängdsmultiplexing. I långdistanssystemen kan det även bli aktuellt med optiska förstärkare, men det verkar mera tvivelaktigt. På grund av de stora avstånden på uppemot 9000 km och på grund av ackumuleringen av bruset, skulle man behöva en optisk förstärkare var 40:e km i ett 2,5 GBit/s system. Dessa system går inte heller att uppgradera utan att man sätter in extra förstärkare. Våglängds multiplexing kan inte heller användas på grund av att detta skulle ställa allt för höga krav på filter och förstärkare.

Lokalnät

Även på lokala nivåer börjar fiberoptiken bli kostnadsmässigt konkurrenskraftigt, och man räknar med att bygga ut stora delar av de lokala näten med fibrer. Detta kommer i kombination med optiska förstärkare möjliggöra introduktionen av distributiva tjänster som kräver höga överföringssystem. Tack vare de optiska förstärkarna kommer det gamla problemet med förgreningsförluster att i stort sett försvinna. Man kommer till exempel att kunna ansluta alla hushåll i Stockholm till en och samma sändarutrustning. Detta medför att

tjänster som tidigare varit för dyra på grund av för lite abonnenter, kan komma att utvecklas och lanseras.

Tillförlitlighet

Eftersom en fiberförstärkare endast innehåller ett fåtal aktiva komponenter, är tillförlitligheten mycket hög. Den kan höjas ytterligare genom att man använder två lasrar som pumplasar i stället för bara en. Om man även dimensionerar lasrarna så att en laser skulle klara av pumpningen ensam en kortare period, möjliggörs utbyte av trasig laser utan allvarligare driftsstopp.

Larm och övervakningsinformation integreras i vanliga fall i den elektriska signal som finns i regenerators, men i en optisk linjeförstärkare finns inte denna signal att tillgå, och problemet måste lösas på ett annat sätt. Man kan till exempel "småsignalmodulera" pumplaser, eftersom en del av pumpeffekten från lasern överförs till nästa förstärkare. Eller så kan man skicka ut en signal parallellt på en annan våglängd, exempelvis vid 1300 nm, som detekteras och sänds vidare vid varje förstärkare.

Kommersiell introduktion

Den första kommersiella användningen för fiberförstärkare i Sverige var det sjökabelsystem som installerades under 1992, där de tjänar som effekt- och förstärkare. Optiska förstärkare kommer troligen även att ersätta regenerators i höghastighetssystem, eftersom de har möjlighet att bli mycket billigare på grund av att man slipper omkopplingen optisk-elektrisk-optisk. Långa sjökabelsystem är dock, som jag tidigare nämnt, mer tveksamma. Här skulle man behöva placera de optiska förstärkarna så tätt, att totalkostnaden för installationen skulle bli lika hög som vid installation av regenerators. Utan vidare forskning och utveckling av pumplaser så bedöms även tillförlitligheten som för låg i dessa sammanhang. Det första transatlantiska systemet, TAT-12, har dock planerad driftsstart i år, och detta system använder sig av optiska linjeförstärkare.

4.5 Utvecklingstrend

På senare tid har man arbetat med att utveckla fibrer med väldigt låga halter av erbium, under 1 ppm. Med långa fibrer av detta slag skulle man kunna uppnå en förstärkning som precis motsvarar fiberns naturliga dämpning, vilket i princip skulle innebära att man fick en förlustfri fiber. Dessa fibrer skulle lämpa sig mycket bra till att överföra så kallade solitoner, mycket korta ljusimpulser på ca 10 ps med en intensitet på 10 mW. Dispersionen kompenseras precis av glasets olinjäritet på grund av ljuspulsens höga intensitet, vilket innebär att solitonerna

kan överföras flera 1000-tals km utan att breddas. Pumplasrar måste dock även i dessa system placeras ut mins lika tätt som dagens regenereratorer.

Tillämpningar

5.1 Allmänt

Fiberoptiken har på de flesta områden ersatt de konventionella koppar- och koaxialkablarna. Anledningen till detta är kanske främst optokablarnas avsevärt större överföringsförmåga än konventionella koppar- och koaxialkablarna (fig. 17), men optokablar och optiska fibrer har även andra fördelar. En optokabel är bland annat helt okänslig för elektromagnetisk interferens, vilket kan vara ett stort, och ödesdigert, problem inom exempelvis flygbranschen. I och med att informationen i ett optiskt kommunikationssystem sänds på digital väg, innebär detta naturligtvis att signalerna kodas, vilket värdesätts högt inom den moderna kommunikationsbranschen, där integritet är väl efterfrågad. Även militären har viss användning för optokablar, som vi skall se senare, och fibrerna håller till och med på att komma oss så nära in på som in i våra bilar. Fibrerna har ju även den fördelen gentemot konventionella kablar, att den endast väger bråkdelen mot vad en kopparkabel gör, samtidigt som den är nästan lika böjlig som en dylik. Den låga vikten är inte endast fördelaktig i exempelvis flygplan och dylikt, utan underlättar även enormt vid installation av exempelvis optokablar för telekommunikation (fig. 18). I detta avsnitt kommer jag att ta en närmare titt på användningen inom främst telekommunikation, men även inom bil- och flygplanstillverkningen, militären och sjukvården.

Därför är ljusledaren så överlägsen
Den totala bandbredden är ett uttryck för hur mycket information det finns plats för i den enskilda ledningen

	Total bandbredd	Antal TV-kanaler	Antal telefonsamtal
Ljusfiber	43 milj. MHz	ca 500	500 000
Koaxialkabel	800 MHz	70	0 då kabeln bara kan sända information åt ena hållet
Kopparkabel	0,08 MHz	0	30

fig. 17



fig. 18

5.2 Telekommunikation

En av de stora teknik händelserna under 80-talet var utvecklingen av den fiberoptiska kommunikationstekniken. Utvecklingen kom faktiskt igång så tidigt som 1975 i Sverige, alltså redan innan jag var född. Så det tar död på myten att fiberoptik skulle vara något som utvecklats det senaste årtiondet bara.

Men vad är ett fiberoptisk system egentligen? Om man ser på den enklaste formen av system, så är det en kommunikationslänk, där de gamla kopparkablarna ersatts med fiberkablar (fig. 19). Informationen överförs i digital form, förmedlad av ljuspulser och inte elektrisk ström.

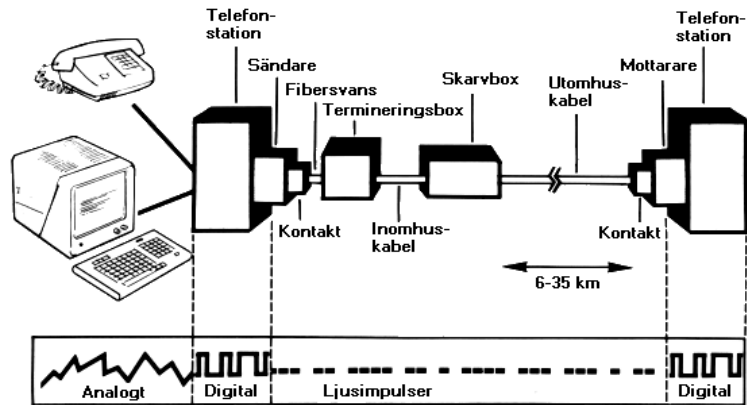


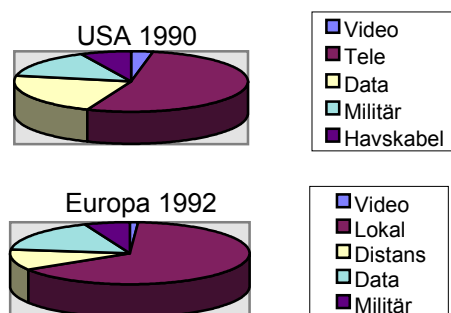
fig. 19

Fördelarna som ett fiberoptisk system erbjuder är framför allt sex stycken:

- ☞ Långa överföringsavstånd
- ☞ Låg vikt
- ☞ Avlyssningssäkerhet
- ☞ Okänslighet för elektromagnetiska störningar
- ☞ Elektriskt isolerade
- ☞ Stor överföringskapacitet

Den stora överföringskapaciteten i kombination med de långa överföringsavstånden är det som är mest intressant om man ser på egenskaper som är till speciell fördel i telekommunikations system. För datakommunikation och industriella applikationer är det snarare störokänsligheten och integriteten som är väsentligt. Långa överföringsavstånd är en följd av fiberns låga transmissionsförluster, fiber är nämligen det mest transparenta material man vet idag. De fibrer som idag används i telekommunikationssystem, singelmodfibern, har i de flesta fall en lägsta dämpning på under 0.25 dB/km . Detta innebär att hela 10% av det ingående ljuset finns kvar efter en så lång överföringssträcka som 40 km. Singelmodfiber har egentligen en enorm teoretisk överföringskapacitet. Det som i praktiken sätter gränserna är hur man kan utforma elektroniken på ett ekonomiskt och praktiskt sätt. Vid telekommunikation används idag (1989) i exempelvis Televerkets/Telias system en standard på 565 Mbit/s . Detta betyder att det samtidigt i en och samma fiber kan överföras nära 8000 telefonsamtal, eller om man tar text som exempel; 15 000 A4 sidor per sekund. Det talades dock redan vid denna tidpunkt om ännu högre överföringshastigheter, och flera tester har också utförts med framgång, tyvärr vet jag inte vad som är standard idag.

fig. 20



Själva fibern väger, som jag tidigare nämnt, nästan ingenting. Av ett kilo glas-massa kan man framställa 38 km fiber. Man kan givetvis inte lägga ner bara fibern i mar-ken, utan man är tvungen att skydda den ge-nom att tillverka en kabel som skyddar runtom. Det innebär dock fortfarande stora underlättningar och besparingar vid installa-tion (fig. 18). Fiberoptiska system blir över-

huvudtaget ofta betydligt billigare än konventionella system. Just inom tele-kommunikationstekniken hade man behov av och kunde utnyttja den stora bandbredd som fiberoptiken tillhandahåller. Detta är en av de främsta anled-ningarna till tekniken först kom att användas inom just detta fält. Inom data-kommunikation och industriell kommunikation, där bandbredd och avstånd inte spelar så stor roll, är det först på senare år som tekniken gjort intrång på allvar. Vid en analys av användnings-områdena för fiberoptiken i USA och i Europa (fig. 20), ser man även tydligt att telekommunika-tionen dominerar, även om ande-len är på väg ner nu när även andra sektorer upptäcker förde-larna med fiberoptiken.

Det land i Europa som kanske bäst har hängt med i utvecklingen är faktiskt Sverige. Vi ligger väl till att bli det första europeiska land som för ett heltäckande fi-beroptiskt kommunikationsnät (fig. 21). Det användningsområde inom vilket optokablar används mycket nu är sjökablar. Sverige har lagt en kabel till Gotland, och det har även lagts kablar under Atlanten. När man skulle lägga dess stötte man dock på ett över-raskande och något annorlunda problem. Avståndet var för stort för att man skulle kunna överföra

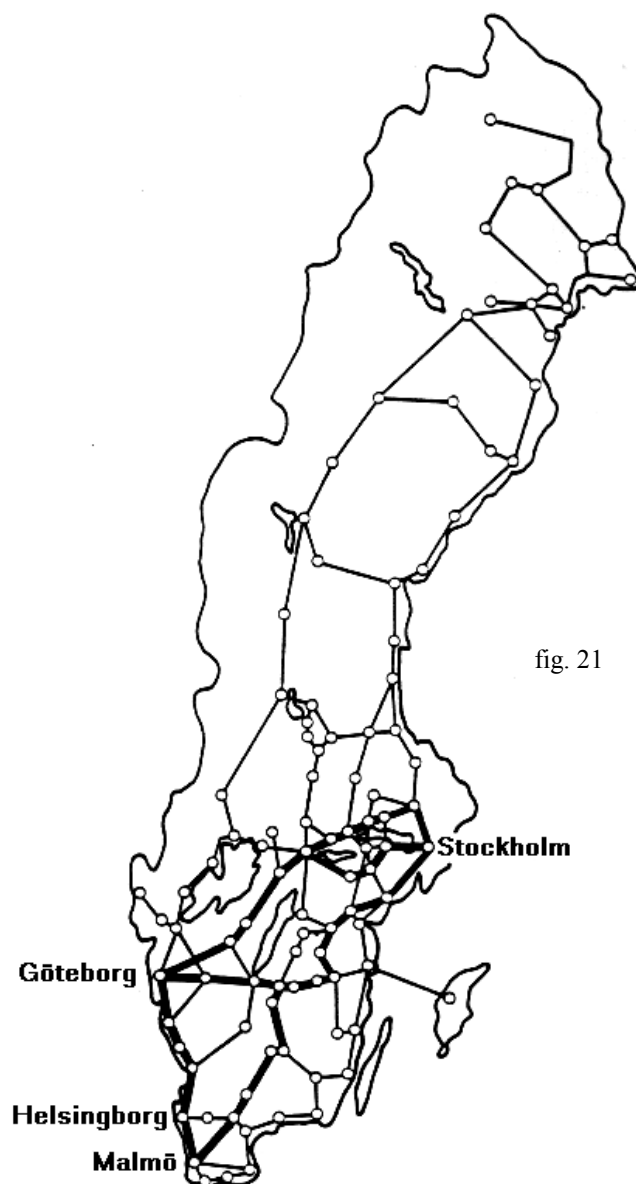


fig. 21

ljuset utan förstärkning på vägen, vilket ledde till att man tillsammans med optokablen var tvungen att lägga högspänningskablar. Nu var det bara så att det finns en viss hajart som blir attraherade av den typ av elektriska fält som högspänningskablar orsakar, och dessa hajar biter helt enkelt sönder kabeln!

Sammantaget har den totala marknaden för fiberoptiska system växt mycket snabbt och fortsätter att göra så. Utvecklingen av fiberoptiska kommunikationssystem har varit mycket snabb. Tekniken är dock inte någon ny teknik. Som nämnts i avsnitt 1, så är det faktiskt mer än 100 år sedan de första experimenten med ljusledning i fiberliknande material samt ljuskommunikation i modern mening utfördes.

5.3 Videoöverföring

Videoöverföring kräver väldigt hög bandbredd, detta är en viktig orsak till att fiberoptiken inte slagit igenom lika starkt på detta område. Alla känner väl till det gamla talspråket en bild säger mer än tusen ord... Nu är det så att en bild även tar upp mycket mer plats, ungefär 50 gånger så mycket som 1000 ord. Det här har varit det grundläggande problemet för bildtelefoni, eftersom det skulle krävs ungefär 1000 vanliga telefonlinjer för att överföra en vanlig TV bild. Ett sätt att lösa problemet är att komprimera informationen och endast överföra sådana delar av bilden som inte förändras från en stund till en annan. Detta innebär dock sämre bildkvalitet och komprimeringstiderna skapar retsamma fördröjningar.

Precis som vid telefoni, handlar det inte bara om att koppla ihop en sändare och en mottagare och sätta på utrustningen. Videoöverföring används inom ett stort antal områden, och kraven varierar kraftigt inom de olika områdena. I vissa fall, vid till exempel reportageinspelning, handlar det endast om en ensam länk som ska vara flexibel, lätt transportabel och okänslig för störningar. Vid andra tillfällen, till exempel vid sändning mellan kontinenter, kan signalen behöva gå över fasta kommersiella nät, fibrer och satelliter. När det handlar om till exempel kabel-TV ska signalen ut till flertalet abonnenter som alla ska kunna få lika hög kvalitet på signalen. Överföring över väldigt stora avstånd sköter satelliter tillfredsställande, men inom en del andra områden kan fiberoptiken komma att ta över.

Tidigare har fiberoptiken främst använts för så kallade Super Trunks, det vill säga de kablar som bär signalen från sändningslokalen till de regionala distributionscentralerna, men på senare tid, med hjälp av bland annat optiska förstärkare, har distribution ända hem till abonnenterna kommit att växa i intresse. I Super Trunk kablarna kan man överföra 30 - 100 videosignaler 8 - 16 km, och ett viktigt krav som måste uppfyllas är att signal/brus förhållandet är minst 53 dB för att försöka att signalen är användbar vid mottagarsidan. Fiberoptiska kablar uppfyller dessa krav mer än väl, och eftersom en optokabel innehåller ett

stort antal fibrer, kan man spara mycket arbete vid installationen jämfört med koaxialkablar. Både digital och analog teknik använd i dessa Super Trunks, och fördelarna är olika. Med analog modulation kan man överföra 8 kanaler per fiber med ett signal/brus förhållande på 60 dB över avstånd på 20 - 25 km, vilket är tillräckligt för de flesta Super Trunks. Om man använder PCM modulering kan man överföra signalen 30 - 40 km med 560 Mbit/s , men denna metod medför ett lägre signal/brus förhållande, 57 dB, och konverteringen mellan analog och digital signal medför dyrare systemlösningar. I analoga system använder man även våglängdsmultiplexering. En stor fördel med fiberoptik jämfört med vanliga koaxialkablar är att man inte behöver kalibrera utrustningen efter olika längder på kabel. Det är nämligen så med koaxialkablar, att de sägs ha en impedans på omkring 75Ω , men i praktiken är denna impedans en produkt av längden, vilket innebär att man behöver kalibrera utrustningen efter kabellängd. Upp till 300 m är detta relativt enkelt att lösa med hjälp av equalizers, men mellan 300 och 900 m blir det svårare, och vid längre kablar än 900 m blir det praktiskt omöjligt. I ett optiskt system är det impedansen på sändare och mottagare som avgör signalens impedans och denna förändras inte under signalens färd i fibern.

5.4 Övrigt

Bilar

Inom bilindustrin har man upptäckt att elektromagnetiska störningar, EMI, kan leda till allvarliga problem i dagens elektriskt styrda bilar. Som ett exempel kan nämnas att när man i Chicago skulle testa bussar med ABS-bromsar i det tidiga stadiet, uppvisade bromsarna ett konstigt beteende när man körde över en viss bro. Det visade sig att en radiosändares vågor fångades upp av brons metallkonstruktion, och omformades så att det uppstod förvirring i bromsarnas styrsystem. Denna typ av problem kan delvis avhjälpas genom fiberoptik. Vid användning av konventionella kablar blir det vidare rejäla spindelväv av kablar bakom instrumentpanelen, eftersom det idag inte används så mycket reläer utan all ström till en vindrutetorkare till exempel, går genom strömbrytaren i instrumentpanelen. Även detta skulle kunna avhjälpas genom användning av fibrer, givetvis skulle man även kunna använda konventionella kopparkablar som skickade styrsignaler till reläer, men då får man inte den immunitet mot EMI som man får med optiska system, och fibrer blir vidare mycket lättare. EMI är ett stort problem i bilar eftersom de innehåller en rad delar som genererar EMI, tändstift, generator, vindrutetorkarmotorer etc. Man kan förvisso använda elektriska EMI-filter, men detta är kostsamt. Och när överföringshastigheten ökar, börjar dessa filter även ta bort signalen.

Man kan även använda fibrer för att indikera om en lampa fungerar genom att helt enkelt dra en fiber från lampan i fråga till instrumentpanelen. På detta sätt skulle man spara extra indikeringslampor och extra kablar som bara bygger på ormboet. På liknande vis kan man även gömma undan alla kontrolllamporna, för att sedan bara leda fram ljuset till panelen. Låt oss säga att man till exempel sätter alla indikeringslampor i anslutning till säkringsboxen i motorutrymmet, detta skulle underlätta utbytet av trasiga lampor avsevärt. Med fibrer skulle man kunna placera indikeringsfönsterna i mitten av ratten istället för på instrumentpanelen. Ett problem som dock kvarstår, är det faktum att det inte finns några fibrer som lämpar sig för användning i motorutrymmet. Glasfibrer kan motstå hettan, men är ej tillräckligt flexibla, plastfibrer är tillräckligt flexibla, men tål inte hettan. Dock kommer det kanske snart att finnas fibrer som är tillräckligt flexibla och tillräckligt värmetåliga.

Flygplan

Flygplan är mer komplicerade än bilar, piloten måste kunna kontrollera mycket fler detaljer än vad bilföraren måste. De absolut högsta kraven ställs på system i militära flygplan där det måste motstå krävande miljöer och överföra mycket information snabbt. I dagens flygplan skickar sensorer i reglagen impulser till motorer som styr mekaniken. Dagens stridsflygplan har även störningsutrustning för att störa ut fiendens radar, målsökningssystem och inre elektronik. Med fiberoptiska ökar skyddet mot denna typ av sabotage. I USA användes en kortare längd fibrer i bombflygplanet B-1. Man har gjort uträkningar som pekar på att man skulle kunna minska detta plans totalvikt med hela 1 ton bara genom att byta ut allt kablage mot fiberoptik! Detta skulle innebära mindre bränsleförbrukning, med längre räckvidd eller högre lastkapacitet som följd. Fiberoptiken kommer troligtvis att spela en viktig roll i framtidens så kallade Stealth flygplan, eftersom det här kan bli intressant att minska mängden metall ombord för att undgå radarupptäckt. Av samma anledning uppskattas även den fördelen att planets eget system på detta vis genererar mycket lite, om några, elektromagnetiska störningar. I kommersiella flygplan som Boeing, överväger man även att använda fiberoptik eftersom detta skulle medföra att man slipper klumpiga kopparkablar skärmade mot EMI och blixtnedslag.

Militära tillämpningar

Radarn är ett stort hjälpmedel när det gäller att upptäcka och lokalisera fiendens flygplan, men den har även den nackdelen att de mikrovågor som sänds ut kan användas till målsökning för missiler. Därför är det önskvärt att ha själva radarn en bit bort från själva kontrollcentralen. Men problemet är att radarn genererar en signal på 70 MHz, en signal som är omöjlig att överföra längre

sträckor i konventionella kablar utan regenerators. Men med fiberoptik skulle man kunna placera radarn så pass långt bort från kontrollcentralen, så att denna inte skulle stå under någon fara för missilerna. Även för fältkommunikation lämpar sig fibrer bättre än andra kablar, främst på grund av sin lätta vikt och sin hållbarhet. I fält ska kablarna tåla att läggas i smuts, hängas från träd och i stolpar, tåla att soldater går på dem och att fordon kör över dem. För att demonstrera det sistnämnda, lade man vid en demonstration ut en fiber vid infarten på en parkeringsplats, och lät 30 000 bilar köra över den, varpå den fortfarande fungerade felfritt. På grund av den lättare vikten, räcker det numera med en bil, istället för 3 - 4 stycken, och med ett fåtal man för att lägga ut kablarna. Ett annat intressant användningsområde, är styrning av missiler. Genom att montera in en kamera, en mottagare, en sändare och en fiberrulle i en missil, kan man skicka iväg denna från ett fordon och sitta i fordonet och styra missilen rakt på sitt mål. Videokameran fångar upp en signal som konverteras och skickas med en våglängd till centralen, varifrån styrsignaler till missilen skickas tillbaka med en annan våglängd som mottagaren i missilen avkodar och tolkar. På detta sätt kan avfyrings- och kontrollfordonet befinna sig utom fara och utom synhåll, och ändå få korrekta träffar. Försöken har varit framgångsrika, och man hoppas att kunna utvidga den nuvarande räckvidden på 10 km till 20 km.

Medicinska tillämpningar

Den kanske viktigaste användningen för fiberoptik är inom medicinen. Här möjliggör tekniken att läkare kan se inuti kroppen utan att behöva operera. Det verktyg som används kallas för ett endoskop och består av ett fiberknippe som är upp till några meter långt. Dessa fiberknippen kan vara fasta eller flexibla, allt beroende på den operation som skall utföras. I dessa fiberknippen kan en del av fibrerna användas till att överföra ljus ner till observationspunkten, medan de andra leder tillbaka ljuset till läkaren. I vissa fall kan man även koppla in en laser som har en våglängd som överförs av fiber, och på detta sätt kan läkaren utföra vissa laserkirurgiska ingrepp genom endoskopet. Detta är speciellt användningsbart vid behandling av exempelvis cancer, då läkaren kan döda den angripna celler med laserpulser, och direkt efter varje puls se hur pass mycket mer som behövs. På detta sätt sparas inte bara pengar, utan patienten slipper även större operationer och riskerar inte i lika hög grad att bli hospitaliserad. Det är trots detta endast ett fåtal av endoskoperna som används till laserkirurgi. Man kan även använda denna typ av laserteknik för att lösa åderförkalkning. Det är dock fortfarande en något riskfylld åtgärd, eftersom det kan hända att man inte bara får hål på proppen, utan kanske även på blodkärlet...

Avslutning

Fiberoptiken är en starkt expansiv marknad och utvecklingen går ständigt framåt, det är därför svårt att hitta information om den dagsfärska tekniken. Som det framgår av källförteckningen är den mesta litteraturen relativt gammal, varför informationen i dem, och därför även i detta arbete, kan vara något inaktuellt. Huvuddragen inom de beskrivna områdena är dock lika aktuellt fortfarande och jag hoppas att detaljinformationen är någorlunda korrekt.

Målet med mitt arbete, att ta reda på mer om fiberoptikens förutsättningar och begränsningar, anser jag att jag har nått. Nu vet jag mer om fiberoptiken, att det inte bara är en dans på rosor, och jag har samtidigt insett att det finns mycket mer att lära inom området. Eftersom jag ämnar läsa vidare inom telekommunikation, är det ytterst sannolikt att jag kommer i kontakt med fiberoptiken igen. Jag tror att detta arbete då kommer att vara till en del hjälp. Det har varit väldigt kul att arbeta med ämnet, och det är faktiskt inte så svårt som det verkar, så till alla som känner sig intresserade - sätt er in i ämnet, det är kul!



*Mattias R Andersson
Naturvetenskaplig linje klass N3a
Filbornaskolan Helsingborg vt-95*

Källförteckning

Bonnedal Dag och Rihed Mats

Optiska förstärkare - framtidens
nätkomponent
Artikel i TELE nr 4 1991

Fernandez Lars

Optisk omkoppling transportnätet
Artikel i TELE nr 3 1992

Hecht Jeff

Understanding Fiber Optics
Howard W. Sams & Company
Första upplagan, tredje tryckning 1989

Stensland Leif

Fiberoptisk Teknik - för
kommunikationssystem
Kursmaterial i STF:s regi 1989

Stensland Leif och Scuka Viktor

Optiska fibrer som telekommunikationsmedium; Artikel i KOSMOS
Svenska Fysikersamfundet, forskningsrådets Förlagstjänst Band 16:1984