



NORGE

(12) **PATENT**

(19) NO

(11) **303956**

(13) B1

(51) Int Cl⁶ H 01 S 3/06, G 02 F 6/28

Patentstyret

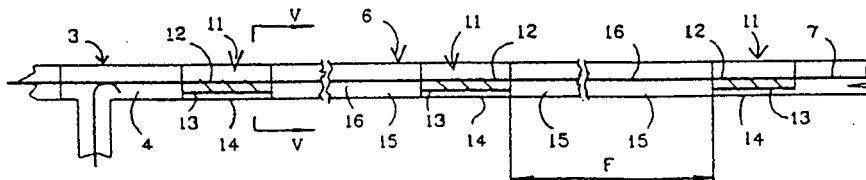
(21) Søknadsnr	19910461	(86) Int. inng. dag og	
(22) Inng. dag	06.02.1991	søknadsnummer	
(24) Løpedag	06.02.1991	(85) Videreføringsdag	
(41) Alm. tilgj.	08.08.1991	(30) Prioritet	07.02.1990, IT, 19280/90
(45) Meddelt dato	28.09.1998		
(73) Patenthaver	Pirelli Cavi SpA, Piazzale Cadorna, 5, I-20123 Milano, IT		
(72) Oppfinner	Giorgio Grasso, Monza, IT		
	Paul Laurence Scrivener, Southampton, Hampshire, England, GB		
(74) Fullmektig	Tandbergs Patentkontor AS, 0306 Oslo		

(54) **Benevnelse** **Bredbåndet, optisk forsterker med aktiv fiber og med dobbeltkjernepartier.**

(56) **Anførte publikasjoner** WO A1 8602171
OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE. TECHNICAL
DIGEST.PAPER TUL14. 24.02.86, New York, US; s. 62-63, K. Okamoto
m.fl.: "Fiber optic spectral filter consisting of concatenated dual-core fibers".

(57) **Sammendrag**

En optisk forsterker, særlig for fiberoptiske telekommunikasjonsledninger som arbeider med et overføringssignal i et forutbestemt bølgelengdebånd, hvilken forsterker omfatter en aktiv, optisk laseremisjonsfiber (6) som er dopet med erbium og har partier (11) av begrenset lengde som er forsynt med to kjerner (12, 13) av hvilke den ene (12) er forbundet med kjernene (16) i de gjenværende partier av aktiv fiber (6) og med ledningsfibrene (7) som utgjør forsterkerens inngang og utgang, mens den andre kjerne (13) er optisk koplet med den første kjerne (12) ved en bestemt bølgelengde som er forskjellig fra overføringsbølgelengden. Den andre kjerne (13) er i stand til fra den første kjerne (12) å fjerne erbiumets spontane emisjonslys som ville utgjøre en kilde til støy, og tillater således forsterkning av et overføringssignal i et område av bølgelengder som i hovedsaken svarer til toleranseområdet for lasersignalsendere (2) av kommersiell type.



Oppfinnelsen angår en optisk forsterker med bredt signalbånd, særlig for fiberoptiske telekommunikasjonsledninger som arbeider med et overføringssignal i et forutbestemt bølglengdebånd, omfattende en dikroisk kopler som er egnet for
5 multipleksing av et overføringssignal og pumpende lysenergi i en eneste utgående fiber, og en aktiv optisk fiber som inneholder et fluorescerende dopingsmiddel og som er koplet til den dikroiske koples utgangsfiber og til en telekommunikasjonsledningsfiber som er egnet til å motta og overføre et forsterket
10 signal.

Det er kjent at optiske fibrer med en kjerne som er dopet med spesielle stoffer, f.eks. ionene av sjeldne jordarter, har egenskaper med stimulert emisjon som er egnet for anvendelse som laserkilder og som optiske forsterkere.

15 Slike fibrer kan i virkeligheten mates med en lyskilde med en spesielle bølgelengde som er i stand til å ta atomene i dopingsstoffet til en eksitert energitilstand, eller et pumpingsbånd, fra hvilken tilstand selve atomene i løpet av meget kort tid spontant faller tilbake til en laseremisjonstilstand hvor de
20 forblir i en forholdsvis lengre tid.

Når en fiber som har et stort antall atomer i den eksiterte tilstand i emisjonsnivået, krysses av et lyssignal med en bølgelengde som svarer til en slik laseremisjonstilstand, forårsaker signalet overgang av de eksiterte atomer til et lavere
25 nivå, med en lysemisjon som har samme bølgelengde som signalet. En fiber av denne type kan således benyttes til å oppnå en forsterkning av et optisk signal.

Med utgangspunkt i den eksiterte tilstand opptrer tilbakefallet av atomene også spontant, og dette frembringer en
30 årsaks- eller kausalemisjon som utgjør en bakgrunnsstøy som overlages over den stimulerede emisjon som svarer til det forsterkede signal.

Den lysemisjon som frembringes ved innføringen av pumpende lysenergi i den doped eller aktive fiber, opptrer ved
35 flere bølgelengder som er typiske for dopingsstoffet, og gir således opphav til et fluorescensspektrum for fiberen.

Med det formål å oppnå maksimal forsterkning av signalet ved hjelp av en fiber av ovennevnte type, i kombinasjon med et høyt signal/støy-forhold, blir det for optisk telekom-

munikasjon vanligvis benyttet et signal, generert av en lasersender, med en bølgelengde som svarer til en topp av fluorescensspektrumkurven for den fiber som inneholder det benyttede dopingsstoff. Særlig for forsterkning av optiske telekommunikasjonssignaler er det bekvemt å benytte aktive fibrer med en kjerne som er dopet med erbiumioner (Er^{3+}). I området for de interessante bølgelengder har imidlertid fluorescensspektret for erbium en særlig smal emisjonstopp, og dette påtvinger derfor anvendelse, som kilde for overføringssignalet, av en lasersender som opererer på en spesiell bølgelengde, med begrenset toleranse, på grunn av at signaler utenfor dette toleranseområde ikke ville bli tilstrekkelig forsterket, mens en kraftig spontanemisjon ville forekomme ved en slik toppbølgelengde, og dermed utgjøre en bakgrunnsstøy som ville gå kraftig ut over overføringskvaliteten.

Lasersendere med ovennevnte egenskaper, dvs. som arbeider ved emisjonstoppen for erbium, er på den annen side vanskelige og kostbare å fremstille, mens den vanlige industrielle produksjon tilbyr lasersendere, såsom f.eks. halvlederlasere (In, Ga, As), med flere egenskaper som gjør dem egnet for anvendelse ved telekommunikasjon, men som har ganske vid toleranse når det gjelder emisjonsbølgelengden, og således har bare et begrenset antall lasersendere av denne type sin emisjon ved ovennevnte toppbølgelengde.

Selv om det ved noen anvendelser, såsom f.eks. undervanns-telekommunikasjonsledninger, kan være akseptabelt å benytte overføringssignalsendere som arbeider på en spesiell bølgelengdeverdi som er oppnådd f.eks. ved å foreta en omhyggelig utvelgelse blant lasere av kommersiell produksjon, slik at bare de som har emisjonen innenfor et lite område av forsterkerfiberens laseremisjonstopp, utvelges, er en slik prosess ikke finansielt akseptabel for ledninger av andre typer, såsom f.eks. by-kommunikasjonslinjer, hvor begrensningen av installasjonsomkostninger er av spesiell betydning.

En fiber som er dopet med erbium for å tillate dens laseremisjon, har for eksempel en emisjon med en topp rundt 1536 nm. For et område på 5 nm fra denne verdi har emisjonen en høy intensitet og kan benyttes for forsterkning av et signal i det samme bølgelengdeområde. Kommersielt fremstilte halvleder-

lasere som kan benyttes for overføring, oppnås imidlertid vanligvis med emisjonsbølgelengdeverdier som varierer fra 1520 til 1570 nm.

Det innses således at et betydelig antall industrielt fremstilte lasere av denne type ligger utenfor det område som er egnet for forsterkning med erbium, og derfor ikke kan benyttes for generering av telekommunikasjonssignaler i ledninger som er utstyrt med erbiumforsterkere av den ovenfor omtalte type.

Det er imidlertid kjent at fibrer som er dopet med erbium, har et område av emisjonsspektret med høy intensitet som er i hovedsaken konstant i det bølgelengdeområde som støter opp til ovennevnte topp, og som er tilstrekkelig bredt til å inneholde en stor del av emisjonsområdet for de ovennevnte interessante, kommersielle lasere. I en fiber av denne type ville imidlertid et signal som tilveiebringes med en bølgelengde som ligger langt fra den maksimale emisjonstopp, bli forsterket i begrenset grad, mens de spontane overganger fra laseremisjonstilstanden i fiberen opptre fremherskende med emisjon ved spektrets toppbølgelengde, ved 1536 nm, slik at det frembringes en bakgrunnsstøy som vil bli ytterligere forsterket mens den beveger seg over lengden av fiberen, og som overlager seg på nyttesignalet.

For å benytte aktive fibrer dopet med erbium for forsterkning av telekommunikasjonssignaler som frembringes ved hjelp av halvlederlasersendere av kommersiell type, slik som beskrevet ovenfor, oppstår behovet for filtrering av erbiumets spontane toppemisjon, langs lengden av den aktive fiber, slik at slik emisjon med en uønsket bølgelengde ikke skal ta pumpingsenergi bort fra forsterkningen av signalet og ikke skal overlagre seg på dette.

For dette formål kan det benyttes en aktiv fiber som har to kjerner, idet overføringssignalet og pumpingsenergien sendes i den ene av kjernene mens det i den andre finnes et lysabsorberende dopingsmiddel. Dersom de to kjerner er optisk koplet ved toppbølgelengden for den spontane emisjon, skal den bli overført til en andre kjerne hvor den absorberes uten å returnere for å overlagre seg på overføringsbølgelengden.

En slik aktiv fiber, som beskrevet i italiensk patentsøknad nr. 22654 A/89 i navnet til den foreliggende søker,

utfører en effektiv filtreringsvirkning av den uønskede bølgelengde, men ved noen anvendelser, hvor den utsettes for mekaniske eller termiske spenninger, og spesielt for en vridningstilstand, kan den komme ut for en endring av de optiske koplingsegenskaper mellom kjernene, og den bølgelengdeverdi som overføres til den andre, absorberende kjerne, endres.

Det oppstår således det problem å ha tilgjengelig en aktiv optisk fiber for anvendelse i optiske forsterkere som kan benyttes i kombinasjon med kommersielle lasersendere for overføringssignalet, uten at det på disse pålegges betydningsfulle kvalitative begrensninger, og hvor fiberen er i hovedsaken ufølsom for deformasjonsspenninger og tilstander som påtvinges på denne under konstruksjonen av forsterkeren eller opptrer under utleggings- og driftsfasene for forsterkeren i ledningen.

Fra den internasjonale patentsøknad WO 86/02171 er det kjent en fiberoptisk forsterker som forsterker ved resonans ved en valgt bølgelengde i en aktiv kavititet. Kaviteten er dannet av en optisk fiber som er dopet med et fluorescerende materiale. Pumpende lys kan innkoples i den aktive kavititet gjennom en fiber som er avbrutt i den ene ende og er optisk koplet til den aktive fiber. Hovedformålet med denne forsterker er å tilveiebringe lysenergiforsterkning ved valgte bølgelengder. Forsterkeren har således som funksjon å forsterke og filtrere en ønsket bølgelengde.

I publikasjonen OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE, TECHNICAL DIGEST, PAPER TUL14, 24.02.86, New York, US, s. 62-63, K. Okamoto m.fl.: "Fiber optical spectral filter consisting of concatenated dual-core fibers" er det beskrevet et fiberoptisk filter som kan benyttes i optiske forsterkere. Filteret omfatter partier som hvert utgjøres av en optisk fiber med to kjerner og en enkeltmodusfiber. Den første kjerne er optisk koplet til enkeltmodusfiberen mens den andre kjerne er avbrutt ved endene. De to kjerner er optisk koplet til hverandre i et forutbestemt bølgelengdebånd. Det dreier seg her om en fullstendig passiv anordning, nemlig et fiberoptisk filter som benytter sammenkjedede dobbeltkjernefibrer. Publikasjonen beskriver en mulig anvendelse av dette filter i kombinasjon med Raman-forsterkere. Det er imidlertid ikke vist eller antydnet benyttelse av et slikt filter i kombinasjon med forsterkere med dopede optiske fibrer.

Formålet med oppfinnelsen er å tilveiebringe en forsterker med en dopet, optisk fiber hvor forsterkeren kan tilby en tilfredsstillende forsterkning i et tilstrekkelig utvidet område av bølgelengder, for å tillate anvendelse av kommersielle
5 lasersendere som eliminerer materialets spontane emisjoner ved en uønsket bølgelengde, hvilke utgjør bakgrunnsstøy med høy intensitet i forhold til overføringssignalet, og hvor sådanne egenskaper holdes stabile under driftstilstander.

Ovennevnte formål oppnås med en optisk forsterker av
10 den innledningsvis angitte type som ifølge oppfinnelsen er kjennetegnet ved at den aktive optiske fiber omfatter vekslende første og andre partier, idet hvert første parti utgjøres av en optisk fiber med to kjerner, og hvert andre parti utgjøres av en optisk fiber med én kjerne som inneholder det fluorescerende
15 dopingsmiddel, idet de første kjerner i de første partier er optisk koplet til kjernene i de andre partier, og de andre kjerner i de første partier er avbrutt ved endene av de første partier, idet de to kjerner i de første partier er optisk sammenkoplet i et forutbestemt bølgelengdebånd som er inkludert
20 i bølgelengdeområdet for laseremisjonen til det fluorescerende dopingsmiddel og forskjellig fra overføringssignalbåndet, slik at emisjon i det forutbestemte bølgelengdeområde, som utgjør bakgrunnsstøy i forhold til overføringssignalet, i det vesentlige overføres fra den første kjerne til den andre kjerne i hvert
25 første parti.

I en foretrukket utførelse inneholder den andre kjerne i hvert første parti av den aktive optiske fiber et dopingsmiddel med høy lysabsorpsjon i laseremisjonsområdet for den aktive fibers dopingsmiddel. Dopingsmiddelet med høy lysabsorpsjon i
30 den andre kjerne kan hensiktsmessig utgjøres av det samme fluorescerende stoff som det som er til stede i den aktive fiber.

Den første kjerne i hvert første parti av den aktive optiske fiber kan inneholde et fluorescerende dopingsmiddel. Som et alternativ kan den første kjerne i hvert første parti av den
35 aktive optiske fiber være uten noe fluorescerende dopingsmiddel, slik at hele forsterkningen er overlatt til de andre partier av den aktive fiber.

Under alle omstendigheter er det fluorescerende dopingsmiddel som er til stede i den aktive fiber, i det minste

innenfor dens andre partier som har en eneste kjerne, hensiktsmessig erbium.

Ifølge en annen utførelse kan dopingsmiddelet som er til stede i den andre kjerne, være et stoff som har høy lysabsorpsjon over hele spektret, valgt blant titan, vanadium, krom eller jern, som i det minste delvis er til stede i sin laveste valenstilstand.

Lengden av hvert første parti er lik eller større enn svevningslengden mellom partiets første og andre kjerner som er koplet i det valgte koplingsbånd mellom kjernene.

Innholdet av dopingsmiddel med høy lysabsorpsjon i den andre kjerne og koplingsegenskapene til fiberkjernene er korrelert, slik at det i den andre kjerne fastlegges en undertrykkelses- eller slokkelengde som er mindre enn $1/10$ av svevningslengden mellom de koplede kjerner.

I en spesiell utførelse av oppfinnelsen er den andre kjerne uten noe lysabsorberende dopingsmiddel, og hvert første parti av den aktive optiske fiber har en lengde som er lik et helt multiplum av én svevningslengde, med en toleranse på 10% av selve svevningslengden.

I det tilfelle hvor det fluorescerende dopingsmiddel i den aktive fiber er erbium, er de første og andre kjerner i partiene av dobbeltkjernefiberen optisk koplet til hverandre mellom 1530 og 1540 nm.

Den første kjerne i det første parti er anordnet koaksialt med fiberens ytre overflate, på linje med kjernene i de andre partier av den aktive fiber og med kjernene i de fibrer til hvilke forsterkeren er tilkoplet, mens den andre kjerne ved sine ender vender mot kledningsmaterialet til de tilstøtende fibrer.

I det minste den første av de to kjerner i de første partier er egnet til å tillate monomodal lysutbredelse ved overføringsbølgelengden og ved pumpingsbølgelengden.

Den aktive fiber har andre partier som inneholder fluorescerende dopingsmiddel og er innesluttet mellom to fortløpende, første partier med en lengde som ikke er større enn den lengde som svarer til en maksimalt oppnåelig forsterkning på 15 dB ved koplingsbølgelengden mellom de første og andre kjerner i de første partier, og fortrinnsvis mellom 1 og 5 dB.

I det minste én ytterende av den aktive fiber utgjøres av et første parti.

Partiene av dobbeltkjernefiber er mekanisk bøyelige i en bue for finjustering av koplingsbølgelengdebåndet mellom de første og andre kjerner i disse.

Hvert parti av dobbeltkjernefiber er hensiktsmessig stivt fastspent til en respektiv støtteplate som er i hovedsaken udeformerbar under driftstilstander.

Hvert parti av dobbeltkjernefiber er dessuten stivt fastspent til den respektive støtteplate i en krumningstilstand som svarer til det ønskede koplingsbølgelengdebånd mellom partiets første og andre kjerner.

Oppfinnelsen skal i det følgende beskrives nærmere under henvisning til tegningene, der fig. 1 viser et riss av en optisk forsterker som benytter en aktiv fiber, fig. 2 viser et diagram av energiovergangene for en fiber av den type som kan benyttes for en forsterker ifølge risset på fig. 1, og som er egnet for generering av stimulert emisjon (laser), fig. 3 viser et diagram av kurven for stimulert emisjon for en optisk fiber som er fremstilt av silisium dopet med Er^{3+} , fig. 4 viser et forstørret, skjematisk riss av en optisk forsterker ifølge oppfinnelsen, fig. 5 viser forsterkerens aktive fiber i tverrsnitt etter linjen V-V på fig. 4, fig. 6 viser en grafisk fremstilling av lysforplantningskonstantene inne i kjernene i den aktive fiber ifølge oppfinnelsen i relasjon til bølgelengden, fig. 7 viser et parti av en aktiv optisk fiber ifølge oppfinnelsen, omfattende et avsnitt med en dobbeltkjerne og en fremstilling av lyseffekt-overføringskurven mellom én kerne og den andre ved koplingsbølgelengden, fig. 8 viser et parti av en optisk fiber ifølge oppfinnelsen, omfattende et parti av en dobbeltkjernefiber med en lengde som er lik én svevningslengde, og fig. 9 viser et fiberparti i en forsterker ifølge oppfinnelsen med et dobbeltkjerneparti med innspent krumning.

For det formål å forsterke et signal i optiske fibrer for telekommunikasjon kan det hensiktsmessig benyttes forsterkere som gjør bruk av optiske fibrer. Konstruksjonen av slike forsterkere er skjematisk illustrert på fig. 1 hvor henvisningstallet 1 betegner en optisk fiber for telekommunikasjon, langs hvilken det sendes et overføringssignal med en bølgelengde λ_s som

genereres av en lasersignalsender 2. Dette signal, som er dempet etter en viss ledningslengde, tilføres til en dikroisk kopler 3 hvor det på en eneste utgående fiber 4 kombineres med et pumpingssignal med en bølgelengde λ_p som genereres av en pumpende lasersender 5. En aktiv fiber, som er betegnet med 6 og er koplet til fiberen 4 som forlater kopleren, utgjør det forsterkende element for signalet som således innføres i ledningsfiberen 7 for å fortsette i retning mot sitt bestemmelsessted.

For å oppnå den aktive fiber 6 som utgjør enhetens forsterkende element, er det ifølge en foretrukket utførelse av oppfinnelsen hensiktsmessig å benytte en optisk fiber som er fremstilt av silisium og hvis kjerne er dopet i oppløsning med Er_2O_3 , hvilket tillater en fordelaktig forsterkning av overføringssignalet, idet laserovergangene til erbium utnyttes.

Slik det fremgår av diagrammet på fig. 2, som angår en fiber som inneholder et dopingsmiddel av den angitte type og som symbolsk representerer de energitilstander som er tilgjengelige for et erbiumion i oppløsning i fiberens kiselgrunnmasse, fører innføring i den aktive fiber av en lyseffekt med en pumpingsbølgelengde λ_p som er lavere enn bølgelengde λ_s av overførings-signalet, til at et visst antall Er^{3+} -ioner som er til stede som dopingsstoff i fiberen, overføres til en eksitert energitilstand 8, heretter definert som pumpingsbånd, fra hvilken ionene spontant faller tilbake til et energinivå 9 som utgjør et laseremisjonsnivå.

I laseremisjonsnivået 9 kan Er^{3+} -ionene forbli i en forholdsvis lang tid før de utsettes for en spontan overgang til grunn- eller basisnivået 10.

Mens overgangen fra pumpingsbåndet 8 til nivået 9 er knyttet til en emisjon av termisk type, som spres utenfor fiberen (fononstråling), frembringer overgangen fra nivået 9 til basisnivået 10 som kjent en lysemisjon, med en bølgelengde som svarer til energiverdien av laseremisjonsnivået 9. Dersom en fiber som inneholder en stor mengde ioner på laseremisjonsnivået, krysses av et signal med en bølgelengde som svarer til et slikt emisjonsnivå, forårsaker signalet stimulert overgang av de innblandede ioner fra emisjonstilstanden til basistilstanden, før det spontane tilbakefall av ionene, med en kaskadevirkning som på den aktive fibers utgang forårsaker utsendelse av et kraftig

forsterket overføringssignal.

Ved fravær av et overføringssignal frembringer det spontane tilbakefall av laseremisjonstilstandene, som finnes i et diskret antall som er typisk for hvert stoff, en lysstråling med topper på forskjellige frekvenser som svarer til de tilgjengelige nivåer. Slik som vist på fig. 3, har spesielt en fiber av typen Si/Al eller Si/Ge, dopet med Er^{3+} , som er egnet for anvendelse i optiske forsterkere, en høyintensitets-emisjonstopp ved en bølgelengde på 1536 nm, mens det ved større bølgelengder, opp til ca. 1560 nm, finnes et område i hvilket emisjonen fremdeles har høy intensitet, men på den annen side lavere enn intensiteten for toppområdet.

Ved tilstedeværelse av et lyssignal som innføres i fiberen ved den bølgelengde som svarer til emisjonstoppen for Er^{3+} , ved 1536 nm, forekommer det en meget kraftig forsterkning av signalet, mens bakgrunnsstøyen, på grunn av den spontane emisjon til erbium, forblir begrenset, og dette gjør fiberen egnet for anvendelse i en optisk forsterker for et signal med en slik bølgelengde.

For generering av signalet er det kommersielt tilgjengelig og bekvemt å benytte lasere av halvledertypen (In, Ga, As), som har et typisk emisjonsbånd fra 1,52 til 1,57 μm . Dette betyr at deres produksjonsteknikk ikke er i stand til, for alle de enheter som fremstilles, å garantere emisjon av overførings-signalet på en spesiell frekvensverdi, svarende til emisjonstoppen for fiberen dopet med erbium benyttet som forsterker, men tvert imot tilveiebringer en stor prosent enheter med et signal i partiene av fiberens emisjonskurve nær ovennevnte emisjonstopp.

Det signal som genereres av slike lasersendere, vil ikke være i stand til å forsterkes med tilstrekkelig forsterkning i en optisk forsterker dopet med Er^{3+} av den ovenfor beskrevne type, da den pumpingseffekt som innføres i den aktive fiber, for størstedelen ville bli benyttet til å forsterke bakgrunnsstøyen som genereres inne i den aktive fiber i selve forsterkeren, ved den spontane emisjon for erbium ved en bølgelengde på ca. 1536 nm.

For derfor å benytte lasersendere av ovennevnte type, idet de aksepteres i et produksjonstoleranseområde som er tilstrekkelig bredt til å gjøre bruken av disse billig, i

kombinasjon med forsterkere som benytter fibrer som er dopet med erbium, dvs. for generelt å tillate anvendelse av spesielle typer av lasersignalsendere i kombinasjon med fluorescerende dopingsmidler med høy bakgrunnsstøy på grunn av spontane overganger fra
5 lasertilstanden, er det ifølge oppfinnelsen sørget for anvendelse av en aktiv fiber som vist på fig. 4. Denne fiber omfatter partier 11 med to kjerner 12 hhv. 13 som er innesluttet i den samme ytre kledning 14, og som veksler med partier 15 av enkeltkjernefiber.

10 I hvert parti av dobbeltkjernefiber 11 er kjernen 12 forbundet med kjernen 16 i de tilstøtende partier av enkeltkjernefiber 15, og ved ytterendene av den aktive fiber forbundet med henholdsvis fiberen 4 som forlater den dikroiske kopler 3, og med ledningsfiberen 7, og denne kjerne leder således over-
15 føringssignalet. Kjernen 13, eller den sekundære kjerne, er avbrutt ved de to ytterender av hvert parti av dobbeltkjernefiberen 11, og har ingen ytterligere forbindelser.

De to kjerner 12 og 13 i partiene av fiberen 11 er utført slik at de respektive lysforplantningskonstanter β_1 og β_2
20 i fiberen, hvis kurver for variasjon med bølgelengden er vist på fig. 6, er slik at det oppnås optisk kopling mellom de to kjerner 12 og 13 ved bølgelengden for den maksimale emisjonstopp for det fluorescerende dopingsmiddel, spesielt ved 1536 nm for erbium, og i et område mellom λ_1 og λ_2 , hvis amplitude er bestemt av
25 hellingen av kurvene λ_1 og λ_2 i deres skjæringsområde, og i det vesentlige, som vist på fig. 3, svarer til amplituden av selve emisjonstoppen som genererer bakgrunnsstøy.

Det foretrukne koplingsområde mellom de to kjerner 12 og 13, i det tilfelle hvor erbium benyttes som dopingsmiddel for
30 kjernen 16, kan antydningssvis være fra $\lambda_1 = 1530$ nm til $\lambda_2 = 1540$ nm.

Dette betyr at lys med en bølgelengde på ca. 1536 nm, som forplanter seg i kjernen 12 sammen med overføringssignalet og som i det vesentlige utgjør bakgrunnsstøy som følge av den
35 spontane emisjon til erbium, periodisk overføres fra kjernen 12 til kjernen 13, i overensstemmelse med de kjente lover for optisk kopling som er beskrevet for eksempel på sidene 84 og 90 i Journal of The Optical Society of America, A/Vol. 2, nr. 1, januar 1985.

Slik som vist på fig. 7, er lyseffekten ved den optiske koplingsbølgelengde mellom de to kjerner fordelt mellom kjernene i overensstemmelse med en i hovedsaken sinusformet kurve som oppnår 100% i én av kjernene i ett punkt på fiberen, og etter en avstand L_B , som er kjent som svevningslengden (beating length), oppnår 100% i den andre av kjernene, mens lyseffekten i et generisk eller felles avsnitt av fiberen er fordelt mellom de to kjerner i denne.

Overføringssignalet i kjernen 12 har på den annen side en bølgelengde λ_s som er forskjellig fra den bølgelengde ved hvilken kopling opptrer mellom de to kjerner 12 og 13, f.eks. lik 1550 nm, og det forblir således innesperret i kjernen 12 uten overføring til kjernen 13. På samme måte har det pumpende lys som tilveiebringes til kjernen 16 av kopleren 3, f.eks. ved en bølgelengde λ_p på 980 eller 540 nm, forplantningskonstanter ved hjelp av hvilke passering av lyset til kjernen 13 er utelukket innenfor dette avsnitt av fiberen 11, i hvilken kjerne fraværet av pumpingsenergi således er sikret.

I tillegg til det dopingsmiddel som bestemmer kjernens 13 ønskede brytningsindeksprofil, inneholder denne kjerne fortrinnsvis et dopingsmiddel som utgjøres av et materiale med høy lysabsorpsjon over hele spektret, eller i det minste ved emisjonstoppen for kjernens 16 dopingsmiddel, en kilde til støy slik som tidligere beskrevet, særlig ved toppen ved ca. 1536 nm når det dreier seg om anvendelse av erbium som laserdopingsmiddel.

Stoffer som er egnet for formålet, og som har høy lysabsorpsjon over hele spektret, er for eksempel beskrevet i europeisk patentsøknad nr. 88304182.4, og omfatter generelt grunnstoffer med variabel valens, såsom Ti, V, Cr, Fe, i deres laveste valenstilstand (Ti^{III} , V^{III} , Cr^{III} , Fe^{II}).

Blant stoffene med høy lysabsorpsjon ved en spesiell bølgelengde, dvs. ved bølgelengden for emisjonstoppen for dopingsmiddelet i kjernen 16 i den forsterkende fiber 15, hvilken bølgelengde det er nødvendig å eliminere, er det særlig bekvemt å benytte det samme dopingsmiddel som i ovennevnte aktive kjerne. Et fluorescerende stoff som forsynes med en tilstrekkelig mengde pumpingsenergi, oppviser i virkeligheten en viss emisjon ved en spesiell bølgelengde, mens det samme stoff, når det ikke forsynes

med pumpingsenergi, absorberer lys med den samme bølgelengde som den bølgelengde ved hvilken emisjon inntraff ved tilstedeværelse av pumpingsenergi.

Ved tilstedeværelse av en kjerne 16 som er dopet med 5 erbium, kan spesielt den andre kjerne 13 i fiberpartiet 11 hensiktsmessig også være dopet med erbium.

På denne måte, da absorpsjonskurven for erbium likner på dets fluorescens- eller laseremisjonskurve, som er vist på fig. 3, forekommer det ved toppen for stimulert emisjon, ved 10 1536 nm, en liknende absorpsjonstopp ved den samme bølgelengde.

Fluorescensen ved koplingsbølgelengden mellom kjernene, dvs. ved 1536 nm, som er blitt overført til kjernen 13, blir således ikke på nytt overført tilbake til kjernen 12 i hvilken overføringssignalet ledes, på grunn av at det inne i kjernen 13 15 kan være en i hovedsaken komplett demping av det innførte lys som absorberes av det tilstedeværende dopingsmiddel.

Emisjonen av den uønskede bølgelengde som er til stede i kjernen 16, kan således innføres i fiberpartiet 11 før den blir av for stor intensitet, og i dette fiberparti kan den uttrekkes 20 fra kjernen 12 og spres i kjernen 13, slik at den ikke fjerner pumpingsenergi fra forsterkningen av overføringssignalet som innføres av kjernen 12 i kjernen 16 i det etterfølgende parti av forsterkningsfiberen 15, og overlages på selve signalet.

For dette formål er det ifølge oppfinnelsen nødvendig 25 at avsnittet F av forsterkningsfiberen 15, som går foran et avsnitt av dobbeltkjernefiberen 11, som vist på fig. 4, har begrenset lengde for å unngå en overdreven økning i bakgrunnsstøy. Denne lengde avhenger av egenskapene til selve fiberen, og kort sagt av dens forsterkning. Forsterkeren ifølge oppfin- 30 nelsen sørger for at lengden F er slik at den fastlegger en maksimumsforsterkning på mindre enn 15 dB, og fortrinnsvis en forsterkning som varierer fra 1 til 5 dB, ved koplingsbølgelengden mellom kjernene, og spesielt ved 1536 nm.

Kjernen 12 i fiberpartiet 11 kan være uten noe fluores- 35 cerende dopingsmiddel, slik at hele forsterkningen er overlatt til partiene 15 av fiberen, eller den kan inneholde det samme dopingsmiddel som kjernen 16.

Lengden L_a av avsnittet av dobbeltkjernefiberen er på sin side større enn den forannevnte svevningslengde L_b .

Innholdet av dopingsmiddel med høy lysabsorpsjon som er til stede i avsnittet, er dessuten slik at det bestemmer en undertrykkelses- eller slokkelengde L for fiberens kjerne 13 som er minst én størrelsesorden mindre enn svevningslengden L_B , dvs.

5 $L < 1/10 L_B$ (slik det er kjent fra loven om forplantning av optisk effekt i et dempende medium: $P = P_0 e^{-\alpha L}$, hvor α er en koeffisient som avhenger av fiberens dempningsegenskaper og i hovedsaken av mengden av dempende dopingsmiddel som er til stede i denne. Etter en lengde L av fiber er lysenergien i fiberen

10 redusert med en faktor på $1/e$). Egenskapene til kjernen 13 er fortrinnsvis slik at den har en slokkelengde L som er to størrelsesordener mindre enn svevningsbølgelengden L_B .

Kjernen 13 kan også være uten noe dempende dopingsmiddel. Slik som vist på fig. 8, må avsnittet av dobbeltkjernefiber

15 11 i dette tilfelle være utført med en lengde $L_a = L_B$, slik at lyseffekten av den bølgelengde som skal elimineres, ved enden av den andre kjerne 13 er fullstendig overført inne i selve kjernen 13, slik at den ved overgangen til fiberen 15 er spredt i kledningen til selve fiberen 15.

20 En slik utførelse er bekvem, da det er mulig å unngå innføring av ytterligere dopingsmidler i dobbeltkjernefiberen, i tillegg til de som bestemmer dens brytningsindeksprofil, men på den annen side krever det en måling i snittet, og i forbindelsen av partiet 11 med den gjenværende aktive fiber, av en pluss-

25 eller minustoleranse t i forhold til verdien av svevningsbølgelengden L_B som ikke er større enn 10% av L_B , slik at det ved selve overgangen i det vesentlige sikres fravær av støybølgelengden i kjernen 12.

Dersom en slik toleranse bare kan oppnås med praktisk

30 vanskelighet, ved svevningslengder L_B som er under noen få cm, er det å foretrekke å benytte dempende stoffer i kjernen 13, slik som beskrevet foran.

Bestemmelsen av størrelsen av fiberpartiene 11 utføres slik at forplantningskonstantene i de to kjerner fører til en

35 kopling i det bånd som er sentrert rundt bølgelengden for toppemisjon (f.eks. 1536 nm), men uunngåelige fremstillingstoleranser kan føre til avvikelser fra den ønskede verdi.

For da å oppnå en finjustering av koplingsbølgelengden, skal partiene 11 av dobbeltkjernefiber i overensstemmelse med

oppfinnelsen være krummet i en bue, slik at det i fiberen frembringes indre spenninger som varierer dens lysforplantnings-egenskaper, og verdien av koplingsbølgelengden kontrolleres etter hvert som den pålagte krumning varierer, inntil det oppnås
5 overensstemmelse med verdien av den ønskede bølgelengde. For å opprettholde denne konfigurasjon, fastspennes fiberpartiene 11 til respektive støtteplater 17, som vist på fig. 9, f.eks. ved hjelp av et klebemiddel, slik at deres form opprettholdes på stabil måte.

10 Enkeltkjernefiber 15 som er inkludert mellom partiene av dobbeltkjernefiber 11, kan i overensstemmelse med aktuelle behov være anordnet inne i den kledning som omslutter forsterkeren, f.eks. ved oppvikling av fiberen i vindinger, uten at dette har noen innvirkning på forsterkerens oppførsel sett fra
15 synspunktet med separasjon av den bølgelengde som utgjør støyen, mens dobbeltkjernefibrene er stivt fastspent i den krumning som er mest passende for disse, slik som beskrevet foran, og beskyttet mot ytterligere påkjenninger.

Med det formål å sende videre et overføringssignal uten
20 støy til det etterfølgende avsnitt av ledningen 7 nedstrøms av forsterkeren, utgjøres det siste avsnitt av forsterkerens aktive fiber 6, i den retning som følges av overføringssignalet, hensiktsmessig av en dobbeltkjernefiber 11. For ledninger som skal benyttes på toveismåte, utgjøres begge ytterender av den
25 aktive fiber av avsnitt av dobbeltkjernefiber 11.

Fiberen ifølge oppfinnelsen utfører således en filtre-ringsvirkning av det lys som ledes i selve fiberen, idet den separerer og absorberer de fotoner ved 1536 nm som genereres på grunn av spontant fall fra laseremisjonsnivået av Er^{3+} -ioner,
30 slik at slike fotoner, som går videre i et langt avsnitt i den aktive kjerne ved tilstedeværelse av pumpingsenergi, hindres fra å forårsake ytterligere tilbakefall ved denne bølgelengde og i det vesentlige tillater forplantning i kjernen 12 bare av overføringsbølgelengden og av pumpingsbølgelengden. Overførings-
35 bølgelengden λ_s kan da velges over hele det område i hvilket erbium har en betydelig verdi av laseremisjon, f.eks. mellom verdiene λ_2 og λ_3 som er vist på fig. 3 (antydning å svare til ca. 1540-1560 nm). Dette tillater stor frihet i valg av lasersenderen for overføringssignalet, uten at det fremkommer forskjeller

i oppførsel med henblikk på forsterkning, med sendere for signaler med forskjellige bølgelengder og som er inkludert i et tilstrekkelig vidt område til å akseptere størstedelen av den kommersielle produksjon av halvlederlasere (In, Ga, As). På samme tid tillater utførelsen av dobbeltkjernefiberen i partier med redusert lengde en nøyaktig justering av koplingsbølgelengden, og tillater partiene å være i hovedsaken ufølsomme for mekaniske spenninger.

Som vist på fig. 5, har dobbeltkjernefiberen 11 fortrinnsvis kjernen 12, som benyttes til å lede det optiske signal, anordnet koaksialt inne i fiberens kledning 14, mens den andre kerne 13 er anordnet i en eksentrisk stilling.

Som vist på fig. 4, 7 og 8, kan forbindelsen mellom partiene av dobbeltkjernefiber 6, partiene av forsterkende fiber 15 og fibre 4 og 7 på denne måte utføres på tradisjonell måte, uten spesielle foranstaltninger, idet endene av selve fibre anordnes slik at de vender mot hverandre via de tradisjonelle overgangsanordninger, hvilket tilveiebringer innretting mellom fibre ved å kontrollere deres ytre overflater, til hvilken det svarer riktig innretting av kjernen 12 i dobbeltkjernefiberen, i en aksial stilling, med kjernene i enkeltkjernefibrene, uten noen vesentlige overgangstap. Kjernen 13, som befinner seg i en eksentrisk stilling, må ikke forbindes med andre kjerner og forblir således avbrutt ved endene av hvert parti av dobbeltkjernefiberen 11, uten å kreve noen ytterligere operasjoner.

For å oppnå den høyeste forsterkningsytelse, er kjernen 12 fortrinnsvis monomodal, både ved signalbølgelengden og ved pumpingsbølgelengden, og kjernen 13 er også monomodal i det minste ved bølgelengden λ_s .

Som et eksempel er det blitt bygget en forsterker ifølge risset på fig. 1, omfattende en aktiv fiber 6 av Si/Al-typen, som er dopet med Er^{3+} og er forsynt med dobbeltkjernepartier. Vektinnholdet av Er_2O_3 i enkeltkjernepartiene av fiberen var 40 ppm.

I hvert parti av dobbeltkjernefiber 11 hadde både kjernen 12 og kjernen 13 en radius $a = 3,1$ mm, en numerisk apertur $Na = 0,105$ og en brytningsindeks $n_1 = 1,462$. Atskillelsen av de to kjerner 12 og 13, vist på fig. 5, var $d = 3,5$ mm. Kjernen 12 var koaksial med fiberens ytre overflate.

Hvert parti 11 hadde en lengde $L_a = 100$ mm og var tilgrensende til en lengde F av forsterkende fiber på 5 m.

Kjernen 12 i hvert parti av dobbeltkjernefiber 11 inneholdt ikke noe erbium, mens kjernen 13 hadde et innhold av
5 Er_2O_3 på 2500 ppm.

Den aktive fiber hadde en total lengde på 30 m.

Som pumpende laser 5 ble det benyttet en argon-ione-laser som arbeidet ved en bølgelengde på 528 nm, med en effekt på 150 mW, mens det som signalsendende laser 2 ble benyttet en
10 halvlederlaser (In, Ga, As) av kommersiell type, med en effekt på 1 mW, og hvis emisjonsbølgelengde ble målt ved 1550 nm.

Nedstrøms av forsterkeren, med ovennevnte eksperimentelle utforming, ble det oppnådd en forsterkning på 20 dB på et inngangssignal som var dempet til en verdi på 0,5 W.

15 Dempningen av forsterkerens inngangssignal, som var egnet til å simulere en virkelig tilstand av forsterkerens anvendelse i en ledning, ble oppnådd ved hjelp av et variabelt dempeledd.

Ved fravær av et signal ble det nedstrøms av forsterkeren målt et nivå av spontan emisjon på 10 W.
20

En slik emisjon, som utgjør den bakgrunnsstøy som frembringes av forsterkeren, representerer ikke noen vesentlig støy for signalet som forsterkes til mye høyere nivåer (ca. 250 W).

25 Som en sammenlikning er den samme lasersender 2 som er beskrevet foran, blitt benyttet i kombinasjon med en forsterker med en konstruksjon som er identisk med konstruksjonen ifølge det foregående eksempel, men som benyttet en aktiv enkeltkjernefiber 6 av trinnindekstypen Si/Al, dopet med Er^{3+} , som inneholdt 40
30 vektdeler ppm av Er^{3+} i kjernen. Den aktive fiber hadde en lengde på 30 m.

En sådan forsterker, med et overføringssignal med en bølgelengde på 1560 nm, oppviste en forsterkning på mindre enn 15 dB med en spontan emisjon på et nivå som kunne sammenliknes
35 med nivået av utgangssignalet.

Slik det kan innses ut fra de gitte eksempler, har enkeltkjernefiberforsterkeren oppvist en redusert forsterkning ved tilstedeværelse av et signal på 1560 nm, mens den også innførte en støy slik at den gjorde det vanskelig å motta selve

signalet, og viste seg å være ubrukbar for praktisk anvendelse. Forsterkeren ifølge oppfinnelsen, som benytter en aktiv fiber som er forsynt med partier av dobbeltkjernefiber, med de to kjerner koplet til hverandre ved en bølgelengde som svarer til emisjons-
5 toppen for bakgrunnsstøyen, har på den annen side vist seg å være i stand til å tilveiebringe, med det samme signal på 1560 nm, en høy forsterkning, sammen med en neglisjerbar innført støy.

Anvendelse av forsterkere ifølge oppfinnelsen i en telekommunikasjonsledning tillater således ledningen å gjøres
10 egnet for overføring av signaler som genereres av lasersendere av kommersiell type, idet det for disse aksepteres en vid produksjonstoleranse, og det på samme tid sikres at forsterkningsoppførselen er i hovedsaken konstant og uavhengig av den virkelige emisjonsverdi for den benyttede signalsender.

15

20

25

P a t e n t k r a v

1. Optisk forsterker med bredt signalbånd, særlig for fiberoptiske telekommunikasjonsledninger som arbeider med et
30 overføringssignal i et forutbestemt bølgelengdebånd, omfattende en dikroisk kopler (3) som er egnet for multipleksing av et overføringssignal og pumpende lysenergi i en eneste utgående fiber (4), og en aktiv optisk fiber (6) som inneholder et fluorescerende dopingsmiddel og som er koplet til den dikroiske
35 koplers (3) utgangsfiber (4) og til en telekommunikasjonsledningsfiber (7) som er egnet til å motta og overføre et forsterket signal, **KARAKTERISERT VED** at den aktive optiske fiber (6) omfatter vekslende første og andre partier (11, 15), idet hvert første parti (11) utgjøres av en optisk fiber med to kjerner (12,

13), og hvert andre parti (15) utgjøres av en optisk fiber med én kjerne (16) som inneholder det fluorescerende dopingsmiddel, idet de første kjerner (12) i de første partier er optisk koplet til kjernene (16) i de andre partier, og de andre kjerner (13) i de første partier er avbrutt ved endene av de første partier, idet de to kjerner (12, 13) i de første partier er optisk sammenkoplet i et forutbestemt bølgelengdebånd som er inkludert i bølgelengdeområdet for laseremisjonen til det fluorescerende dopingsmiddel og forskjellig fra overføringssignalbåndet, slik at emisjon i det forutbestemte bølgelengdeområde, som utgjør bakgrunnsstøy i forhold til overføringssignalet, i det vesentlige overføres fra den første kjerne til den andre kjerne i hvert første parti.

2. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at den andre kjerne (13) i hvert første parti (11) av den aktive optiske fiber (6) inneholder et dopingsmiddel med høy lysabsorpsjon i laseremisjonsområdet til den aktive fibers dopingsmiddel.

3. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 2, **KARAKTERISERT VED** at dopingsmiddelet med høy lysabsorpsjon som er inneholdt i den andre kjerne (13), utgjøres av det samme fluorescerende stoff som det som er til stede i den aktive fiber (6).

4. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at den første kjerne (12) i hvert første parti (11) av den aktive optiske fiber (6) inneholder et fluorescerende dopingsmiddel.

5. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at den første kjerne (12) i hvert første parti (11) av den aktive optiske fiber (6) er uten noe fluorescerende dopingsmiddel, slik at hele forsterkningen er overlatt til de andre partier (15) av den aktive fiber (6).

6. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at det fluorescerende dopingsmiddel som er til stede i den aktive fiber (6), i det minste i dens andre partier (15) som har en eneste kjerne, er erbium.

7. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 2, **KARAKTERISERT VED** at dopingsmiddelet som er til stede i den andre kjerne (13), er et stoff som har høy lysabsorpsjon over hele laseremisjonsområdet til den aktive fibers dopingsmiddel, og er

valgt blant titan, vanadium, krom eller jern, som er til stede i det minste delvis i sin laveste valenstilstand.

8. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at lengden (L_a) av hvert første parti (11) er lik eller større enn svevningslengden (L_b) mellom partiets første og andre kjerner (12, 13) som er koplet i det valgte koplingsbånd mellom kjernene.

9. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at innholdet av dopingsmiddel med høy lysabsorpsjon i den andre kjerne (13) og koplingsegenskapene til fiberkjernene (12, 13) er korrelert, slik at det i den andre kjerne fastlegges en slokkelengde som er mindre enn 1/10 av svevningslengden mellom de koplede kjerner.

10. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 8, **KARAKTERISERT VED** at den andre kjerne (13) er uten noe lysabsorberende dopingsmiddel, og hvert første parti (11) har en lengde (L_a) som er lik et helt multiplum av én svevningslengde (L_b), med en toleranse på 10% av selve svevningslengden.

11. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 6, **KARAKTERISERT VED** at de første og andre kjerner er optisk koplet til hverandre mellom 1530 og 1540 nm.

12. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at den første kjerne (12) i det første parti (11) er anordnet koaksialt med den ytre overflate av fiberen som danner det første parti, og ligger på linje med kjernene (16) i de andre partier (15) av den aktive fiber (6) og med kjernene i de fibrer (7) til hvilke forsterkeren er tilkoplet, mens den andre kjerne (13) ved sine ender vender mot kledningsmaterialet (15) til de tilstøtende fibrer.

13. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at i det minste den første (12) av de to kjerner (12, 13) i de første partier (11) er egnet til å tillate monomodal lysutbredelse ved overføringsbølgelengden og ved pumpingsbølgelengden.

14. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at den aktive fiber (6) har andre partier som inneholder fluorescerende dopingsmiddel og er innesluttet mellom to fortløpende, første partier (11) med en lengde (F) som ikke er større enn den lengde som svarer til en maksimalt oppnåelig

forsterkning på 15 dB ved koplingsbølgelengden mellom de første og andre kjerner (12, 13) i de første partier (11).

15. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 14, **KARAKTERISERT VED** at de andre partier (15) som inneholder
5 fluorescerende dopingsmiddel og er innesluttet mellom to fortløpende, første partier (11), har en lengde (F) som ikke er større enn den lengde som svarer til en forsterkning på mellom 1 og 5 dB ved koplingsbølgelengden mellom de første og andre kjerner (12, 13) i de første partier (11).

10 16. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at minst én ytterende av den aktive fiber (6) utgjøres av et første parti (11).

17. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at de første partier (11) er mekanisk bøyelige
15 for finjustering av koplingsbølgelengdebåndet mellom de første partiers første og andre kjerner.

18. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 1, **KARAKTERISERT VED** at hvert første dobbeltkjerneparti (11) er stivt fastspent til en respektiv støtteplate (17) som er i
20 hovedsaken udeformerbar under driftstilstander.

19. Bredbåndet optisk forsterker ifølge krav 17 eller 18, **KARAKTERISERT VED** at hvert første parti (11) er stivt fastspent til den respektive støtteplate (17) i en krumnings-
tilstand som svarer til det ønskede koplingsbølgelengdebånd
25 mellom partiets første og andre kjerner (12, 13).

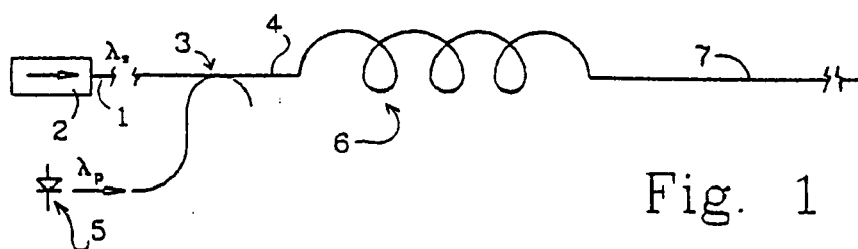


Fig. 1

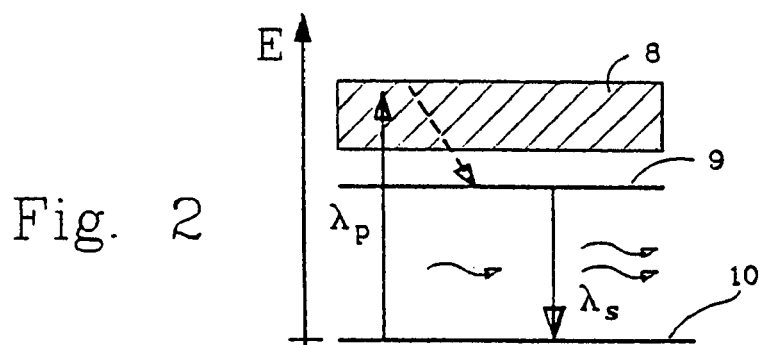


Fig. 2

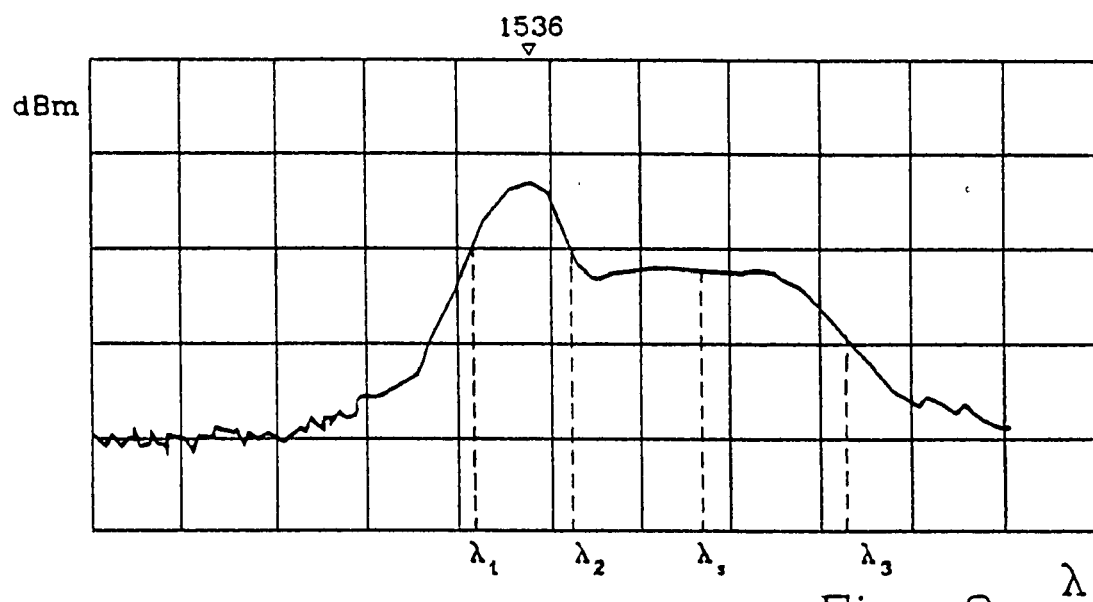


Fig. 3

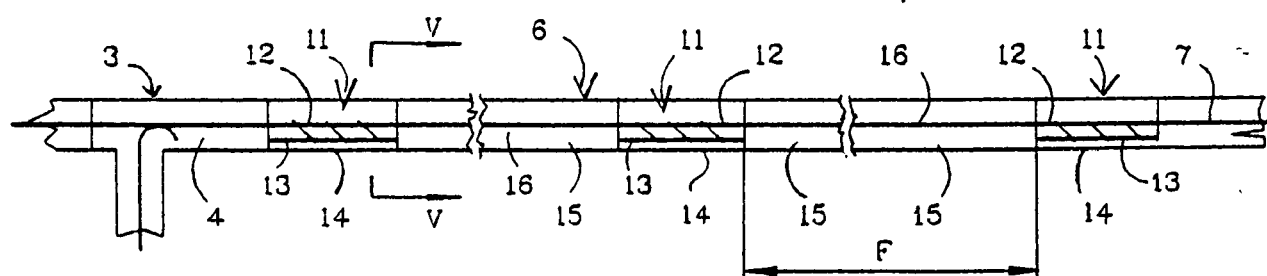


Fig. 4

