

FoU N 53/2002

Aasmund Sudbø

Nettaspekt ved Ramanforsterkarar



FoU Notat **N 53/2002**
Tittel **Nettaspekt ved Ramanforsterkarar**

ISBN
ISSN **0809-1021**
Prosjekt nr **IXTN24**
Program **Internett Nettverksarkitektur**
Gradering **OPEN**
Sidetal
Dato **2002.10.25**

Forfatter(ar)
Aasmund Sudbø

Emneord

Samandrag

Samanlikna med den meir velutvikla erbiumdopa fiberforsterkaren kan ramanforsterkaren gjeva forbetringar av eit optisk telenett: Større rekkevidde i WDM-system, til over 1000 km med ein kanalbitrate på 10 Gbit/s, og auka kanalbitrate, frå 10 til 40 Gbit/s, utan nye mellomforsterkarar i nettet. Føresetnaden er at ein tek i bruk transmisjonsfiberen for ramanforsterking. Rapporten er ei vurdering av eigenskapane til ramanforsterkaren med omsyn på dei krava vi har til ein forsterkar som skal fungere i eit optisk nett. Vi ser på spektral- og støyeigenskapar, polarisasjonsavhengig og tidsavhengig forsterkning, linearitet og krysstale mellom WDM-kanalar.

Title **Fiber Raman Amplifiers in Optical Networks**

Abstract

When compared the more developed erbium doped fiber amplifier, Fiber raman amplifiers may improve optical networks. The most important improvements are increased regenerator spacing in WDM transmission systems, to more than 1000 km with a channel bit rate of 10 Gbit/s, and increased channel bit rate, from 10 to 40 Gbit/s, without the need to introduce additional line amplifiers. These improvements require the transmission fiber to be used for Raman amplification. The report is an evaluation of the fiber Raman amplifier as an optical networking element. Spectral and noise properties are reviewed, as well as polarization sensitivity, transient response, linearity, and WDM channel cross talk.

ã Telenor Communication AS 2002.10.25

Det må ikkje kopierast frå denne rapporten utover det som er tillate i "Lov om opphavsrett til åndsverk", "Lov om rett til fotografi" og "Avtale mellom staten og rettighetshavernes organisasjoner om kopiering av opphavsrettslig beskyttet verk i undervisningsvirksomhet".

Innhald

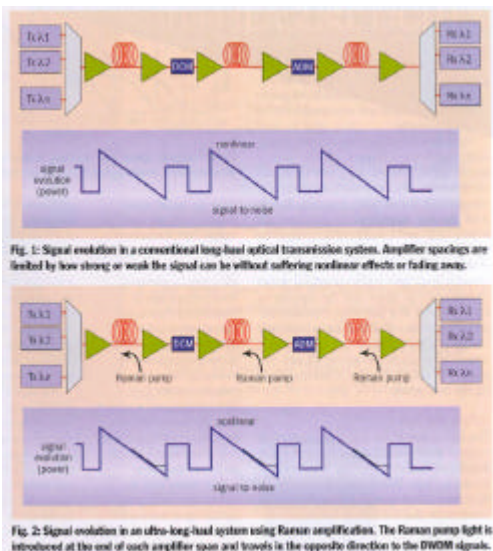
Forord.....	1
1 Innleiing.....	2
2 Senterfrekvens og bandbreidde.....	4
3 Forsterkingsspekteret.....	5
4 Støy i ramanforsterkarar.....	6
5 Ulineær forvrenging.....	8
6 Polarisasjonsavhengig forsterkning.....	9
7 Inn- og utkopling av WDM-kanalar.....	10
8 Konklusjon.....	11
9 Referansar.....	12

Forord

Notatet er eit bidrag i prosjekt IXTN24, «Raman og PMD», på oppdrag frå Telenor Nett.

1 Innleiing

Ramanforsterkaren (eng. *fiber Raman amplifier*, FRA) har blitt eit interessant alternativ [13], [14] til den erbiumdopa fiberforsterkaren (eng. *erbium doped fiber amplifier*, EDFA) i fiberoptiske transmisjonsnett. Det er to forbetringar av nettet som ein kan få til med hjelp av ramanforsterkaren: Større rekkevidde i WDM-system, til over 1000 km med ein kanalbitrate på 10 Gbit/s, og auka kanalbitrate, frå 10 til 40 Gbit/s, utan nye mellomforsterkarar i nettet. Mekanismen i desse forbetringane er vist i figur 1.



Figur 1: Effektnivået som funksjon av avstand langs eit transmisjonssystem (blå felt) utan (øverst) og med (nedast) bruk av ramanforsterking i transmisjonsfiberen. Når ein sender ramanpumpelys inn på transmisjonsfiberen, får ein forsterking i fiberen, mest nær pumpen (© Fiber Systems Europe, juli 2001)

Optisk signal-til-støy-forhold (eng. *optical signal-to-noise ratio*, OSNR) i eit transmisjonssystem er i hovudsak fastlagt av den lågaste effekt signalet har langs fiberen. Med bruk av transmisjonsfiberen for forsterking, slik ein kan ha med ramanforsterkar (TFRA), kan ein auke denne minimumseffekten, og dette er grunnen til forbetringane som vi får med ramanforsterkaren i høve til ein diskret forsterkar som EDFA. Det er verd å merke seg at denne gevinsten får ein ikkje med bruk av diskret ramanforsterkar (DFRA), for eksempel om ein brukar fiberen i ein dispersjonskompensasjonsmodul som ramanforsterkar.

Her skal vi sjå på eigenskapane til ramanforsterkaren med omsyn på dei krava vi har til ein forsterkar som skal fungere i eit optisk nett. Vi skal sjå på fylgjande krav:

1. senterfrekvens og bandbreidde
2. flatt forsterkingsspektrum

3. liten tilleggsstøy
4. lite ulinearitetar
5. ikkje polarisasjonssensitiv
6. tole utfall og innkopling av WDM-kanalar utan transientar

Viktige eigenskapar som ikkje blir vurdert i rapporten, er det at ein i eit nett ynskjer å ha mest mogeleg faste forsterkarar (ikkje justerbare), og helst ikkje for mange variantar av det som bare skulle vera ein systembyggekloss, for eksempel optisk forsterkar.

Vi vil også vise til det som står om ramanforsterkarar i tidlegare FoU-rapportar [1], [2], og til litteraturlistene i desse rapportane.

Vi skal gå ut frå at fiberkabelnettet til Telenor i hovudsak vil vera kabel som nå alt er installert. Med den overinvesteringa som har vore i fibeinfrastruktur i Europa i fleire år, vil det i mange år framover stort sett vera billegare å kjøpe brukt enn å legge ny kabel.

2 Senterfrekvens og bandbreidde

Det mest interessante bølglengdeområdet for fibertransmisjon er området mellom 1500 og 1600 nm, der svekkingskoeffisienten til fiberen er nær minimum. Denne svekkingskoeffisienten har fastlagt forsterkaravstanden i eksisterande kabelnett, og slike nett vil ha enkeltstrekk som er så lange at det å taka i bruk bølglengder med vesentleg større svekkingskoeffisient vil krevje ekstra mellomforsterkarar. Slike forsterkarar kan bli svært dyre, fordi ein må bygge nye hus for dei. I dag kan ein nesten dekke det aktuelle bølglengdeområdet med C- og L-bandsforsterkarar av EDFA-type. Med ein FRA kan ein kanskje dekke eit litt større område enn C- og L-bandet til saman, og kanskje litt betre sentrert rundt minimum i svekkingsspekteret. Men gevinsten med å taka i bruk FRA for å auke bandbreidda er nokså liten.

Dersom fibernettet har svært få lange strekk, slik at ein kan taka i bruk eit større bølglengdeområde enn 100 nm, treng ein andre forsterkartyper enn EDFA. Ein ramanforsterkar kan dekke kva område på ca. 100 nm det skal vera, bare ein har rett bølglengde på pumpelaserane [7]. Leverandørar av pumpelaserar kan truleg på eit par års varsel levere laserar på kva bølglengde det skal vera mellom 1200 og 1600 nm, dersom nokon vil betala for utviklinga. Men FRA har ei ulempe samanlikna EDFA: Parallellkopling av forsterkarar, som ein kan bruke med EDFA for å dekke C- og L-bandet samtidig, er ikkje mogeleg når ein skal bruke transmisjonsfiberen for forsterking. Det er vanskeleg å tenkje seg korleis ein med ein FRA skal kunne dekke ei bandbreidde på stort meir enn 100 nm på ein og same transmisjonsfiberen.

Med FRA kan ein altså få forsterking i optiske frekvensområde som ein ikkje kan nå med EDFA [16]. For dette formålet kan diskrete ramanforsterkarar (DFRAs) vera aktuelle. Dispersjonskompensasjonsfiber (DCF) er truleg den mest aktuelle fibertypen å bruke for slike formål, sidan ein ofte må bruke slik fiber i optiske transmisjonssystem, og pumpeeffektane som trengst i slik fiber er moderate, sidan det effektive arealet vanle gvis er lite i slik fiber. Ei ulempe med lite effektivt areal er at støy frå dobbel rayleighspreiing er eit større problem enn i ein fiber med større effektivt areal (sjå nedanfor).

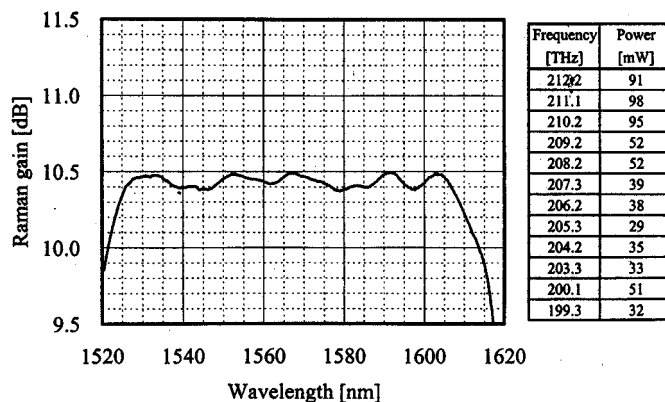
3 Forsterkingsspekteret

Eit flatt forsterkningsspektrum er svært viktig for ein forsterkar som skal gå inn i nettet. Dersom forsterkaren har flatt spektrum kan ein kople mange i serie utan utjamnar, og ein treng ikkje tenkje på kor mange forsterkarstrekk det er mellom knutepunkta i nettet.

Med ramanforsterkar kan ein oppnå eit svært flatt forsterkarspektrum, dersom ein brukar mange pumpelaserar på ulike frekvensar, med optimalisert fordeling av pumpeeffektane [9]. Ein kan også til ein viss grad bruke ein ramanforsterkar som utjamnar for feil i effektfordelinga, for eksempel overføring av effekt på grunn av stimulert ramanspreiing mellom WDM-kanalar i system med mange kanalar og stor totaleffekt [4].

Dei beste eksperimentelle resultatane om utjamna FRAs kjem frå Furukawa [6], [9]. Figur 2 viser at med 12 pumpelaserar og dispersjonsskift fiber (type DSF) har dei greidd å få til ei forsterking på $10,44 \pm 0,06$ dB innanfor ei bandbreidde på over 80 nm. Det å optimalisere pumpeeffektar og pumpebølgjelengder er ikkje ei triviell oppgåve i slike forsterkarar, og tema for grundig analyse og simulering i [4], [5].

Ein praktisk FRA for bruk i nettet vil typisk måtta vera meir kompleks enn ein EDFA, med fleire pumpelaserar og krav om større total pumpeeffekt (typisk ein faktor 10 større enn for EDFA) for å få oppnå ei spesifisert forsterking. Og sjølv om ein FRA kan gjeva noko spektralutjamning er det ingen generell WDM-utjamnar som kan justere nivået på ein vilkårleg WDM-kanal til ynskt nivå.



Figur 2 (frå [9]): Forsterkingsspektrum for ramanforsterkar basert på dispersjonsskift fiber (25 km DSF), med tilhøyrande frekvensar og effektar for 12 pumpelaserar.

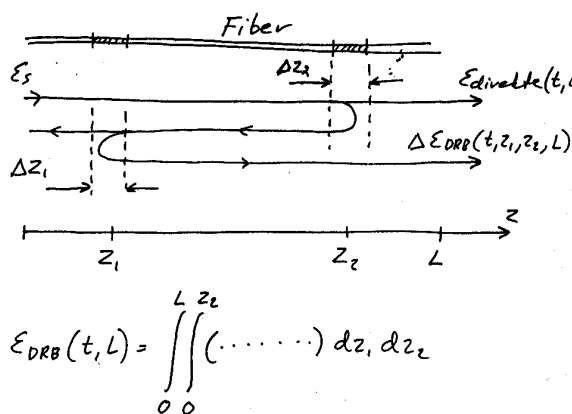
4 Støy i ramanforsterkarar

Ein ideell optisk forsterkar har eit støytalet på minst 3dB ved stor forsterkning [10], dvs at optisk signalkil-støy-forhold (OSNR) på utgangen er forsterkaren er 3dB mindre enn på inngangen, når ein på inngangen reknar med haglstøyen, som ein får med å rekne at lyset er ein tilfeldig straum av partiklar (foton). Dette gjeld både EDFA og FRA, når ein som inngang på forsterkaren reknar den posisjonen langs transmisjonssystemet der lyset er svakast. For ein diskret forsterkar (EDFA eller raman) er denne posisjonen (sjå figur 1) vanlegvis rett før forsterkaren. Ser vi på ein bakoverpumpa TFRA med ei forsterkning lik fibersvekinga vil denne posisjonen vera om lag ei svekkingslengde (20 km i vanleg transmisjonsfiber) frå mottakaren. (Ein må ha bakoverpumping for å hente ut støygevinsten med TFRA i høve til ein diskret forsterkar.).

Sidan det ikkje er nokon støygevinst med å bruke ein diskret FRA samanlikna med ein EDFA, er det uvisst om diskret FRA vil kunna utkonkurrere EDFA.

Ein EDFA pumpa med 980 nm bølglengde vil kunna vera nær ideell, med 3dB tilleggsstøy, medan ein FRA med utjamna frekvensrespons vil ha endå 1-2 dB tilleggsstøy i høve til ein EDFA [4]. Grunnen er at ein slik FRA må ha nokre pumpelaserar med frekvens nokså nær signalfrekvensområdet. Det er grunnleggande fysikk at dersom avstanden mellom pumpe- og signalfrekvensen ikkje er stor samanlikna med kT/h (lik 6,1 THz ved romtemperatur, $T = 293$ K), vil ein optisk forsterkar ha tilleggsstøy i tillegg til dei ideelle 3 dB. Einaste botemiddelet er å kjøle forsterkarfiberen, og det er uaktuelt dersom fiberen er transmisjonsfiber.

Den viktigaste kjelden til tilleggsstøy når ein brukar transmisjonsfiberen som forsterkar er **dobbel rayleighspreiing** [12], [11] (DBRS, eng. *double Rayleigh backscattering*, sjå figur 2).



Figur 2: Dobbel rayleighspreiing. Kvar liten fiberstubb spreier litt lys i alle retningar, såkalla rayleighspreiing. Ein liten brøkdel av det spreidd lyset blir fanga opp av fiberkjernen og sendt tilbake mot lyskjelden. Denne spreingsprosessen skjer pånytt, og gjev spreidd lys som er forsinka og går i same retning som det innsende lyset i fiberkjernen.

Dersom det ikkje er forsterking langs fiberen, er det dobbeltspreidde lyset svært svakt, i ein lang fiber 50-60 dB svakare enn det innsende. Når ein har forsterkning i fiberen blir det direktesende lyset forsterka ein gong, medan noko av det dobbeltspreidde lyset blir forsterka tre gonger, og kan bli like sterkt som det direktesende lyset, om forsterkninga er stor nok. Det dobbeltspreidde lyset har same frekvens som det innsende, men er forsinka, og forstyrrar for mottak av det direktesende lyset. I ein EDFA treng ein ikkje tenkje på DBRS, men i ein FRA er dette ein viktig støykjelde, og analysen i [11] visar at for den dispersjonsskifte fibertypen som er modellert er det ikkje optimalt å hente ut meir enn mellom 10 og 15 dB forsterking av ein FRA.

Ein parameter som er viktig for å avgjera kor mykje forsterking ein kan hente ut er det effektive arealet A_{eff} til fiberen. A_{eff} varierer ein god del mellom ulike vanlege transmisjonsfibertyper, frå under $55 \mu\text{m}^2$ i somme typer dispersjonsskifte fiber (ITU type G.655), til nær $80 \mu\text{m}^2$ i standardfiber (type G.652). Den delen av det rayleighspreidde lyset som blir fanga opp av fiberkjernen er omvendt proporsjonalt med A_{eff} , og det same er tilfelle med ramanforsterkingskoeffisienten. Generelt vil ein fiber med større A_{eff} kunna gjeva meir forsterking [12], men krev større pumpeeffekt for å oppnå ei viss forsterking. Dei fleste som har rapportert modellering eller eksperiment med ramanlaserar har sett på fibrar med lite effektivt areal, fordi det ikkje er lett å skaffe pumpelaserar med stor nok effekt til til å eksperimentere med.

10-15 dB forsterking kan vera nok for å kompensere for tapet i eit fiberstrekk på 50 km, men ikkje i 100 km. For å redusere problemet med DRBS kan ein då plassere ein isolator (for framoverpumping) eller frekvensselektiv sirkulator (for bakoverpumping) [12], om lag ei halv svekkingslengde frå pumpen, om lag 10 km i vanleg transmisjonsfiber. I utgangspunktet ville det synast realistisk å skulla ettermontere dette på ein installert landkabel, sidan det er snakk om ein passiv komponent med moderate miljøkrav. Det er kanskje ikkje fullt så praktisk å gjera på ein installert sjøkabel.

5 Ulineær forvrenging

Både EDFA og FRA er i seg sjølv svært lineære forsterkarar, og ulineær signalforvrenging som sjølvfasemodulasjon (SPM), kryssfasemodulasjon (CPM) og firebølgjemiksing (FWM) kjem vanlegvis frå transmisjonsfiberen og ikkje frå forsterkaren. Den ulineære effekten som er viktigast i fiberforsterkarar er vanlegvis metning, det at forsterkinga minkar når ein prøvar å hente ut meir signaleffekt enn det som er tilgjengeleg frå pumpen. Sidan pumpeeffekten som ein treng for å oppnå ei viss forsterking er langt større i ein FRA enn i ein EDFA, vil ein vanlegvis ikkje møte metning som eit problem med FRA i same grad som med EDFA. Men sidan den totale optiske effekten i ein ramanforsterkar (signal- og pumpeeffekt til saman) er så stor, kan uynskt ramanforsterkning vera eit problem, f.eks at dei høgaste pumpefrekvensane ikkje bare forsterkar signalfrekvensane, men også dei lågaste pumpefrekvensane. Dette er analysert i detalj i [4].

Sjølvfasemodulasjon er den ulineære effekten som ein alltid møter i optiske transmisjonssystem. Utan forsterkning langs transmisjonsfiberen er signalet sterkast på inngangen, og blir svekka eksponensielt langs fiberen, med ein faktor $e = 2,71$ etter ei svekkingslengde, som i vanleg transmisjonsfiber er om lag 20 km. Sjølvfasemodulasjon er ei signalforvrenging i kvar enkelt WDM-kanal som er proporsjonal med den optiske inngangseffekten i kanalen gonger svekkingslengda, dersom fiberen er lenger enn svekkingslengda.

For ein framoverpumpa FRA kan effektfordelinga langs fiberen lagast nokså flat, slik at inngangseffekten kan reduserast og dermed sjølvfasemodulasjonen, utan at minimumseffekten langs fiberen blir redusert. Dette er viktig, sidan minimumseffekten fastlegg støyen i forsterkaren. Dersom ein tek omsyn til ulinær signalforvrenging kan det såleis vera ein gevinst ved å bruke både framover- og bakoverpumping [11].

Dersom ein skal få så lite ulineær forvrenging som mogeleg for eit gitt OSNR, er det beste å få til så lite variasjon i den optiske effekten som mogeleg langs transmisjonsfiberen, slik at effekten heile vegen bare er litt større enn den minimale som trengst for å oppnå eit visst OSNR. Dette er utnytta i den systemoptimaliseringa som er gjort i [8], [11], [17].

6 Polarisasjonsavhengig forsterkning

I utgangspunktet har ramanforsterkaren svært polarisasjonsavhengig forsterkning, fordi pumpen og signalet må ha same polarisasjonstilstand at for at vi skal få forsterkning. Med den tilfeldige, varierende og ukjende polarisasjonstilstanden som signallyset har langs transmisjonsfiberen blir ei løysing å la polarisasjonstilstanden til pumpen variere tilfeldig i høve til tilstanden til signalet langs fiberen. Det vil vanlegvis vera tilfelle i ein bakoverpumpa ramanforsterkar, som dermed har lite polarisasjonsavhengig forsterkning. For ein framoverpumpa forsterkar kan ein derimot godt tenkje seg at når pumpe- og signalpolarisasjonane er like på fiberinngangen kan dei vera like innover i fiberen der signalet blir forsterka. Då har vi ein forsterkar med svært polarisasjonsavhengig forsterkning. For å bli kvitt denne må vi bruke ein godt depolarisert pumpe, som diskutert, for eksempel i [19]. Ein transmisjonsfiber med stor polarisasjonsmodusdispersjon (PMD) vil også gjeva effektivt sett ein depolarisert pumpe, men vi har samtidig krav om at PMD skal vera liten av omsyn til signalforvrenging, og normalt er ikkje PMD ein parameter vi har kontroll med utover det at vi gjerne vil minimalisere han. Dette er analysert gjennom simuleringar i [20].

7 Inn- og utkopling av WDM-kanalar

Alle forsterkarar har metningseffektar når total uteffekt ikkje er liten samanlikna med pumpeeffekten. Som nemnt ovanfor så vil metningseffektar generelt vera mindre for ramanforsterkarar (FRA) enn for EDFA, fordi pumpeeffekten som trengst for å gjeva ei viss forsterkning er mykje større for ein FRA enn for ein EDFA. Ein slik metningseffekt er at forsterkninga er avhengig av kor mange WDM-kanalar som er slått på. Problemetstillinga er analysert i [21]. Eit problem med EDFA-rekker er at når ein koplur inn mange WDM-kanalar samtidig på inngangen til forsterkarrekka vil ein få ein effekttopp ut av den fyrste forsterkaren idet ein slår på kanalane, og denne toppen veks gjennom kvart nytt forsterkarsteg. Dette problemet ser ut til å vera mindre med FRA-rekker [15], [18].

8 Konklusjon

Samanlikna med den meir velutvikla erbiumdopa fiberforsterkaren kan ramanforsterkaren gjeva forbetringar av eit optisk telenett: Større rekkevidde i WDM-system, til over 1000 km med ein kanalbitrate på 10 Gbit/s, og auka kanalbitrate, frå 10 til 40 Gbit/s, utan nye mellomforsterkarar i nettet. Føresetnaden er at ein tek i bruk transmisjonsfiberen for ramanforsterking. Rapporten er ei vurdering av eigenskapane til ramanforsterkaren med omsyn på dei krava vi har til ein forsterkar som skal fungere i eit optisk nett. Vi ser på spektral- og støyegenskapar, polarisasjonsavhengig og tidsavhengig forsterkning, linearitet og krysstale mellom WDM-kanalar.

I dag kan ein dekke stort sett det same frekvensområdet med to parallellkopla erbiumdopa fiberforsterkarar som ein kan med ein ramanforsterkar, i underkant av 100 nm. Ramanforsterkaren kan i prinsipp dekke andre frekvensområde enn det som erbium kan gjeva, for eksempel bølgjelengder kortare enn 1500 nm. Skal ein oppnå større bandbreidde enn 100 nm, må ein kople forsterkarar i parallell, og då kan ein ikkje bruke transmisjonsfiberen for forsterkning.

Når ein brukar transmisjonsfiberen som forsterkar, slik ein gjer med ramanforsterkaren, kan redusere støyen på signalet samanlikna med om ein har ein optisk forsterkar montert i enden av transmisjonsfiberen. Slik gjev ramanforsterkar mindre støy enn erbiumforsterkar. Både ramanforsterkar og erbiumforsterkar har eit grunnleggande støytal på minimum 3dB, slik at støyen aukar med minst 3dB for kvart forsterkartrinn, og dette set grenser for talet på forsterkarar i ei rekke. Ramanforsterkaren har ein støymekanisme som erbiumforsterkaren ikkje har, dobbel rayleighspreiing, og denne støymekanismen set grenser for kor stor forsterkning ein kan ha i ein enkel ramanforsterkar. Grensa er typisk under 20dB, lågast for fiber med lite effektivt areal.

Ramanforsterkaren krev i utgangspunktet at pumpe og signal har same polarisasjon, så forsterkninga er svært polarisasjonsavhengig. Denne avhengigheten blir vanlegvis midla ut i bakoverpumpa forsterkarar, fordi polarisasjonen varierer nok langs fiberen.

Generelt kan ramanforsterkaren vera meir lineær enn erbiumforsterkaren. Med ramanforsterkarar kan ein hindre at signalet varierer så mykje langs transmisjonsfiberen som det gjer med erbiumforsterkarar, fordi ein kan kompensere for fibersvekkinga i sjølve transmisjonsfiberen. Då kan ein redusere maksimal optisk effekt i fiberen, og slik redusere alle ulineære optisk effektar. Ein annan forskjell mellom erbium- og ramanforsterkarar ligg i pumpeeffekten, som vanlegvis er mykje større i ramanforsterkarar, slik at ulinearitetar som har å gjera med metning i forsterkaren blir mindre.

9 Referansar

- [1] de Vree, G., Kleivstul, A., Nord, M., Olsen, T., Slagsvold, B.J., Sudbø, A., Optical Fibre Transmission of 40 Gbit/s, *Telenor FoU-rapport R 16/2002*.
- [2] Nord, M., Sudbø, A., Slagsvold, B.J., Evaluering av fibertyper for transmisjon av 40 Gbit/s, *Telenor FoU-rapport R 2/2002*.
- 1 [3] Desurvire, E. "Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Principles and Applications," Wiley, New York 1994, ISBN 0471589772.
- [4] Perlin, V.E. and Winful, H.G., *On distributed Raman amplification for ultrabroad-band long-haul WDM systems*, J. Lightwave Technol., s. 409 – 416, bind 20, Mars 2002.
- [5] Mori, A., Masuda, H., Shimizu, M., *Ultra-wide band tellurite-based fibre Raman amplifiers*, ECOC2002 bidrag S3.01, European Conference on Optical Communication (ECOC), København, 8-12 september 2002.
- [6] Emori, Yoshihiro, *Ultrabroadband Fiber Raman amplifiers*, ECOC2002 bidrag S3.02
- [7] Rottwitt, K., Bromage, J., Leng, L., *Scaling the Raman gain coefficients of optical fibers*, ECOC2002 bidrag S3.03
- [8] Bouteiller, J. C., Brar, K., Headley, C., *Quasi-constant signal power transmission*, ECOC2002 bidrag S3.04
- [9] Namiki, S. og Emori, Y., *Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes*, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., s. 3-16, bind 7, januar/februar 2001.
- [10] Haus, H. A., *Optimum noise performance of optical amplifiers*, IEEE J. Quantum Electron, vol.37, pp. 813-823, Juni 2001.
- [11] Essaimbre, R. J., *Effects of Raman noise and double Rayleigh backscattering on bi-directionally Raman-pumped systems at constant fibre nonlinearity*, European Conference on Optical Communication (ECOC), Amsterdam, 30 september-4 oktober 2001.
- [12] Fludger, C. R. S. and Mears, R. J., *Electrical measurement of multipath interference in distributed Raman amplifiers*, J. Lightwave Technol., s. 536-545, bind 19, april 2001.
- [13] Nissov, M., Kidorf, H. D., Foursa, D. G., *Raman amplification in ultra long-haul systems*, ECOC2002 bidrag S3.06
- [14] Chbat, M. W., Fevrier, H. A., *Low-cost, high-capacity ultra-long-haul WDM systems based on wide-band Raman amplification*, ECOC2002 bidrag S3.07
- [15] Schulze, E., Malach, M., Raub, F., *Dynamics of All-Raman Amplified Links in Comparison to EDFA-Links*, ECOC2002 bidrag S3.08
- [16] Thiele, H. J., Bromage, J., Nelson, L., *Impact of Discrete Raman Amplifier Architecture on Nonlinear Impairments*, ECOC2002 bidrag S3.09
- [17] Davenet, M., Le Guen, D., Billès, L., Georges, T., Manach, L., Favre, F., Merlaud, F., *Experimental investigation of performance improvement by co-propagating Raman amplification in repeaterless systems*, ECOC2002 bidrag S3.10

- [18] Sugaya, Y., Muro, S., Sato, Y., Ishikawa, E., *Suppression method of transient power response of Raman amplifier caused by channel add-drop*, ECOC2002 bidrag 05.2.3
- [19] Matsushita, S., Shinozaki, J., Emori, Y., Namiki, S., *Design of temperature insensitive depolarizer for Raman pump laser diode*, Optical Fiber Communication Conference (OFC2002), bidrag WB3.
- [20] Kee, H.H., Fludger, C.R.S., Handerek, V., *Statistical properties of polarization dependent gain in fiber Raman amplifiers*, Optical Fiber Communication Conference (OFC2002), bidrag WB2.
- [21] Bononi, A. and Papararo, M., *Transient gain dynamics in saturated counter-pumped Raman amplifiers*, Optical Fiber Communication Conference (OFC2002), bidrag ThR1.