

波長多重励起光源を用いた広帯域WDM 伝送用ラマン増幅器の開発

Development of Raman Amplifier Suitable for Broadband WDM Transmission Using a Multi-Wavelength Pump Source

江森 芳博*
Yoshihiro Emori

並木 周*
Shu Namiki

概要 波長多重励起方式によるラマン増幅器の利得特性が各励起波長から発生する利得の重ね合わせで表現できることを確認し、これを用いた合成利得の設計方法を開発した。一例として、1 THz間隔をベースとした波長多重励起方式を用いたラマン利得の平坦化設計を示し、1 THz間隔のグリッド波長の中から選択された12波長を多重化した励起ユニットを用いて1527 nmから1607 nmの帯域において0.1 dBの平坦度をもつラマン利得を実現した。また、新たな波長を追加することによって利得帯域を拡張することを考えた場合に、利得平坦度を維持しながら帯域が拡張できるような追加波長の選択指針を示した。

1. はじめに

コンピュータの性能向上、低価格化が進み、すべての情報がデジタル化される方向へ向かっている。この流れは、インターネットの普及との相乗効果により、世界の通信網を流れる情報量を飛躍的に増大させている。この傾向は北米において最も顕著に現れており、バックボーンネットワークは大容量化し続けている。北米のシステムではWDMの適用が定石で、大容量化は波長多重数の増加と高速化の両面から進められている。最近では、波長帯域を従来のCバンドからLバンドにまで拡張するというのも現実的な手段として考えられている。一方で、インターネットの普及に伴う通信事業者間の激しい価格競争により、システム性能の向上とコスト削減が同時に達成されなければ受け入れられない状況になりつつある。ラマン増幅はこの要求にこたえるための一つの策として注目されている。これは、伝送路におけるラマン増幅を用いることで、従来よりも非線形効果を低減すると同時に低雑音化が実現できるため、高価な電気再生中継器の間隔を従来の数倍に延ばすことができ、システム全体として考えると、コストを大幅に削減することができるからである¹⁾³⁾。

伝送用ファイバを単一波長で励起したときのラマン利得は現在のWDMシステムに使用されている帯域幅よりも若干狭いため、複数の励起波長を用いて利得帯域を拡大する必要^{4), 5)}がある。これまでも、1520 nmから1620 nmの帯域で1 dBの利得平坦度を有するラマン増幅器が報告されているが⁶⁾、励起波長の設計については余り詳しく述べられていなかった。本報告で

は、波長多重励起方式によるラマン増幅器の利得特性が各励起波長から発生する利得の重ね合わせで表現できることを実証し、これを用いた合成利得の設計方法を提案する。一例として、1 THz間隔をベースとした波長多重励起方式を用いたラマン利得の平坦化設計を示し、これに基づいた試作において、1527 nmから1607 nmの帯域で10 dBのラマン利得に対して利得偏差0.1 dBの動作が得られたことを報告する。また、新たな波長を追加することによって利得帯域を拡張することを考えた場合に、利得平坦度を維持しながら帯域が拡張できるような追加波長の選択指針を示した。

2. 波長多重励起ラマン増幅器

図1に示すように、信号光、励起光、増幅媒体となる光ファイバ、信号光と励起光を合分波するためのフィルタがラマン増幅を観測するための基本構成である。光ファイバは特殊なものである必要はなく、通信用に用いられているすべてのファイバ

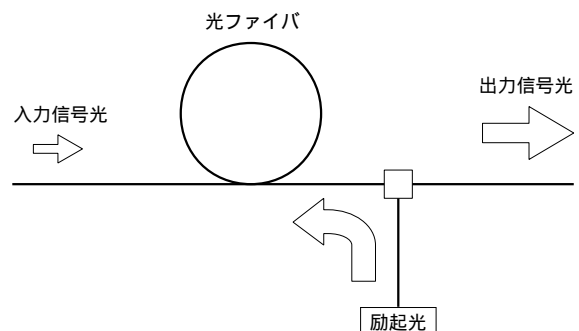


図1 ラマン増幅器の基本構成
Schematic diagram of a Raman amplifier

* ファイテルフォトンクス研究所 光線路開発部 光伝送グループ

が増幅媒体となりうる。励起光をファイバに入射すると、そのうちの一部がガラス分子の光学フォノンを励起することによってエネルギーを失い、その分だけ低い周波数の光へと変換される。この現象をラマン散乱と呼び、シリカ系のファイバの場合、その周波数シフトが約13 THz付近に分布している。散乱光の帯域に含まれる光が存在するとその波長への変換が誘発されるため増幅器として利用することができる。

図2はDSFを単一波長で励起した場合のラマン利得を示したものである。横軸は励起光の周波数を基準とした相対周波数、縦軸はラマン利得で便宜上その最大値を1に規格化してある。図2に示される形状は、励起波長が異なってもほぼ同様に得られる。したがって、ある励起波長で図2のような特性を測定しておけば、任意の励起波長から生じる利得の波長特性を予測することができる。

図3は11波長の励起光によるラマン利得の測定結果と1波長励起の利得プロファイルをもとに重ね合わせによって合成した利得を比較したものである。増幅用ファイバは図2と同一のものを使用している。図2のデータを使用して実際の励起波長に対応した利得プロファイルを作成し、その11個の利得の重ね合わせが測定した利得形状に一致するように各利得の大きさを適当に調整した。図3より、波長多重励起によって得られる利得には、各励起波長から生じる利得形状以外の成分が含まれていないことがわかる。

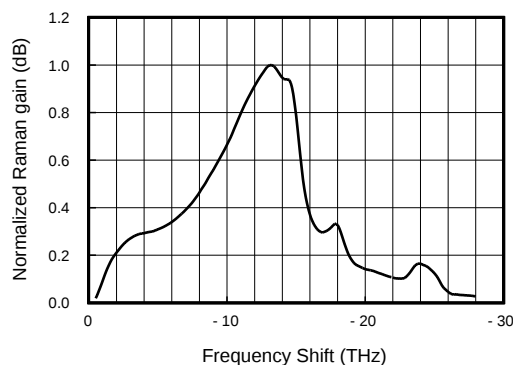


図2 単一波長励起によるラマン利得プロファイル
Normalized Raman gain profile created by a single wavelength pump

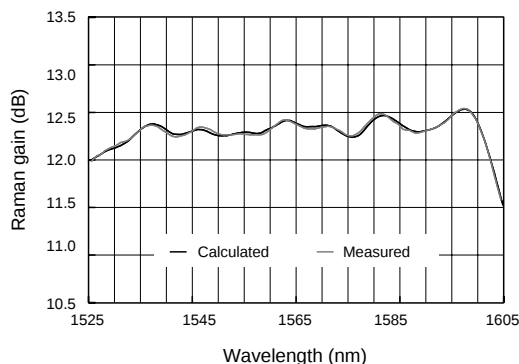


図3 波長多重励起におけるラマン利得の測定値と重ね合わせによる合成との比較
Comparison between an experimental result and a superposition calculated with weighting factor

各励起波長から生じる利得の形状に関しては、複数の励起光を用いた場合でも、単一波長の場合との違いは生じないが、利得の大きさに関しては、波長多重励起に特有の現象が起こる。それは、短い波長の励起光が長い波長の励起光をラマン増幅するというポンプ間ラマン効果^{6), 7)}による利得の変化である。図4はその様子を示す実験結果である。図中には、5つの励起波長に対して個別に励起した場合の利得、同時に励起した場合の利得、個別励起の利得プロファイルを重ね合わせた合成利得が示されている。同時励起のプロファイルは、重ね合わせの場合よりも長波長側の利得が大きく、短波長側の利得が小さくなっている。これは、複数の波長の励起光が同時に入射された場合には、ポンプ間ラマン効果によって、短波長側の励起光のエネルギーが長波長側の励起光に移行するため、長波長側の励起光から生じる利得が個別励起の場合よりも大きくなるからである。

図5は5波長の励起光を用いて、その入射パワーを一律100 mWとした場合の伝搬方向に対するパワーの変化を計算した結果である。波長が短いほど急速に減少していること、入射端付近において一番長い波長のパワーが増加していることからポンプ間ラマン効果の影響がはっきりとわかる。ラマン増幅器は増幅媒体における励起光と信号光の相互作用長が非常に長い場合、励起パワーとラマン利得の関係は入射端でのパワーのみで規定することは難しい。つまり、励起光のパワーを増幅用ファ

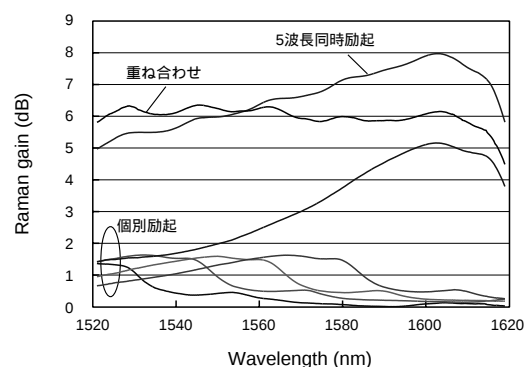


図4 ポンプ間ラマン効果による利得の変化
Gain magnitude variation caused by pump-to-pump Raman interaction

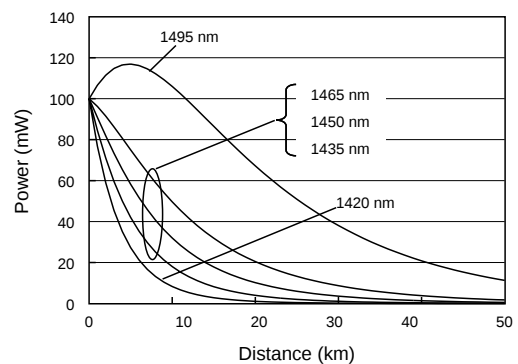


図5 ポンプ間ラマン効果による励起パワーの変化
Pump power variation caused by pump-to-pump Raman interaction

イバ全長にわたって積分した値がラマン利得の大きさに対応する。したがって、複数の波長の励起光を同時に入射することで、長波長側の励起光から生じる利得が単独で入射したときよりも大きくなることは図5からも読み取れる。

3. 利得平坦化設計

波長多重励起方式によるラマン利得の平坦化の様子を図6に示す。この設計例では1 THz間隔のグリッド波長の中から選択された11波長の励起光を用いている。図中、曲線Aはすべての励起光による利得を足しあわせた結果、曲線Bは短波側の9波長の利得を足しあわせた結果、曲線Cは長波側の2波長の利得を足しあわせた結果である。曲線BとCがかみ合うように調整することによって、トータル利得を曲線Aのように平坦にすることができる。1波励起のラマン利得スペクトルは利得ピークよりも短波長側にはリップルがなく、利得ピークよりも長波長側にはリップルが存在する。このため短波側の励起光が作り出す利得スペクトル（曲線Bに相当）にはリップルが生じやすい。このリップルを小さくするためには、多重数を増やして1波当たりの利得を小さくする、励起光を等周波数間隔で配置する、各波長による利得を同じくらいの大きさにすることが有効である。励起光間隔を1 THz、トータル利得を10 dB、波長帯域をC + Lバンドとすると、図6に示される程度にリップルを低減できる。目標利得が小さい場合やリップルの許容度が大きい場合には、励起光の間隔をもっと広げてよい。

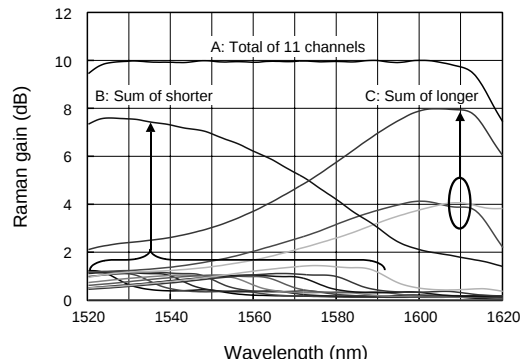


図6 波長多重励起による利得平坦化の原理
Principle of creating flat Raman gain by multi-wavelength pumping scheme

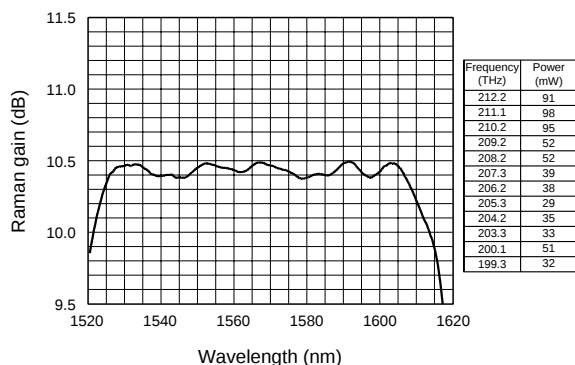


図7 ラマン利得の測定結果と励起条件
Experimental result of a broadband flat Raman gain and the pump condition

4. ラマン利得の測定結果

図7に試作した波長多重励起光源によるラマン利得の測定結果と励起条件を示す。励起光源は212.2 THzから199.3 THz (1412.5 nmから1504.5 nm) の帯域に含まれる12波長で構成されており、1 THz間隔のグリッド上から選択した。実験では、25 kmのDSFを増幅用ファイバとして用い、後方励起配置で測定した。製作精度の問題で励起周波数に ± 0.1 THzの設計値からのずれが生じたが、約10.5 dBの平均利得に対して、波長帯域1527 nmから1607 nmにわたり0.1 dBの利得偏差を達成した。この励起波長配置では、各励起波長から生じる利得の構成は図6とほぼ同様な配分で平坦化されているはずであるが、ポンプ間ラマン効果によって入射励起パワーの配分は波長が短くなるほど大きくなる傾向が出ている。

試作した波長多重励起光源によるラマン増幅器では、図6と同様に全利得が多数の利得プロファイルから構成されているため、おのこの大きさを適切に調整することによって、平坦以外の利得曲線も作り出すことができる。図8はその一例であり、リップルを小さく保ったまま様々な傾きをもった直線的な傾斜を実現している。この利得傾斜は、WDM伝送時に信号間のラマン相互作用によって生じる信号レベルの傾斜を打ち消すのに利用できる^{8), 9)}。

5. 利得帯域拡張機能

波長多重励起によるラマン増幅器において、CバンドからC + Lバンドに代表されるような利得帯域の拡張を考えた場合、拡張前に使用していた励起波長のすべてを利用したうえで、拡張後にC + Lバンド用として動作するように設計する必要がある。すなわち、Cバンド用に使用していた励起波長に新たな励起波長を追加することで、C + Lバンド用として動作するように設計しなければならない。

図9にCバンド用、Lバンド用を個別に設計したラマン増幅器の利得プロファイルの例を示す。想定ファイバは通常のシングルモードファイバ、Cバンドは1530 nmから1565 nm、Lバンドは1575 nmから1610 nmをカバーするように設計されている。これらに対して利得帯域の拡張を試みる場合、Cバンド用とLバンド用の両方の励起波長を同時に用いるというのが直感的方法であると思うが、実際にそのような方法をとると図10に示されるような結果となる。全帯域にわたって利得平坦

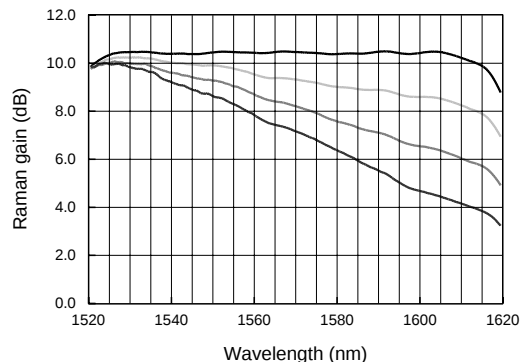


図8 広帯域利得傾斜の測定結果
Demonstration of broadband tilted Raman gain profiles

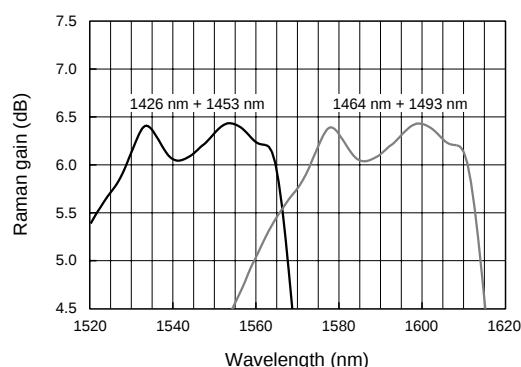


図9 帯域ごとに設計した例
Design for each band

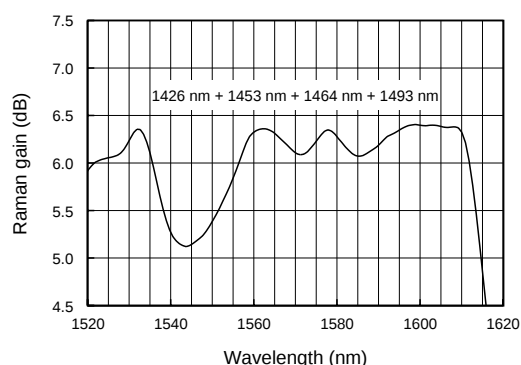


図10 帯域別の設計波長を同時に使用した場合の利得プロファイル
Raman gain profile created by the all pump wavelengths for both bands

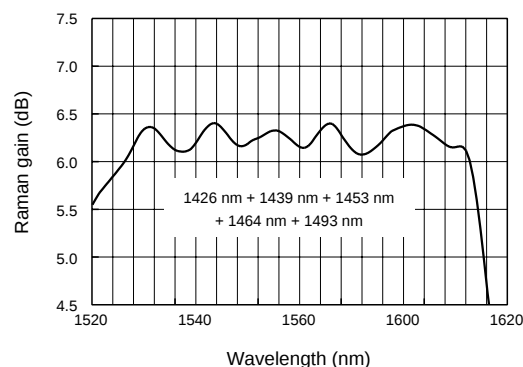


図11 帯域拡張用の波長を追加した場合の利得プロファイル
Raman gain profile with an additional upgrade wavelength

度を図9と同等にするように試みても、Cバンドの帯域内に大きなくぼみができてしまい、拡張前よりも利得平坦度が悪くなってしまう。

既に述べたように、C + Lバンドで利得平坦度の良い動作をさせるためには、ほぼ等間隔に配置された複数の励起波長を用いて右下がり利得曲線を作り、それらよりも長い励起波長によって右上がり利得曲線を作る必要がある。しかしながら、図10に用いられている励起波長は、図9の励起波長を同時に用いただけであるから、Cバンド用の励起波長帯域において、等間隔に近い配置という条件を満たさなくなる。つまり、短波長

側を等間隔に近い配置にするためには、Cバンド用の励起波長帯域に励起波長が不足しているのである。この不足分が、図10に示された利得のくぼみを生じさせる要因である。不足波長を補った場合の利得プロファイルを図11に示す。この図より、Cバンド用励起波長帯域内に一波長加えるだけで利得平坦度が著しく向上することがわかる。

6. おわりに

WDM伝送技術の成熟によってEDFAを用いた集中型増幅中継システムの限界が近づき、その問題を解決する手段の一つであるラマン増幅への期待が高まってきた。そこに、励起用半導体レーザーの十分な高出力化と波長多重励起という手法の実証が加わり、ラマン増幅器の商用システムへの導入が現実的に検討され始めている。本報告では、広帯域WDM伝送への適用を想定し、波長多重励起方式によるラマン増幅器の設計原理の解説と実験結果の紹介をした。

参考文献

- 1) Y. Zhu, W. S. Lee, C. Scanzill, C. Fludger, D. Watley, M. Jones, J. Homan, B. Shaw and Hadjifotiou, "1.28 Tbit/s (32 x 40 Gbit/s) transmission over 1000 km with only 6 spans," Proc. European Conference on Optical Communication(2000), PD Paper 1.4.
- 2) T. Tanaka, N. Shimojoh, T. Naito, H. Nakamoto, I. Yokota, T. Ueki, A. Sugiyama, M. Suyama, "2.1-Tbit/s WDM transmission over 7,221 km with 80-km repeater spacing," Proc. European Conference on Optical Communication(2000), PD Paper 1.8.
- 3) M. Nissov, C. R. Davidson, K. Rottwitt, R. Menges, P. C. Corbett, D. Innis, and Neal S. Bergano, "100 Gb/s (10x10Gb/s) WDM transmission over 7200 km using distributed Raman amplification," Proc. European Conference on Optical Communication, vol. 5(PDP)(1997), pp.9-12.
- 4) K. Rottwitt and H. D. Kidorf, "A 92 nm bandwidth Raman amplifier," Proc. Optical Fiber Communication Conf.(1998), Paper PD6.
- 5) Y. Emori, Y. Akasaka, and S. Namiki, "Less than 4.7 dB noise figure broadband in-line EDFA with a Raman amplified -1300ps/nm DCF pumped by multi-channel WDM laser diodes," Proc. Optical Amplifiers and Their Applications,(1998), Paper PD3.
- 6) Y. Emori and S. Namiki, "100nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes," Proc. Optical Fiber Communication Conf.(1999), Paper PD19.
- 7) H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarjaona, "Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier," Photon. Technol. Lett., vol. 11, no. 5(1999), pp. 530-532.
- 8) T. Naito, T. Terahara, N. Fukushima, N. Shimojoh, T. Tanaka, M. Suyama, "Active gain slope compensation in large-capacity, long-haul WDM transmission system," Proc. Optical Amplifiers and Their Applications,(1999), Paper WC5.
- 9) M. Takeda, S. Kinoshita, Y. Sugaya, T. Tanaka, "Active gain-tilt equalization by preferentially 1.43mm- or 1.48mm-pumped Raman amplification," Proc. Optical Amplifiers and Their Applications, (1999), Paper ThA3.