

高出力励起光源（HPU）の開発と広帯域ラマン増幅器への応用

Demonstration of Broadband Raman Amplifier as a Promising Application of High-power Pumping Unit

江森 芳博*

Yoshihiro Emori

並木 周*

Shu Namiki

概 要 1405 nm から 1510 nm にわたる 12 波長の励起用レーザダイオードにファイバ・ブラッグ・グレーティングを接続し、発振波長を狭窄化・安定化したのちに、石英系ガラス集積回路技術によって作製されたマッハツェンダ干渉計型波長合波器を用いて合波することによってトータル光出力 2.2 W となる高出力励起光源を開発した。開発した励起ユニットを用いて、三種類の伝送路用ファイバ（SMF25 km, DSF25 km, RDF20 km）をラマン増幅用媒体として使用したラマン増幅実験を行い、SMF では平均利得 2 dB、DSF および RDF では平均利得 6.5 dB において 1520 nm から 1620 nm の波長帯域で利得偏差 ± 0.5 dB となる超広帯域増幅特性を実現した。

1. はじめに

1990 年代の始め、エルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA）が実用化されたことによって、光通信システムの伝送容量と再生中継距離が飛躍的に向上した。ところが、それとほぼ同じ時期に、北米を中心にインターネットの爆発的な普及が始まったことにより、公衆通信のトラフィックが激増し、更なる大容量化が緊急課題となった。幸いにも、EDFA の利得帯域が比較的広がったため、この波長帯域に含まれる複数の信号光を利用する波長分割多重（WDM）通信方式が、その解決手段として注目され、急速な実用化を遂げて現在に至っている。現在のインターネット上を流れる情報は静止画像が中心であるが、将来的には動画が主体となると予想されるため、伝送容量拡大に対する要求はとどまるところを知らない。

EDFA を用いた WDM 技術は、利得平坦化の容易な 1550 nm から始まったのだが、わずか数年のうちに 1530 nm 帯への拡張を経て、最近では、利得係数が小さいために利用されていなかった 1580 nm 帯にまで拡大している。しかしながら、EDFA で増幅可能な帯域よりも光ファイバの低損失帯域の方が広いことから、EDFA の帯域外で動作する光増幅器への関心が高まっている。ラマン増幅器は、その候補の一つである。エルビウムのような希土類イオンを媒体とした光増幅器は、イオンのエネルギー準位によって利得波長帯が決まるのに対し、ラマン増幅は、励起光の波長によってこれが決まるという特徴を持つ^{1)~3)}。そのため、励起光波長を選ぶことによって任意の波長帯を増幅することが可能なのである。

光ファイバにおけるラマン増幅器は、Stolen ら⁴⁾によって原理確認され、青木ら⁵⁾によって伝送実験が行われ実証された。Mollenauer ら⁶⁾は、これを光ソリトン伝送に応用した。また、枝川らは、半導体レーザを励起光源として WDM 伝送の実証を行った⁷⁾。ところが、十分な利得を得るためには数百 mW という励起パワーを必要とするため、当時では、固体レーザを励起光源として用いる以外手立てはなく、数十 mW の励起光で十分動作する EDFA と比べ、通信での実用面で劣っていた。効率の良い EDFA は、半導体レーザを励起光源として実用化が進み、その影でラマン増幅器が広く普及することはなかった。

しかしながら、ラマン増幅器に関する研究は続けられ、大きく二つの利点が指摘された。一つは、ラマン増幅器を分布型として構成した場合、伝送路にて一点集中して信号を増幅する希土類イオン添加ファイバ増幅器に比べ、システム全体で低雑音化が可能となること⁸⁾、もう一つは、ラマン増幅用の励起光を波長多重し帯域を拡大することによって EDFA では成し得ない利得の広帯域化が可能となることである^{9)~10)}。

本稿では、化合物半導体励起レーザ（LD）の波長多重化技術を用いた高出力・広帯域励起光源の開発についてと、これを用いたラマン増幅器で 1520 nm から 1620 nm の波長帯域において利得偏差 ± 0.5 dB という超広帯域増幅特性を実現したことについて報告する。

2. 高出力・広帯域、波長多重励起光源の開発

高出力 EDFA の普及は、化合物半導体をベースとしたコンパクトな 1480 nm 励起レーザモジュールの実現によって大幅に進んだ¹¹⁾。WDM 対応の EDFA は、チャンネル数が増えるほど高出力な励起レーザを必要とするため、励起レーザの高出力技術

* 光技術研究所 WDM パッシブ光部品開発チーム 光伝送グループ

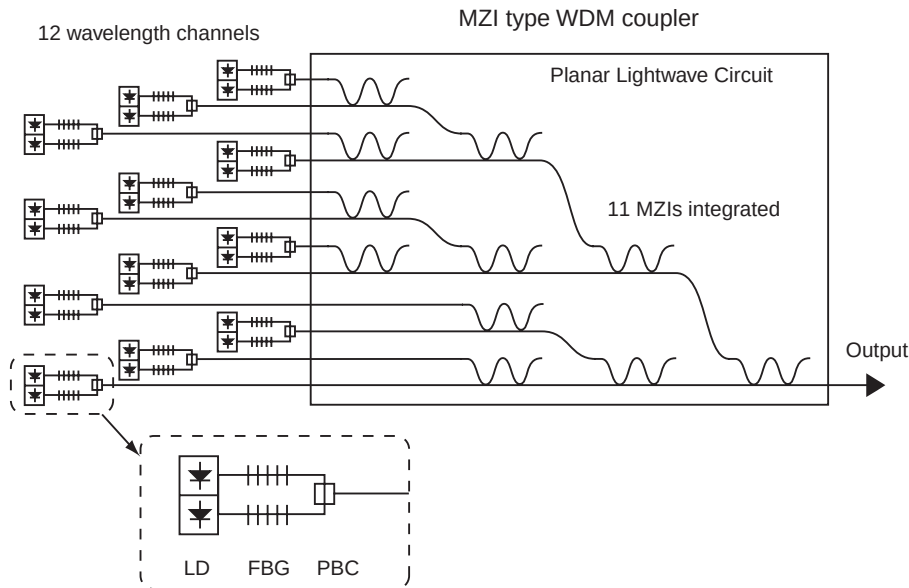


図1 波長多重励起光源の構成
Schematic diagram of 12-channel WDM laser diode unit

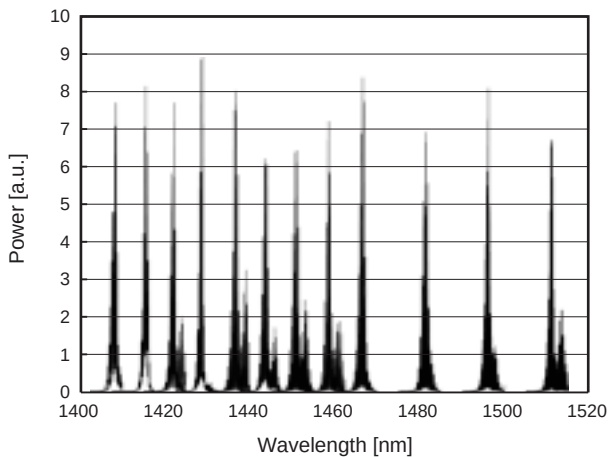


図2 波長多重励起光源の出力スペクトラム
Output spectrum of high-power pumping unit

の発展を促している。特に、1480 nm 帯の励起レーザは年々高出力化が進み、遂にシングルモードファイバ（SMF）端出力で、250 mW を達成するに至っている¹²⁾。

広帯域 WDM 伝送実用化に不可欠な EDFA の高出力化を実現するため、励起光源を効率良く合波することが必要である。近年、偏波合成された 3 波長の励起光源（都合 6 個）を合波することで信号光出力 1.5 W という高出力 EDFA が実現されている¹³⁾。1480 nm 帯における EDF の吸収波長帯は 1450-1500 nm であり、3 波以上を合波するためには、各励起レーザの発振スペクトルを狭帯域化し安定化しなければならない。そこで、モジュール化の際、ファイバ・ピグテールにファイバ・ブラッグ・グレーティング（FBG）を施し狭帯域の反射特性を有する外部共振ミラーを設けることで、発振波長を狭帯域化・安定化した¹⁴⁾。

FBG を用いて励起光源の発振スペクトルが数 nm 程度まで狭く安定になったため、マッハツェンダ型の WDM カプラによる効率の良い合波が可能となった。そのため、田中らは、火炎堆積法に基づいた石英系ガラス集積回路（PLC）の技術を用いて

集積型 8 波長 WDM カプラを実現し、安価で効率の良い高密度波長多重励起光源用合波器を開発した¹⁵⁾。その結果、光出力 1 W を超える広帯域高出力励起光源（High-power pumping unit; HPU）の実現が可能となった。

3. 平坦利得帯域 100nm ラマン増幅器の開発

EDFA 高出力化の目的で開発された 1480 nm 帯高出力波長多重励起光源は、容易に広帯域ラマン増幅器用励起光源に転用することができる。ラマン増幅は 1500 nm 付近では励起光からおよそ 110 nm 長波側にて利得が発生するので、励起光源が 1450 nm の周りで波長多重され広い帯域にわたっていれば、ラマン増幅もそれに応じて 1560 nm のあたりで広い帯域を有する。WDM カプラを用いて信号光と励起光を合波するならば、励起光と信号光の波長差である 100 nm 程度がラマン利得の広帯域の上限となる。最近、我々のグループは、ラマン増幅器において、105 nm の帯域にわたる励起光源の波長多重を行い、100 nm の広帯域利得を実現した¹⁶⁾。

図 1 に、試作した 12 波多重励起光源の光学構成図を示す。各チャンネルは FBG により波長安定化された励起 LD を PBC（Polarization Beam Combiner）により偏波合成したものをを用いている。波長合波器は石英系の PLC で 11 個のマッハツェンダ干渉計（MZI）が一つの基板上に集積化されている。励起 LD を偏波合成しているのは、励起光源の高出力化という目的以外に、ラマン増幅器の利得の偏波依存性解消という目的のためである。図 2、3 に HPU の出力スペクトラムと I-L 特性を示す。各 LD の駆動電流を 700 mA にしたときにトータルで 2.2 W の出力が得られている。波長配置は、1405-1457.5 nm が約 7.5 nm 間隔、1465-1510 nm が約 15 nm 間隔に設定されている。このように非対称な波長配置とした理由は、波長の短い励起光が波長の長い励起光をラマン増幅してしまうことに起因する利得形状の非対称性を補償するためである。図 4 は実験に用いたラマン増幅器の構成である。励起光と信号光の合波には、LWPF（Long Wavelength Pass Filter）を用い、励起方向は後方励起配置とし

た。二つのアイソレータとLWPFのトータルの挿入損失は波長1550 nmにおいて1.6 dBであった。基本的には広帯域ASE光源を用いて利得形状を測定しているが、確認のために波長可変レーザをプローブ光として用い、ASE光源と共に入射した測定も行った。図5は3種類のテストファイバ(SMF, DSF, RDF¹⁷⁾)で行った超広帯域ラマン増幅器の利得特性である。各波長の励起光パワーを調整することによって、波長帯域100 nmにわたって利得偏差が±0.5 dBとなる広帯域かつ平坦な特性が得られている。SMF: 25 kmでは2 dB, DSF: 25 kmおよびRDF: 20 kmでは6.5 dBの平均利得が得られている。図5の利得は部品とファイバの損失を含んだものであり、入出力信号の比で定義された利得である。各ファイバの伝搬損失はいずれも約5 dBであった。

図6は帯域100 nmにわたる平坦化を行ったときの励起波長別の入射パワーである。ポンプ間ラマン効果のため、利得の平坦性を維持するためには短波長側の入射パワーを長波長側よりも大きくする必要があることがわかる。SMFはトータルの励起パワーが一番大きいにもかかわらず、平均利得が他の二種のファイバよりも小さいので、利得効率が一番悪いといえる。RDFとDSFは平均利得が同じであるが、必要な励起パワーはDSFが790 mWであるのに対して、RDFは610 mWであるから、RDFのほうが効率が良いといえる。この傾向は、ラマン利得が励起光のパワー密度に比例することと、モードフィールド径がSMF, DSF, RDFの順に小さくなっていることから概ね説明される。

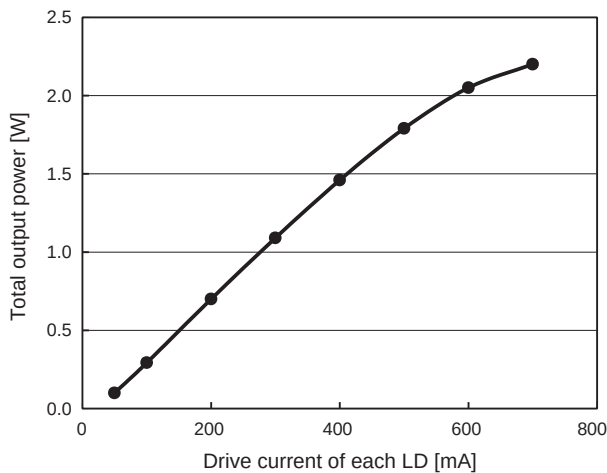


図3 波長多重励起光源のI-L特性
Total output power of high-power pumping unit

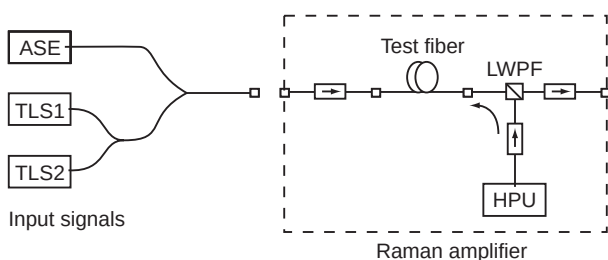


図4 実験に用いたラマン増幅器の構成
Experimental setup

EDFAと分布型ラマン増幅器の比較は、集中型と分布型という違いがあり直接比較することは容易ではないが、100 nmの帯域を得るのにトータルの励起光出力が600 mWならば、ラマン増幅器がEDFAに対して効率で決定的に不利になるとは、必ずしもいえないことがわかる。

4. 広帯域ラマン増幅器の応用

最近、特にWDM伝送において、分布型ラマン増幅を用いることによってシステム全体の低雑音化を図る研究がなされている。従来のEDFA中継方式では、信号光レベルが高くFWM (Four Wave Mixing) などによる非線形性が問題となり、信号帯域にゼロ分散波長を含むDSF線路上のWDM伝送は困難とされていた。一方、EDFAを用いたWDM無中継伝送にラマン増幅を組み合わせることで、雑音特性が向上した分、伝送路中の信号レベルを低下させることができる。NTTやLucentの研究グループは、この効果を利用し、信号帯域にゼロ分散波長があるDSF線路上にて信号レベルを低減させることで非線形効果を抑制し、大容量WDM伝送に成功している^{18)~19)}。一方、新しい分散補償線路として注目を集めているSMF-RDF線路にてラマン増幅を適用することで、信号のSPM (Self-Phase

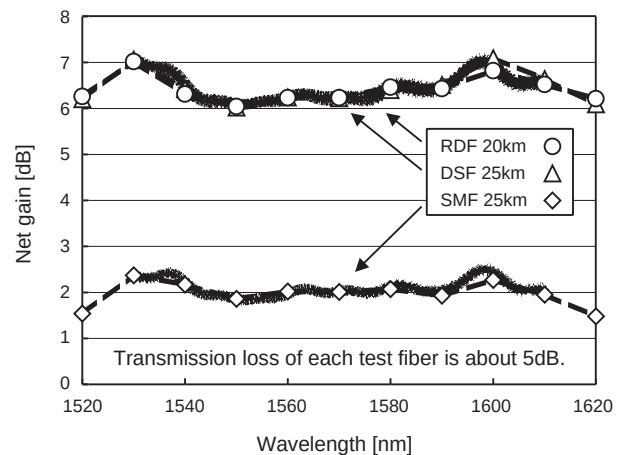


図5 超広帯域ラマン増幅器の利得特性
Net gain profile of 100 nm bandwidth Raman amplifiers

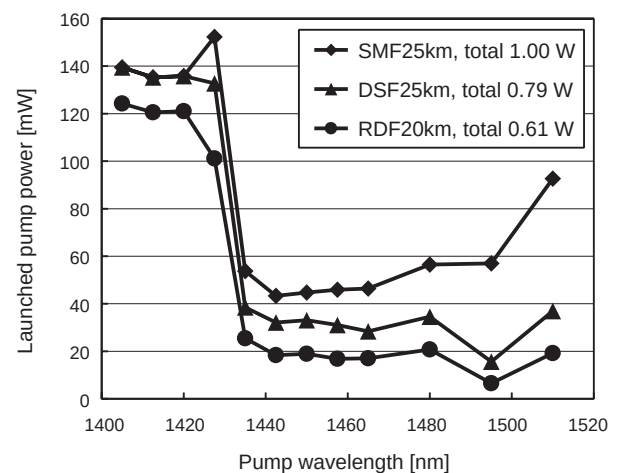


図6 励起波長別の入射パワー
Launched pump power allocation of 100 nm bandwidth Raman amplifiers

Modulation) による影響を低減した報告もなされている²⁰⁾。大容量 WDM 伝送において、雑音や非線形性の回避は死活問題であり、分布型ラマン増幅器が一つの解決策になることが期待される。

5. おわりに

ラマン増幅器に関する研究の歴史は古く、通信用の光増幅器を模索していた時代には、その最有力候補として期待された時期もあった。しかしながら、EDFAが格段の進歩を遂げたことにより、ラマン増幅器は影の薄い存在となっていくところ。ところが、EDFAを用いたWDM技術が成熟し始めたことにより、再びラマン増幅器への関心が湧き上がりつつある。本稿では、利得帯域が励起光波長によって決まるというラマン増幅器の利点を生かすことによって利得帯域幅 100 nm という超広帯域特性が可能であることを示した。今後、ラマン増幅器は、いろいろなシステムへの応用が期待される。形式も、集中型、分布型、EDFAとの併用など、多様な可能性を持つ。光ファイバの低損失帯域全域を使い切る超広帯域 WDM 伝送や、分散補償線路による次世代の長距離・超高速・大容量 WDM 伝送において不可欠な役割を担うであろう。

参考文献

- 1) R. H. Stolen, J. P. Gordon, W. J. Tomlinson, and H. A. Haus, "Raman response function of silica-core fibers," J. Opt. Soc. Am. B, vol. 6, no. 6, pp.1159-1166 (1989).
- 2) G. P. Agrawal, Nonlinear fiber optics, 2nd ed., Academic Press, pp. 316-369 (1995).
- 3) Y. R. Shen, The Principles of Nonlinear Optics, John Wiley & Sons, Inc., pp. 141-186; pp. 505-527 (1984).
- 4) R. H. Stolen and E. P. Ippen, Appl. Phys. Lett., "Raman gain in glass optical waveguides," vol. 22, p.276-278 (1973).
- 5) Y. Aoki, S. Kishida, K. Washio, and K. Minemura, "Bit error rate evaluation of optical signals amplified via stimulated Raman process in an optical fibre," Electron. Lett., vol. 21, no. 5, pp.191-193 (1985).
- 6) L. F. Mollenauer, J. P. Gordon, and M. N. Islam, "Soliton propagation in long fibers with periodically compensated loss," J. Quantum Electron., vol. QE-22, no. 1, pp. 157-173 (1986).
- 7) 枝川, 笠, 望月, 若林, 「光ファイバラマン増幅における増幅特性」, 信学技報, OQE88-33 (1988).
- 8) 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, pp.9-12 (1997).
- 9) K. Rottwitt and H. D. Kidorf, "A 92 nm bandwidth Raman amplifier," OFC'98, PD6 (1998).
- 10) 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," OAA'98, PD3 (1998).
- 11) S. Namiki, Y. Ikegami, Y. Shirasaka, and I. Oh-ishi, "Highly coupled high power pump laser modules," OAA'93, MD5 (1993).
- 12) T. Kimura N. Tsukiji, A. Iketani, N. Kimura, H. Murata, and Y. Ikegami, "High temperature operation quarter watt 1480nm pump LD module," OAA'99, ThD12 (1999).
- 13) Y. Tashiro, S. Koyanagi, K. Aiso, and S. Namiki, "1.5 W erbium doped fiber amplifier pumped by the wavelength division-multiplexed 1480 nm laser diodes with fiber Bragg grating," OAA'98, WC2 (1998).
- 14) S. Koyanagi, A. Mugino, T. Aikiyo, and Y. Ikegami, "The ultra high-power 1480nm pump laser diode module with fiber Bragg grating," OAA'98, MC2 (1998).
- 15) K. Tanaka, K. Iwashita, Y. Tashiro, S. Namiki, and S. Ozawa, "Low-loss integrated Mach-Zehnder interferometer-type eight-wavelength multiplexer for 1480-nm band pumping," OFC 99, TuH5 (1999).
- 16) Y. Emori and S. Namiki, "100nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes," OFC'99, PD19 (1999).
- 17) K. Mukasa, Y. Akasaka, Y. Suzuki, and T. Kamiya, "Novel network fiber to manage dispersion at 1.55 μ m with combination of 1.3 μ m zero dispersion single mode fiber," Proc. European Conference on Optical Communication, vol. 1, pp.127-130, (1997).
- 18) P. B. Hansen, A. Stentz, T. N. Nielsen, R. Espindola, L. E. Nelson, and A. A. Abramov, "Dense wavelength-division multiplexed transmission in "Zero-Dispersion" DSF by means of hybrid Raman/Erbium-doped fiber amplifiers," OFC'99, PD8 (1999).
- 19) N. Takachio, H. Suzuki, H. Masuda, and M. Koga, "32 x 10 Gb/s distributed Raman amplification transmission with 50 GHz channel spacing in the zero-dispersion region over 640 km of 1.55- μ m dispersion-shifted fiber," OFC'99, PD9 (1999).
- 20) H. Kawakami, Y. Miyamoto, K. Yonenaga, and H. Toba, "Highly efficient distributed Raman amplification system in a zero-dispersion-flattened transmission line," OAA'99, ThB5 (1999).