

# ラマン増幅器

古河電気工業株式会社  
ファイテルフォトンクス研究所 WP チーム

並木 周

## Raman amplifier

Shu Namiki

Furukawa Electric Co. Ltd.  
WP team, Fitel Photonics Laboratory

### 1. はじめに

毎年秋に開催される European Conference on Optical Communication (ECOC) という光通信に関する国際会議が、今年はミュンヘンで行われた。そのハイライトであるポストデッドラインセッションの通信部門で、数テラビット毎秒 (Tbps) という未曾有の超大容量伝送実験の報告が相次いだ<sup>1)</sup>。その中で、重要な役割を担っている技術として、ラマン増幅器がある。

2000 年という年は、通信分野では象徴的な年であるといわれている。それは、インターネットのトラフィックが電話を上回る年だからである。インターネットは恐るべきスピードで増加している。いみじくも 21 世紀を目前にして、世界の公衆通信は従来の音声から IP に取って代われようとしている。光通信だけがその爆発的な伝送容量への需要に応えられる技術とみなされている。しかし、光通信といえども、インターネットのすさまじい需要に太刀打ちできるか非常にきわどい状況となっている。

このような背景にして、今回の ECOC では予想を上回る熾烈な超大容量伝送競争が改めて浮き彫りとなった。現在の大容量化を支える技術は、エルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) をベースとした波長分割多重 (WDM) 伝送方式である。近年、伝送容量をさらに向上する技術としてラマン増幅器が注目されている。

ラマン増幅器は、EDFA とは大きく違う点を 2 点有する<sup>2)</sup>。ひとつは、利得帯域が励起光の波長によって決まるため、自由に設定できる点。もうひとつは、分布型増幅に適している点である。分布型増幅とは、伝送路中にて長い距離に渡り増幅を行うものの総称である。EDFA は、伝送路中のある地点にて集中して増幅を行う集中型増幅器のひとつである。一般に、光増幅器に入射する信号は、レベルが低いほど増幅時に量子雑音の比率が大きくなる。したがって、伝送路の損失を受け、レベルが低下した光信号を増幅する EDFA より、伝送路の損失をその場で補うよう増幅する分布型増幅器のほうが、原理的に設計上システムの雑音を低く抑えることが可能となる。インターネット需要により、果てしない大容量化を求められる以上、雑音を改善できる分布型増幅器が必要となることは必然である。ラマン増幅器は、利得帯

〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通 6 番地  
TEL 0436-42-1724  
FAX 0436-42-9340  
E-mail: snamiki@ch.furukawa.co.jp

域を自由に設定できる上、理想的な分布型増幅器であるため、WDM システム応用上メリットが大きい。

## 2. ラマン増幅器の実用化

ラマン増幅器は、光ファイバ中のラマン散乱という非線形性を利用するので、既存の光ファイバをそのまま用いることができるという利点を有する。ラマン散乱とは、光子とガラスの光学フォノンの相互作用である。入射光子は、ガラス分子の電子を仮想準位に励起する過程で光学フォノンを励起し、フォノンのエネルギー分だけ周波数をシフトする現象である<sup>3)</sup>。仮想準位の電子が脱励起する過程で誘導放出を利用したのが、ラマン増幅器である。光ファイバにおけるラマン増幅は古く 1973 年に観測された<sup>4)</sup>。ガラス分子の振動モードは多岐にわたり、光学フォノンのスペクトルも連続的に広帯域にわたっている。図 1 に、代表的な 3 種類のファイバのラマン利得スペクトルを示す。スペクトルの形状、特にラマンシフト量は、光ファイバの材料である石英によって決まる。ファイバ種類によって、若干形状が異なるが、これは石英中に含まれる Ge 添加の密度による。スペクトル形状は、石英と  $\text{GeO}_2$  のラマンスペクトルの合成として概ね理解できる<sup>5)</sup>。ラマン利得効率の大きさは、ファイバの非線形性に対応している。非線形性によるラマン利得効率の違いは顕著であるが、石英と  $\text{GeO}_2$  のスペクトル形状への寄与の相違は小さい。ラマン増幅利得は、光ファイバの構造や製造ばらつきに対して安定した増幅特性を有する。

ラマンシフトは約 13.2 THz、EDFA の動作帯域 1550 nm 付近ではおよそ 110 nm の波長シフトに相当する。EDFA 帯域にてラマン増幅器を実現するには、およそ 1440 nm の励起光源を用いればよい。ところが、ラマン散乱の断面積は非常に小さく、十分な利得を得るには 1 Watt 近い励起光出力が必要とされる。ラマ

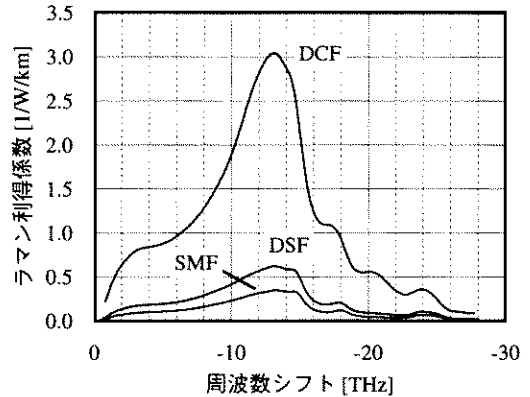


図 1 各種ファイバのラマン利得係数  
SMF：シングルモードファイバ、DSF：分散シフトファイバ、DCF：分散補償ファイバ

ン増幅が活発に研究された 70 年代から 80 年代では、そのような光出力を有するコンパクトな半導体レーザは存在しなかった。一方、80 年代から 90 年代に出現した EDFA は、数十 mW の 980 nm か 1480 nm の励起光により十分動作するため、半導体レーザによる励起光が実現できた<sup>6)</sup>。そのため、EDFA が通信の主流となり、ラマン増幅器は普及しなかった。

冒頭で述べたように、EDFA を用いた WDM 伝送技術は驚異的發展を遂げている。その中で、1480 nm の励起レーザも驚異の高出力化が進んだ<sup>7)</sup>。ところが、集中型 EDFA をベースとしたシステムもいよいよ限界に達し始め、WDM 技術がインターネット需要に追いついてゆくにはラマン増幅器のような分布型増幅器が必須となってきた。ラマン増幅は、蛍光寿命が EDFA のミリ秒に対しフェムト秒とさきわめて短いため、線形増幅でなければクロストークが問題となって複数の信号波長を一括して増幅する WDM 伝送に向かない。ところが、ラマン増幅は効率が小さく利得飽和の効果も小さいため、線形増幅器として設計しやすい。つまり、ラマン増幅器は、EDFA とは対照的であるが同様に WDM 伝送用に適している。

EDFA 励起に用いられる 1480 nm 半導体レーザ技術は簡単に 1440 nm に転用することが

できる。したがって、ラマン増幅器は、EDFA用励起レーザの発展により、現実的な技術になりつつある。もっとも、半導体レーザは単体では、1 Wattの出力は依然難しい。近年、カスケードラマンレーザという技術も提案されており、単体で数 Wattの出力が報告されており、通信に応用される可能性が研究されている<sup>8)</sup>。これに対し、筆者らは、波長多重方式ラマン増幅器を提案し、半導体励起レーザ単体のパワーの不足を効率よく補うとともに、利得を平坦にできるという、よりWDM伝送に適した利点をもたらす技術を開発した<sup>9),10)</sup>。この提案により、ラマン増幅は、実システムにおいても使用に堪える技術として、雑音特性を改善できEDFAをベースにしたシステムの限界を乗り越える、新しい技術として再び注目されている。

### 3. 波長多重励起方式

波長多重励起方式は、異なる波長を有する励起レーザを効率よく波長合成する技術である。これを実現するには、マルチモード発振する励起レーザにファイバ・ブラッグ・グレーティングを外部共振器として配備し発振スペクトルを狭窄化・安定化する必要がある、さらに挿入損失の小さい波長分割多重(WDM)カプラの実

現が必要である。田中らは、PLC技術を用いた集積化されたマッハツエンダー型干渉計による効率よいWDMカプラを作成し1450 nmから1500 nmまでの8波を効率よく合波し1 Wattのファイバ出力を達成している<sup>11)</sup>。図2に、合波された光スペクトルと出力-電流特性を示す。合波する波長数が少ないのであれば誘電体多層膜を用いた空間結合型バルク型カプラでも代替可能である。波長が多くなるほど、高効率かつ安定した波長合波を行うにはPLCのような集積型のデバイスが望ましくなる。

波長多重励起方式は、単体では出力が限られた励起レーザを用いて必要な高出力を得るために有効な技術であるばかりでなく、ラマン増幅へ応用する際、利得スペクトルが広帯域化でき、さらに、平坦に調整することができるという優れた特徴を有する。我々は、1405 nmから1510 nmまでの12波長を用い、ラマン利得にして1 dB帯域幅100 nmの超広帯域を達成した<sup>10)</sup>。さらに、図3に示すように、1 THz間隔で配置されたグリッド上に適当に12波長を選定することで80 nmの帯域に渡り0.1 dBという優れた平坦度を達成した<sup>12)</sup>。

### 4. 今後の課題

ラマン増幅器はインターネット需要によると

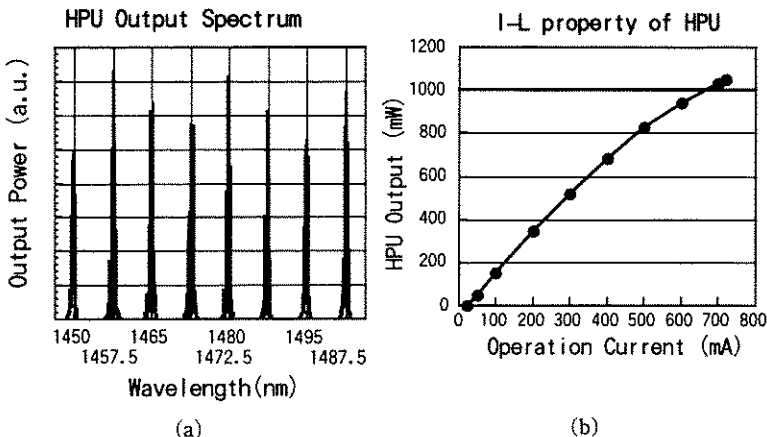


図2 波長多重励起光源の光スペクトル(a)と光出力-電流特性(b)

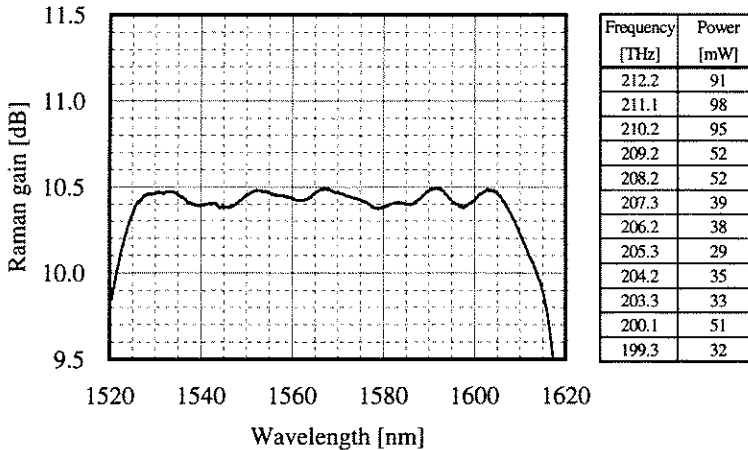


図3 C-Lバンド ラマン増幅利得 (12波励起)

全面的に普及する必要がある。しかしながら、実システムへの導入はこれからの課題である。既設ファイバを用いて良好なラマン増幅特性が得られたという報告もある上<sup>13)</sup>、フィールド試験にてラマン増幅を用いた長距離大容量伝送に成功した報道もなされている。今後の課題は、普及に伴う問題点の抽出であろう。特に、励起光出力が1 Wattに近づいてくると、光部品やファイバ端面などの高出力による劣化が潜在的問題点と指摘されている。現在のところ、多くの実験報告から短期的動作は問題ないことが伺えるが、長期的耐高出力性に関する研究はあまり報告されていない。

さらに、既設ファイバの個別特性を把握することも重要である。特に、励起光帯域での損失係数は従来問題とされてこなかったが、ラマン増幅を導入する上で非常に重要なパラメータである。また、反射戻り光が減衰しにくい分布型増幅では、既設ファイバのコネクタによる反射戻り光の影響も重要なパラメータとなる。こうした問題も早急に克服されていく必要がある。

EDFAをベースとしたWDM伝送技術は、インターネットの強力な需要によって、大容量化の上限にさしかかってきた。この上限を克服しさらに大容量化を図るために、従来の集中型

増幅器から分布型増幅器の導入が不可欠となった。ラマン増幅器は、励起用半導体レーザーの高出力化と波長多重励起方式という新しい技術の提案により実用化の目処も立ち、実システムへと導入されつつある。本稿では、その技術の流れを駆け足で紹介した。

#### 参考文献

- 1) Post-deadline papers, Topic 1, 26<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication (2000).
- 2) 並木, 電子情報通信学会誌, 平成12年10月号 p. 788.
- 3) E. G. Sauter, "Nonlinear Optics", John Wiley & Sons, Inc., pp. 77-88 (1996).
- 4) R. H. Stolen and E. P. Ippen, Appl. Phys. Lett. Vol. 22, p. 276 (1973).
- 5) F. Galeener et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 32, p. 34 (1978).
- 6) S. Namiki, et al., OAA'93, MD5 (1993).
- 7) T. Kimura et al., OAA'99, ThD12 (1999).
- 8) S. G. Grubb et al., OAA'95, SaA4 (1995).
- 9) Y. Emori et al., OAA'98 PD3 (1998).
- 10) Y. Emori and S. Namiki, OFC'99 PD19 (1999).
- 11) K. Tanaka et al., OFC'99, TuH5 (1999).
- 12) Y. Emori et al., Proc. ECOC'00, vol. 2, pp. 73-74 (2000).
- 13) L. D. Garrett et al., OFC'00, PD42, (2000).