

波長広帯域化と光増幅器

増田 浩次

最近のインターネットやデータ通信などのデータ系通信量の急増から、多彩なサービスに支えられた近い将来のマルチメディア社会においては、現在と比較して桁違いに大きな通信量を有するネットワークの出現が予想される。特に、大容量の光ファイバー通信システムでは、搬送波である光と伝送路である光ファイバーの広帯域性を生かしたテラビット (10^{12} ビット/秒, Tbit/s) 以上の伝送容量を有する波長多重 (wavelength division multiplexing: WDM) システムの実現が期待される。すでに、陸上および海底系の光ファイバー通信システムにおける線形中継増幅器等の光増幅器として、優れた性能と経済性を有するエルビウム添加ファイバー増幅器 (erbium-doped fiber amplifier: EDFA) が実用に供されているが、現在、さらに広帯域で経済的な光増幅器およびそれを用いたシステムの研究が活発に進められている¹⁻⁶⁾。また、直接光レベルで信号のアド・ドロップやクロスコネクト等を行うフォトニックネットワークにおいて用いられる光増幅器の広帯域化・経済化も重要である。

最近の研究では、陸上系および海底系の光増幅線形中継システムにおいて、テラビット級の高密度 WDM 伝送実験が多数報告されている⁷⁻⁹⁾。それらの大容量伝送実験では、光増幅器として EDFA を用い、多波長信号光の一括増幅を行っており、EDFA の利得波長域は最大で約 $1.53\sim 1.61\ \mu\text{m}$ (信号光波長域はその一部を使っている) である。また、WDM の高密度化により、信号光の周波数利用効率 (伝送容量と信号光占有帯域の比) として $0.1\sim 0.6\ \text{bit/s/Hz}$ 程度の高い値が得られている。上記 $1.53\sim 1.61\ \mu\text{m}$ の帯域は周波数にして約 $10\ \text{THz}$ であるが、伝送ファイバーの帯域は、低損失波長域をたとえば

$1.3\sim 1.7\ \mu\text{m}$ とすると、その周波数帯域は $54\ \text{THz}$ であり、明らかに未使用の広い波長域が存在する。 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯の光増幅技術に関しては、別の解説記事等を参照していただくとして¹⁰⁾、本稿では、 $1.4\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 帯の光増幅技術を紹介する。特に、最近活発に研究されているファイバーラマン増幅器^{11,12)} に関しては、その具体的な構成および特性を紹介する。

1. 光増幅中継系の広帯域化

1.1 各種光増幅器

図1は伝送ファイバー (分散シフトファイバー) の典型的な損失係数スペクトルと光増幅器の利得帯域を示している。ただし、損失係数スペクトルに関し、 $1.39\ \mu\text{m}$ 近傍波長の損失値 (OH の振動吸収に起因する) はファイバーの種類等に依存する。図1(a) の損失係数スペクトルから、伝送ファイバーの低損失波長域として、たとえば $1.3\sim 1.7\ \mu\text{m}$ (損失係数 $0.4\ \text{dB/km}$ 以下) の広い波長域を挙げることができ、その帯域幅は波長で $400\ \text{nm}$ 、周波数で $54\ \text{THz}$ に及ぶ。

光増幅中継系に適用される光増幅器に求められる増幅特性は、適用形態により異なるが、低雑音、高利得、広帯域、高出力、偏波無依存、および無歪な時間応答などである¹³⁻¹⁵⁾。上記低損失波長域に適用可能な利得帯域を図1(b) に示す。それらの光増幅器は、希土類添加ファイバー増幅器、ファイバーラマン増幅器 (fiber Raman amplifier: FRA, 簡単のため以下ではラマン増幅器と呼ぶ) および半導体レーザー増幅器 (SLA) がある¹³⁻¹⁶⁾。希土類添加ファイバー増幅器には、PDFA (praseodymium-doped fiber amplifier), TDFA (thulium-doped fiber amplifier), および EDFA があり、それぞれ希土類元素としてプラセオジウム (Pr), ツリウム (Tm) およびエルビウム (Er) を

NTT 未来ねっと研究所 (〒239-0847 横須賀市光の丘 1-1)
E-mail: masuda@exa.onlab.ntt.co.jp

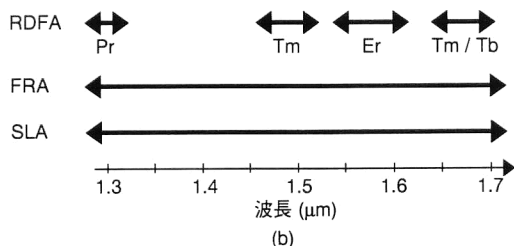
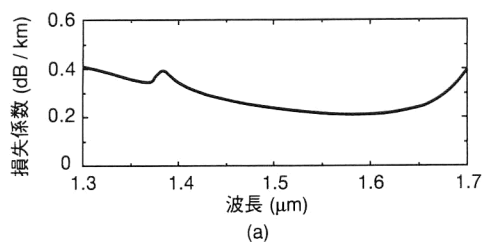


図1 (a) 伝送ファイバーの損失係数スペクトルと (b) 光増幅器の利得帯域。RDFA：希土類添加ファイバー増幅器，Pr：プラセオジウム，Tm：ツリウム，Er：エルビウム，FRA：ラマン増幅器，SLA：半導体レーザー増幅器。

用いている。ラマン増幅器は、光ファイバー中での誘導ラマン散乱現象を利用したものであり、励起光波長で決まる任意の波長域に利得帯域を設定できる。一方、半導体レーザー増幅器は、電流励起された半導体中での誘導放出現象を利用したものであり、その利得帯域は、InGaAsPの組成比を変えることにより、1.3~1.7 μm の任意の波長域に設定可能である。ラマン増幅器と半導体レーザー増幅器の利得帯域幅は最大で100 nm程度である。

図2はラマン増幅器の利得スペクトルを示している¹⁶⁾。(a)が単一波長励起の場合、(b)が多波長励起の場合である。利得媒質としての光ファイバーは、敷設した伝送ファイバーをそのまま用いて分布増幅を行う場合と、励起効率が大きく、大きなラマン利得が得られる光ファイバー（ここでは、ラマンファイバーと呼ぶ）をボビン等に收容して集中増幅を行う場合がある。ラマンファイバーは、Geの添加濃度が高い、高開口数（NA）のシリカファイバーであり、長さは数百m以上である。単一波長励起の場合には、励起光波長の約13 THz低い周波数、すなわち、1.5 μm で約100 nm長い波長に利得ピークを有する。一方、多波長励起のラマン増幅器では、励起光波長とパワーを調整することにより、図2(b)に示すような広波長域で平坦な利得スペクトルが得られる。

ラマン増幅器は、一般に低雑音・高出力である^{8,18,20,21)}。一方、半導体レーザー増幅器は、飽和出力が低く（10 dBm程度）、応答時定数が短い（nsオーダー）という特徴があるため、多波長一括増幅を行う線形中継増幅器への適用よりもむしろ、送信器および受信器等における波長ごとの増

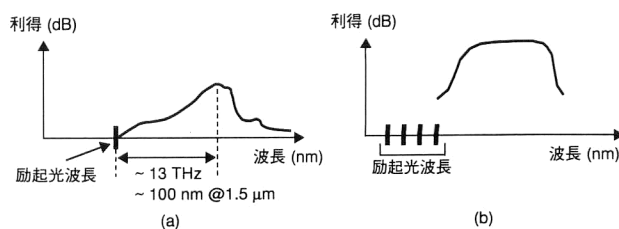


図2 ラマン利得スペクトル。(a) 単一波長励起、(b) 多波長励起。

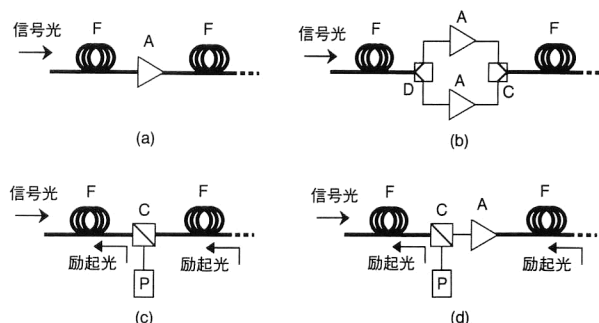


図3 光増幅中継系の構成。(a) 集中増幅型、(b) 2波長帯集中増幅型、(c) 分布増幅型、(d) ハイブリッド（集中・分布）増幅型、F：伝送ファイバー、A：光増幅器、D：分波器、C：合波器、P：励起光源。

幅や信号処理等への適用が期待される^{1,13)}。

1.2 光増幅中継系の構成

図3は、広帯域化の視点から分類した光増幅中継系の各種構成を示している。特に、分布増幅による優れた低雑音性を有する分布ラマン増幅を用いた構成を含めている^{8,18-21)}。図3(a)は1波長帯の集中増幅構成、(b)は2波長帯並列配置の集中増幅構成、(c)はラマン増幅を用いた分布増幅構成、(d)は分布ラマン増幅と集中増幅器を用いたハイブリッド構成である。ただし、(b)の2波長帯構成は、分波器・合波器を変えることにより3以上の任意数の波長帯構成に拡張できる。

1.3 広帯域化の流れ

本節では、広帯域化の流れと広帯域化を可能とした手法について述べる。図4は、1989年以降に報告された、1.45~1.65 μm の波長域における光ファイバー増幅器の利得帯域を示している。(a)希土類添加ファイバー増幅器（RDFA）、(b)多波長帯構成のRDFA、(c)ハイブリッド増幅器（RDFA+ラマン）、および(d)ラマン増幅器に分けて示し、また、利得帯域としては、利得平坦帯域（3 dB利得低下帯域）、高利得帯域（平坦化を見込んだ20~25 dB以上の帯域）、および伝送ファイバー透明帯域（分布増幅を用いた場合に利得がファイバー損失を超える帯域）を示している。ただし、利得平坦帯域として、3

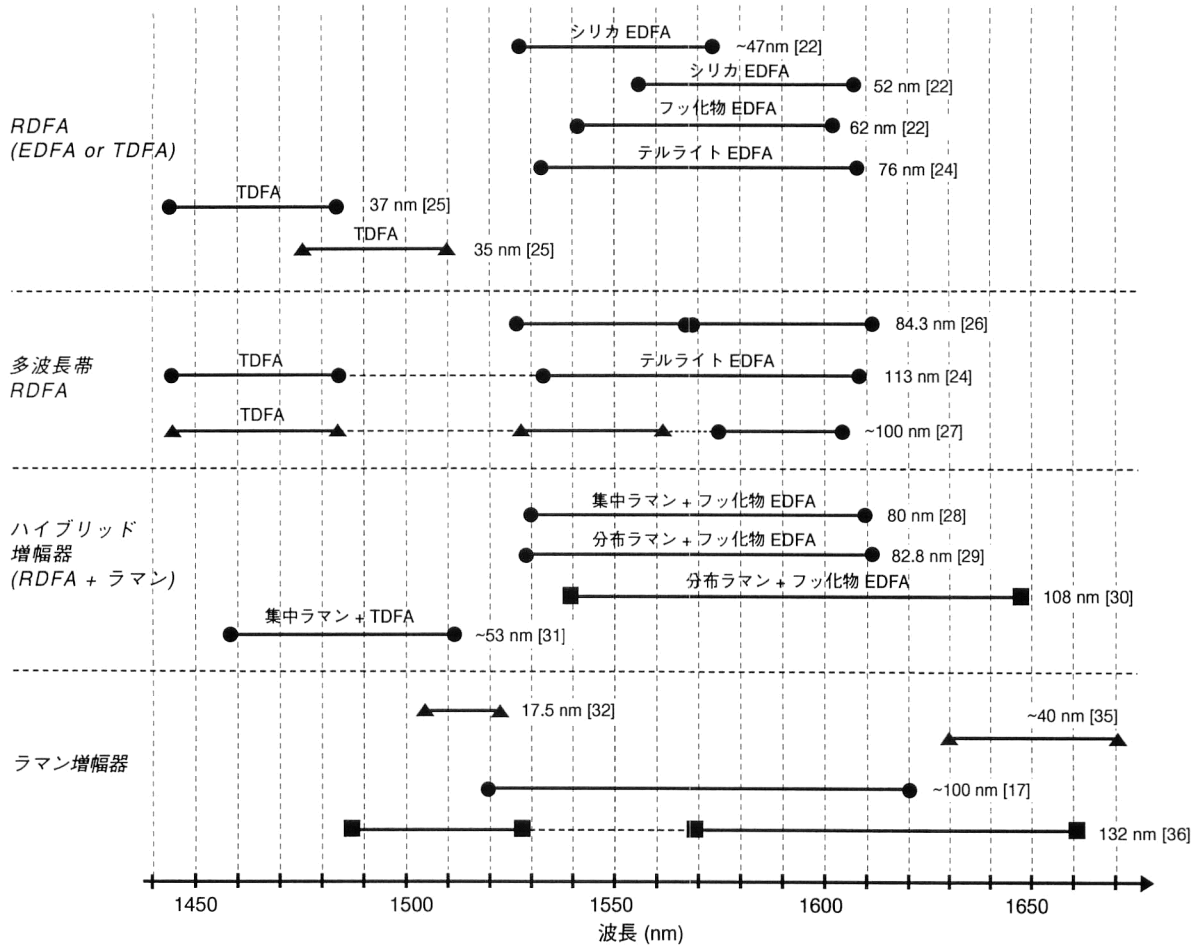


図4 光ファイバー増幅器の利得帯域。RDFA, EDFA, T DFA: 希土類添加, エルビウム添加, ツリウム添加ファイバー増幅器。●-----●: 利得平坦 (3 dB) 帯域, ▲-----▲: 高利得 (20 or 25 dB) 帯域, ■-----■: 伝送ファイバー透明 (0 dB) 帯域。

dB 帯域以外に 1 dB 帯域などの帯域や, ピーク利得値と非平坦利得値 (利得のばらつき) の相対比率を評価基準として用いる場合がある。以下に, 上記の 4 種類の光ファイバー増幅器ごとに, 広帯域化の流れを示す。

1.3.1 希土類添加ファイバー増幅器 (RDFA)

1989 年から 1996 年までの EDFA に関しては, 当初のシリカ EDFA では, その平坦帯域幅は 1550 nm 近傍の 10~20 nm 程度であったが, 新規ファイバー材料 (Al 共添加シリカファイバーやフッ化物ファイバー), 利得等化器, および新規波長帯 (1580 nm 帯) の利用により, 最大約 40 nm の 3 dB 帯域が 1550 nm 帯および 1580 nm 帯で報告されている^{2-4,6,22)}。

一方, 1997 年以降では, まず, 中間に損失値の大きな利得等化器を設置した 2 段増幅構成を用いて, 低雑音・高出力を保ちつつ広帯域化が図られている。シリカ EDFA の 1550 nm 帯に約 47 nm の 3 dB 帯域幅 (40 nm の 1 dB 帯域幅), および 1580 nm 帯に 52 nm の 3 dB 帯域幅が得られている^{3,22)}。さらに, 利得等化器を用いた帯域拡大を

徹底した 3 段増幅構成を用いて, シリカ, フッ化物, およびテルライトの各 EDFA で, それぞれ 57 nm, 62 nm²²⁾, および 69 nm²³⁾ の 3 dB 帯域幅が得られている。また, 外付け利得等化器を用いた構成ではあるが, テルライト EDFA で 76 nm の 3 dB 帯域幅が報告されている²⁴⁾。

T DFA²⁵⁾ に関しては, アップコンバージョン励起と利得等化器を用いて, 1.47 μm 近傍に 37 nm の 3 dB 帯域幅²⁵⁾ が, また, 2 波長励起により反転分布状態を調整した利得シフト型 T DFA で, 1.49 μm 近傍に 25 dB 以上の高利得帯域幅として 35 nm が得られている²⁵⁾。

1.3.2 多波長帯 RDFA

多波長帯構成の RDFA としては, まず, 1550 nm 帯と 1580 nm 帯の EDFA を合・分波器を用いて多重した構成 (図 3(b)) により, 精度よく平坦化した増幅器で約 63 nm の 3 dB 帯域幅 (60 nm の 1.7 dB 帯域幅) が得られている^{3,4,22)}。また, サーキュレーターとファイバークレーティング (FG) を用いた急峻な波長分離特性を有する合・分波器と, 利得等化器を利用して帯域拡大された 1550 nm

帯と 1580 nm 帯の EDFA を用いて、84.3 nm の 3 dB 帯域幅が得られている²⁶⁾。前記の利得等化されたテルライト EDFA と TDFA を用いて、113 nm の 3 dB 帯域幅が得られている²⁴⁾。さらに、3 波長帯構成として、1550 nm 帯と 1580 nm 帯の EDFA、および TDFA を用いて、約 100 nm の帯域幅が得られている^{2,25,27)}。

1.3.3 ハイブリッド増幅器 (RDFA+ラマン)

ハイブリッド増幅器は、RDFA とラマン増幅器の縦接続構成を用いて効率よく帯域拡大および利得平坦化を行ったものであり、RDFA の長波長域における利得低下をラマン利得で補っている²²⁾。まず、EDFA を用いた各種ハイブリッド増幅器が報告され、次に、TDFA でも同様にハイブリッド増幅器が実現されている。ラマン増幅には、分布増幅または集中増幅を適用できる。

利得平坦性の高いフッ化物 EDFA を用いて、ラマン利得のピーク値が 10 dB 程度になるように励起したとき、集中ラマンとフッ化物 EDFA (図 3(a))、および分布ラマンとフッ化物 EDFA (図 3(d)) を用いたハイブリッド増幅器とともに 75 nm の 3 dB 帯域幅が得られている^{3,22)}。さらに、ラマン利得のピーク値が 20 dB 程度になるように多波長・高パワーで励起したとき、集中ラマンとフッ化物 EDFA を用いて 80 nm²⁸⁾、分布ラマンとフッ化物 EDFA を用いて 82.8 nm²⁹⁾ の 3 dB 帯域幅が得られている。また、1535 nm の高出力ラマン励起光源 (EDFA 利用) を用いて、ハイブリッド増幅器の利得帯域幅を最大化し、50 km の伝送ファイバーに対する透明利得帯域として 108 nm (1540~1648 nm) の利得帯域幅が得られている³⁰⁾。一方、TDFA と集中ラマン増幅器を用いたハイブリッド増幅器では、1490 nm 周辺に約 53 nm の 3 dB 帯域幅 (50.5 nm の 2 dB 帯域幅) が得られている³¹⁾。

1.3.4 ラマン増幅器

すでにいくつかの解説記事で紹介されているように、ラマン増幅技術の歴史は古く、EDFA 出現以前 (おもに 1980 年代後半) から、伝送実験を含む各種検討が行われている^{11,12)}。これまで、ラマン増幅器は、1.3、1.4、および 1.5 μm 帯の各種波長域の線形中継³²⁾ およびソリトンシステム³³⁾ において検討されてきた。それらのラマン増幅器は、EDFA に比べ励起効率が低く、ワット級の高出力励起光源が必要であるなどの実験上の制限があった。しかしながら、最近の高出力レーザー技術の進展と、WDM システムの大容量化および長距離化に対する強い要望を背景として、再び研究が活発化している。

新規波長帯の集中型ラマン増幅器として、1.51 μm 帯³⁴⁾ および 1.65 μm 帯³⁵⁾ の増幅器が報告されており、その高

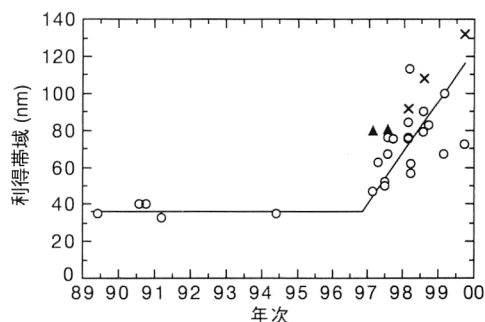


図5 利得帯域幅の拡大の流れ。○：平坦帯域，▲：高利得帯域，×：透明帯域。

利得帯域幅 (20 dB 以上の利得) は、約 20~40 nm である。また、分布増幅型ラマン増幅器に関しては、2 波長励起を用いて、45 km の伝送ファイバーに対する透明利得帯域幅として 92 nm (1560 nm 中心) の増幅器が報告されている²¹⁾。さらに、図 2(b) に模式的に示した多波長励起 (12 波長多重) を用いた平坦化・広帯域化により、約 100 nm の利得平坦帯域幅 (1 dB 帯域幅) が 1520~1620 nm の波長域で得られている¹⁷⁾。また、2 波長帯構成のラマン増幅器により、50 km の伝送ファイバーに対する透明利得帯域として、長波長帯 (中心波長 1610 nm) で 91 nm の帯域幅、短波長帯 (中心波長 1510 nm) で 41 nm の帯域幅、合計で 132 nm の帯域幅が得られている³⁶⁾。

以上、各種の利得帯域を紹介したが、図 4 から明らかなように、RDFA とラマン増幅器により、1440~1670 nm の任意の波長域に利得帯域が得られていることがわかる。また、1.5 μm 帯周辺における利得帯域幅の拡大の年次変化の様子を示すと、図 5 のようになる。ただし、利得帯域幅としては、平坦帯域幅、高利得帯域幅、および透明帯域幅とし、広帯域幅として報告されたものを集めた。1989 年から 1996 年までは、利得帯域幅は高々 30~40 nm であったが、1997 年以降の活発な研究により、利得帯域幅が急速に拡大している様子が見られる。およその傾向を図中の折れ線で示したが、1997 年以降の 3 年足らずでほぼ 3 倍に拡大している。上記の技術推移と今後の需要の大きさから、今後のさらなる利得帯域幅拡大が予想される。ちなみに、100 nm の波長帯域幅は周波数帯域幅に換算すると、1.55 μm で約 13 THz である。

2. 新規波長帯のラマン増幅器

2.1 ラマン増幅器の構成

分布増幅型のラマン増幅器の構成は、図 3(c) および (d) に示した構成があり、伝送ファイバー中で増幅を行っている。一方、集中増幅型のラマン増幅器の構成は、図

3(c) の伝送ファイバーをラマンファイバーに置き換えたものである。

2.2 ラマン増幅器の具体例

以下に、 $1.65\ \mu\text{m}$ 帯³⁵⁾の集中増幅型ラマン増幅器、および2波長帯 ($1.61\ \mu\text{m}$ 中心および $1.51\ \mu\text{m}$ 中心) 構成の分布増幅・集中増幅混在型ラマン増幅器³⁶⁾の具体例を示す。 $1.65\ \mu\text{m}$ 帯のラマン増幅器は2段増幅構成 (多重レーラー散乱に起因する雑音抑圧のための構成^{12,28,35)}) を有し、励起光波長は、 $1540\sim 1563\ \text{nm}$ (波長可変の励起光源を使用)、またラマンファイバー入力の励起光パワーは $700\ \text{mW}$ である。利得および雑音指数のスペクトルは図6に示すとおりである。たとえば励起光波長が $1540\ \text{nm}$ のとき、 $1630\sim 1670\ \text{nm}$ の波長域 (帯域幅 $40\ \text{nm}$) で $20\ \text{dB}$ 以上のネット利得および $33\ \text{dB}$ のピーク利得が得られている。雑音指数は、利得が $20\ \text{dB}$ 以上の波長域で $6.2\ \text{dB}$ 以下である。

次に、2波長帯構成の超広帯域ラマン増幅器の具体構成と増幅特性を紹介する。図7に示したように、本増幅器

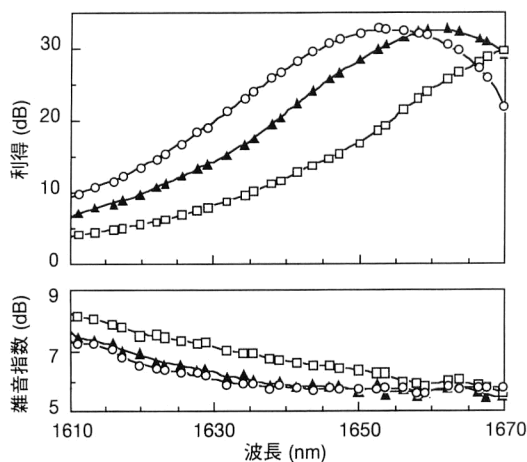


図6 $1.65\ \mu\text{m}$ 帯ラマン増幅器の利得・雑音指数スペクトル。○：励起光波長= $1540\ \text{nm}$ 、▲：励起光波長= $1550\ \text{nm}$ 、□：励起光波長= $1563\ \text{nm}$ 。

は、伝送ファイバーである $50\ \text{km}$ の $1.5\ \mu\text{m}$ 分散シフトファイバー (DSF) 中で分布ラマン増幅を行う部分と、そのDSFの後段に設置した、2波長帯の集中増幅型ラマン増幅器部分からなる。2波長帯の中心波長は、長波長帯で約 $1610\ \text{nm}$ 、短波長帯で約 $1510\ \text{nm}$ であり、短波長帯でも分布増幅を、また長波長帯でも集中増幅を行っている。また、長波長帯の集中増幅は、広帯域かつ高利得にするため、上記の2段増幅構成をさらに高度化した3段増幅構成を用いている。励起光パワーは、総合で $1846\ \text{mW}$ である。

図8は本増幅器の利得スペクトル特性として、分布利得と集中利得を合わせた全利得スペクトルと、DSFの損失スペクトルを示している。ただし、短波長帯の励起が、 $1417\ \text{nm}$ 付近の接近した2波長 (実質1波長) で行われているのは、単に実験上の都合によるものであり、多波長励起による短波長帯の広帯域化が可能である。また、本ラマン増幅器を用いた伝送実験 (ただし小信号・単一チャンネル動作) により、全利得帯域において誤りなしの良好な動作が確認されている。

以上、将来の大容量波長多重システムに適用可能な、 $1.3\sim 1.7\ \mu\text{m}$ の波長域における各種光増幅器およびそれを用いた線形中継系について、その構成と特徴を示した。特に、最近活発に研究されている $1.5\ \mu\text{m}$ 周辺の波長域 ($1.45\sim 1.65\ \mu\text{m}$) における光増幅器について、広帯域化の流れとその実現技術を紹介した。また、EDFAの利得

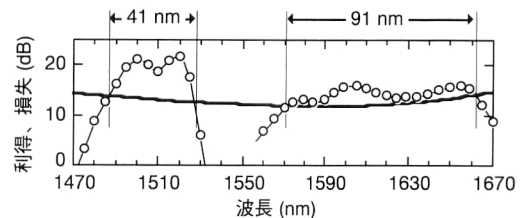


図8 超広帯域ラマン増幅器の利得スペクトル特性。○：ラマン利得、—：分散シフトファイバー損失。

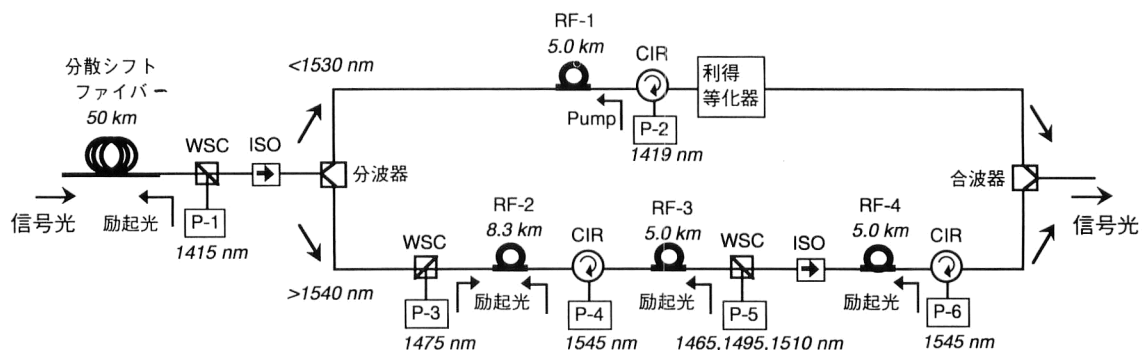


図7 超広帯域ラマン増幅器の構成。RF：ラマンファイバー、P：励起光源、WSC：波長選択型合波器、ISO：アイソレーター、CIR：サーキュレーター。

帯域以外の任意の波長域で動作可能な広帯域なラマン増幅器について、具体的な構成および特性例を紹介した。これまでの研究により、1.45~1.65 μm の任意の波長域において利得帯域が得られており、EDFA の限界波長幅である約 80 nm (周波数幅 10 THz) を超える利得帯域幅 (最大 132 nm) が複数報告されている。利得帯域幅の拡大は、1997 年以降ほぼ 3 年間で 3 倍のスピードで急速に進んでいる。この分野における今後の研究開発の進展に注目したい。

文 献

- 1) 青山友紀, 姫野 明, 宮 哲雄, 大越春喜, 山口昌幸, 金森弘雄, 桑原秀夫, 鈴木扇太, 東盛裕一, 加藤邦治, 岡山秀彰, 田嶋一人, 清野 実: “フォトリックネットワーク用デバイス(小特集)”, 電子情報通信学会誌, **82** (1999) 703-775.
- 2) 鳥羽 弘: “光増幅器のシステムへの展開”, O plus E, **21** (1999) 965-974.
- 3) H. Yoshimura, K. Sato and N. Takachio: “Future photonic transport networks based on WDM technologies,” IEEE Commun. Magazine (1999) 74-81.
- 4) A. Mori, M. Yamada, Y. Ohishi and M. Shimizu: “Ultra-broadband amplification for DWDM systems,” *Tech. Dig. of European Conference of Optical Communications*, Vol. 1 (1999) pp. 260-263.
- 5) 清水 誠: “光ファイバー増幅器”, 光学, **25** (1997) 624-631.
- 6) M. Jinno, T. Sakamoto, M. Fukui, S. Aisawa, J. Kani and K. Oguchi: “Ultra-wide band WDM transmission: issues and enabling technologies,” *Tech. Dig. of Optoelectronics and Communications Conference*, 16A1 (1998) pp. 404-405.
- 7) S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, I. Shake and K. Mori: “3 Tbit/s (160 Gbit/s \times 19 ch) OTDM/WDM transmission experiment,” *Tech. Dig. of Optical Fiber Communication Conference*, PD1 (1999).
- 8) H. Suzuki, J. Kani, H. Masuda, N. Takachio, K. Iwatsuki, Y. Tada and M. Sumida: “25 GHz-spaced, 1 Tb/s (100 \times 10 Gb/s) super dense-WDM transmission in the C-band over a dispersion-shifted fibre cable employing distributed Raman amplification,” *Tech. Dig. of European Conference of Optical Communications*, PD9 (1999) pp. 30-31.
- 9) T. Naito, N. Shimojoh, T. Tanaka, H. Nakamoto, M. Doi, T. Ueki and M. Suyama: “1 Terabit/s WDM transmission over 10,000 km,” *Tech. Dig. of European Conference of Optical Communications*, PD (1999) pp. 24-25.
- 10) 西田好毅: “プラセオジウム添加光ファイバ増幅器 (PDFA)”, Optronics, No. 8 (1999) 118-123.
- 11) 並木 周, 江森芳博: “ファイバラマン増幅器”, O plus E, **21** (1999) 990-997.
- 12) 枝川 登: “ファイバラマン増幅器”, Optronics, No. 8 (1999) 111-117.
- 13) 中川清司, 中沢正隆, 相田一夫, 萩本和男: 光増幅器とその応用 (オーム社, 1992).
- 14) E. Desurvire: *Erbium-Doped Fiber Amplifiers* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994).
- 15) S. Sudo ed.: *Optical Fiber Amplifiers* (Artech House, Inc., Boston, 1997).
- 16) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, Inc., Boston, 1989).
- 17) Y. Emori and S. Namiki: “100 nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes,” *Tech. Dig. of Optical Fiber Communication Conference*, PD19 (1999).
- 18) N. Takachio, H. Suzuki, H. Masuda and M. Koga: “32 \times 10 Gb/s distributed Raman amplification transmission with 50-GHz spacing in the zero-dispersion region over 640 km of 1.55- μm dispersion-shifted fiber,” *Tech. Dig. of Optical Fiber Communication Conference*, PD9 (1999).
- 19) H. Masuda, S. Kawai and K.-I. Suzuki: “Optical SNR enhanced amplification in long-distance recirculating-loop experiment using 1580 nm band hybrid amplifier,” *Electron. Lett.*, **35** (1999) 411-412.
- 20) S. Kawai, H. Masuda, K.-I. Suzuki and K. Aida: “Wide bandwidth and long distance WDM transmission using highly gain-flattened hybrid amplifier,” *Tech. Dig. of Optical Fiber Communication Conference*, FC3 (1999) pp. 56-59.
- 21) K. Rottwitt and H. D. Kidorf: “A 92 nm bandwidth Raman amplifier,” *Tech. Dig. of Optical Fiber Communication Conference*, PD6 (1999).
- 22) H. Masuda, S. Kawai, K.-I. Suzuki and K. Aida: “Wide-band WDM transmission using erbium-doped fluoride fiber and Raman amplifiers,” *Tech. Dig. of Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications*, MD2 (1998) pp. 58-61.
- 23) 阪本 匡, 森 淳, 星野耕一, 山田 誠, 大石泰丈, 清水 誠: “3段構成を有する広帯域・利得等化型テルライトEDFA”, 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会講演論文集, C-3-68 (1999) p. 174.
- 24) M. Yamada, A. Mori, K. Kobayashi, H. Ono, T. Kanamori, K. Oikawa, Y. Nishida and Y. Ohishi: “Gain-flattened tellurite-based EDFA with a flat amplification bandwidth of 76 nm,” *Tech. Dig. of Optical Fiber Communication Conference*, PD7 (1998).
- 25) 阪本 匡: “ツリウム添加光ファイバ増幅器 (TDFa)”, Optronics, No. 8 (1999) 104-110.
- 26) Y. Sun, J. W. Sulhoff, A. K. Srivastava, A. Abramov, T. A. Strasser, P. F. Wysocki, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, R. P. Espindra, C. Wolf, J. L. Zyskind, A. M. Vengsarkar and J. Zhou: “A gain-flattened ultra wide band EDFA for high capacity WDM optical communications systems,” *Tech. Dig. of European Conference of Optical Communications* (1998) pp. 53-54.
- 27) J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, T. Kanamori and K. Oguchi: “Triple-wavelength-band WDM transmission over cascaded dispersion-shifted fibers,” *Tech. Dig. of Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications*, WC2 (1999) pp. 26-29.
- 28) H. Masuda and S. Kawai: “Wide-band and gain-flattened hybrid amplifier consisting of an EDFA and a multi-wavelength pumped Raman amplifier,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11** (1999) 647-649.
- 29) H. Masuda, S. Kawai, K.-I. Suzuki and K. Aida: “Wide-band and low noise optical amplification using distributed Raman amplifiers and erbium-doped fiber amplifiers,” *Tech. Dig. of European Conference of Optical Communications* (1998) pp. 51-52.
- 30) H. Masuda, S. Kawai and K. Aida: “Ultra-wideband hybrid

- amplifier comprising distributed Raman amplifier and erbium-doped fibre amplifier," *Electron. Lett.*, **34** (1998) 1342-1343.
- 31) J. Kani and M. Jinno: "Wideband and flat-gain optical amplification from 1460 to 1510 nm by serial combination of a thulium-doped fluoride fibre amplifier and fibre Raman amplifier," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 1004-1006.
- 32) Y. Aoki: "Fiber Raman amplifier properties for applications to long distance optical communications," *Optical and Quantum Electronics*, **21** (1989) S89-S104.
- 33) K. Iwatsuki, K.-I. Suzuki and S. Nishi: "Adiabatic soliton compression of gain-switched DFB-LD pulse by distributed fiber Raman amplification," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3** (1991) 1074-1076.
- 34) J. Kani, M. Jinno and K. Oguchi: "Fibre Raman amplifier for 1520 nm band WDM transmission," *Electron. Lett.*, **34** (1999) 1745-1746.
- 35) H. Masuda, S. Kawai, K.-I. Suzuki and K. Aida: "1.65 μm band fibre Raman amplifier pumped by wavelength-tunable amplified spontaneous emission light source," *Tech. Dig. of European Conference of Optical Communications*, PD (1998) pp. 139-140.
- 36) H. Masuda and S. Kawai: "Ultra wide-band Raman amplification with a total gain-bandwidth of 132 nm of two gain-bands around 1.5 μm ," *Tech. Dig. of European Conference of Optical Communications*, Vol. 2 (1999) pp. 146-147.

(1999年11月25日受理)