

■5 群(通信・放送)- 3 編(光伝送技術)

---

## 4 章 波長分割多重技術

**【本章の構成】**

- 4-1 多波長光源
- 4-2 広帯域光増幅
- 4-3 DWDM 技術
- 4-4 CWDM 技術

## ■5群-3編-4章

### 4-1 多波長光源

(執筆：多久島裕一) [2009年8月 受領]

急増する通信トラフィックに対応して光通信ネットワークの大容量化を図るためには、波長分割多重 (wavelength division multiplexing, WDM) 技術の開拓は不可欠であり、波長数の増大や波長チャンネルの狭間隔化を大規模に推し進める必要がある。従来のシステムでは、異なる波長のDFBレーザを個別に集めて多数の波長チャンネルを構成しているが、波長数が増えると、設置スペースや消費電力が増大する、波長制御が困難になる、保守が煩雑になる、といった様々な問題が生じる。また近年、加入者を収容するアクセス系へもWDM技術が導入されようとしており、低コストで多数の波長チャンネルを提供する技術が求められている。本節ではこれらの問題点や技術的要求に応える将来技術として、多数の波長の光信号を一つの光源で一括して生成する多波長光源について述べる。

#### 4-1-1 光集積回路を用いた多波長光源

発振波長の異なる多数の半導体レーザを単一の光集積回路 (photonic integrated circuit) に組み込んで多波長光源を構成する方法である<sup>1, 2)</sup>。基本的な構成を図4・1に示す。コンパクトにWDM送信システムを構築できるという利点を持ち、実用上ニーズが高い。

光基板上に集積することができる半導体レーザの数で波長数が決まるため、高度な光集積化技術が鍵となる。近年になってInPベースのモノリシック光集積回路のデバイス作成技術が向上したことにより、実現できるデバイスの種類が豊富になり、高性能で実用的な多波長光源の研究開発が活発に進められている<sup>2)</sup>。最近の報告例では、一枚のInP基板上で、10~40波長のDFBレーザ、光変調器、アレイ導波路グレーティング (arrayed waveguide grating, AWG)、光減衰器、光検出器を集積化することにより、高速光変調、光パワー調整、光パワーモニタといったWDM光送信システムに必要な機能を単一の光モジュールで実現している<sup>1)</sup>。

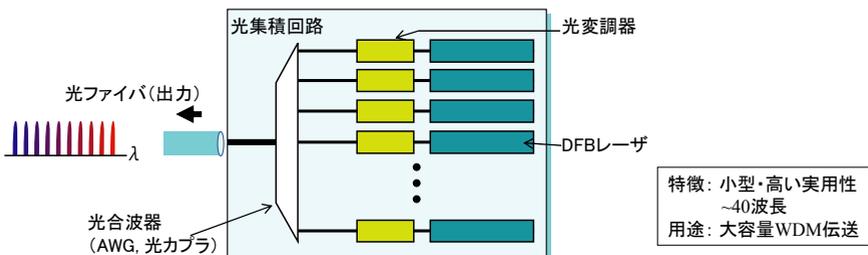


図4・1 光集積回路を用いた多波長光源の基本構成

#### 4-1-2 光スペクトルスライスをを用いた多波長光源

広帯域光のスペクトルの一部分を光フィルタやAWGを用いて切り出すことにより、多波長光信号を生成する方法で、用いる広帯域光により波長数や用途が異なる。

## (1) 光増幅器などからの自然放出光(ASE光)を用いる方法

光増幅器やスーパーluminescentダイオード (super-luminescent diode, SLD) から発せられる自然放出光雑音 (amplified spontaneous emission, ASE 光) はスペクトル幅が広く、平坦性も良い。そのため、**図4・2**のように、ASE 光を広帯域光源として用いてスペクトルの一部をスライスすることにより多波長光源を構成できる。この場合、ASE-ASE ビート雑音による強度雑音が発生するが、スライスするスペクトル幅と伝送ビットレートを適切に選べば WDM 伝送用の光源として十分使用に耐えうる<sup>3)</sup>。例えば、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯でフィルタの帯域幅を $1 \text{ nm}$ とすると 相対雑音強度比 (relative intensity noise, RIN) は $-110 \text{ dB/Hz}$ 以下になり、ビットレートが $2 \text{ Gb/s}$ 程度であれば RIN によるパワーペナルティは無視しうる。

この方式の特徴は、構成が簡単で、低コストで実現できることである。これはアクセス系においては非常に大きな利点であり、この原理を利用した WDM PON (WDM 伝送を利用した次世代 PON (passive optical network)) システムの開発・商用試験が進められている<sup>4)</sup>。

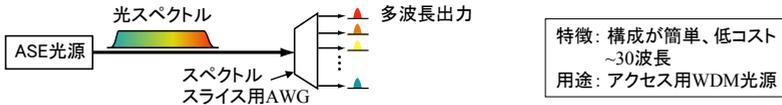


図4・2 ASE光源を用いた多波長光源

## (2) 光位相変調器・強度変調器を用いる方法

連続光 (continuous wave, cw 光) に位相変調器 (もしくは強度変調器) を用いて正弦波変調すると、連続光の周波数から変調周波数の整数倍離れたところに側波が発生し、**図4・3**のように等間隔に並んだ多数の線スペクトルから成る光が得られる。これらの線スペクトルを1本ずつ切り出し、独立した連続光として用いることにより多波長光源を実現することができる。

波長数を増やすためには深い位相変調をかける必要がある。このため、印加電圧に対する光位相の変化の大きな  $\text{LiNbO}_3$  導波路位相変調器が開発されている<sup>5)</sup>。このほかに、光スペクトルを効率よく広げる有力な方法として光共振器を用いる方法がある。これは、位相変調器を光共振器のなかに置き、光共振器内部で位相変調器を何度も通過させることにより変調指数を高める方法で、位相変調の周期と光が共振器を往復する時間を一致させると深い位相変調がかかり、光スペクトルは劇的に広がる<sup>6)</sup>。このとき、多数の線スペクトルからなる光スペクトルが、櫛の歯のように見えることから光コム (optical comb) 発生とも呼ばれる。

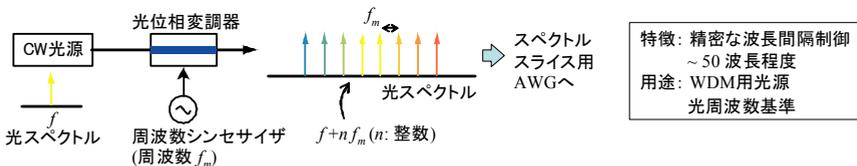


図4・3 光位相変調・強度変調を用いた多波長光源

### (3) スーパーコンティニューム (SC) 発生を用いる方法

媒質に高強度の光パルスを入力すると、自己位相変調などの非線形光学効果によりスペクトルが広がり白色化する。この現象はスーパーコンティニューム (super-continuum, SC) 発生という名称で古くから知られている<sup>7)</sup>。SC 発生を用いた多波長光源の構成例を図4・4に示す。パルス光源として光ファイバ増幅器や半導体光増幅器を用いたモード同期レーザを用い、石英系光ファイバを非線形媒質として使用することにより、コンパクトな構成で SC 発生が実現できる。

光ファイバを用いた SC 発生では、主に自己位相変調や四光波混合などの3次の非線形光学効果がスペクトルの広帯域化に寄与している<sup>7,8)</sup>。よって、SC を効率よく発生させるためには光ファイバ中の3次非線形光学係数を高めることが有効であり、コア断面積を狭くして光の閉じ込めを強くした高非線形ファイバやフォトニック結晶ファイバがよく用いられる。

SC 発生を用いる方法の大きな特徴は、非常に広い光スペクトルが得られることであり、100nm を超える帯域幅を得るのは困難ではない。また、モード同期レーザのように繰り返し周波数が一定の光パルスを用いた場合、SC 発生によって得られる光スペクトルは、多数の線スペクトルからなる。これらの線スペクトルを1本ごと AWG で取り出すことにより、1000 波を超える超多波長光源を実現することができる<sup>8)</sup>。

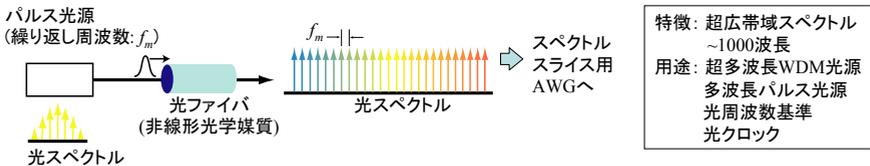


図4・4 スーパーコンティニューム (SC) 発生を用いた多波長光源

#### 4-1-3 多波長光源における光周波数 (波長) の制御

前述の光位相変調を用いる方法とSC発生を用いる方法では、出力光は多数の線スペクトルからなり、櫛状に等間隔で並んでいる。また、線スペクトルの間隔は、変調周波数や入力光パルスの繰り返し周波数に一致するので、多数の線スペクトルのうちの1本の光周波数を調整することにより、すべての波長チャネルの光周波数を一括して精密に調整することができる。この性質を利用して、非常に精度が高い光周波数基準や光クロックが実現されている<sup>6)</sup>。

#### ■参考文献

- 1) R. Nagarajan et al.: "Large-scale photonic integrated circuits," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 11, no. 1, pp. 50-65 (2005).
- 2) C. R. Doerr: "InP-based photonic devices," in Technical Digest of OFC/NFOEC 2008, paper OWE3 (2009).
- 3) J. S. Lee, Y. C. Chung, and D. J. DiGiovanni: "Spectrum-sliced fiber amplifier light source for multichannel WDM applications," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 5, no. 12, pp. 1458-1461 (1993).
- 4) C. H. Lee, S. M. Lee, K. M. Choi, J. H. Moon, S. G. Mun, K.T. Jeong, J. H. Kim, and B. Kim, "WDM-PON experiences in Korea," J. Opt. Networking, vol. 6, no. 5, pp. 451-464 (2007).
- 5) M. Doi, M. Sugiyama, K. Tanaka, and M. Kawai: "Advanced LiNbO<sub>3</sub> optical modulators for broadband optical communications," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 12, no. 4, pp. 745-750 (2006).
- 6) M. Kourogi and M. Ohtsu: "Past, present, and future of optical comb generation," Proc. SPIE, vol. 4269, pp.

- 59-71, (2001).
- 7) G. P. Agrawal: Nonlinear Fiber Optics, 3rd edition, Academic Press (2001).
  - 8) Y. Takushima and K. Kikuchi: "10-GHz, over 20-channel multiwavelength pulse source by slicing supercontinuum spectrum generated in normal-dispersion fiber," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 11, no. 3, pp. 322-324 (1999).
  - 9) T. Ohara, H. Takara, T. Yamamoto, H. Masuda, T. Morioka, M. Abe, and H. Takahashi: "Over-1000-channel ultradense WDM transmission with supercontinuum multicarrier source," J. Lightw. Technol., vol. 24, no. 6, pp. 2311-2316 (2006).

## ■5 群-3 編-4 章

### 4-2 広帯域光増幅

#### 4-2-1 希土類添加光ファイバ増幅技術

(執筆者：山田 誠) [2009年7月 受領]

希土類添加光ファイバ増幅器は、 $1.5\mu\text{m}$  帯 WDM 伝送をベースとするフォトニクスネットワーク（基幹ネットワーク）の構築において、伝送用光ファイバや同ネットワークを構成する光デバイスの損失を補償しネットワークの大規模化・長距離化を推し進めるうえで重要なシステム構成要素であり、その増幅帯域はネットワークの運用波長帯を決定する重要な特性である<sup>1)</sup>。これまで、ネットワークの大容量化は  $1.5\mu\text{m}$  帯光ファイバ増幅の広帯域化が C 帯（1530-1565nm 帯）、L 帯（1565-1625nm 帯）、さらに S 帯（1460-1530nm 帯）へと拡大されるのと相まって進んできた<sup>2-4)</sup>。さらに、現在導入が進められている加入者系ネットワークである PON（Passive Optical Network、収容局から加入者宅へは  $1.3\mu\text{m}$  帯（O 帯（1260-1360nm）、加入者宅から収容局へは  $1.48\mu\text{m}$  帯（S 帯）信号を使用）の伝送距離増加に向けて希土類添加光ファイバ増幅器への適用も検討されている<sup>5)</sup>。なお、C 帯（1530-1565nm 帯）、L 帯（1565-1625nm 帯）、S 帯（1460-1530nm 帯）とは、ITU-T で定義された波長帯で、ほかに E 帯（1370-1460nm 帯）、U 帯（1625-1675nm 帯）がある。

本節では、 $1.5\mu\text{m}$  帯 WDM 伝送用の広帯域光ファイバ増幅技術と  $1.3\mu\text{m}$  帯及び  $1.48\mu\text{m}$  帯希土類添加ファイバ増幅技術を説明する。

#### (1) $1.5\mu\text{m}$ 帯 WDM 伝送用・広帯域光ファイバ増幅技術<sup>2,3)</sup>

$\text{Er}^{3+}$  添加ファイバ増幅器 (EDFA:  $\text{Er}^{3+}$ -doped Fiber Amplifier) を用いて  $1.5\mu\text{m}$  帯 WDM 伝送用広帯域光ファイバ増幅は実現されている。表 4-1 に、希土類添加ファイバ増幅器で用いられている広帯域化のコンセプト、技術要素及び構成を示す。広帯域化技術は、①増幅帯域の異なる光ファイバ増幅器を並列接続する方法、②増幅帯域自体を拡大する方法に分類される。これまでに EDFA では、最初に実現された C 帯 EDFA に次いで、L 帯 EDFA が開発されると共に C 帯と L 帯 EDFA を並列接続した増幅器が実現されている。さらに S 帯 EDFA や  $1.48\mu\text{m}$  帯  $\text{Tm}^{3+}$  添加ファイバ増幅器 (T DFA:  $\text{Tm}^{3+}$ -doped Fiber Amplifier) が開発され、これらの希土類添加ファイバ増幅器を並列接続することで広帯域増幅技術が可能である。また、並列増幅技術として、希土類添加ファイバ増幅とラマンファイバ増幅器 (FRA: Fiber Raman Amplifier) を直列接続する技術も開発されている。増幅器自体の広帯域化では、 $\text{Er}^{3+}$  を添加するファイバをテルライトファイバあるいはビスマスファイバに変更することによる広帯域化、C 帯 EDFA の増幅帯域を L 帯に広げた C&L 帯・一括増幅技術、 $1.48\mu\text{m}$  帯 T DFA と C 帯 EDFA を直列接続して構成される C&L 帯・一括増幅技術が開発されている。

表 4・1 ファイバ増幅器で用いられている広帯域化のコンセプト,  
それを実現するための技術要素及び構成

コンセプト	技術	アンプ構成
<p>◎ 増幅帯の異なるファイバ増幅器の並列接続</p>	<p>● C、L、S帯希土類添加ファイバ増幅技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・C帯EDFA技術、</li> <li>・L帯EDFA技術、</li> <li>・S帯増幅技術(TDFA、S帯EDFA技術)</li> </ul> <p>● ファイバラマン増幅技術の適用</p>	
<p>◎ 増幅帯域自体の拡大</p>	<p>● 新規ファイバ材料による希土類添加ファイバ増幅</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・テルライトガラスファイバ、ビスマスガラスファイバ</li> </ul> <p>● 希土類添加ファイバ一括増幅技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・C&amp;L帯一括増幅</li> <li>・S&amp;C帯一括増幅</li> </ul> <p>● 希土類添加ファイバ増幅・ファイバラマン増幅直列接続</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・TDFA+ファイバラマン増幅技術</li> <li>・C&amp;L帯一括増幅EDFA+ファイバラマン増幅技術</li> </ul>	<p>A (テルライト、ビスマスファイバ)</p> <p>A (C&amp;L帯増幅)</p> <p>A (C帯増幅) A (S帯増幅)</p>

A: 希土類添加ファイバ増幅器、F: 伝送用ファイバ(或いはラマン増幅用ファイバ)、G: 合波器、D: 分波器、P: ファイバラマン増幅用励起光源

以下に C 帯 EDFA, L 帯 EDFA, S 帯 EDFA, C&L 帯一括増幅技術及び  $\text{Er}^{3+}$  添加テルライトファイバ増幅技術を説明する。TDFA に関しては(2)で説明する。また、希土類添加ファイバ増幅と FRA の直列接続, C&L 帯一括増幅技術については, (3)で, それらの増幅帯域について紹介する。

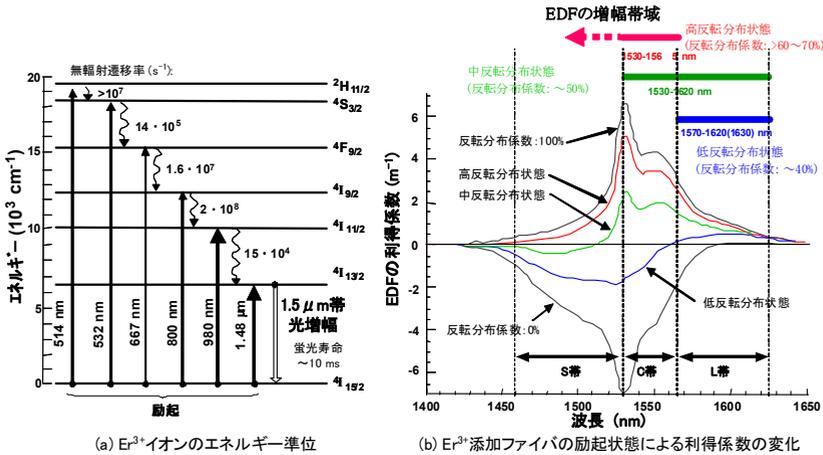


図 4・5  $\text{Er}^{3+}$  イオンのエネルギー準位と  $\text{Er}^{3+}$  添加ファイバの励起状態による利得係数の変化

図 4・5(a) に  $\text{Er}^{3+}$  のエネルギー準位図を示す。1.5  $\mu\text{m}$  帯光増幅は  $4\text{I}_{13/2}$  準位から基底準位である  $4\text{I}_{15/2}$  準位への誘導放出現象を用いる。励起には実用的観点より 980nm ( $4\text{I}_{11/2}$  準位) 帯あるいは 1480nm ( $4\text{I}_{13/2}$  準位) 帯半導体レーザーを用いられている。図 4・5(b)に  $\text{Er}^{3+}$  添加ファイバ (EDF: Erbium-doped Fiber) の励起状態 (励起状態にある  $\text{Er}^{3+}$  イオン数の割合を示す反転分布係数) に対する利得スペクトルを示す。励起を強めて EDF を高い反転分布状態 (反転分布係

数を60~70%以上)にすることで、C帯に大きな利得を有する増幅域が簡単に実現できる。このため、この増幅域を用いたC帯EDFAの開発・実用化が最初に行われた。L帯EDFAは、EDFを低い反転分布状態(反転分布係数を~40%)にすることによって実現する。ただし、L帯増幅動作はEDFの単位長さ当たりの利得係数が小さいため、C帯に比べ数倍、EDF長を長くする必要がある。S帯EDFAは、C帯EDFAと同様に、高い反転分布状態でEDFを励起することによりC帯と共に現れるS帯の増幅帯域を利用する。ただし、S帯増幅を実現するためには、EDF内のC帯に発生するASE(Amplified Spontaneous Emission)を除去してEDFの全長で高い反転分布状態を実現するとともに、L帯EDFAと同様に長尺のEDFを用いる必要がある。C&L帯一括増幅型EDFAは、EDFの反転分布状態を調整(中励起状態)することにより実現している。図4・6に石英系EDFを用いて実現したC&L帯一括増幅型EDFAの増幅スペクトル例を示す。また図にはEr<sup>3+</sup>添加テルライトファイバを用いた場合の特性も合わせて示す。石英系EDFを用いて利得平坦帯域:66nm(1533~1599nm)のC&L帯一括増幅が実現できると共に、Er<sup>3+</sup>添加テルライトファイバを用いることで、利得平坦帯域が拡大(帯域68nm(1541~1608nm))できることがわかる。なお、利得平坦化には、ファイバ増幅器の利得スペクトルと逆の波長特性を有する利得等化フィルタをファイバ増幅器に付加する方法が一般に用いられ、この方法はC&L帯一括増幅型EDFAだけではなくすべてのファイバ増幅器に応用されている。

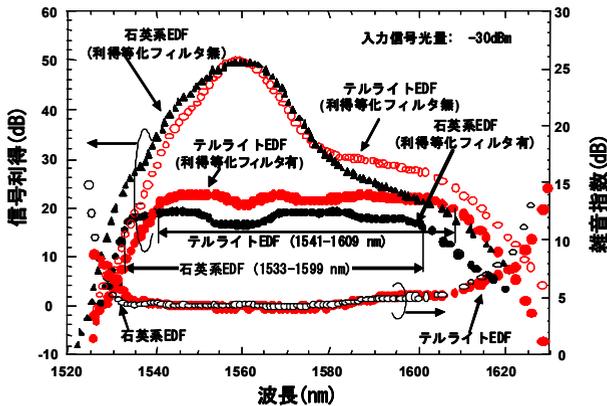


図4・6 C&L帯一括増幅型EDFAの増幅特性例

## (2) 1.3 $\mu\text{m}$ 帯及び1.48 $\mu\text{m}$ 帯希土類添加ファイバ増幅技術<sup>2)</sup>

1.3 $\mu\text{m}$ 帯増幅用希土類イオンとして用いられる、Pr<sup>3+</sup>のエネルギー準位図を図4・7(a)に示す。1.3 $\mu\text{m}$ 帯信号の光増幅は<sup>1</sup>G<sub>4</sub>増幅始準位から<sup>3</sup>H<sub>5</sub>増幅終準位への誘導放出現象を利用する。<sup>3</sup>H<sub>5</sub>増幅終準位に遷移したPr<sup>3+</sup>イオンは無輻射緩和により<sup>3</sup>H<sub>4</sub>基底準位に遷移する。励起は<sup>3</sup>H<sub>4</sub>基底準位から<sup>1</sup>G<sub>4</sub>増幅始準位への光吸収を用い、励起波長帯は~1.02 $\mu\text{m}$ 帯である。ただし、本増幅では、<sup>1</sup>G<sub>4</sub>増幅始準位に励起されたPr<sup>3+</sup>イオンが多音子緩和によって<sup>3</sup>F<sub>4</sub>準位に散逸する無輻射遷移を抑圧する必要があるため、低い多音子緩和率を有するフッ化物ファイ

バを用いて実用的な  $1.3\mu\text{m}$  帯ファイバ増幅器 (PDFA:  $\text{Pr}^{3+}$ -doped Fiber Amplifier) が実現している。図 4・7(b) に  $1.48\mu\text{m}$  帯増幅用希土類として用いられる  $\text{Tm}^{3+}$  のエネルギー準位図を示す。 $1.48\mu\text{m}$  帯増幅は  ${}^3\text{H}_4$ - ${}^3\text{F}_4$  準位間の誘導放出を用いる。励起は  ${}^3\text{H}_6$  基底準位から  ${}^3\text{F}_4$  増幅終準位、さらに  ${}^3\text{F}_4$  増幅終準位から  ${}^3\text{H}_4$  増幅始準位への2段階励起を用い、励起波長帯は  $\sim 1.4\mu\text{m}$  帯がよく用いられる。また高効率増幅を実現するために、 $\text{Pr}^{3+}$  添加ファイバと同様に、ファイバのホストガラスには  $\text{Tm}^{3+}$  のフォノン緩和による非発光遷移 ( ${}^3\text{H}_4$  準位から  ${}^3\text{H}_5$  準位への遷移) を抑えるためフッ化物ガラスが用いられている。

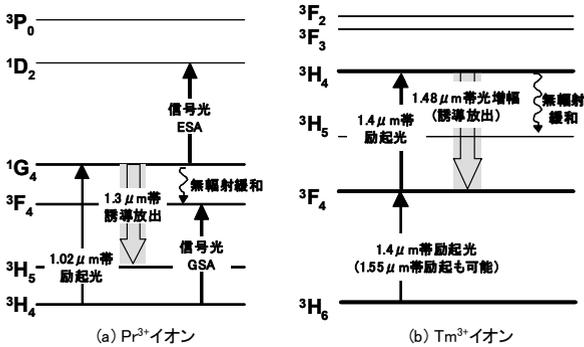


図 4・7  $\text{Pr}^{3+}$  イオンと  $\text{Tm}^{3+}$  イオンのエネルギー準位図

図 4.4(a) および図 4.3(b) に、 $1.3\mu\text{m}$  帯ファイバ増幅器の増幅特性および  $1.48\mu\text{m}$  帯ファイバ増幅器 (TDFA:  $\text{Tm}^{3+}$ -doped Fiber Amplifier) の増幅特性例を示す。両増幅器とも実用的な増幅特性が実現されている。

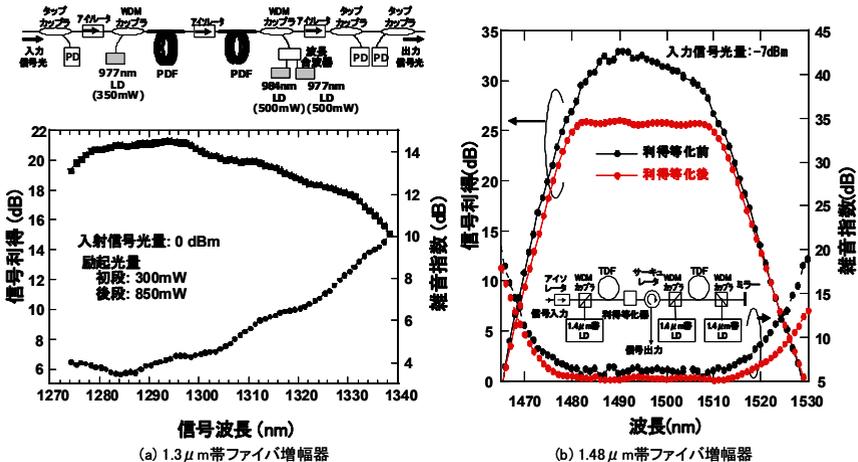


図 4・8  $1.3\mu\text{m}$  帯ファイバ増幅器及び  $1.48\mu\text{m}$  帯ファイバ増幅器の増幅特性例

(3) まとめ

図4・9に、現在実現されている希土類添加光ファイバ増幅器の増幅帯域と伝送用ファイバの損失スペクトルを示す。また、同図には、本節ではしなかったラマンファイバ増幅器(FRA)，希土類添加ファイバ増幅とFRAを直列接続する広帯域化技術、1.48 $\mu$ m帯TDFAとC帯EDFAを直列接続することで実現されるC&L帯一括増幅技術、Tm<sup>3+</sup>ファイバを用いた1.65 $\mu$ m帯TDFA増幅技術の帯域も合わせて記載している。

希土類添加光ファイバ増幅器や、それとラマンファイバ増幅を組み合わせることで、1300nmから1650nm帯までの広い波長域で増幅動作が可能です。今後、このすべての光ファイバ増幅技術を有効に活用した大規模かつ高機能なフォトニクスネットワークが実現されるものと考える。

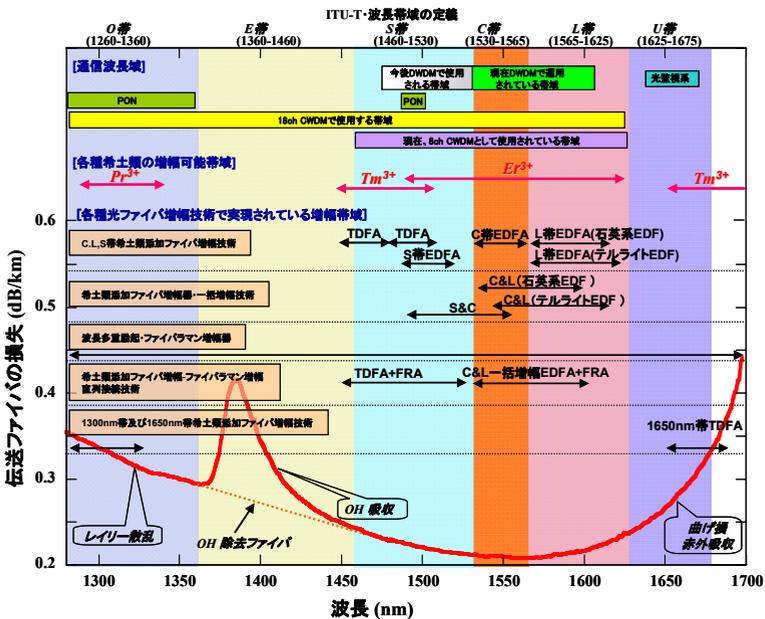


図4・9 光ファイバ増幅器の増幅帯域と伝送用ファイバの損失

■参考文献

- 1) 青山, “フォトニックネットワークの展望”, 信学誌, vol.82, No.7, pp.704-712, 1999.
- 2) 須藤, 横浜, 山田, “光ファイバと光ファイバ増幅器”, 共立出版
- 3) M. Yamada, et al., “Novel fiber amplifier technology”, SPIE, Vol. 5246, pp. 216-223, 2003
- 4) 増田, “波長広帯域化と光増幅器”, 光学, vol.29, No.3, pp.136(18)-142(24), 2000.
- 5) K. Suzuki, et al., “Amplified gigabit PON system”, Journal of Optical Networking, Vol.6, No.5, 2007

## 4-2-2 ラマン増幅器

(執筆者：江森芳博) [2009年8月 受領]

現在の光ファイバ通信システムで最も普及している光増幅器はエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) であるが、一部のシステムにおいてはラマン増幅器が使用されている。ラマン増幅は光ファイバ中の非線形光学効果である誘導ラマン散乱 (SRS: Stimulated Raman Scattering) を用いた光増幅方法であり、増幅作用のエネルギー源となる励起光を光ファイバに入射し、励起光から生じるラマン散乱を信号光波長において誘導的に生じさせることで信号光を増幅する。増幅媒体とな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光ファイバが使用可能である。ラマン増幅器の増幅用ファイバの中では、励起光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。このため、増幅したい信号光よりもフォノンエネルギー分だけ高い周波数の励起光を入射することで増幅器が実現される。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、ラマン増幅器は、励起光の波長によってこれが決まるという特徴をもつため、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である<sup>1)</sup>。

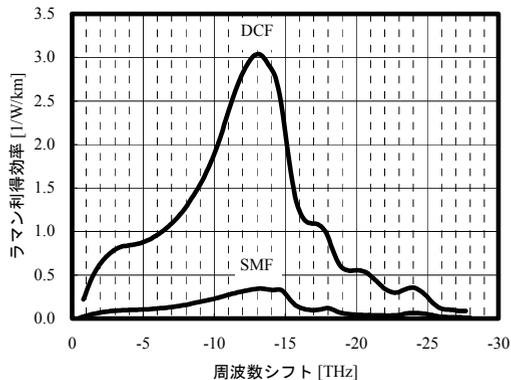


図 4・10 励起光からの周波数シフトに対するラマン利得効率

図 4・10 に、代表的な 2 種類の光ファイバのラマン利得効率の測定結果を示す。ここで示した利得効率は波長 1510 nm のランダム偏光の励起光を用いた測定結果である。使用した増幅用ファイバは 1.3  $\mu\text{m}$  帯ゼロ分散シングルモードファイバ (ITU-T G.652 準拠, SMF) と分散補償用ファイバ (DCF) である。シリカ系のファイバの場合、利得効率の最大値は約 13.2 THz の周波数シフトにおいて得られる。例えば、波長 1450 nm と 1550 nm の周波数差が約 13.2 THz である。ここで用いた 2 種類の光ファイバはコアに含まれている  $\text{GeO}_2$  の濃度が違うため利得効率スペクトルの形状が異なっている。利得効率の大きさは材料ごとに異なっており、 $\text{GeO}_2$  の添加量が多いほど利得効率は高くなる。また、ラマン増幅は非線形光学効果である誘導ラマン散乱によるものなので、光ファイバの断面内での励起光の強度が強いほど利得効率は大きな値となる。このため、光ファイバ中を伝搬する光の断面積もしくはモードフィール

ド径の小さい光ファイバの方が利得効率は高い。異なる励起波長を用いた場合の利得効率については、周波数シフトに対するスペクトル形状は縦軸方向にのみ定数倍した相似形であり、励起波長が短いほど利得効率は高くなる。一方、横軸を励起波長との波長差で表現した場合には、横軸方向へも定数倍した相似形となる。このため、励起波長が長いほど利得波長帯域幅が広がる。1.55  $\mu\text{m}$  帯のラマン増幅器の場合、励起光の有無による信号光のパワー変化（ラマン利得）が 10 dB 程度の条件で利得偏差 1 dB 以内となる帯域幅は 20 nm 以上と広帯域である。

このように単一波長励起のラマン増幅器でも比較的広い利得帯域幅が得られるが、複数の励起波長を同時に用いることで更なる広帯域化が可能である。図 4・11 は波長多重励起方式を用いたラマン増幅器の広帯域化の様子を示した例である。この例では五つの励起波長を用いている。各励起波長から生じる利得曲線が色線で示されており、五つの利得曲線を足し合わせたものが黒線で示されている。黒線で示された合成ラマン利得は 10 dB から 10.5 dB の範囲内で 80 nm 以上の帯域幅が得られている。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。このため短波長側の励起光が作り出す利得スペクトル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くらいの大きさにすることが有効である。

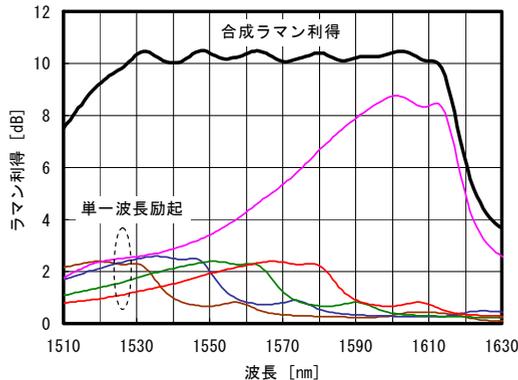


図 4・11 波長多重励起方式によるラマン利得の広帯域化

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でも違いは生じないが、利得の大きさに関しては、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現象による影響が現れる。このような波長多重励起ラマン増幅器における特徴的な現象はポンプ間ラマン効果と呼ばれている。図 4・11 には、五つの励起波長に対して個別に励起した場合の利得、個別励起の利得プロファイルを足し合わせた合成利得が示されているが、実際に五つの波長の励起光を同時に入射すると、合成利得プロファイル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る。これは、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。このため、合成利得のような平坦な利得を得るためには短波長側の励起光の入射パワーを増加させ、長波長側の励起光の入射パワーを減少させるように調整し、適切なパワー配分を決定する必要がある<sup>2)</sup>。

ラマン増幅器では EDFA の自然放出光雑音 (ASE : Amplified Spontaneous Emission) と同様に増幅された信号光以外に自然散乱光雑音が発生する。EDF の場合、上の準位が実在するために、下の準位に電子が存在すると信号光を吸収してしまい、信号光に対する自然放出光の割合が増加してしまう。そのため、低雑音化のためには EDF 全体にわたって励起光強度を高くして反転分布を可能な限り高める必要がある。一方で、ラマン増幅器の場合には、増幅用ファイバは信号光に対する実準位をもたないので信号光吸収はほとんどない。ただし、ラマン増幅器は EDFA と比較すると利得効率が非常に低いため、ラマン利得効率を高めた増幅用ファイバを使用したとしてもファイバ長が 1 km を超える場合がほとんどである。このため、増幅用ファイバにおける通常の伝搬損失が信号光に対する自然散乱光雑音の割合を増加させる要因となっており、ラマン増幅器は EDFA と比較すると集中型増幅器を構成するのに適していないとみなされている。一方で、光通信システムの伝送用ファイバを増幅用ファイバとして用いる分布型光増幅器を想定した場合には、伝送用ファイバの伝搬損失はラマン増幅を適用しない場合にも存在する損失であるため、EDF を用いた分布型光増幅器よりも雑音特性上有利になる。このため、集中型増幅器である EDFA と伝送路を用いた分布型ラマン増幅器を組み合わせて使うことによって、EDFA の設置間隔や設置段数を増加させることが実現されている<sup>3)</sup>。

#### ■参考文献

- 1) “Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems”, C. Headley and G. P. Agrawal, Elsevier Academic Press (2005).
- 2) Y. Emori: “Broadband flat-gain and low-noise Raman amplifiers pumped by wavelength-multiplexed high-power laser diodes,” *Optical Fiber Technology*, Vol. 8, Issue 2, pp.107-122 (2002).
- 3) “Raman Amplifiers for Telecommunications 2”, M. N. Islam, Springer-Verlag, New York (2004).

## ■5 群-3 編-4 章

### 4-3 DWDM 技術

(執筆者：高橋 浩・森田 逸郎) [2011年4月 受領]

高密度波長分割多重 (DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing) 伝送方式は、**図 4・12** に示すように伝送路である光ファイバに波長の異なる多数の光信号を同時伝送することで、伝送容量を一挙に波長数倍に拡大可能とする方式である。1990 年後半から導入が始まりインターネットとともに急速に普及し、世界中の商用光通信網で採用されている重要技術である。波長間隔はITU-T<sup>1</sup>で標準化され約 0.8 nm (1.55  $\mu$ m 帯で周波数に換算して 100 GHz) で、波長チャンネル数が 40 程度が一般的であるが、近年は間隔が半分の 50 GHz で 80 チャンネルのシステムも実用化されている。また、海底システムなどの特殊用途では間隔をさらに狭く (33.3 GHz や 25 GHz など) して波長チャンネル数を増やす場合がある。4-3-1 項でこの DWDM で用いられる合波用及び分波用のフィルタについて、4-3-2 項では高密度に波長多重して長距離伝送するための主要技術について解説する。

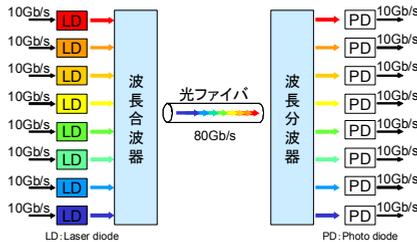


図 4・12 波長分割多重伝送系 (8 波長の場合)

#### 4-3-1 DWDM 用合波分波フィルタ

波長の異なる光信号を合波・分波するフィルタは波長合分波器と呼ばれ、種々の干渉型デバイスで実現可能である。従来から知られている回折格子に加え、誘電体多層膜フィルタ<sup>1)</sup>、ファイバブラッググレーティング<sup>2)</sup>を用いたものが開発されているが、商用 DWDM 用には LSI と同様に薄膜堆積と微細加工技術で基板上にモノリシック形成が可能な光導波路型を用いるのが一般的である。その理由として、光導波路型は小型で高安定・高信頼、量産性に優れている点があげられる。回路構成としてはアレイ導波路回折格子 (AWG : arrayed-waveguide grating) が用いられる<sup>3)</sup>。

**図 4・13** に示すように AWG は長さの異なる多数の光導波路からなる透過型グレーティングで、入力導波路、入力側スラブ導波路、出力側スラブ導波路、出力導波路群と一緒にモノリシックに作製される。AWG を構成する導波路の端は円弧上に配置されており、凹面鏡と同様に集光作用があるため全体として分光光学系として動作し、入力された波長多重光を一度に分波する波長分波器の作用をもっている。逆向きに利用すれば合波器となる。導波路の長

<sup>1</sup> ITU (International Telecommunication Union) は国連組織の一部で情報通信関係を取り扱う。その中に電気通信の標準化を扱う ITU-T と、電波の周波数割当てや無線通信標準化を行う ITU-R などがある。

さの差を大きくとることにより通常の回折格子では実現が困難な高い回折次数を利用して高い波長分解能が得られ、DWDMの狭い波長間隔にも対応可能である。波長数は40チャンネル程度が一般的であるが、近年は80チャンネルのものも製造されている。AWGの通過域スペクトルは原理的にはガウス関数形状であるが、入力部にマツハツェンダー(MZ)干渉計を追加した構成で平坦形状が実現可能である<sup>4)</sup>。阻止域の減衰量は40dB以上あり、総漏話率は主信号光に比較して-20dB以下である。また、共振を伴う誘電体多層膜フィルタとは異なり、原理的には複素透過率の位相は線形であり位相歪みは発生せず高ビットレートの広帯域信号を通過しても波形歪みは生じない。

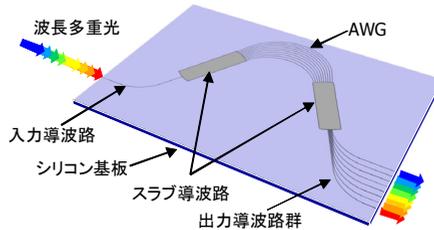


図 4・13 AWG 型波長合分波器

AWGは、基板にはシリコンウェハ、導波路材料は石英ガラスを使用して作製される。物理的・化学的に安定で長期信頼性に優れ、光ファイバを接着接続する前の端面光学研磨、接続時やその後の機械的作業にも耐えられるため実装工程も容易であり低コストで生産性が高い長所も有する。光ファイバと導波路の光学結合損失は0.2 dB程度である。石英ガラスの屈折率の温度依存性が原因で透過波長には0.01 nm/度の温度依存性があるため、ペルチエ素子やヒータを使用して温度を一定に保持して使われるが、導波路を横切るように形成した溝に石英とは屈折率の温度係数が逆符号の樹脂を充填して温度依存性を解消したものも実用化されている<sup>5)</sup>。また、熱石英ガラス膜とシリコン基板の膨張係数不一致による圧縮応力を受けて導波路は $10^{-5}$ オーダーの複屈折を有しており、これが原因で通過波長が偏波に依存して約0.1 nm変動する。わずかな量であるが波長間隔の狭いDWDMでは問題となるので、AWGの中央を横切るように薄片波長板を挿入して平均化(水平・垂直偏波を交換)したり、ガラス組成や導波路近傍のミクロな断面構造を工夫して導波路にかかる水平及び垂直方向の応力を均等にするなど、偏波依存性を解消する方法が取られる。

また、非常に波長間隔の狭いDWDM伝送を行う場合、分波における隣接チャンネルの抑圧が不十分で受信劣化を生じる可能性がある。その対策として、インタリーブフィルタを用いて波長多重光を偶数チャンネルと奇数チャンネルの2群に分け波長間隔を広げてからAWG(2台)で分波する構成が用いられる。インタリーブフィルタはGires-Tournoisエタロン<sup>2)</sup>を組み込んだバルク形MZ干渉計や、石英系導波路で構成した多段MZ構成のラティス型光回路で実現される<sup>6)</sup>。前者はIIR型、後者はFIR型のフィルタであるが、いずれもAWGよりも矩形度が高く

<sup>2)</sup> Gires-Tournois エタロン；片方の共振壁の反射率を100%にした特殊なエタロン

急峻なスペクトル形状を有し、左右の隣接チャンネルを十分に抑圧し狭波長間隔の多重光を2群分離するのに優れた特性を有している。

#### 4-3-2 DWDM 伝送技術

チャンネル間隔の狭い DWDM 伝送では、チャンネル間の干渉が信号特性に大きな影響を与える。チャンネル間干渉には、隣接チャンネル間の信号スペクトルの重なりに起因し、光ファイバ伝送を行わずに送受信機を直接接続した場合にも生じる干渉（線形干渉）と、光ファイバ中を複数チャンネルが同時に伝送することに起因する非線形光学効果による干渉（非線形干渉）が存在する。

DWDM 伝送において線形干渉の影響を低減するためには、信号スペクトルの狭窄化が重要である。そのためには、信号スペクトルの狭い変調方式の適用や、周波数フィルタにより信号スペクトルを帯域制限する方法が有効である。

従来の光通信システムでは、光の点滅（On/Off）により、データの（0/1）を伝送する方式が用いられてきた。光の点滅を用いた方式の場合、情報伝送に用いる光の状態は2種類だけであるため、伝送速度を高速化するには光の点滅速度を高速化する必要がある。そのため、信号スペクトル幅は伝送速度とともに広がる。一方、光搬送波の周波数や位相も利用して情報を伝送できるコヒーレント光伝送方式 [5群3編7章参照] の実用化が進んでいる。コヒーレント光伝送方式を用いた場合、より多くの光の状態を情報伝送に用いることができるため、1つの光信号で伝送する情報量を増やすこと（多値化）が可能となり、光信号の状態変化のスピード（シンボル速度）を低速化できる。シンボル速度が低速化する程、信号スペクトル幅は狭くなり、より高密度な DWDM 伝送が可能となる [位相を用いた高度な光変調方式の詳細については5群3編3章参照]。

また、周波数フィルタにより帯域制限を行うことにより、変調光信号の信号スペクトルの狭窄化を図ることも可能である<sup>7)</sup>。ただし、過度な帯域制限は信号特性劣化を誘起するため、最適なフィルタの選択が重要となる。過度な帯域制限により発生する信号特性劣化に対する対策として、デジタル信号処理を用いて補償する方法も提案されている<sup>8)</sup>。

さらに、信号スペクトルの狭窄化には、光ファイバの二つの直交する偏波成分を用いて独立した情報を伝送する偏波多重方式を併用することも有効である。伝送容量を一定とした条件では、偏波多重方式を用いることで、各偏波成分の信号の伝送速度を1/2に低減できるため、信号スペクトル幅も1/2とすることができる。偏波多重方式を適用するためには、光ファイバ中の偏波状態の変化に追従できる受信機での偏波分離が不可欠であるが、最近では、デジタル信号処理を用いることで高信頼な偏波分離が実現できるようになっている。

DWDM 伝送における非線形干渉の影響を低減するためには、光ファイバ中の光信号パワーの低減と伝送路の低非線形化が必要となる。光信号パワーの低減は、受信信号の光信号対雑音比の低下につながるため、所望の信号品質を確保するためには、その対処が不可欠である。信号パワーを低減した状態で十分な光信号対雑音比を確保するためには、光増幅器の低雑音化が必要であり、伝送路を増幅媒体として用いる分布型ラマン増幅 [5群3編4章2節参照] も有効である。また、光信号対雑音比が十分でなく多くの符号誤りが発生する状態においてもデータ伝送を可能とする誤り訂正符号 [5群3編5章4節参照] も不可欠な技術である。誤り訂正符号の誤り訂正能力が大きい程、光ファイバ中の光信号パワーを低減することが可

能となり、低非線形化が図れる。一方、伝送路の低非線形化を図る方法としては、実効断面積を拡大した光ファイバを用いる方法や、光ファイバの分散管理 [5 群 3 編 5 章 1 節参照] を行う方法がある。

DWDM 伝送の主要なパラメータの一つは周波数利用効率であり、チャンネル伝送速度とチャンネル間の周波数間隔の比で定義される。チャンネル速度が 10 Gbit/s の DWDM 伝送システムでは、チャンネル間隔が 50 GHz のシステムが実用化されており、この場合の周波数利用効率は 0.2 bit/s/Hz である。近年、チャンネル速度を 100 Gbit/s に高速化した DWDM 伝送システムの実用化が進められている。100 Gbit/s システムでターゲットとされているチャンネル間隔は、10 Gbit/s システムと同一の 50 GHz 間隔であり、この時の周波数利用効率は 2 bit/s/Hz となる。10 Gbit/s システムから 10 倍の高周波数利用効率化は、偏波多重を併用した多値変調信号 (4 相位相変調信号) をコヒーレント受信する方式を用いることにより実現されている<sup>9)</sup>。最近では、さらなる多値化を進めた直交振幅変調 (QAM : Quadrature Amplitude Modulation) [5 群 3 編 7 章 2 節参照] や、直交周波数分割多重 (OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [5 群 3 編 7 章 3 節参照] を用いて、より一層の高周波数利用効率化を図る検討も進められている。サブキャリアを 128 QAM で変調した光 OFDM 伝送実験では、チャンネル伝送速度が 275 Gbit/s の偏波多重光 OFDM 信号を 25 GHz 間隔で波長多重し、11 bit/s/Hz の周波数利用効率が得られている。その結果、ファイバ当たりの伝送容量では最大となる 101.7 Tbit/s の超大容量伝送が達成されている<sup>10)</sup>。

#### ■参考文献

- 1) H. A. Macleod, Thin film optical filters, Third edition, Institute of Physics Publishing, 2001
- 2) R. Kashyap, Fiber Bragg Grating, Academic Press, 1999
- 3) H. Takahashi, K. Oda, H. Toba and Y. Inoue: "Transmission characteristics of arrayed-waveguide grating N x N wavelength multiplexer", Journal of Lightwave Technology, **13**, 3, pp.447-455, (March 1995)
- 4) C. R. Doerr, L. W. Stulz, and R. Pafchek : "Compact and low-loss integrated box-like passband multiplexer", Photonics Technology Letters, **15**, 7, pp. 918-920, (July 2003)
- 5) S. Kamei, Y. Inoue, T. Shibata and A. Kaneko: "Low-loss and compact silica-based athermal arrayed waveguide Grating using resin-filled groove", Journal of Lightwave Technology, **27**, 17, pp.3790-3799, (September 2009)
- 6) S. Cao, J. Chen, J. N. Damask, C. R. Doerr, L. Guiziou, G. Harvey, Y. Hibino, H. Li, S. Suzuki, K.-Y. Wu, and P. Xie: "Interleaver technology: comparisons and applications requirements", Journal of Lightwave Technology, **22**, 1, pp.281-289, (January 2004)
- 7) T. Tsuritani, A. Agata, K. Imai, I. Morita, K. Tanaka, T. Miyakawa, N. Edagawa, and M. Suzuki, "35GHz-spaced 20Gbps x 100WDM Z transmission over 2700km using SMF-based dispersion flattened fiber span," ECOC2000, post-deadline paper, PDI.5, (September 2000)
- 8) J.-X. Cai, Y. Cai, C. R. Davidson, D. G. Foursa, A. Lucero, O. Sinkin, W. Patterson, A. Pilipetskii, G. Mohs, and Neal S. Bergano, "Transmission of 96x100G pre-filtered PDM-RZ-QPSK channels with 300% spectral efficiency over 10,608km and 400% spectral efficiency over 4,368km," OFC/NFOEC2010, PDPB10, (March 2010)
- 9) C. Fludger, T. Duthel, D. van den Borne, C. Schullien, E. Schmidt, T. Wuth, E. de Man, G. Khoe, H. Waardt, "10 x 111 Gbit/s 50 GHz spaced, POLMUX-RZ-DQPSK transmission over 2375km employing coherent equalization," Technical Digest of OFC/NFOEC2007, PDP22, (March 2007)
- 10) D. Qian1, M.-F. Huang, E. Ip, Y.-K. Huang, Y. Shao, J. Hu, T. Wang, "101.7-Tb/s (370 x 294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM Transmission over 3x55-km SSMF using Pilot-based Phase Noise Mitigation," OFC/NFOEC2011, PDPB5, (March 2011)

## ■5群-3編-4章

### 4-4 CWDM 技術

(執筆者：杉江利彦) [2010年6月受領]

#### 4-4-1 CWDM の概要

##### (1) CWDM の特徴

###### (a) 原理とねらい

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) は、 $0.7\text{-}1.6\ \mu\text{m}$  と広い波長帯で、波長間隔を  $20\ \text{nm}$  程度以上に設定することで、光デバイスの波長設定精度を緩和し制御系を軽減した経済化を狙った波長多重技術である。DWDM で必要な波長や周波数をモニタし制御を行う回路は不要である。そのため、光デバイスやモジュール技術の性能が直接システムに与えるインパクトが大きい。WDM 光源として直接変調の DFB レーザ (DFB-LD) やファブリペロレーザ (FP-LD)、光合波器として誘電体多層膜、ファイバコブラやポリマ導波路などのフィルタが主に使用されている。CWDM 技術は、メトロやアクセスネットワークにおける LAN, WAN に適用され、一本のファイバの伝送容量の増加やサービスの多重に波長が使われている。また、光信号波長の通過帯域を平坦化し波長間隔を  $20\ \text{nm}$  とすることで、光源の温度制御を省略し長距離伝送を狙った広通過帯域型の CWDM (WWDM : Wide Passband WDM) は標準化されている<sup>1), 2)</sup>。

歴史的には、CWDM 技術は 1980 年代の光通信の黎明期から開発されている。その後、大容量化のため波長の稠密化を行った DWDM が開発された。WDM 光源や光フィルタなどの光デバイスの進展とともに CWDM 技術の使用される領域が広がり発展してきた。現在では、一心のファイバで  $100\ \text{Gbps}$  を越えるシステムにも使用されようとしている。

###### (b) 波長配置

図 4・14 に CWDM の波長配置を示す。従来から使用されている典型的な CWDM の例 (図 4・14(1))、及び標準化された広通過帯域型の CWDM の例 (図 4・14(2)) である。

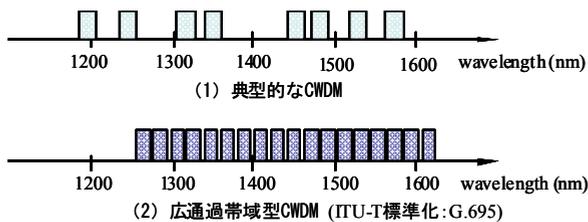


図 4・14 CWDM の波長配置

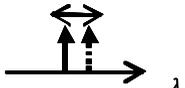
###### (c) 特徴

CWDM の特徴を表 4・2 にまとめる。

- ・波長間隔が広く、波長制御を行わないため、経済的で消費電力を低減することができる。
- ・一方、温度変動による光源の波長シフトが生じても信号光の合波、分波を適正に行うため光フィルタの通過帯域を広くする必要がある。

- ・波長数を増加すると使用帯域が広がるため、波長による光ファイバの損失、分散量の差異が顕著になる。同じ波長数の場合、DWDMより波長間の差は大きい。

表 4・2 CWDM の特徴

	システム	要素技術	
		光源	合分波器
典型的な CWDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構内 LAN、長距離伝送 (80km) など多様なシステムに適用</li> <li>・MMF、SMF</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・FP-LD、DFB-LDを使用</li> <li>・波長選定条件緩和</li> <li>・波長制御が不要。(波長モニタなし、温度制御なし)</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・チャンネル間隔は、20、40 nm 等</li> <li>・温度制御等の波長制御が不要</li> <li>・多様な構造のフィルタを適用</li> </ul>
広通過帯域型 CWDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>・送受信レベル差が大 (キャリアグレードが実現)、長距離伝送 (80km) 可能</li> <li>・SMF</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・DFB-LD (波長制御なし) を使用</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・チャンネル間隔は、20 nm</li> <li>・信号通過帯域は、約15nm</li> <li>・急峻な遮断特性、平坦な通過帯域が必要</li> </ul>

## (2) 光ネットワークへの適用

### (a) アクセス、メトロネットワーク

コアネットワークは、数百 km 以上の長距離・大容量の基幹回線や海底伝送システムなどにより構成されるため光増幅を使用した DWDM 技術が使用される。一方、メトロ、アクセスネットワークでは、経済的で柔軟なネットワークが必要になる。特に、ユーザに近いネットワークほど経済化が重要である。そのため、CWDM を使用した 4~16 波程度の波長多重システムが導入されている。主に、ポイント・ツウ・ポイントの構成で、数十 km 以内のシステムに使用されている。SDH だけでなく、光映像や光 IP の信号など、多様な信号やサービスが直接多重され収容される<sup>3)</sup>。

波長多重は、各波長をそれぞれ光ファイバの代用として活用することと等価である。そのため、①容量を増大するための大容量化、②複数のサービス、速度や変調方式の異なる信号を多重するサービスの多重、③波長ごとにユーザを割り当て光路を多重するユーザ多重などに分類できる。CWDM は、アクセスやメトロネットワークで、①の容量増大だけでなく、②の柔軟なサービスの多重に使用されている。

### (b) 伝送路特性

CWDM では、波長間隔が 20 nm と広いため、波長の増加に伴い使用する波長帯が広がる。そのため、すべてのチャンネルで、従来の DWDM 対応の EDFA を適用することはできない。基本的には光増幅を使用しないシステムである。1.2~1.6 μm を使用する場合、長波長側でファイバの伝送損失や曲げによる損失をそのまま受ける。また、直接変調の光源を使用する場合、チャープングにより光ファイバの波長分散の影響を直接受けるので、変調速度と使用波長の設定が伝送距離を規定することになる<sup>4)</sup>。例えば、アクセス系では、2.4 Gbps の直接変調 DFB-LD で単一モードファイバ 20 km 程度の伝送は可能であるが、10G イーサネットでは

は、分散制限により数 km 以下と制限されるため外部変調が必要となる。

#### 4-4-2 システムへの適用

##### (1) CWDM を活用したシステムの特徴

CWDM 技術を適用することで、一心の光ファイバで双方向通信を実現するコンパクトな光伝送装置が実現されている。この特徴をまとめると次のようになる。

- ・ 大容量化だけでなく多様なインタフェースの提供が可能：各種インタフェースを各々 CWDM の波長に対応させ同一装置に混載した一心双方向伝送を行う。
- ・ 柔軟なネットワーク構成が可能：装置から 2 方路に対し一心双方向伝送することで、多段接続やリング接続を行い Add/Drop 機能を実現する。また、プロトコル制限をなくしギガビットイーサネットや STM フレームを中継でき、用途に応じて柔軟なネットワークを構築できる親和性の良い装置が可能となる。
- ・ 消費電力を低減したコンパクトな構成の実現：光部品の温度制御等を簡易化することで、消費電力を低減し、省スペース設計が可能となる。19 インチの汎用ラックに搭載できる。
- ・ 導入、運用コストの低減が可能：送受信モジュールとして Plug&Play 機能を有するプラグラブル(挿入/抜去可能)な光トランシーバを使用することで、迅速にサービスや波長の変更、追加が可能となる。

##### (2) 装置構成

典型的な装置のブロック図を図 4・15 に示す。光信号波長を多重分離する合分波器、所望の波長の光信号を発生する光源(LD)からなる送信部、PD や APD と TIA からなる受信部、送受信した信号を処理する電子回路、ユーザとのインタフェース回路、監視制御回路などから構成される。送信部と受信部はプラグラブルな送受信モジュールとして、例えば、SFP などを使用されている。

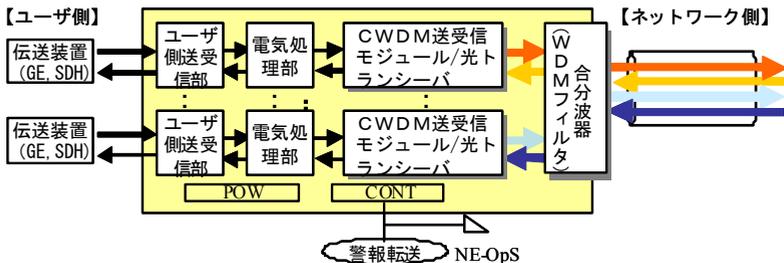


図 4・15 装置構成

##### (3) 適用例

CWDM 装置を適用することで、メトロエリアのバックボーンからアクセス、ISP や xDSL プロバイダ、CATV ネットワーク、電力、鉄道、自治体、大学・学術機関、さらに企業のデータセンタを結ぶ基幹ネットワークに低コストで最適なソリューションを提供することができる。これらのシステムの構成例を図 4・16 に示す。実際、これらではポイント・ツウ・

ポイント構成，リング構成が主に使われている。

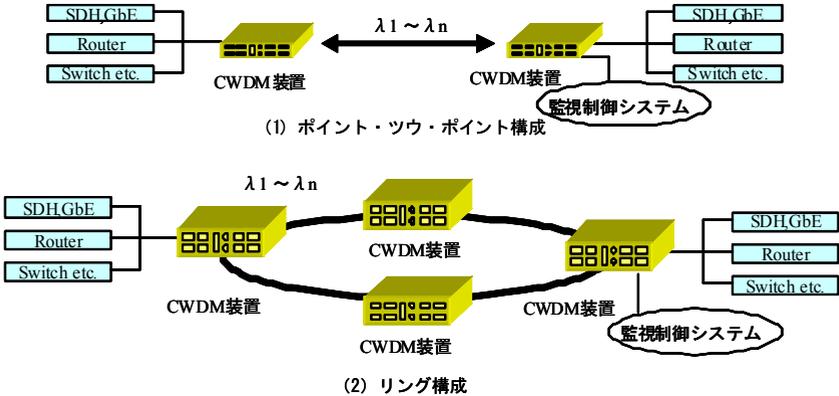


図 4-16 システム構成例

### 4-4-3 光デバイス

#### (1) 要求条件

CWDM システムでは，光源や光合分波器などの光デバイスの温度制御機能を省略しているため，光合分波器の光信号の通過帯域は，温度変化による波長変動，製造時の波長のばらつきを考慮して決める必要がある。一般に，光デバイスでは，光源の波長変動がほとんどを占める。波長設定の一例として波長間隔 20 nm の広通過帯域型の CWDM について述べる。この CWDM では，主に，単一縦モードで発振し，温度による波長シフト量が少ない DFB-LD を使用する。例えば，使用温度範囲を  $-20^{\circ}\text{C}$  から  $80^{\circ}\text{C}$  とする場合，DFB-LD の波長変動量は，約  $0.1 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  であることから，波長変動量は 10 nm となる。さらに，製造時の中心波長などを許容するマージンを 5 nm とすると，光合分波器の通過帯域は 15 nm となる。隣接波長からのクロストークを抑圧するため分波器のアイソレーションを確保するための領域として通過禁止帯域を 5 nm とすると，波長間隔は 20 nm となる。この波長間隔で使用温度範囲を 0 から  $70^{\circ}\text{C}$  と狭くすると，通過帯域は 13 nm で通過禁止帯域を 7 nm と光合分波器の遮断特性への要求条件を緩和することができる。

#### (2) 実際の光デバイス

##### (a) 光源

CWDM では，光源として FP-LD，DFB-LD が使用され，波長をモニタする制御は行わない。LD は，一般に，高温で閾値が上昇し光出力が低下するため，信号変調時の駆動条件が変化しやすい。そこで，温度変動に対し安定な変調特性が得られる LD や駆動回路が重要である。現在，経済的な同軸構造の LD モジュールやバタフライ型，ミニディル型パッケージの LD モジュールが使用されている。また，IP 機器で適用されていた送受信モジュールを通信用に機能，性能や信頼性を改良し，装置に適用している。例えば，プラグブルな SFP などである。

図 4-17 に，1.25 Gbps の CWDM 用 SFP を示す。1471 nm から 1611 nm まで 20 nm 間隔で製造されており，必要な波長に応じて脱着し使用される。これらは，パッケージや基本機能が

MSA として標準化され大量に使用されているため、経済化を狙いやすい。

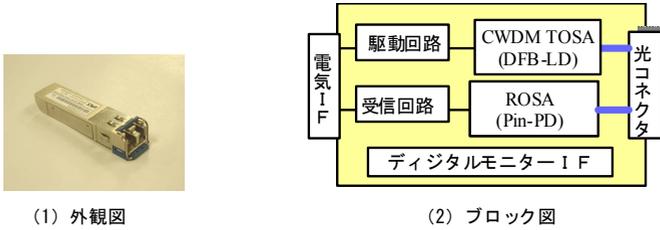


図 4・17 CWDM SFP

#### (b) 光合分波器

光合分波器では、隣接チャネルなどからの異なる波長から漏れるクロストークは、光受信機において漏れこみ光と信号光の干渉によるビート雑音となり受信感度を劣化させるので抑圧する必要がある。実際には、要求されるフィルタのアイソレーションはシステムにより決まる。例えば、デジタル信号の場合、隣接チャネルからのパワークロストークによるペナルティを 0.5 dB 以下に抑えるには、信号光に対し 12.6 dB 以上抑圧する必要がある<sup>5)</sup>。さらに、アナログやデジタルの信号の種別、隣接信号光のレベル差や受信感度により要求されるアイソレーションが決まる。光コネクタなどからの多重反射を考慮すると高いアイソレーションの遮断特性が要求される。これらの特性を満たす合分波器として、誘電体多層膜フィルタが有望である。干渉膜として誘電体多層膜の膜厚や層数を選定して多層キャビティを製作することで、広い波長間隔で平坦な通過帯域と急峻な遮断特性を実現している。4 チャネルの誘電体多層膜フィルタで構成した合分波器の一例を図 4・18 に示す。また、量産技術に適している PLC 技術を用いたラテス型や AWG 型、材料としてポリマを使用した光フィルタがあり、用途に合わせ使用されている。

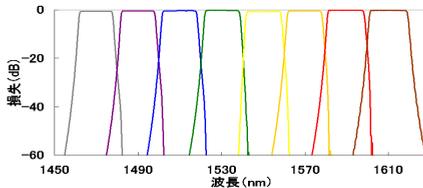


図 4・18 合分波器 (光フィルタ)

#### 4-4-4 まとめ

CWDM 技術は、光デバイスに本質的な温度特性を強制的に制御することなく、WDM 伝送が可能となるように多重パラメータの設計を工夫した WDM 方式で、経済的で柔軟なシステム構成が可能である。サービスの多様化や光技術の適用領域の拡大に対応できる柔軟な多重方式として、メトロ、アクセスからソリューションまで広く適用されている。

## ■ 参考文献

- 1) “WDM Technologies: Optical Networks, volume III,” Chapter 6, pp.191-248, A. K. Dutta et al. ed., Elsevier, Academic Press, 2004.
- 2) “FTTH 教科書, (IDG 情報通信シリーズ),” 第 8 章, pp.233-256, 青山友紀監修, IDG ジャパン, 2003.
- 3) H. Kawata, et al., “Service Multiplexing Systems with Wide Passband DWDM (WWDM) Technology for Access Networks,” IEICE Trans. Commun., E83-B, pp.2348-2354, No.10, 2000.
- 4) H. Nakamura et al., “Wide Passband WDM (WWDM) Transmission in 1.5  $\mu\text{m}$  Wavelength Region through Optical Fiber Cable Installed in Access Networks,” 5<sup>th</sup> IWCS/FOCUS, pp.477-462, Oct. 2001.
- 5) “Optical Networks,” 5.6.2, pp.301-303, R. Ramaswami et al., Morgan Kaufman 2002.