

## 第12回

# 光増幅器・波長多重技術

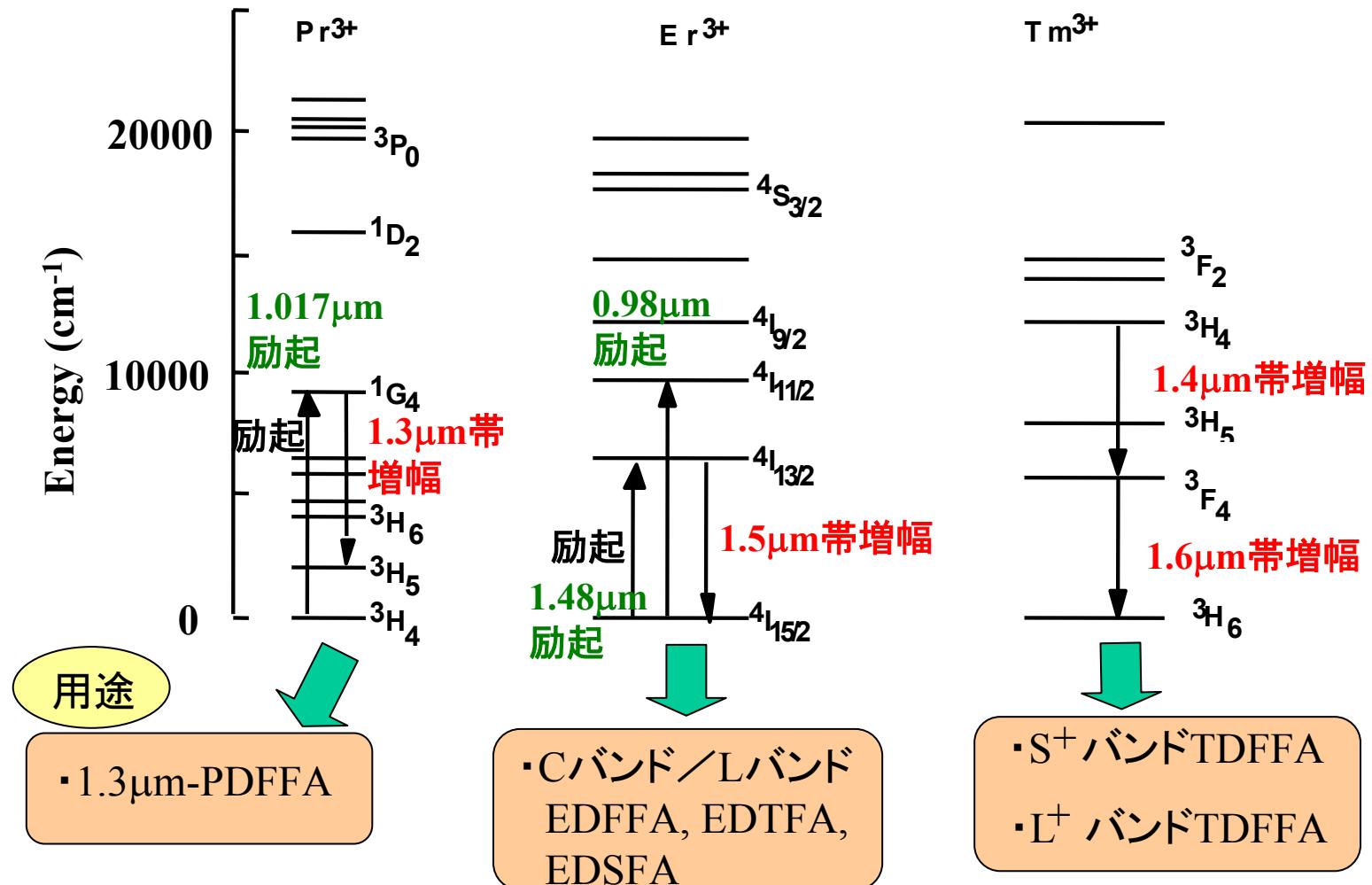
2007年7月9日(月)

資料中、著作権にかかる資料は意図的に  
削除しておりますことをご承知置きください。

参考文献は明記しておりますのでご参照ください。

# いろいろな光増幅器

# Pr, Er, Tmイオンのエネルギー準位



\* ○OFFA: フッ化物光ファイバ増幅器  
 ○OTFA: テルライト系光ファイバ増幅器  
 ○OSFA: 石英系光ファイバ増幅器      ○○はPD, ED, TD

信号光波長 :  $1.55\mu\text{m}$

適用波長 :  $1.535\mu\text{m} \sim 1.560\mu\text{m}$

利得 :  $20 \sim 30\text{dB}$

雑音指数(NF) :  $5.0\text{dB}$

飽和光出力 :  $+20\text{dBm}$

伝送路損失 :  $0.2\text{dB/km}$

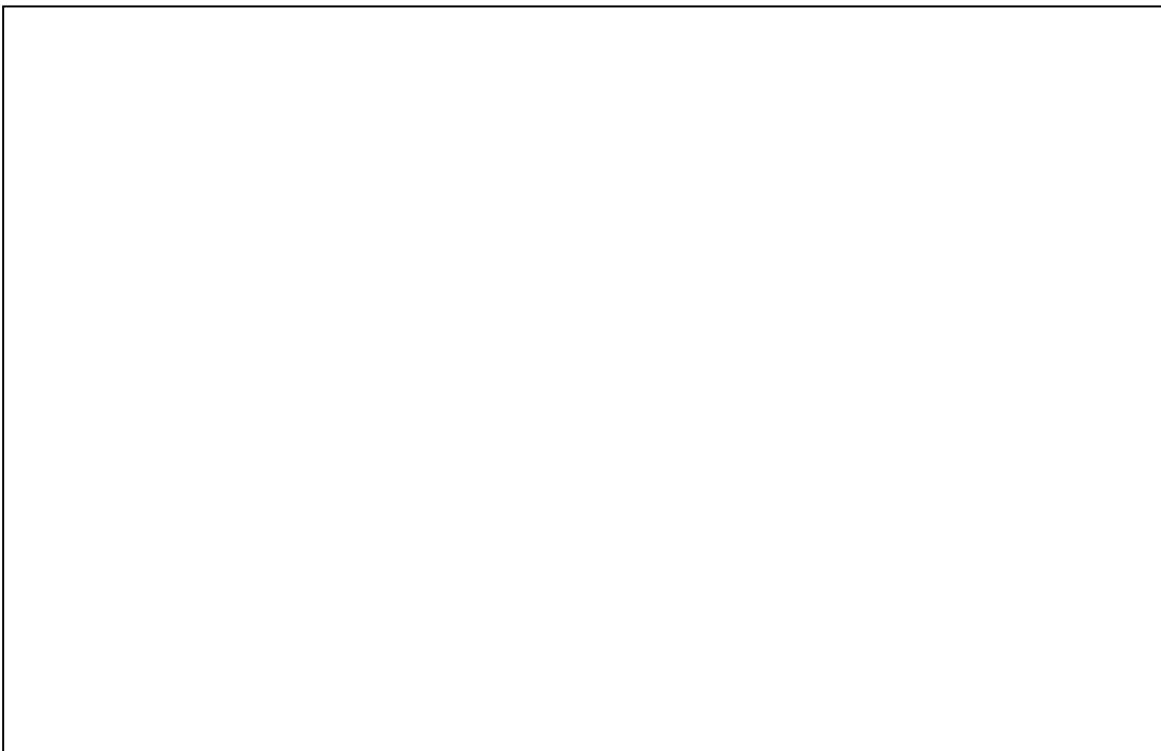
伝送路分散 :  $0.5\text{ps/nm/km}$

## 励起波長による特性差

波長	1.48μm	0.98μm
光源	InGaAsP/InP MQW-LD	InGaAs/GaAs歪MQW-LD
利得効率	5dB/mW	10dB/mW
雑音指数	5.5dB	3~4.5dB
飽和光出力	+20dBm	+20dBm
励起波長範囲	1.47~1.49μm (20nm)	0.979~0.981μm (2.5nm)
励起光出力	< 400mW	< 350mW

## L帯EDFAの利得スペクトル

- ・平均の反転分布を低い状態で使用。
- ・利得平坦度3dBの増幅帯域はEDTFAが最も広い(  $1.56\mu m \sim 1.61\mu m$  )



M. Yamada et al., Electron. Lett., 33, pp. 710-711, 1997

## 広帯域EDTFAの増幅特性

- ・1.48μm励起EDTFA+利得等価器
- ・3dB以下の利得平坦度: 1.534μm～1.606μm (72nm)

A. Mori et al, in OFC'97, paper PD-1

# 利得透過型TDFFAの増幅特性

- ・ツリウムドープ: 1.4μm帯用
- ・アップコンバージョン励起法による反転分布の高維持

課題

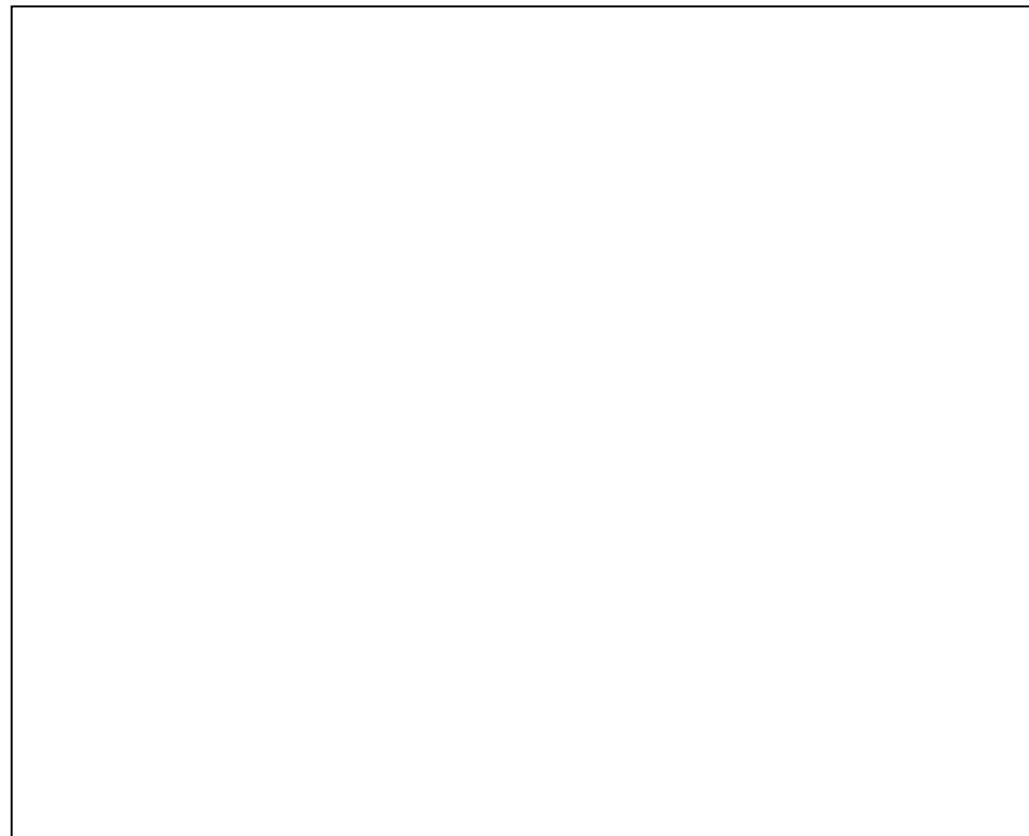
- ・変換効率の向上
- ・増幅帯域の長波長側への拡大 → 1μm, 1.55μm励起光同時入射+  
長尺化(NEC笠松ら)

T. Kasamatsu et al., in OAA'99,  
paper PD1

T. Sakamoto et al., in OAA'99, paper WD2.

## 利得透過型PDFFAの增幅特性

- ・プラセオジウムドープ: 1.3μm帯用
- ・PbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系PDFFA(下図)
- ・ZBLAN系に比べてフォノンエネルギー低い → 量子効率高いのが特徴



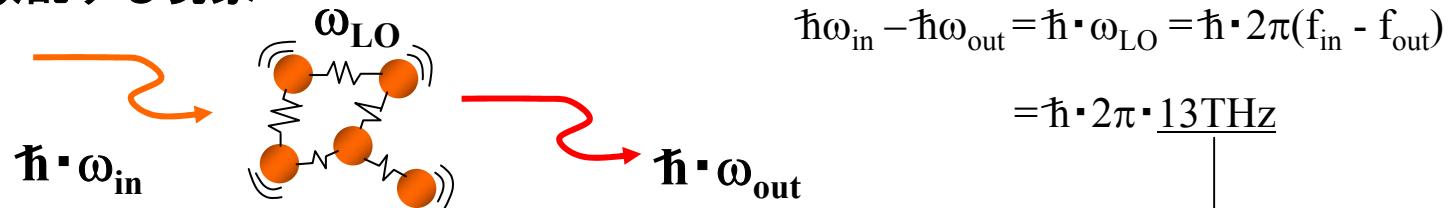
T.Sakamoto et al., in OAA99, paper PD5

## Raman増幅器の特徴

### 信号光波長と励起光波長の関係

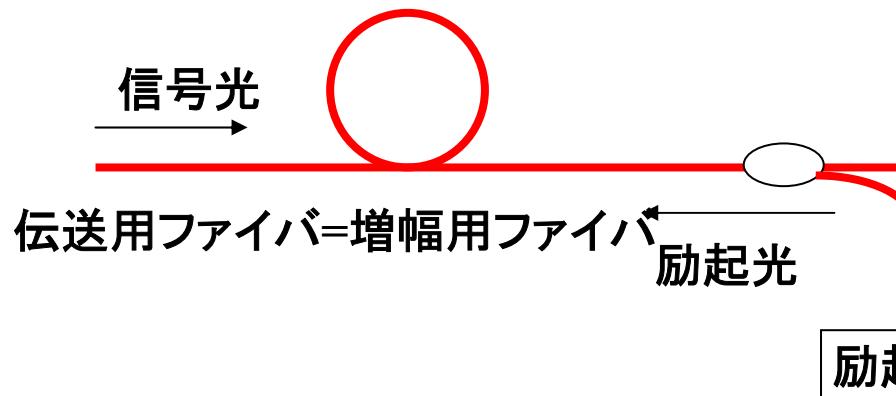
#### ラマン散乱：

励起光により分子振動(LOフォノン)を引き起こし、その差のエネルギーの光を散乱する現象



波長では約100nm

### ラマン増幅中継器の構成



#### メリット

- 伝送用光ファイバを増幅用ファイバとして使用可能
- 任意の信号光が増幅可能

#### 課題

- 長尺ファイバが必要(10km以上)
- 雑音特性の励起方向依存性

2007年度

光通信システム

# 波長帯域202nmの分布ラマン増幅器を用いた伝送実験

田中, 鳥居, 幸, 中元, 内藤, 横田, 2003年信学ソ大, B-10-113 (2003).

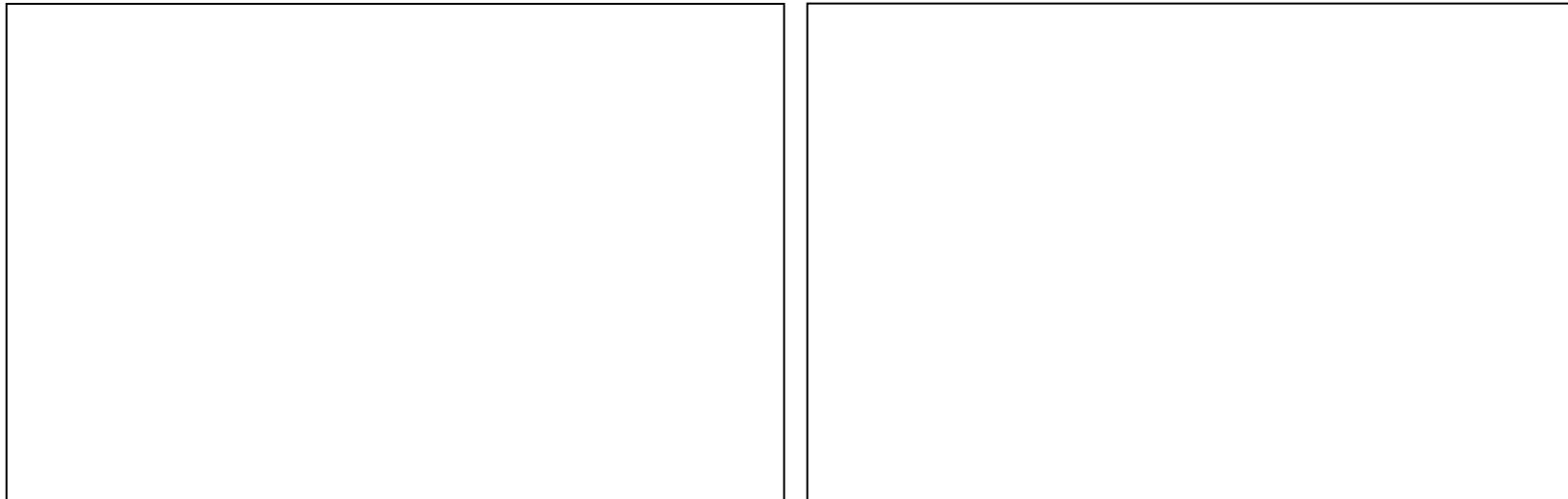
4.23Tbps, 120km伝送

## EDFAの広帯域化の進展(1)

H. Masuda, A. Sano, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, Y. Hibino, K. Hagimoto, T. Yamada, T. Furuta, and H. Fukuyama, OFC2007, PDP20.

ハイブリッドラマン・EDFA: ラマン増幅器とEDFAを組み合わせ、広帯域と高利得  
を実現

## EDFAの広帯域化の進展(2)



**H. Masuda, A. Sano, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, Y. Hibino, K. Hagimoto, T. Yamada, T. Furuta, and H. Fukuyama, OFC2007, PDP20.**

## 第8章

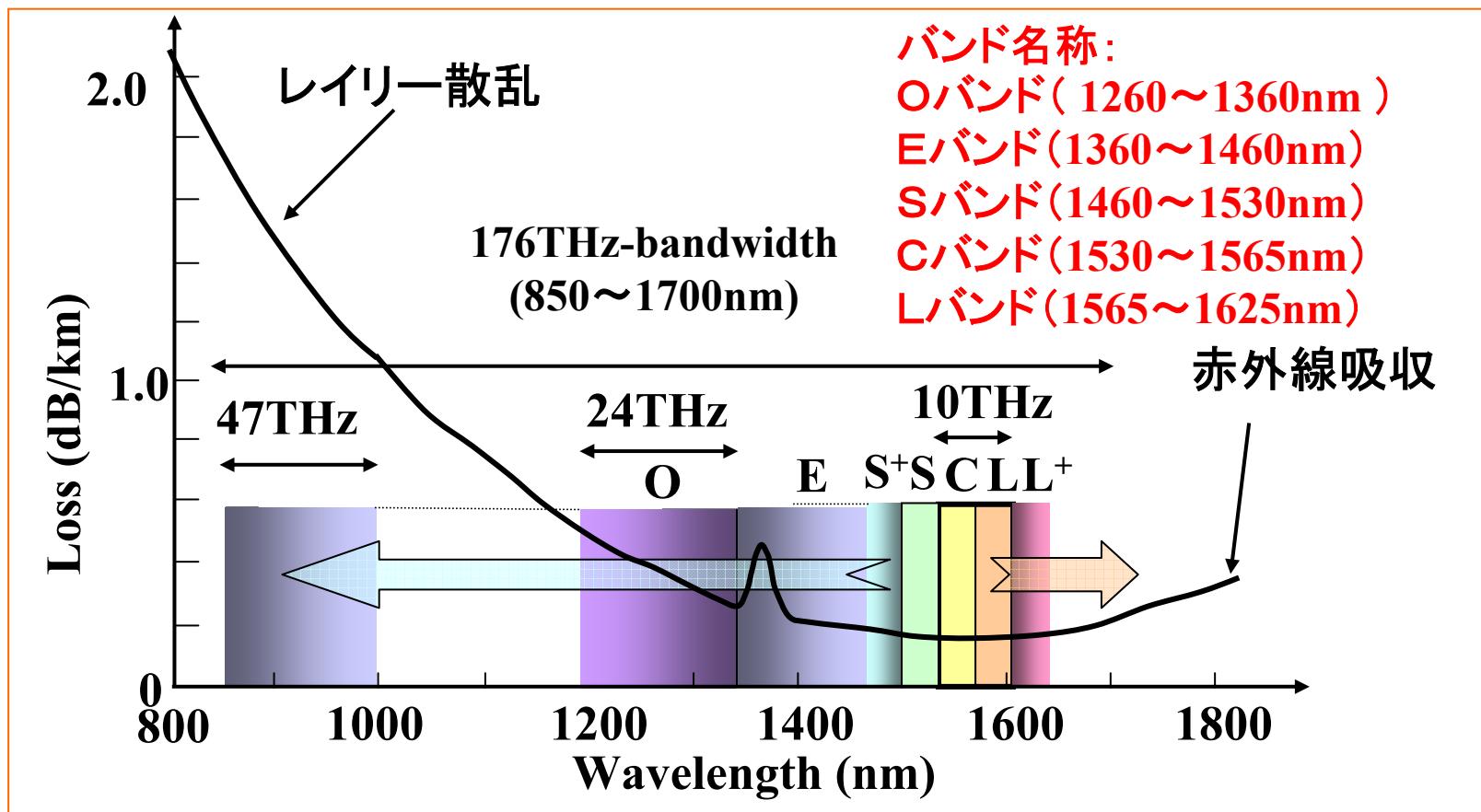
# 波長多重伝送技術

2007年7月9日(月)

1. 波長多重(WDM)伝送と変調方式
2. WDM伝送と分散マネジメント
3. 分散補償器

## DWDMと使用波長(光源波長)

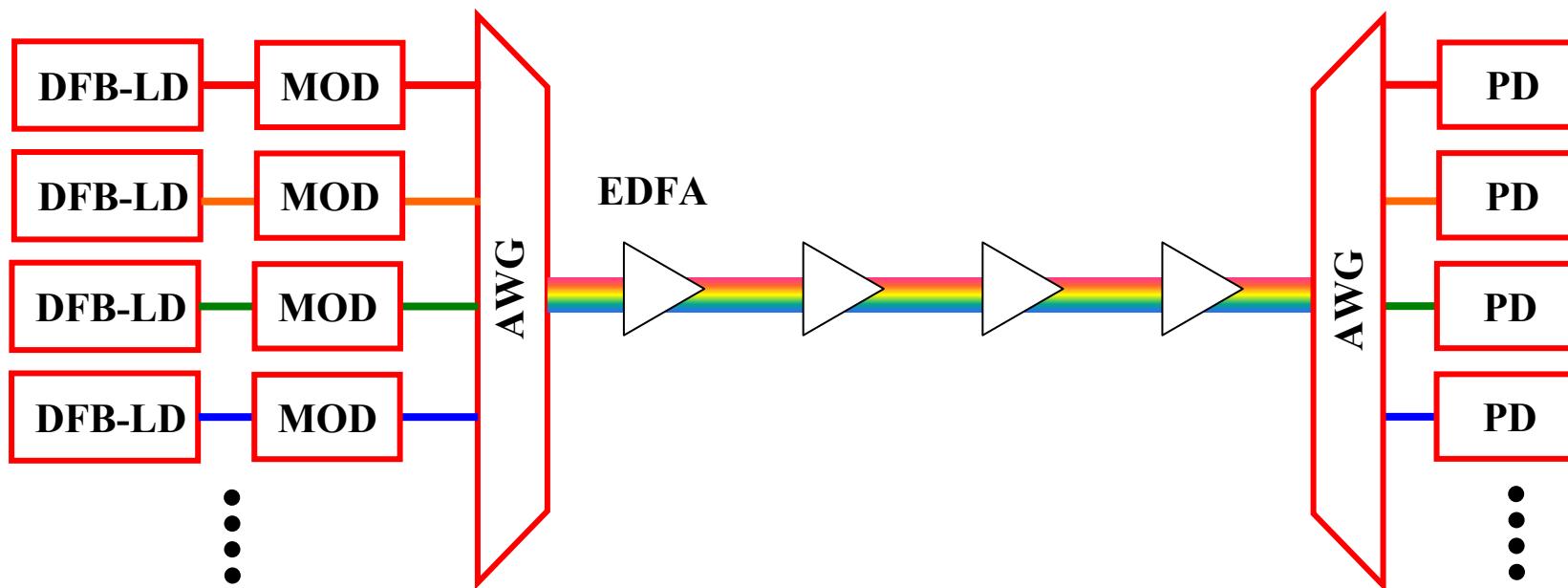
DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing (高密度波長多重技術)



周波数間隔: 100GHz → 波長間隔: 0.8nm間隔@1550nm帯 に相当

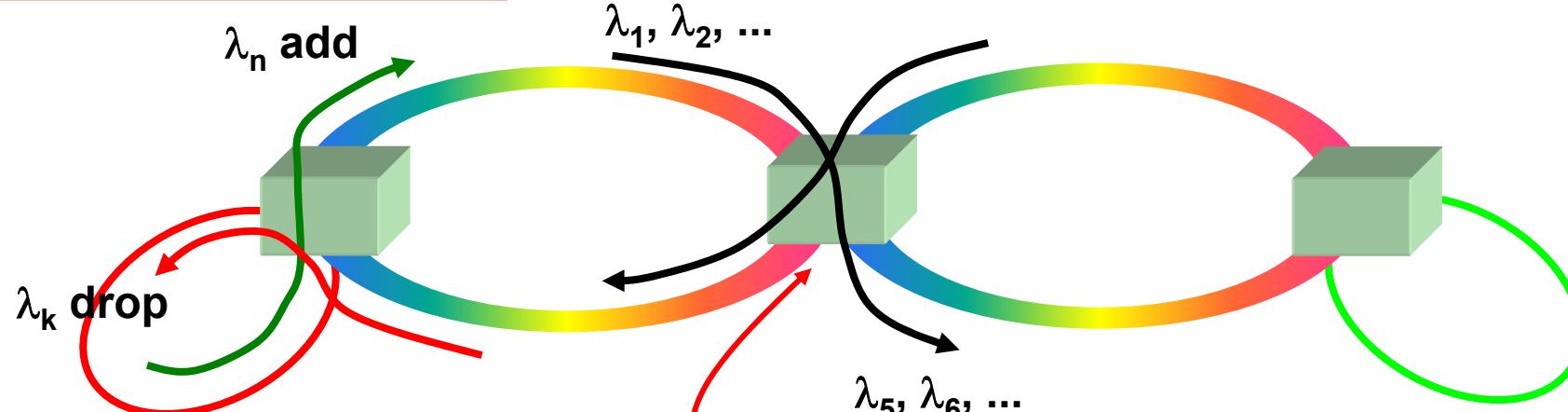
## 波長多重伝送の構成

Point-to-Point



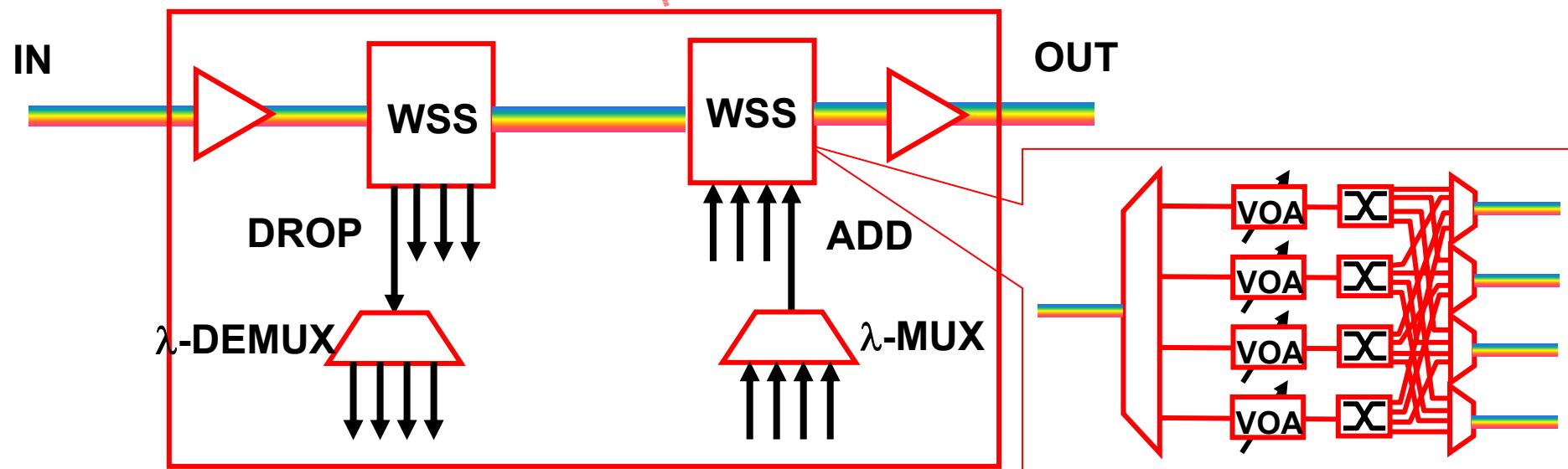
## AWGを多段中継するリングネットワーク

### 多段フィルタ中継構成



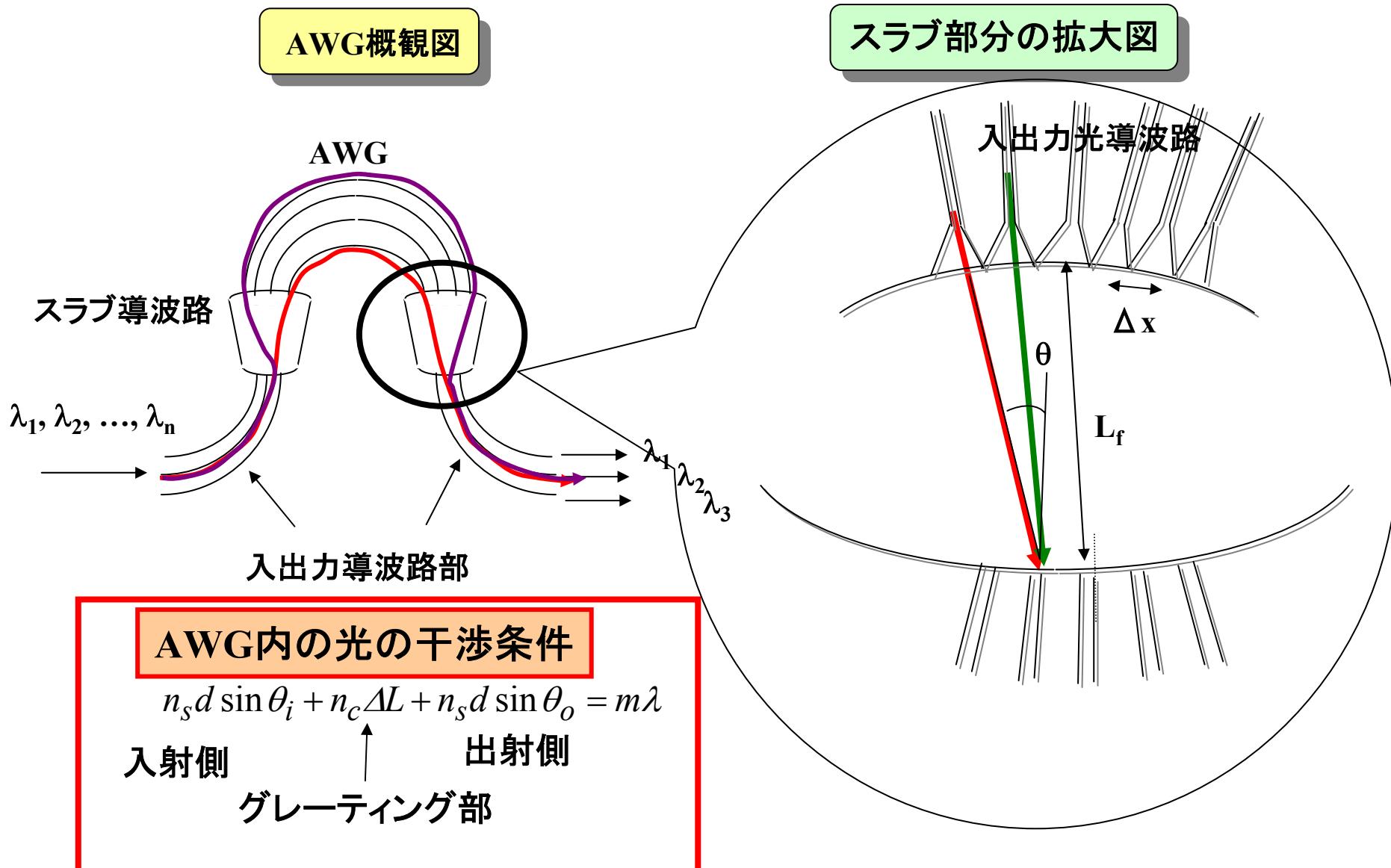
### Interconnected Ring Network Topology

### ROADM : Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer

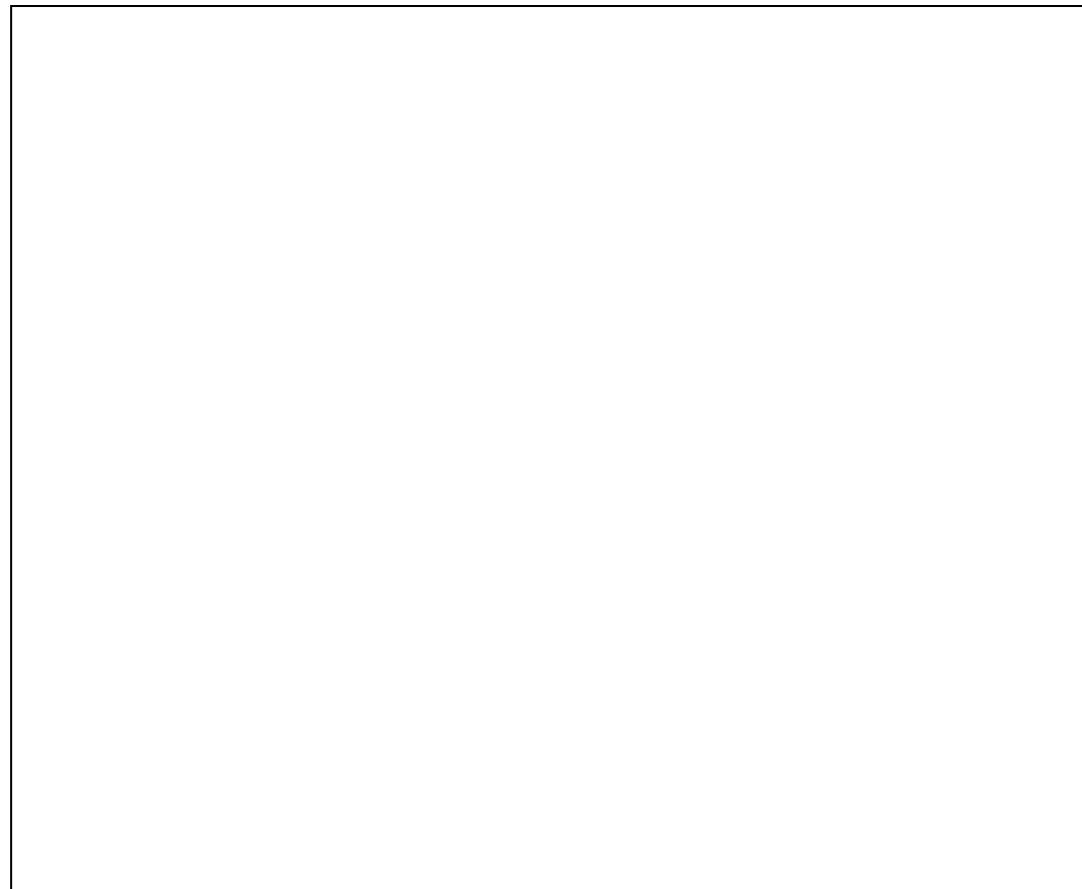


※ WSS : Wavelength Selective Switch

# アレイ導波路格子 (AWG)



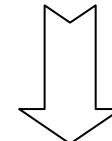
**Y. Hida, Y. Hibino, T. Kitoh, Y. Inoue, M. Itoh, T. Shibata, A. Sugita and A. Himeno (NTT),  
Electron. Lett., vol. 37, pp.820-821 (2001).**



## 小型・大規模AWG

6インチウェハ上に作製した  
25GHz, 400チャネルAWG

超高 $\Delta$ PLC(1.5%, 曲げ半径2mm)の採用



小型・大規模AWGの実現

波長範囲: 1530 – 1610nm  
損失: 3.8dB(中央ポート)、6.4dB(端のポート)  
隣接クロストーク: -20dB  
偏波依存波長シフト: 0.03nm以下

Y. Hida, Y. Hibino, T. Kitoh, Y. Inoue, M. Itoh,  
T. Shibata, A. Sugita and A. Himeno (NTT),  
Electron. Lett., vol. 37, pp.820-821 (2001).

# 波長多重(WDM)と変調方式

## 高周波数利用効率

周波数利用効率:  $f_0/\Delta f$  の向上を目指す。

→ **狭帯域変調方式(NRZ, CS-RZ, DQPDK)**

(例) 0.8bps/Hzの時、40Gbps, 50GHz間隔

→ SCL3波長帯の伝送帯域上限16THz × (0.8bps/Hz) = **12.8Tbps**

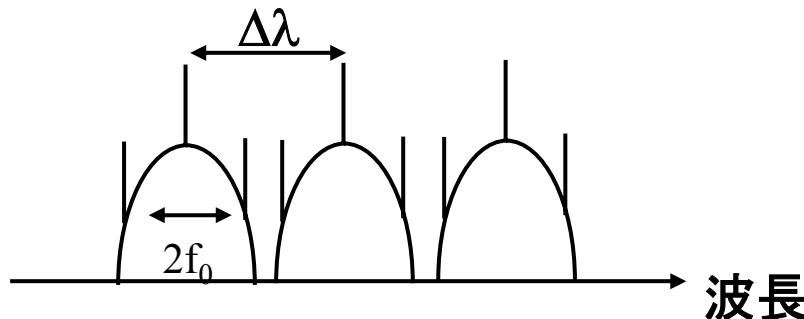
① 波長間隔が変調周波数よりも  
十分広い場合

$$\Delta f = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \gg 2f_0$$

$\Delta \lambda$  : DWDMの波長間隔

$\Delta f$  : DWDMの周波数間隔

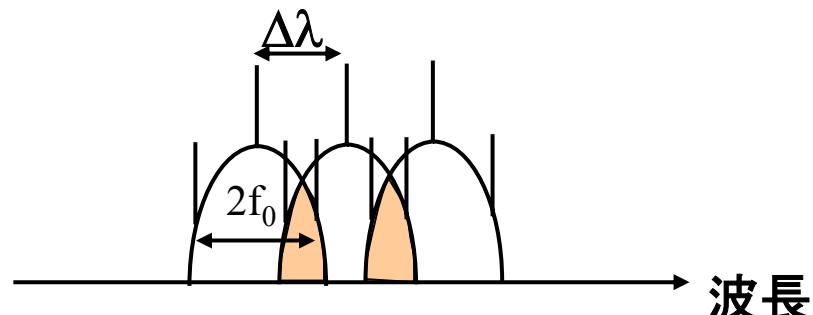
$f_0$  : 変調周波数



② 波長間隔が変調周波数に対して  
広くない場合

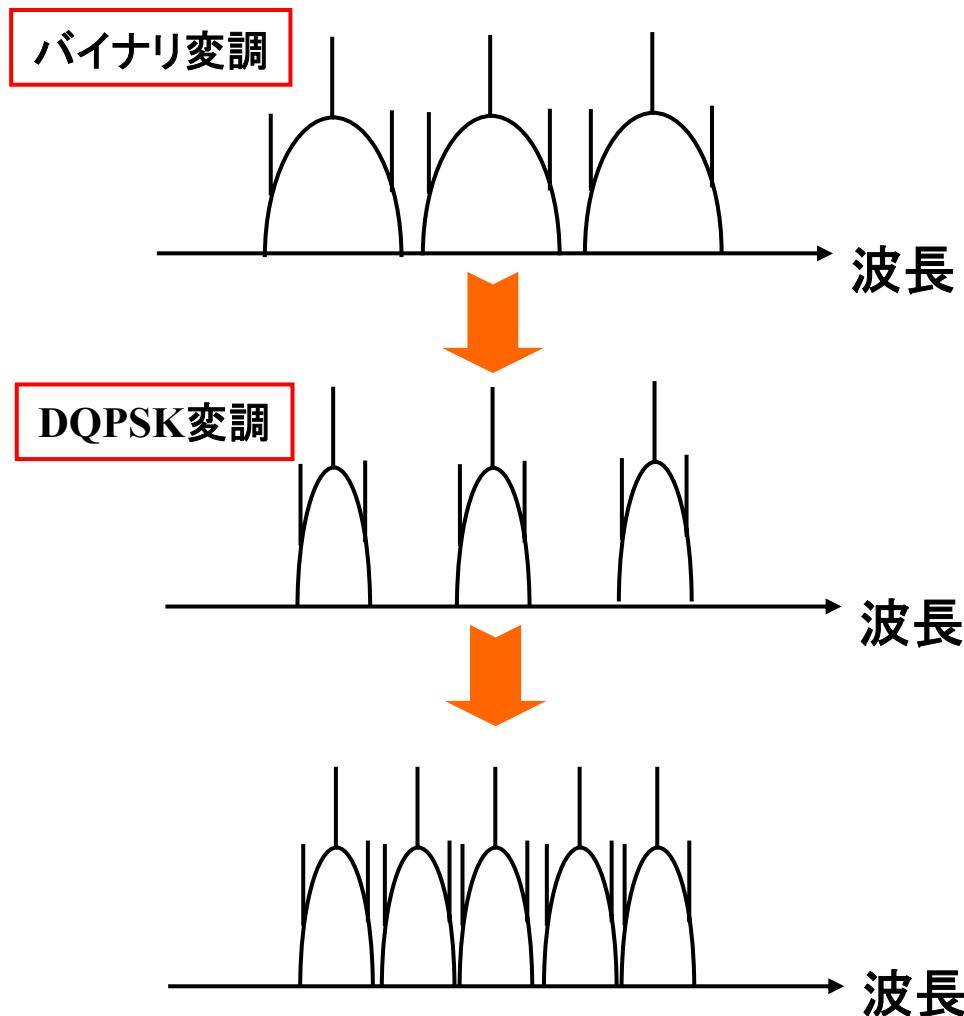
$$\Delta f = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda < 2f_0$$

隣接チャネルのバンドが重なってしまい、  
クロストークとなる



## DWDMにおける変調方式への要求仕様(1－2)

バイナリ(2値)から多値変調へ



(例) DQPSK変調

30nm帯域, 0.8bps/Hzの変調方式を用いる場合

バイナリ変調

10Gbps (12.5GHz or 0.1nm間隔) → 300波長

$$10\text{Gbps} \times 300\text{波長} = 3\text{Tbps}$$

40Gbps (50GHz or 0.4nm間隔) → 75波長

$$40\text{Gbps} \times 75\text{波長} = 3\text{Tbps}$$

伝送容量は変わらない！

DQPSK変調

位相4値なので、バイナリ変調の半分の帯域で同じ伝送容量を実現

$$40\text{Gbps} = 20\text{Gbps} \times 2$$

20Gbps (25GHz or 0.2nm間隔) → 150波長

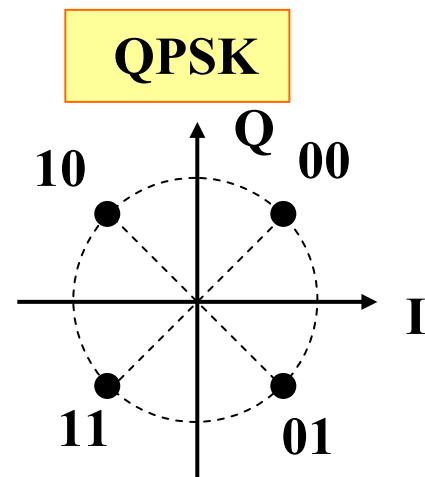
$$40\text{Gbps} \times 150\text{波長} = 6\text{Tbps}$$

伝送容量倍増！

# DQPSKの研究動向

R.A. Griffin, OFC2005, OWE3.

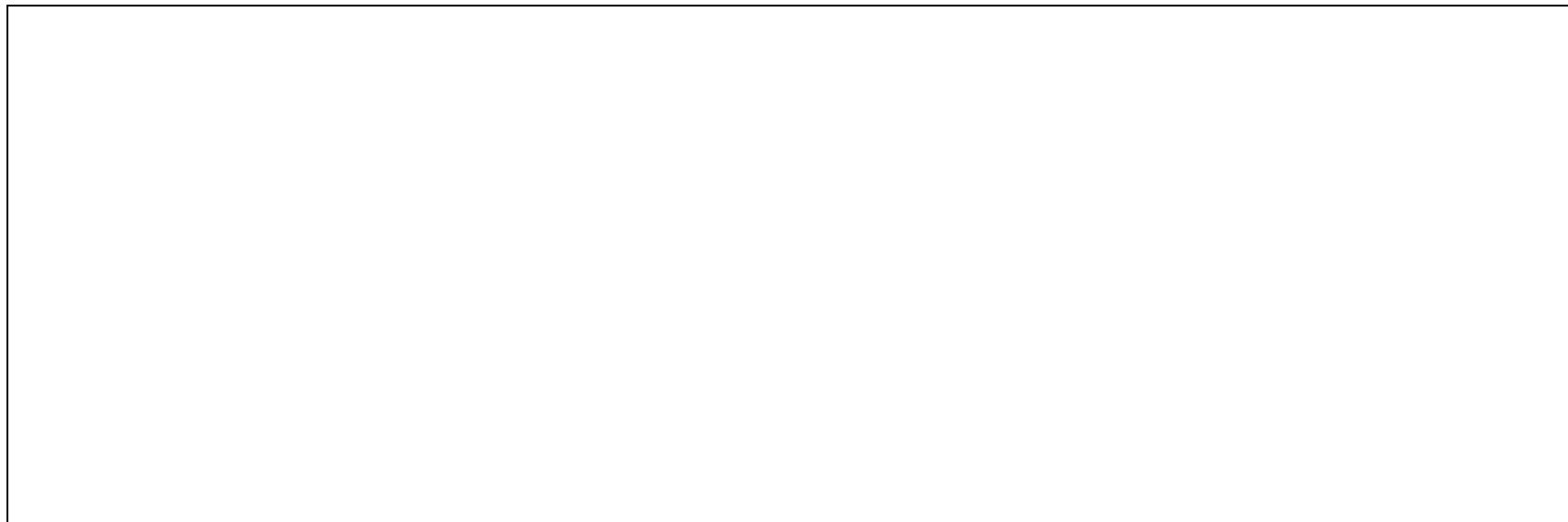
**DQPSK : Differential Quadrature PSK**



1シンボル2ビット

# DQPSK送信器

R.A. Griffin, OFC2005, OWE3.



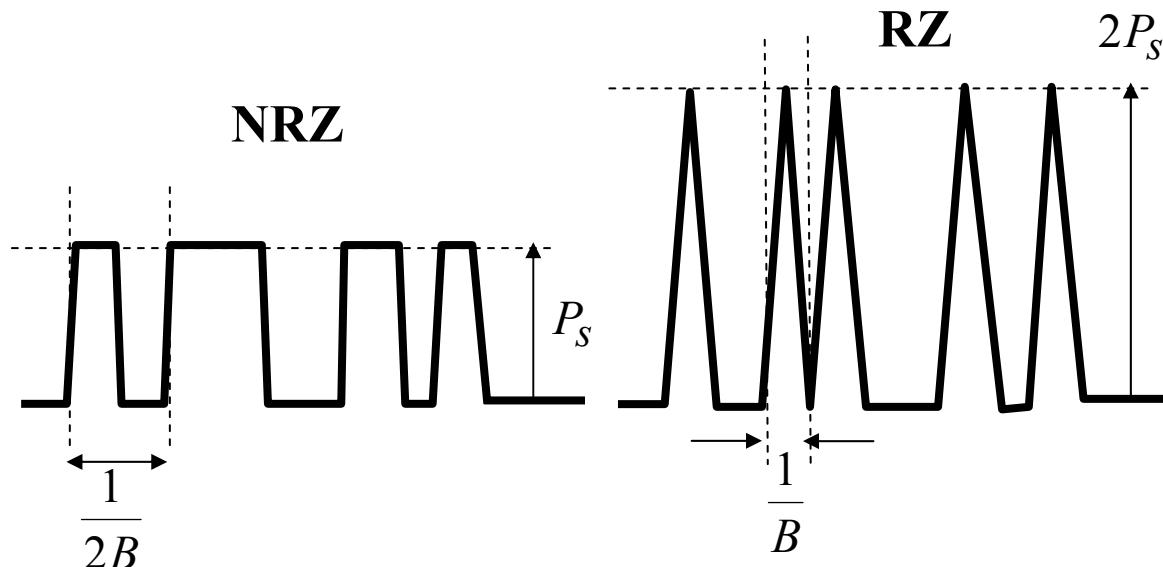
スペクトル利用効率 **2.5bps/Hz**の報告

S. Tsukamoto, D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh and K. Kikuchi, OFC2005, PDP29.

### 光雑音耐性

同一受信感度に対するSN比の差

→高SN比(高受信感度)の変調方式の選択(RZ, DPSK)



平均受信感度 $P_{ave}$ を用いてRZ・NRZのSNRを比較する。

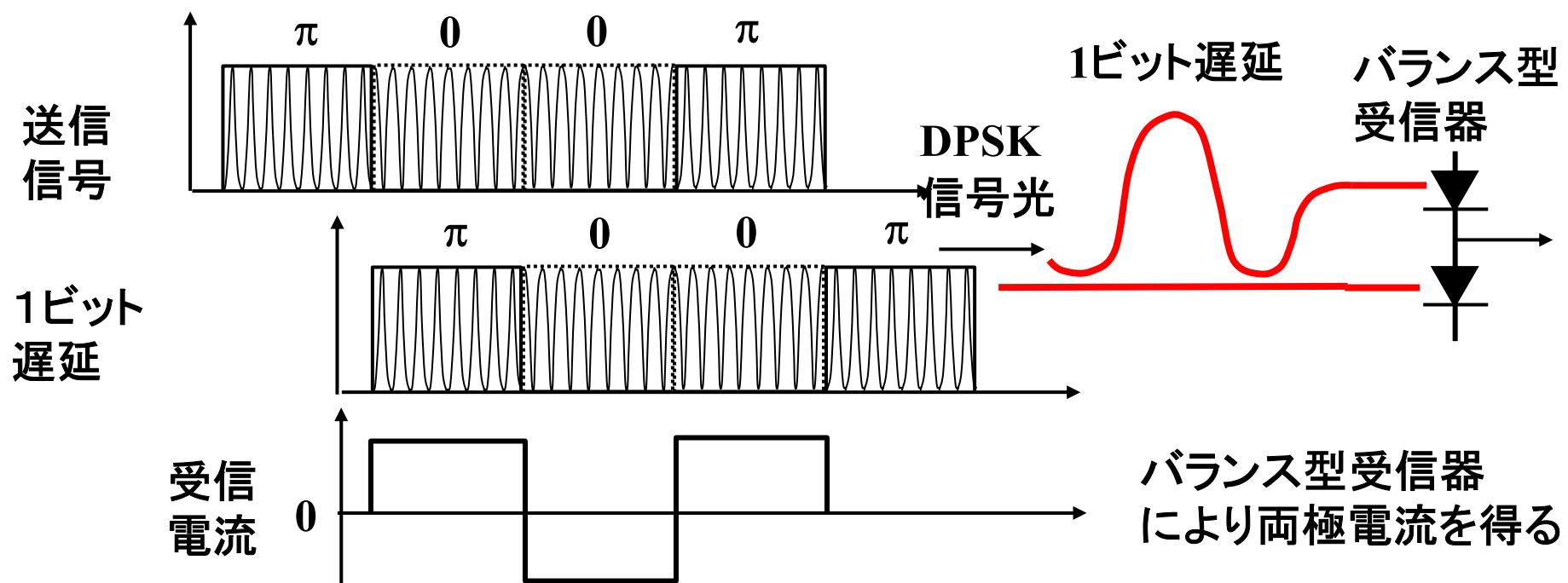
$$SNR = \left( \frac{e\eta i \frac{GP_s}{\hbar\omega}}{\sqrt{\sigma_{s,shot}^2 + \sigma_{sp,shot}^2 + \sigma_{s-sp}^2 + \sigma_{sp-sp}^2 + \sigma_{th}^2} + \sqrt{\sigma_{sp,shot}^2 + \sigma_{sp-sp}^2 + \sigma_{th}^2}} \right)^2$$

$$\left. \begin{array}{l} Ps : RZ = NRZ \times 2 (\text{ピーク強度}) \\ \sigma_{s,shot}^2, \sigma_{s-sp}^2 : RZ = NRZ \times 4 (\text{ピーク強度&帯域}) \\ \sigma_{sp,shot}^2, \sigma_{sp-sp}^2, \sigma_{th}^2 : RZ = NRZ \times 2 (\text{帯域}) \end{array} \right\} \text{より, } SNR(RZ) > SNR(NRZ)$$

## DPSK変調

### DPSK(Differential Phase-Shift-Keying, 差動位相シフトキーイング方式)

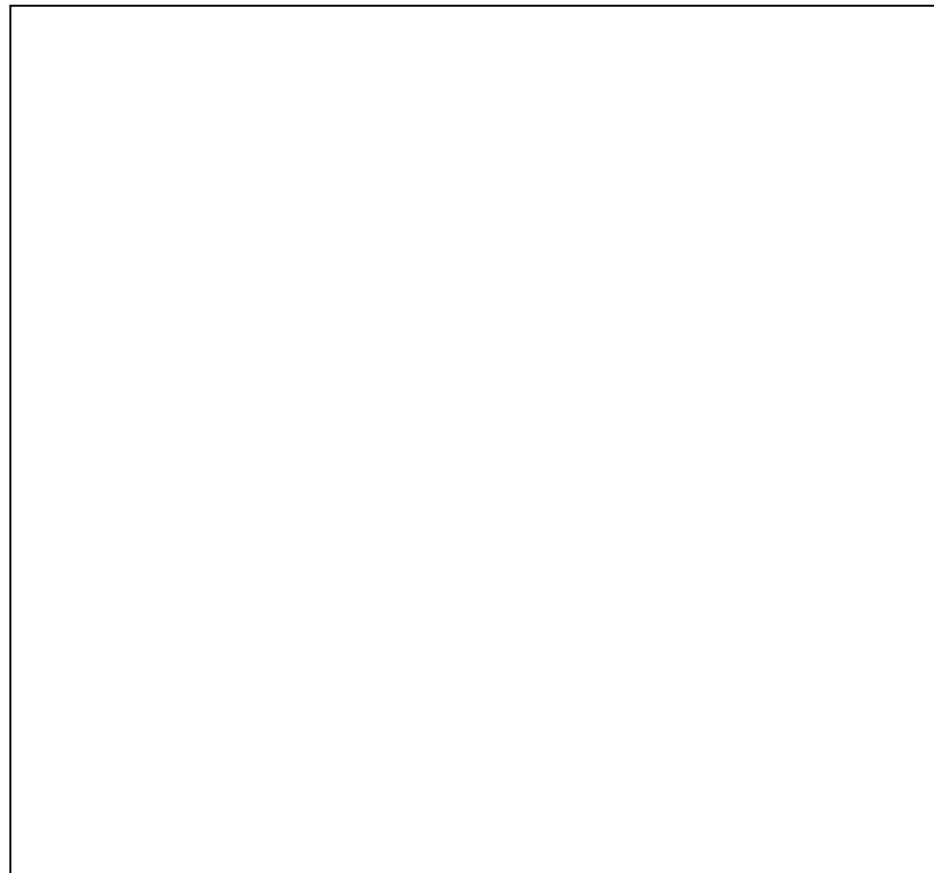
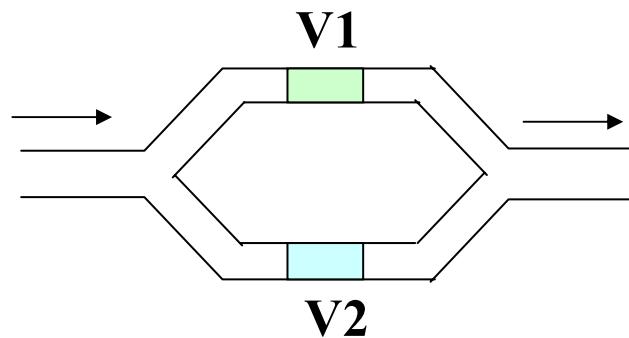
- PSK変調の1種でデータ1を隣接ビット間の位相差 $\pi$ 、データ0を隣接ビット間の位相差0に割り当てたもの。
- 40Gbps DWDMの長距離・受信感度改善を目的にこの2~3年急激に取り組みが盛んになってきた。



バランス型検波器により光位相0,  $\pi$ を電気レベル+1, -1に変換  
→ 電圧0に閾値を設定でき、レベル0,1の受信より感度を3dB改善可能

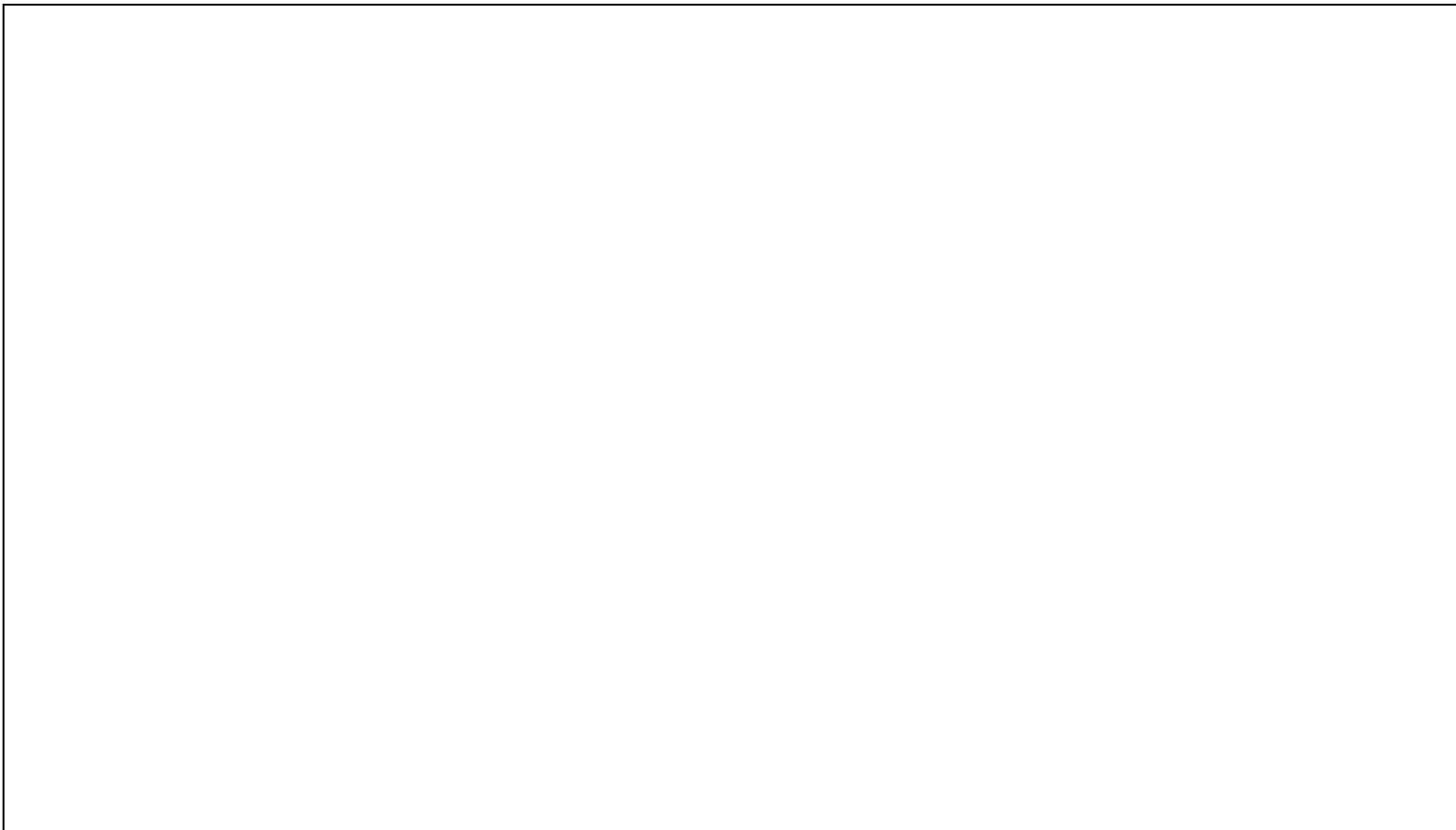
A.H. Gnauck, OFC2004 Tutorial, TuF5.

差動駆動型  
MZMを用いた場合



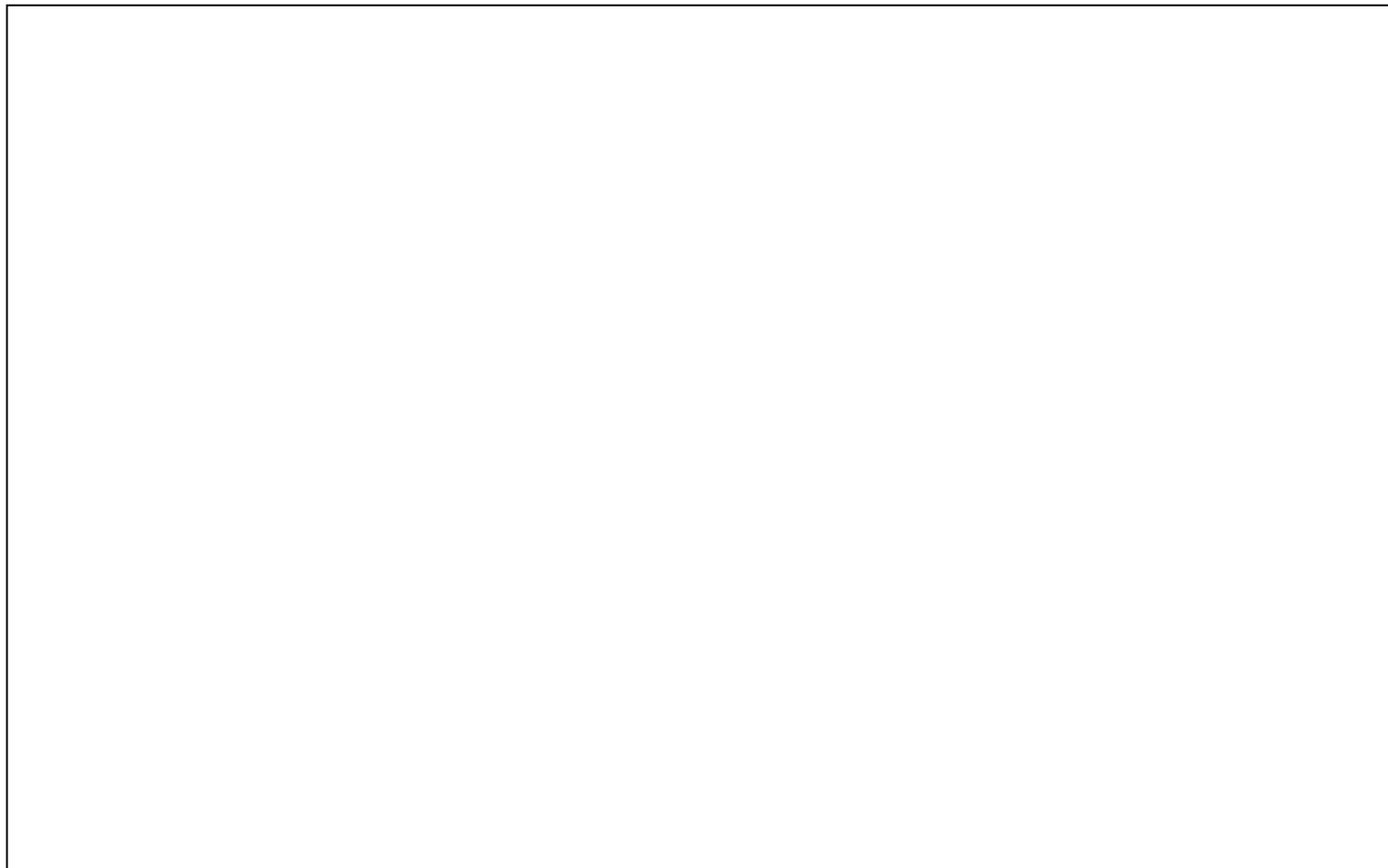
# DPSK変調信号の受信器

A.H. Gnauck, OFC2004 Tutorial, TuF5.



# 40Gbps RZ-DPSK伝送実験例

A.H. Gnauck, OFC2004 Tutorial, TuF5.



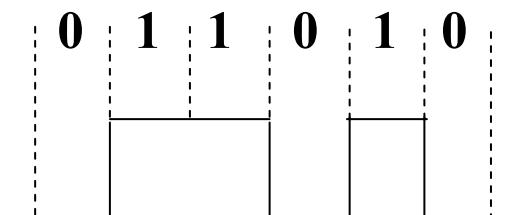
### 非線形耐力

光ファイバ伝送中の自己位相変調(SPM)による分散の影響を抑える。

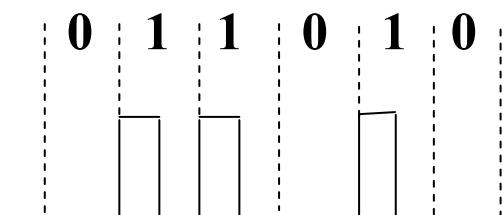
→ ・送信光平均パワーのなるべく小さな変調方式

(例1) NRZはRZの半分の帯域で済むので変調効率の観点では有利だが、1インターバルの平均光パワーが倍のため非線形耐力は劣る。

NRZ



RZ



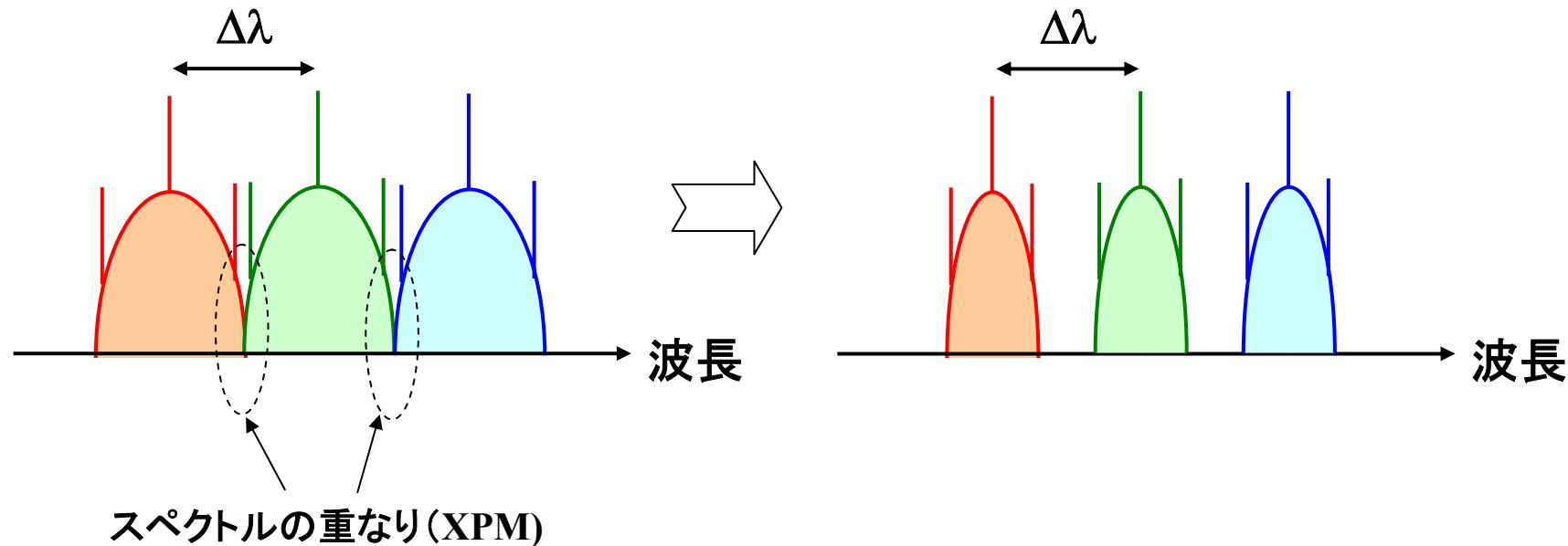
### 隣接波長チャネル間クロストーク耐力

隣接チャネル間の相互作用(XPM)の低減

→ 隣接チャネル間のスペクトル重なりを極力避ける

→ 狹帯域の変調方式の採用

(2値:CS-RZ, Duobinary)(多値:DQPSK)



### PMD耐性

DVD(Differential Velocity Delay)による波形歪の影響の大小  
→変調波形形状依存

10Gbps NRZ

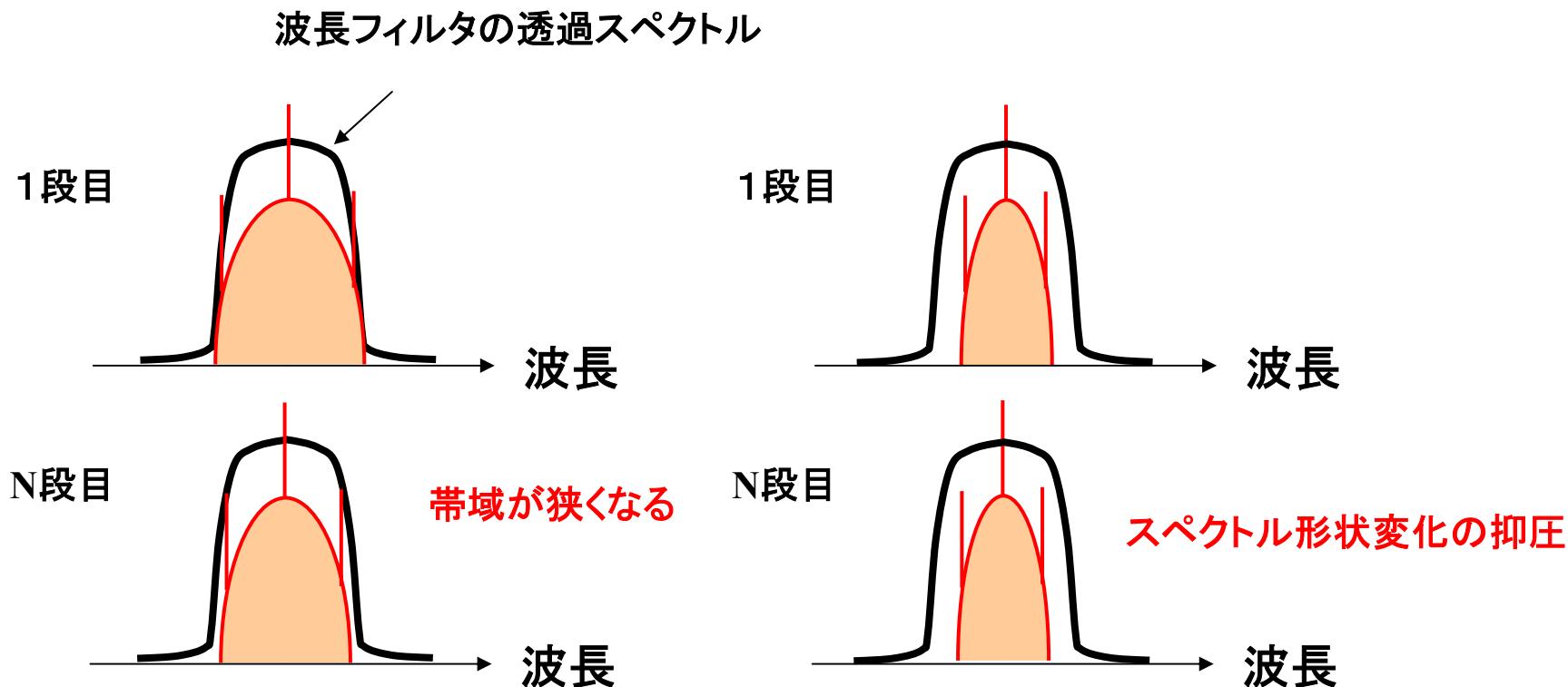


10Gbps RZ



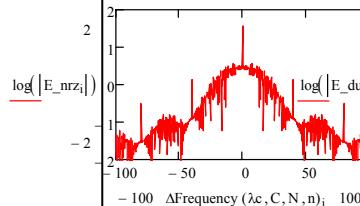
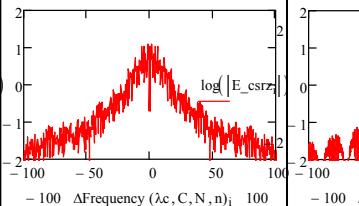
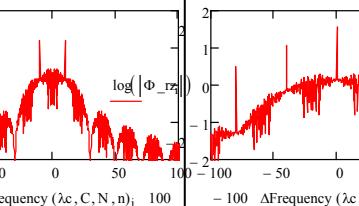
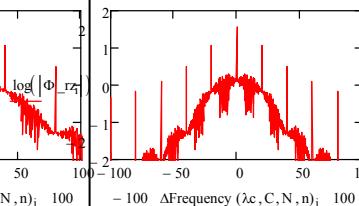
### 波長フィルタ多段透過耐性

多段フィルタによるスペクトル形状変化・波形劣化→狭帯域スペクトルの変調方式  
(2値:CS-RZ, Duobinary)(多値:DQPSK)



# 変復調方式の比較(40Gbps以上)

参考文献:尾中(富士通), NGN時代の光技術・産業懇談会第1回公開討論会資料(2007.5.15)

	NRZ	Duobinary	CS-RZ	RZ-DPSK	RZ-DQPSK
光スペクトル 形状					
光雑音耐力	悪い	悪い	中	非常によい	よい
波長分散耐力	中	よい(線形 領域では)	中	中	よい
PMD耐力	悪い	中	中	中	よい
光学非線形耐力	中	悪い	よい	よい	よい
OADMフィルタ 透過耐力	よい	非常によい	中	中	非常によい
構成(サイズ/コスト)	小	大	中	大	大