

第10回

光増幅器

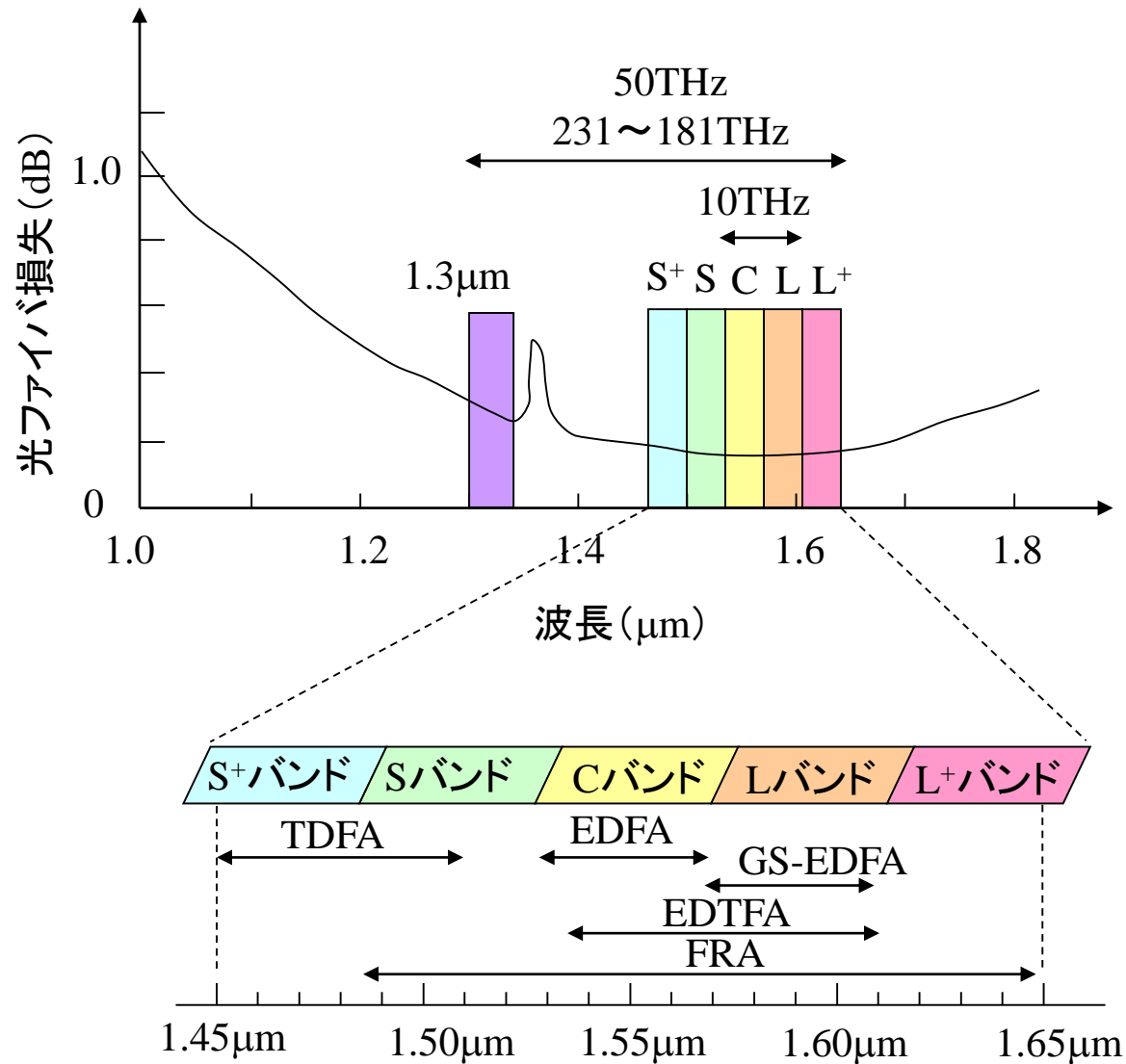
講義スケジュール(1)

	日付	内容
第1回	10/6	光通信システム(基礎・長距離基幹系)
第2回	10/13	光通信システム(メトロ・アクセス・LAN・インターコネクション)
第3回	10/20	光変調符号
第4回	10/27	光変復調技術(強度変調・位相変調)
第5回	11/10	光変復調技術(デジタル・コヒーレント関連技術)
第6回	11/17	光ファイバのモード特性(波動方程式)
第7回	11/24	光ファイバのモード特性(偏波)
第8回	12/1	ファイバの伝送特性(分散による伝送限界)

講義スケジュール(2)

	日付	内容
第9回	12/8	ファイバの伝送特性(分散補償技術)
第10回	12/15	光増幅器
第11回	12/22	ビット誤り率(強度変調・直接検波)
第12回	1/5	ビット誤り率(コヒーレント、多値変調、光増幅)
第13回	1/19	波長多重(WDM)伝送(分散マネジメント技術)
第14回	1/26	波長多重(WDM)伝送(変調技術)
第15回	2/2	光スイッチング技術・最新の光通信関連技術

光ファイバの伝送損失と対応する光ファイバ増幅器



6－1 光増幅器の雑音

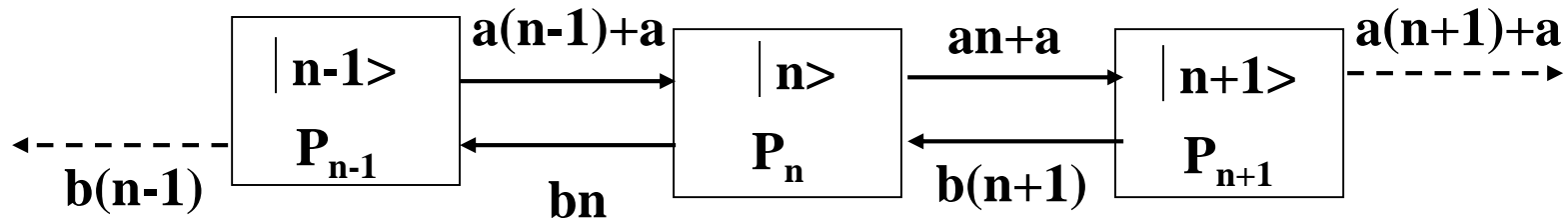
6－2 ASE雑音によるSN比と伝送限界

6－3 光ファイバ増幅器の種類

光増幅器の雑音

光増幅器の雑音特性(1)

n個の光子数を持つ状態 $|n\rangle$ と $|n+1\rangle, |n-1\rangle$ 間の遷移図



$a=A\Gamma N_2$: 誘導放出の遷移確率 = 自然放出確率

$b=A\Gamma N_1$: 誘導吸収の遷移確率

ただし A : アインシュタインの A 係数

N_1 : 下準位の密度

N_2 : 上準位の密度

n 個あった光子数が $n+1$ 個に増える確率は、 $a+an$

$n+1$ 個から n 個になる確率は、 $b(n+1)$

従って、光子数が n 個になる存在確率 $P_n(t)$ の時間変化は以下の方程式で表される。

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -[a(n+1) + bn]P_n(t) + [a(n-1) + a]P_{n-1}(t) + [b(n+1)]P_{n+1}(t) \quad (10.1)$$

光増幅器の雑音特性(2)

光子数の平均値 $\langle n \rangle$, 2乗平均値 $\langle n^2 \rangle$ は $P_n(t)$ を用いて表現される光子数のk次モーメント $\langle n^k \rangle = \sum n_k P_n$ において $k=1, 2$ の場合であるから、式(10.1)より

$$\frac{d \langle n \rangle}{dt} = (a - b) \langle n \rangle + a \quad (10.2)$$

$$\frac{d \langle n^2 \rangle}{dt} = 2(a - b) \langle n^2 \rangle + (3a + b) \langle n \rangle + a \quad (10.3)$$

一つのモード当たりの入射信号光子数に対応する初期条件 $\langle n(0) \rangle = \langle n_0 \rangle$, $\langle n^2(0) \rangle = \langle n_0^2 \rangle$ で解くと、

$$\langle n \rangle = \langle n_0 \rangle \exp[(a-b)t] + n_{sp} \{ \exp[(a-b)t] - 1 \} \quad (10.4)$$

$$\begin{aligned} \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 = & \langle n_0 \rangle \exp[(a-b)t] + n_{sp} \{ \exp[(a-b)t] - 1 \} \\ & + 2n_{sp} \{ \exp[(a-b)t] - 1 \} \langle n_0 \rangle \exp[(a-b)t] \\ & + n_{sp}^2 \{ \exp[(a-b)t] - 1 \}^2 \\ & + \exp[2(a-b)t] (\langle n_0 \rangle - \langle n_0^2 \rangle - \langle n_0 \rangle) \end{aligned} \quad (10.5)$$

ただし、
$$n_{sp} = \frac{a}{a-b} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \quad : \text{反転分布パラメータ or 自然放出光係数}$$
$$\exp[(a-b)t] : \text{単一通過の利得Gと等価}$$

式(10.4)、(10.5)をすべてのモードに対する和を取る。

入射光に対する和

$$\left. \begin{array}{l} \langle n_0 \rangle^2 \rightarrow \langle n_{in} \rangle^2 \\ \langle n_0^2 \rangle \rightarrow \langle n_{in}^2 \rangle \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{入射光の全スペクトル領域の和を取る。} \\ \text{ただし入射光は単一モードの条件。} \\ \langle n_{in} \rangle : \text{全入射光子数の平均値} \end{array}$$

自然放出光に対する和

$$\left. \begin{array}{l} \cdot \text{利得媒質の等価的な周波数帯域幅(波長フィルタを使用する場合はその帯域幅)} \Delta f \\ \cdot \text{導波される横モードの総数 } m_t \text{ (直交偏波を含む)} \end{array} \right\} n_{sp} \rightarrow n_{sp} m_t \Delta f$$

光増幅器の雑音特性(4)

- ・式(10.5)中の第3項 $n_{sp}\langle n_0 \rangle \rightarrow$ 自然放出光と信号光の各モードが一致している前提なので、 $n_{sp}\langle n_{in} \rangle$ とする。
- ・式(10.5)中の第4項 $n_{sp}^2 \rightarrow$ 一つのモードの自乗和なので、 $n_{sp}^2 m_t \Delta f$ とする。

以上から、光増幅器出力端での平均光子数 $\langle n_{out} \rangle$ と分散 $\sigma_{out}^2 (\langle n_{out}^2 \rangle - \langle n_{out} \rangle^2)$ は、

$$\langle n_{out} \rangle = G \langle n_{in} \rangle + (G-1)n_{sp}m_t\Delta f \quad (10.6)$$

$$\sigma_{out}^2 = G \langle n_{in} \rangle + (G-1)n_{sp}m_t\Delta f + 2G(G-1)n_{sp}\langle n_{in} \rangle + (G-1)^2n_{sp}^2m_t\Delta f + G^2\beta\langle n_{in} \rangle \quad (10.7)$$

式(10.6)中の項の意味 第1項: 増幅された信号光
第2項: 発生したASE (Amplified Spontaneous Emission)

式(10.7)中の項の意味 第1項: 信号光のショット雑音
第2項: ASEのショット雑音
第3項: 信号光－ASE間のビート雑音
第4項: ASE－ASE間のビート雑音
第5項: 信号光の持つ過剰雑音(相対強度雑音など)

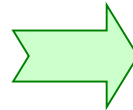
雑音指数

雑音指数: Noise Figure (NF)

$$NF = \frac{SN_{in}}{SN_{out}}$$

$$\cong 2 \frac{G-1}{G} n_{sp}$$

$$\cong 2n_{sp}$$



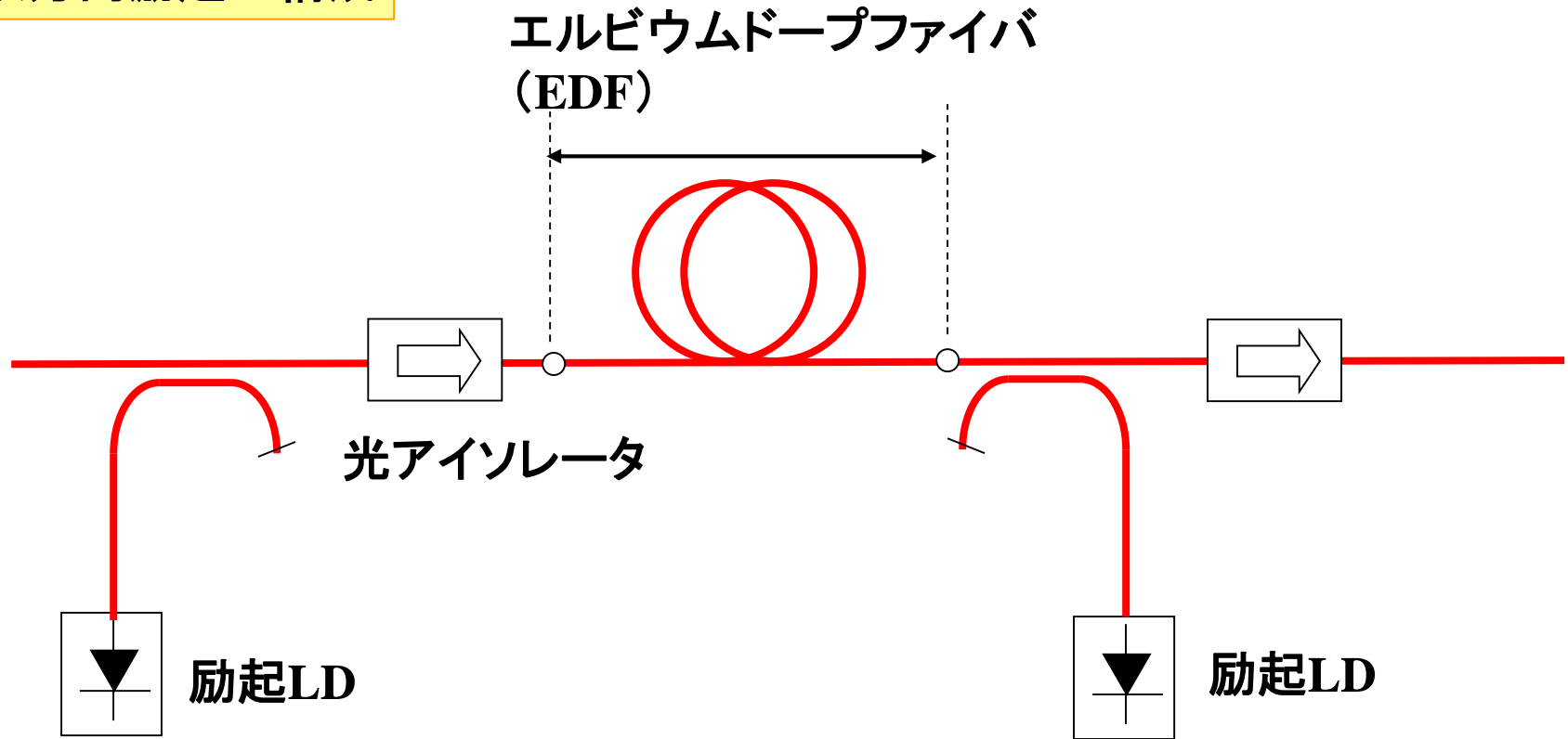
$n_{sp} > 1$ だから $NF \geq 2$ (3dB)

増幅後のSN比は入力に
対して必ず3dB以上劣化

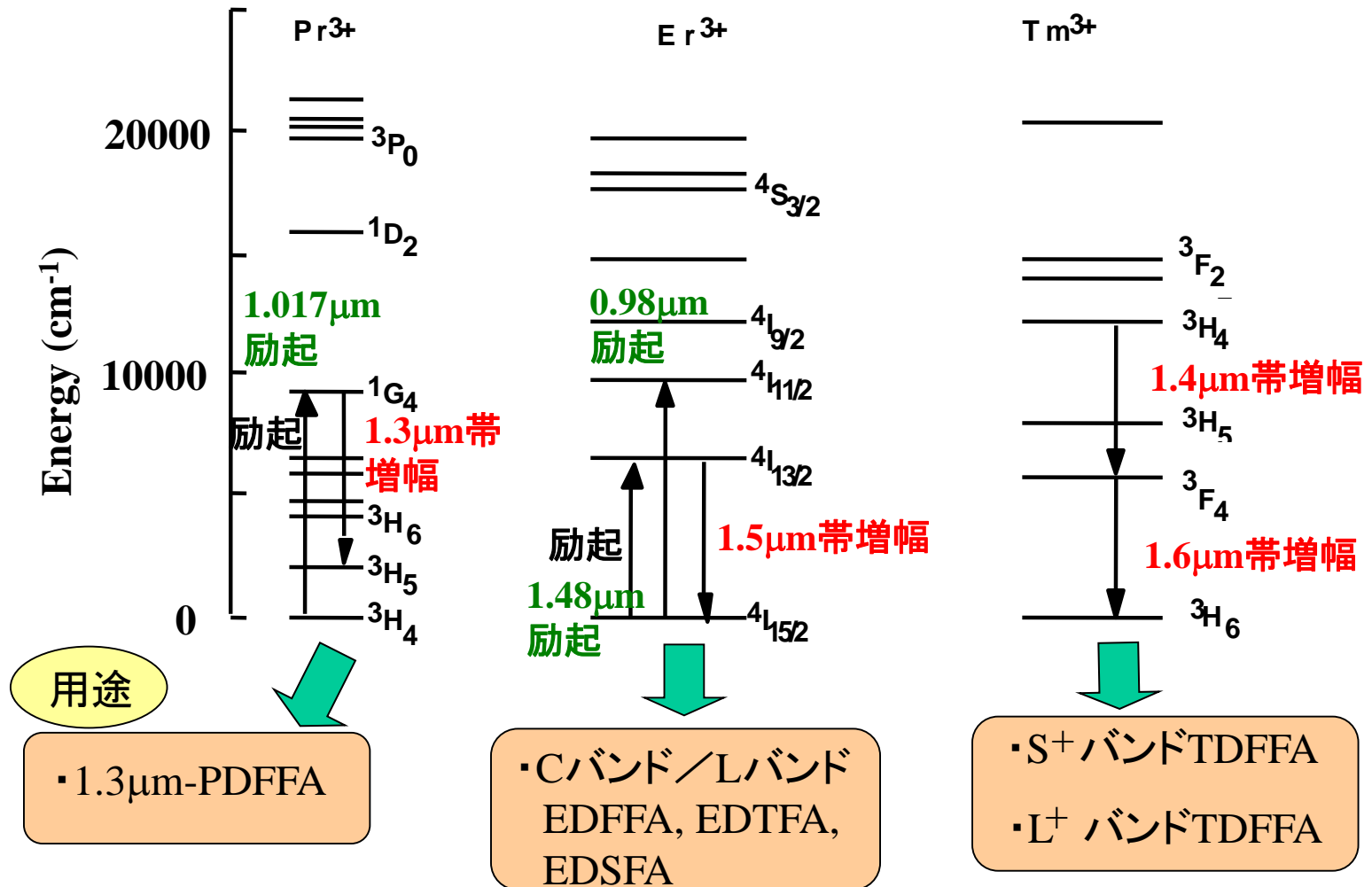
いろいろな光増幅器

光ファイバ増幅器の構成

双方向励起の構成



Pr, Er, Tmイオンのエネルギー準位



* ○○FFA: フッ化物光ファイバ増幅器
 ○○TFA: テルライト系光ファイバ増幅器
 ○○SFA: 石英系光ファイバ増幅器 ○○はPD, ED, TD

光ファイバ増幅器(EDFA)の仕様

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 ~ 30dB

雑音指数(NF) : 5.0dB

飽和光出力 : +20dBm

伝送路損失 : 0.2dB/km

伝送路分散 : 0.5ps/nm/km

励起波長による特性差

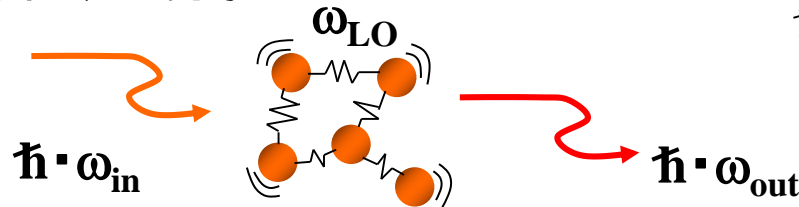
波長	1.48 μ m	0.98 μ m
光源	InGaAsP/InP MQW-LD	InGaAs/GaAs $\overline{\text{A}}$ MQW-LD
利得効率	5dB/mW	10dB/mW
雑音指数	5.5dB	3~4.5dB
飽和光出力	+20dBm	+20dBm
励起波長範囲	1.47~1.49 μ m (20nm)	0.979~0.981 μ m (2.5nm)
励起光出力	< 400mW	< 350mW

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

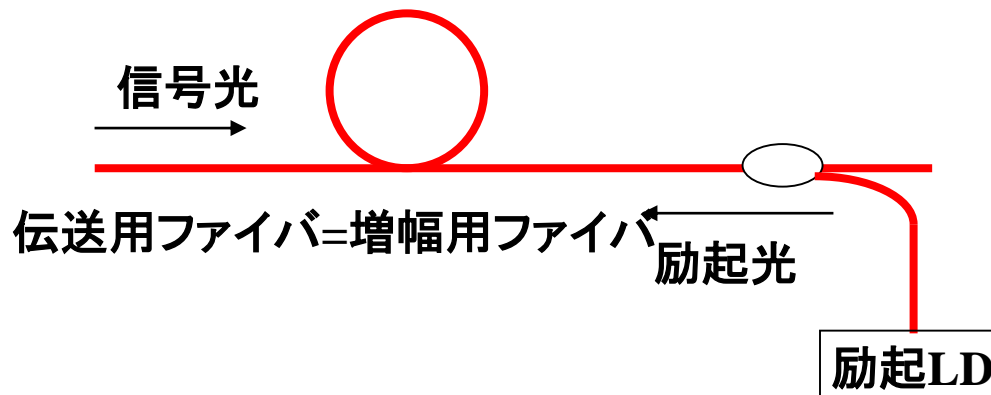


$$\hbar\omega_{in} - \hbar\omega_{out} = \hbar \cdot \omega_{LO} = \hbar \cdot 2\pi(f_{in} - f_{out})$$

$$= \hbar \cdot 2\pi \cdot 13\text{THz}$$

波長では約100nm

ラマン増幅中継器の構成



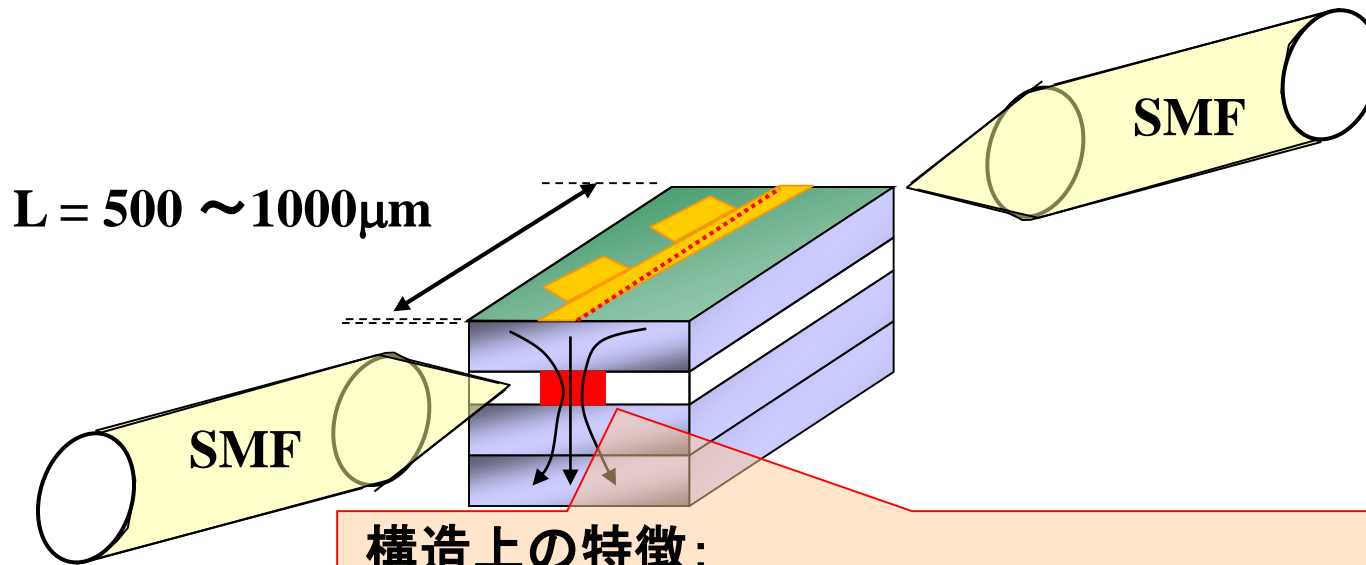
メリット

- 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

半導体光増幅器(SOA)の基本構成



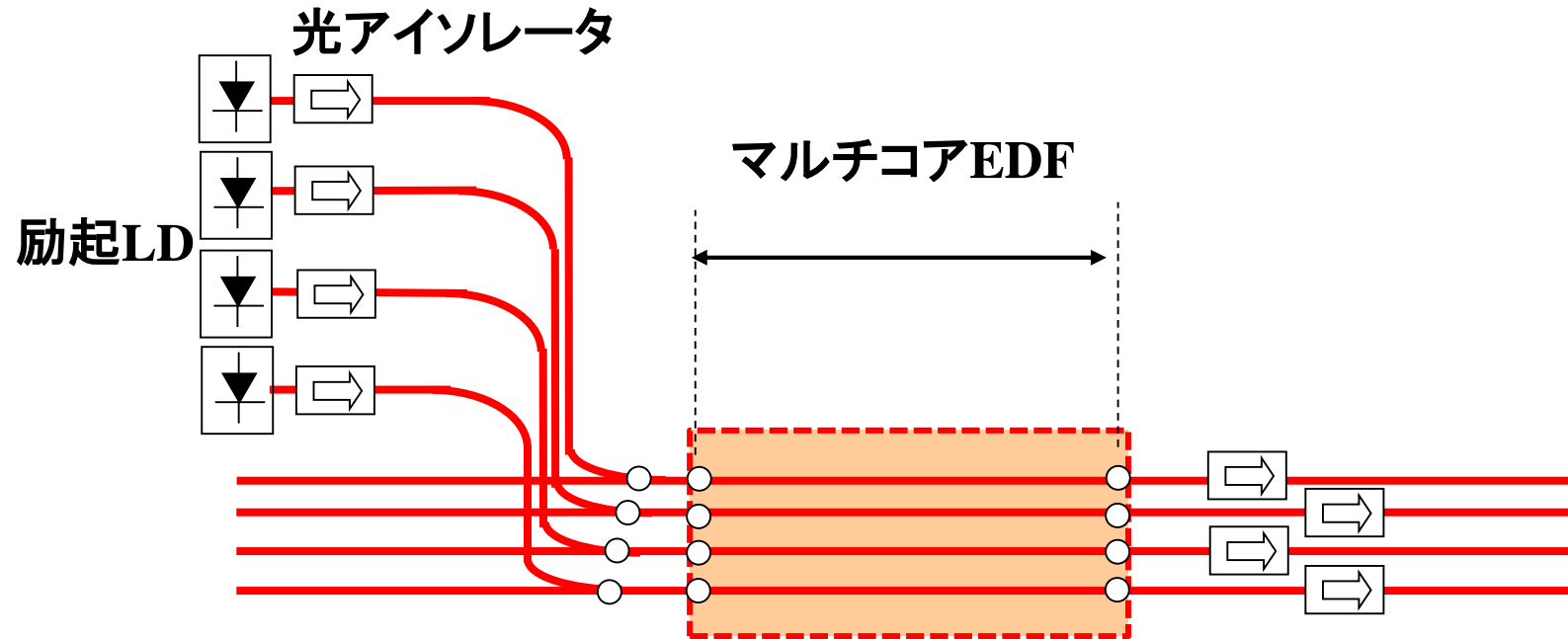
構造上の特徴:

- ① 偏波無依存化を実現するため、最近はバルク構造が主流
- ② 横に扁平した導波路の偏波依存性($\Gamma_{\text{TE}} > \Gamma_{\text{TM}}$)を補償するため伸長歪み導入の構造も見られる。
- ③ MQWによる高利得の検討例もあるが、偏波無依存化のため伸長歪みバリア・井戸構造にする必要あり。
- ④ SMFとの結合向上のためのスポットサイズ変換器の装荷
- ⑤ 発振抑制のための無反射コート($R < 0.1\%$) + 斜め導波路(端面の垂線から約7度傾斜) + 導波路のない窓領域

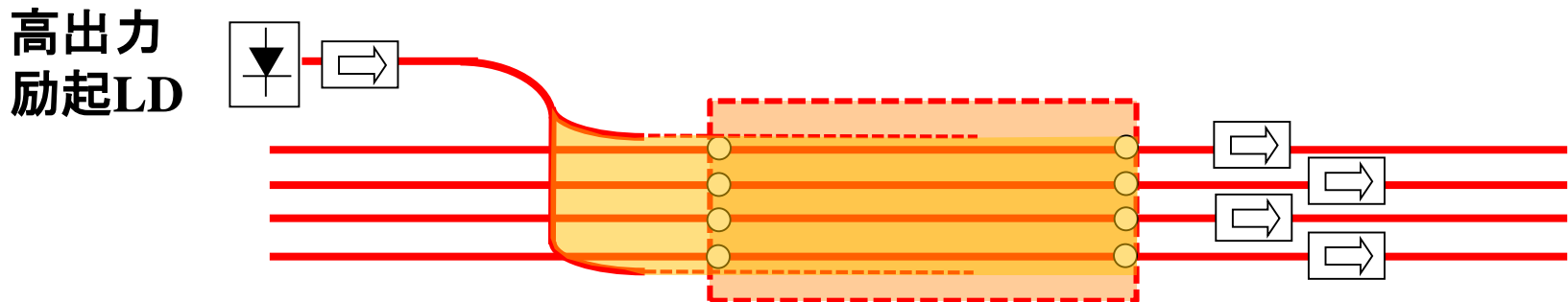
最近の新しい光ファイバ増幅器

マルチコアEDFA

個別励起方式



一括クラッド励起方式



マルチモードEDFA

