

IV. 光増幅伝送

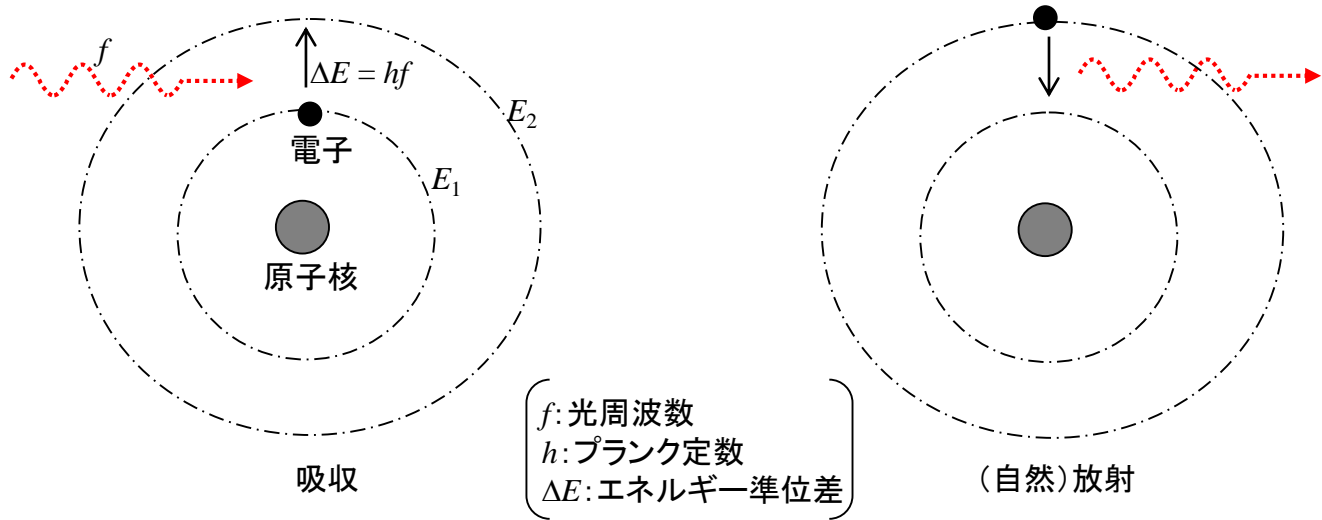
現在の光通信システムでは、光信号を直接増幅しながら伝送するのが標準的となっている。
本章では光増幅伝送系における信号光の伝搬特性について述べる。まずは光増幅の基本から。

誘導放出

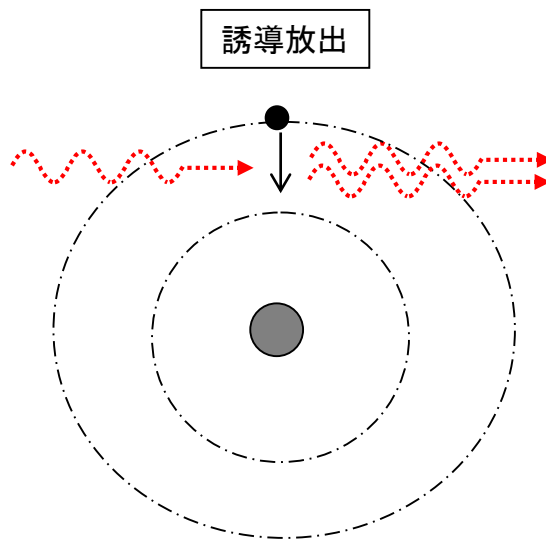
物質には固有のエネルギー状態がある。

光との相互作用により物質が高いエネルギー準位に遷移するときには光は吸収され、
物質が低いエネルギー準位に遷移するときには光が放射される。

このとき、エネルギー保存より、(吸収/放射光子のエネルギー) = (物質のエネルギー準位差)。



特に、光入射に刺激されて放射が起こる場合、入射光と同一周波数・同一位相の光が放射される。

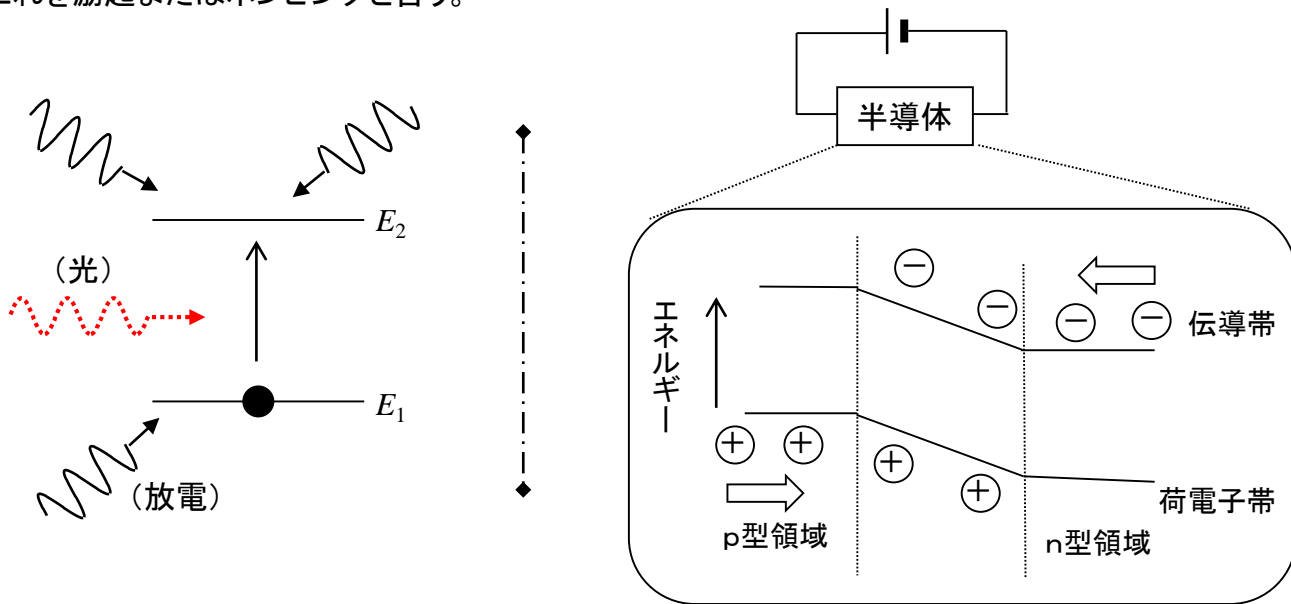


入射光からみたら、これは光の増幅現象。これが光増幅器の源。

なお、誘導放出は、高エネルギー準位状態の原子があれば必ず起こるわけではなく、確率事象。

吸収、放射も同様。

光増幅作用を得るためには、物質系が高いエネルギー状態にあることが必要。
がしかし、通常の熱平衡状態では、物理系はエネルギーが低い状態に落ち着いている。
そこで、物質を高いエネルギー状態へ遷移させて光増幅を起こす。
これを励起またはポンピングと言う。



光増幅器の開発経緯

誘導放出現象は、量子力学の誕生により人々の知るところとなった(1900 年代前半)。

そして、これを利用してレーザが発明された(1960年)。

1970年、半導体レーザ室温発振。

1980年代、半導体光増幅器の研究がなされた。が、実用化に苦しむ。

ファイバとの結合、無反射コート、利得飽和による波形歪み・チャンネル間クロストーク、
などが課題。

1980年代、エルビウム添加光ファイバ増幅器(Erbium Doped Fiber Amplifier: EDFA)の研究が地道に行われた。

- ー励起光をファイバ伝搬させるアイデア (後々、この特許で皆が苦しんだ)
- ー当初は、0.8 μm 帯半導体レーザ励起 (多重励起現象のため低効率)
- ー次に、1.48 μm Fセンターレーザ励起 (励起光源が大き過ぎた)

1988年、1.48 μm 半導体レーザ励起によるEDFA。

元々はファイバラマン増幅用に沖電気が作った光源をEDFAに転用。

1989年、EDFAによる長距離伝送実験。

コヒーレント伝送に対抗するための起死回生の一発。

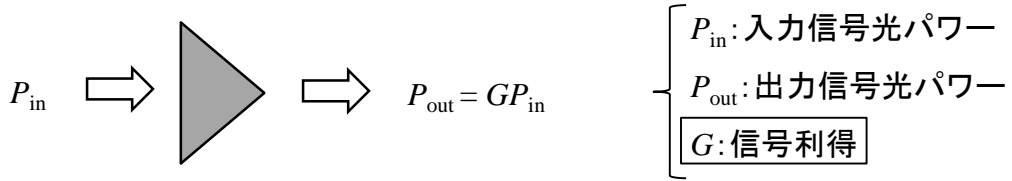
1990年代、EDFAの実用化へまっしぐら。現在に至る。

2000 年代、ファイバ・ラマン増幅方式の開発・実用化。現在に至る。

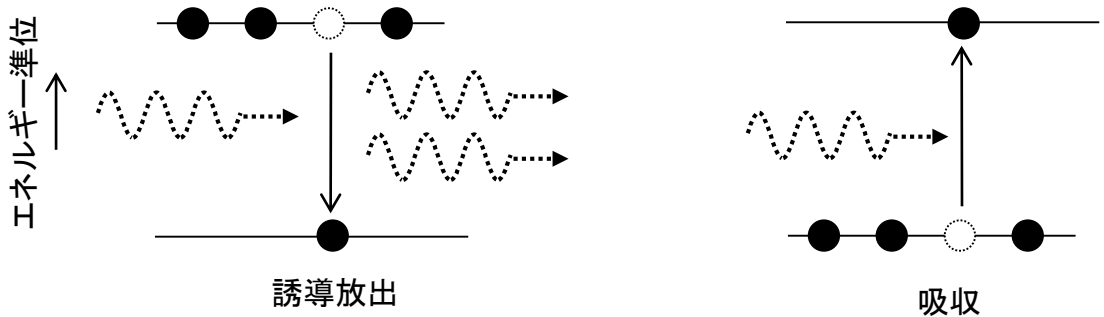
光増幅器の性能指数

光増幅器の伝送装置として重要な特性は、信号利得・飽和出力光パワー・雑音指数。

信号利得



信号利得は、(誘導放出確率) > (吸収確率)、のときに生じる。



誘導放出確率は、上準位にある原子数に比例。また、光に入射光に刺激されて起こるので、光強度に比例；(誘導放出確率) \propto (上準位数) \times (光強度)

吸収確率は、下準位にある原子数に比例。また、光強度に比例；

$$(\text{吸収確率}) \propto (\text{下準位数}) \times (\text{光強度})$$

よって、光強度 I の時間変化は次式で記述される。

$$\frac{dI}{dt} = \overbrace{aN_2I}^{\text{誘導放出}} - \overbrace{aN_1I}^{\text{吸収}} = a(N_2 - N_1)I$$

N_2 : 上準位数
 N_1 : 下準位数
 a : 比例係数

比例定数が共通的に a である理由は量子力学による。

↓ $(N_2 - N_1)$ は一定とすると

$$I(t) = I(0) \exp[a(N_2 - N_1)t]$$

t を光増幅器の入力端から出力端までの伝搬時間とすれば、

$$I(0) = \text{入力光強度 } I_{in} \quad I(t) = \text{出力光強度 } I_{out}$$

とにおいて、

$$I_{out} = I_{in} \exp[a(N_2 - N_1)(L/v)] = G \times I_{in}$$

L : 増幅器長
 v : 光速

$$G \equiv \exp[a(N_2 - N_1)(L/v)] \quad (\text{未飽和) 信号利得} \quad (N_2 - N_1) \text{ 一定の場合}$$

利得係数は、 $(N_2 - N_1)$ に比例。

II

上準位数 $N_2 >$ 下準位数 N_1 、のときに増幅作用。この状態を反転分布状態という。

反転分布が大きいほど高利得。

◆.....◆

上記では $(N_2 - N_1)$ は一定とした。

信号増幅につれて信号光強度が大きくなると、誘導放出により反転分布が減少するため、この仮定は成り立たない。

反転分布量を定量的に取り扱うには、次のレート方程式を用いる(但し、近似です)。

$$\frac{dN_2}{dt} = P - aN_2I + aN_1I - \frac{N_2}{\tau_{sp}} \quad N_2 + N_1 = N_0$$

励起率
誘導放出による減少率
吸収による増加率
自然放出による減少率

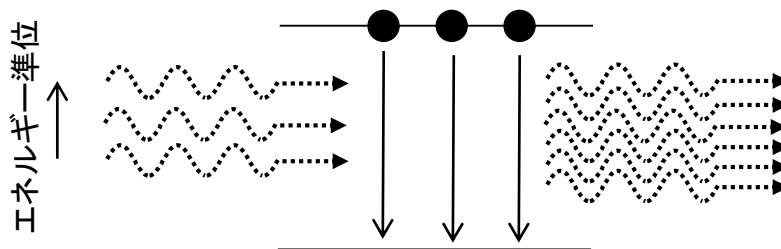
定常状態では、 $dN_2/dt = 0$

$$P - aN_2I + aN_1I - \frac{N_2}{\tau_{sp}} = 0 \quad \longrightarrow \quad N_2 = \frac{P + aN_0}{1/\tau_{sp} + 2aI}$$

$$N_2 - N_1 = N_2 - (N_0 - N_2) = 2 \frac{P + aN_0}{1/\tau_{sp} + 2aI} - N_0 = 2 \frac{\tau_{sp}P + \tau_{sp}aN_0}{1 + 2\tau_{sp}aI} - N_0$$

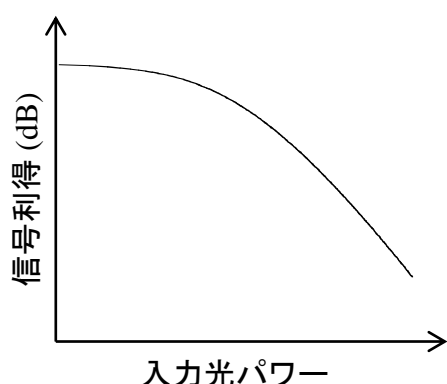
$2\tau_{sp}aI \ll 1$ であれば、反転分布一定。

信号光強度 I が大きいと利得低下 → 利得飽和

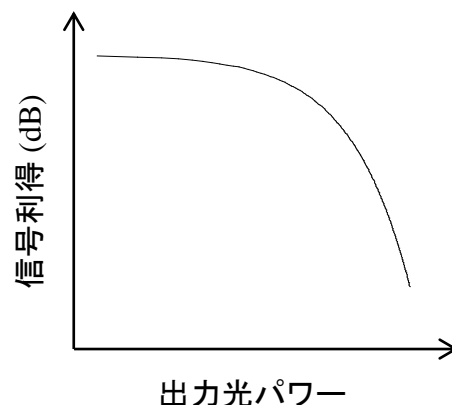


飽和出力光パワー

利得飽和のため、光増幅器の利得特性は下図のようになる。



または



入力光パワーを上げていくと、出力光パワーが頭打ち状態となる。

つまり、光増幅器からの出力光パワーには限界値がある。

飽和出力パワー

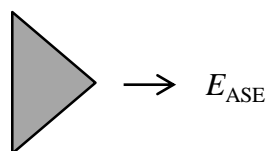
光増幅器の用途によっては、利得値よりも出力光パワーが重要な場合がある。

そこでは、飽和出力パワーが重要な性能指標となる。

なお、光増幅器の飽和特性を表す指標として、利得が未飽和値から3dB小さくなる出力光パワーを用いる場合も多い。

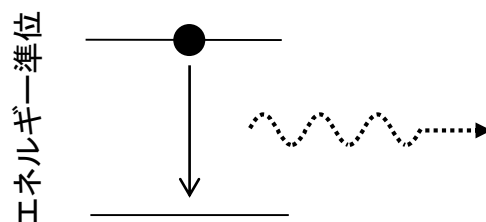
雑音

光増幅器は、信号光入力に関係なく、自然発生的に光を出力する。

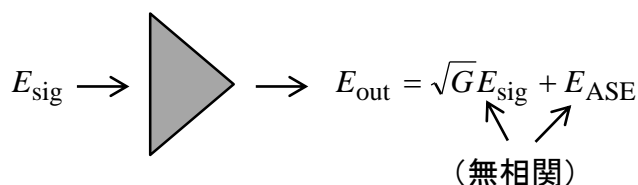


ASE (Amplified Spontaneous Emission)

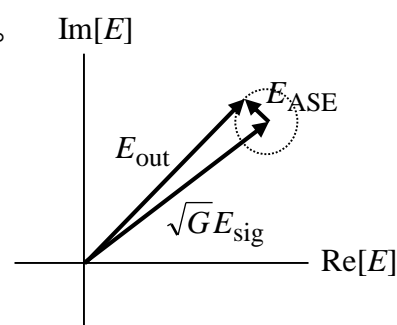
源は反転分布媒質の自然放出現象。



ASE光が重畳されると、出力信号光に揺らぎ(雑音)が生じる。



(この現象の理論的導出は「量子光工学」にて)



ASE光の振幅が大きいほど揺らぎも大きい。

したがって、ASEの出力光パワーが増幅器の雑音性能を表す指標となる。

ところで、光増幅器から出力されるASE光パワー(単位周波数、1偏波モード当り)は次式で与えられる。(導出は演習問題にて)

$$P_{\text{ASE}} = (G - 1)n_{\text{sp}}hf$$

{

G : 信号利得

$n_{\text{sp}} \equiv \frac{N_2}{N_2 - N_1} = \frac{1}{1 - N_1/N_2}$: 反転分布パラメータ or 雑音因子

hf : 1光子エネルギー (h : プランク定数、 f : 光周波数)

ASE光パワーは、 $(G - 1)n_{\text{sp}}$ に比例するので、

信号利得 G または n_{sp} : 小 \rightarrow ASEパワー: 小 \rightarrow 信号揺らぎ: 小

となる。但し、信号利得 G が小さいのは光増幅器としては不都合。

そこで、ASE光パワーを利得で割った(規格化した)値、すなわち反転分布パラメータ n_{sp} が増幅器の雑音性能を表す指標となる。

通常用いられるのは、 n_{sp} を2倍してdB表示した下記のパラメータ。

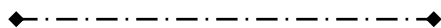
$$n_{\text{sp}} \propto \frac{P_{\text{ASE}}}{G - 1} \approx \frac{P_{\text{ASE}}}{G}$$

$$NF = 10\log_{10}(2n_{\text{sp}})$$

(なぜ2倍するかは後ほど)

これを 雑音指数 (Noise Figure: NF) という。

雑音指数が小さいほど、雑音性能の良い光増幅器。

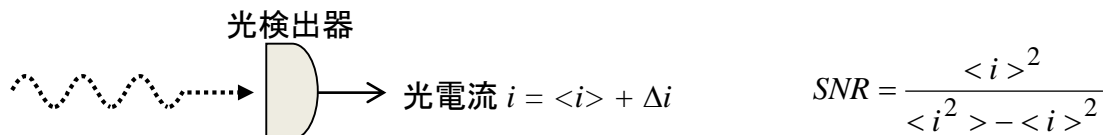


実は、雑音指数の本来の定義は、

入力信号の信号対雑音比 (Signal-to-Noise Ratio: SN比) と出力信号のSN比の比率。

$$NF \equiv 10\log_{10} \left[\frac{(SNR)_{\text{in}}}{(SNR)_{\text{out}}} \right] \quad \text{where} \quad SNR \equiv \frac{\text{(信号パワー)}}{\text{(雑音パワー)}}$$

光の場合、SN比はもともとは信号光強度を理想的な光検出器で電気信号へ変換した時の平均値の二乗(信号パワー)と分散(雑音パワー)の比で定義された。



が、ここではもっと直接的に、光パワー P を信号とし、そのSN比を考える。

$$SNR = \frac{\langle P \rangle^2}{\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2}$$

どちらでも本質的には同じ。

基準となる入力光は、純粹単一周波数光(コヒーレント状態)とする。これには、光の最小単位が光子であるがゆえに生じる本質的な揺らぎ(量子雑音または光ショット雑音)が存在する。その光子数はポワソン分布に従い、分散は平均値に一致している。式で表すと、コヒーレント状態の光子数の平均と分散は、

$$\text{平均} : \frac{P_0}{hf} \qquad \text{分散} : \sigma_0^2 = \frac{P_0}{hf} \qquad (P_0: \text{平均入力光パワー})$$

光子数のSN比はそのまま光パワーのSN比であるので、入力コヒーレント光パワーのSN比は、

$$(SNR)_{\text{in}} = \frac{(P_0 / hf)^2}{P_0 / hf} = \frac{P_0}{hf}$$

一方、光増幅器の出力光電場は、増幅信号光とASE光との足し合わせとして、次式で表される。

$$E_{\text{in}} = A_0 e^{i\omega_s t} \rightarrow \text{光増幅器} \rightarrow \begin{aligned} &\sqrt{G} A_0 e^{i\omega_s t} \\ &E_{\text{ASE}} = \sum_k A_n^{(k)} \exp[i(\omega_n^{(k)} t + \theta_n^{(k)})] \end{aligned}$$

光バンドパスフィルタ

$$E_{\text{out}} = \underbrace{\sqrt{G} A_0 \exp[i(\omega_s t + \theta_s)]}_{\text{信号光}} + \underbrace{\sum_k A_n^{(k)} \exp[i(\omega_n^{(k)} t + \theta_n^{(k)})]}_{\text{ASE光}}$$

この光パワーは、

$$P_{\text{out}} = |E_{\text{out}}|^2 = \underbrace{G A_0^2}_{\text{信号光強度}} + \underbrace{\sum_k A_n^{(k)2}}_{\text{ASE光強度}} + \underbrace{2\sqrt{G} A_0 \sum_k A_n^{(k)} \cos[(\omega_n^{(k)} - \omega_s)t + (\theta_n^{(k)} - \theta_s)]}_{\text{信号光とASE光との干渉項 (signal-spontaneous ビート雑音)}} + \underbrace{2 \sum_{k < k'} A_n^{(k)} A_n^{(k')} \cos[(\omega_n^{(k)} - \omega_n^{(k')})t + (\theta_n^{(k)} - \theta_n^{(k')})]}_{\text{ASE光同士の干渉項 (spontaneous-spontaneous ビート雑音)}}$$

sp-spビート雑音は、ASE光の帯域に大きく依存。狭帯域ではsig-spビート雑音に比べて十分小。よって、光増幅器自体の性能評価には、sig-spビート雑音のみを考察対象とする。すると、出力光パワーの分散(=雑音パワー)は、

$$\sigma_{\text{out}}^2 = \langle P_{\text{out}}^2 \rangle - \langle P_{\text{out}} \rangle^2$$

$$\begin{aligned}
&= \left\langle \left\{ 2\sqrt{G}A_0 \sum_k A_n^{(k)} \cos[(\omega_n^{(k)} - \omega_s)t + (\theta_n^{(k)} - \theta_s)] \right\}^2 \right\rangle \\
&\quad - \left\langle 2\sqrt{G}A_0 \sum_k A_n^{(k)} \cos[(\omega_n^{(k)} - \omega_s)t + (\theta_n^{(k)} - \theta_s)] \right\rangle^2 \\
&= 4GA_0^2 \sum_k \left\{ A_n^{(k)} \right\}^2 \underbrace{\langle \cos^2[(\omega_n^{(k)} - \omega_s)t + (\theta_n^{(k)} - \theta_s)] \rangle}_{1/2} \\
&= 2GP_0 P_{\text{ASE}} \\
&= 2GP_0 (G-1)n_{\text{sp}}hf
\end{aligned}$$

一方、平均光パワーは、

$$\langle P_{\text{out}} \rangle = GP_0 + P_{\text{ASE}} \approx GP_0 \quad (GP_0 \gg P_{\text{ASE}})$$

よって、出力光パワーのSN比は、

$$(SNR)_{\text{out}} = \frac{G^2 P_0^2}{2GP_0(G-1)n_{\text{sp}}hf} = \frac{GP_0}{2(G-1)n_{\text{sp}}hf} \approx \frac{P_0}{2n_{\text{sp}}hf} \quad (G \gg 1)$$

以上より、光増幅器のNFは、

$$NF = 10 \log_{10} \left[\frac{(SNR)_{\text{in}}}{(SNR)_{\text{out}}} \right] = 10 \log_{10} \left[\frac{(P_0/hf)}{(P_0/2n_{\text{sp}}hf)} \right] = 10 \log_{10}(2n_{\text{sp}})$$

雑音指数を決める要因

雑音性能は反転分布パラメータ n_{sp} で決まる。

$$n_{\text{sp}} = \frac{1}{1 - N_1/N_2} \quad \left(\begin{array}{l} N_2: \text{上準位数} \\ N_1: \text{下準位数} \end{array} \right)$$

上式によれば、 N_1/N_2 : 小 $\rightarrow n_{\text{sp}}$: 小 \rightarrow 雑音性能: 良



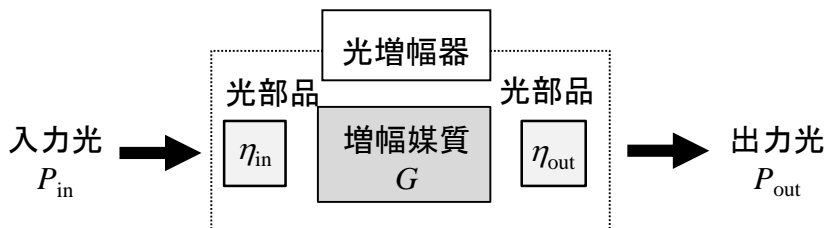
上準位の原子数が多い(反転分布が大きい)ほど、雑音性能が良い光増幅器。

極限は、 $N_1/N_2 = 0$ の時で、 $n_{\text{sp}} = 1$ 、すなわち、 $NF = 3 \text{ dB}$ 。これを量子雑音限界という。

直感的には、利得で規格化されたASE光パワーが雑音特性を決めていることの反映。

ASEパワーは N_2 に比例し、利得は $(N_2 - N_1)$ に比例するので、比をとると n_{sp} となる。

さらに、実際の光増幅器では、入力側の光損失も雑音性能を左右する。



実効的な利得

出力信号光パワー: $P_{\text{in}} \times \eta_{\text{in}} \times G \times \eta_{\text{out}}$

出力ASE光パワー: $P_{\text{ASE}} \times \eta_{\text{out}}$

実効利得で規格化したASE光パワーは

$$\frac{\eta_{\text{out}} P_{\text{ASE}}}{\eta_{\text{in}} \eta_{\text{out}} G} \Rightarrow \frac{P_{\text{ASE}}}{\eta_{\text{in}} G}$$

↑

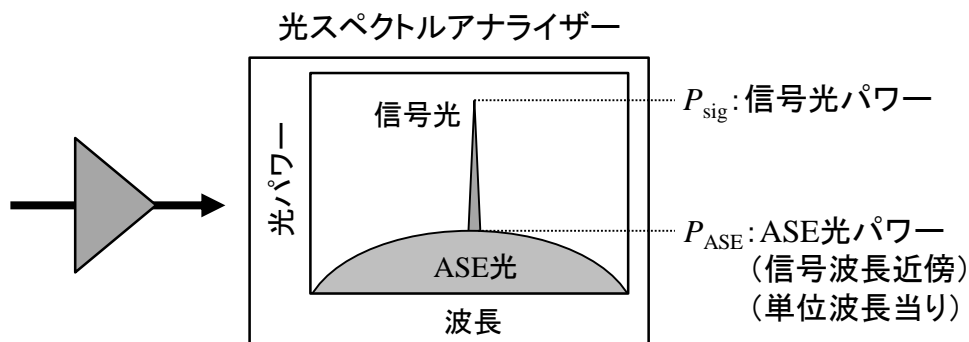
入力損失分だけ、雑音指数は大きくなる。

$\left[\eta_{\text{in}}: \text{入力部透過率}, \eta_{\text{out}}: \text{出力部透過率} \right]$

伝送系への適用

光SN比

光増幅伝送系の伝送特性を考える際には、光SN比がよく用いられる。

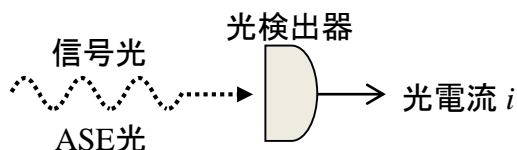


$$(\text{光 S N 比}) \equiv \frac{P_{\text{sig}}}{P_{\text{ASE}}}$$

（註: ASE光パワーは単位波長当りなので、波長幅の指定が必要。通常は0.1nm幅）

光SN比は、信号受信特性と次のように関係付けられる。

信号光 + ASE光を直接検波したとする。



受信光電場は、次式で表される。

$$E = \underbrace{A_s \exp[i(\omega_s t + \theta_s)]}_{\text{信号光}} + \underbrace{\sum_k A_n^{(k)} \exp[i(\omega_n^{(k)} t + \theta_n^{(k)})]}_{\text{ASE光}}$$

これより発生する光電流は、

$$i \propto |E|^2 = \underbrace{A_s^2}_{\text{(信号光強度)}} + \underbrace{\sum_k A_n^{(k)2}}_{\text{(ASE光強度)}} + \underbrace{2A_s \sum_k A_n^{(k)} \cos[(\omega_n^{(k)} - \omega_s)t + (\theta_n^{(k)} - \theta_s)]}_{\text{(信号光とASE光の干渉揺らぎ項)}} + \underbrace{2 \sum_{k < k'} A_n^{(k)} A_n^{(k')} \cos[(\omega_n^{(k)} - \omega_n^{(k')})t + (\theta_n^{(k)} - \theta_n^{(k')})]}_{\text{(ASE光同士の干渉揺らぎ項)}}$$

第1項が信号成分、第3項/第4項が雑音成分。

信号光周波数帯に限定すると、(第3項)>>(第4項)。

したがって、

$$\text{受信SN比} = \frac{\text{(第1項の電力)}}{\text{(第3項の電力)}}$$

$$= \frac{\langle \{A_s^2\}^2 \rangle}{\left\langle \left\{ 2A_s \sum_k A_n^{(k)} \cos[(\omega_n^{(k)} - \omega_s)t + (\theta_n^{(k)} - \theta_s)] \right\}^2 \right\rangle}$$

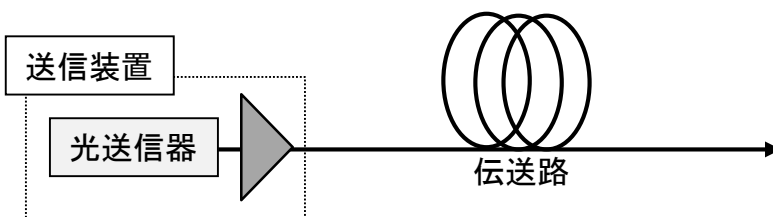
$$= \frac{A_s^4}{4A_s^2 \sum_k \{A_n^{(k)}\}^2 \cdot (1/2)}$$

$$\propto \frac{P_s^2}{2P_s P_{\text{ASE}}} = \frac{P_s}{2P_{\text{ASE}}} \quad \left(\begin{array}{l} P_s \propto A_s^2 : \text{信号光パワー} \\ P_{\text{ASE}} \propto \sum_k \{A_n^{(k)}\}^2 : \text{ASE光パワー} \end{array} \right)$$

このように、受信SN比は光SN比に比例。

よって、光SN比は受信信号品質を表す指標となる。

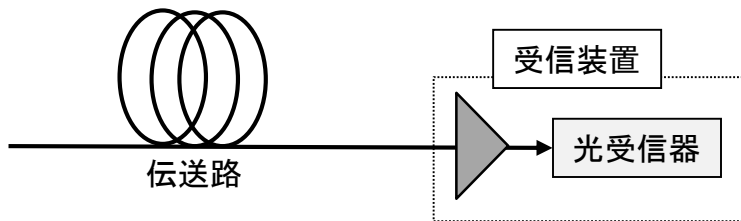
ポストアンプ



飽和出力光パワーが大きい光増幅器を用いる。
雑音性能は気にしない。

送信器の出力光パワーは十分大
↓
増幅された信号光パワーは十分大
↓
光SN比は十分大

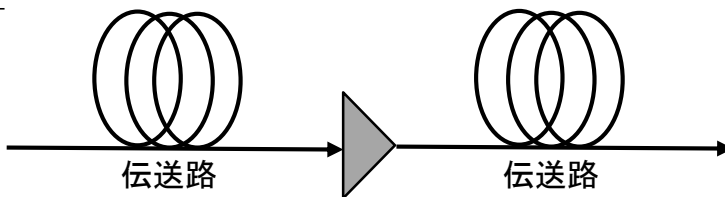
プリアンプ(前置増幅)



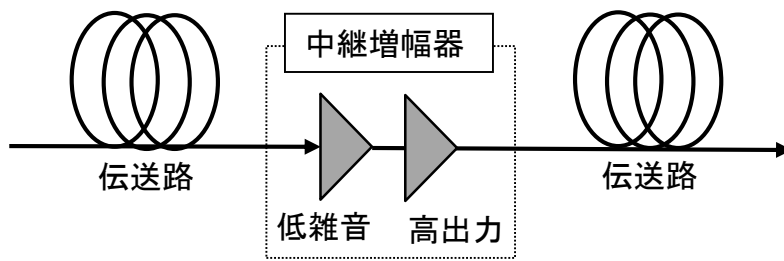
雑音指数の小さい光増幅器を用いる。
通常、入力光パワーは小さいので、飽和出力光パワーは気にしない。
利得は光受信器が正しく動作する光パワーまで増幅する程度。

入力光パワー: 小
↓
増幅信号光パワー: 小
↓
出力光SN比はASE光パワーに大きく依存
||
増幅器の雑音指数に大きく依存

中継アンプ



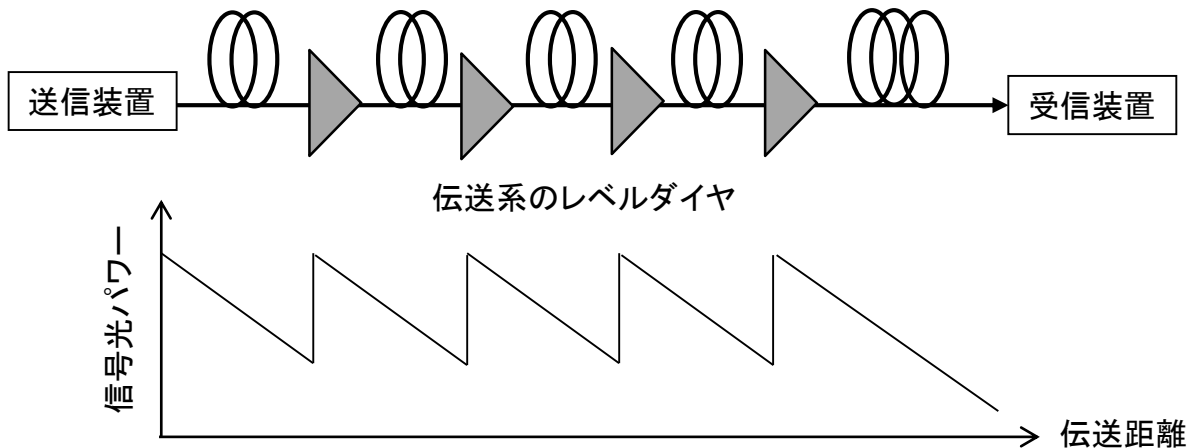
プリアンプとポストアンプの中間的な位置づけ。
よって、プリアンプとポストアンプの両方の特性が望まれる。
そこで、2段構成がよく用いられる。前段には低雑音アンプ、後段には高パワーアンプ。



多中継伝送系

長距離伝送システムでは、中継アンプを多段に接続する。

1中継間隔の伝送損失＝増幅器利得、とするのが通例。



さて、このような伝送系の受信端での光SN比は？

$$\text{信号光パワー: } P_s = P_0 \overbrace{(TG)}^1 N T_f = P_0 T_f$$

$$\text{ASE光パワー: } P_{\text{ASE}} = P_a (TG)^{N-1} T_f + P_a (TG)^{N-2} T_f + \dots + P_a TGT_f + P_a T_f$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} P_a (TG)^k T_f$$

$$= NP_a T_f$$

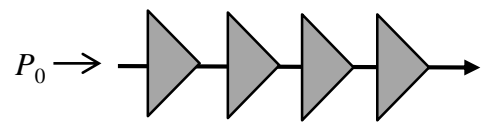


P_0 : 送信光パワー
 N : 中継アンプ数
 T : 1区間透過率
 G : 増幅器利得
 T_f : 最終区間透過率
 P_a : ASE増幅器出力光パワー

$$(\text{光 S N R}) = \frac{P_s}{P_{\text{ASE}}} = \frac{P_0 T_f}{NP_a T_f} = \frac{P_0}{NP_a}$$

中継増幅器数に比例して光SNは劣化。

ちなみに、直接多段増幅する場合；



信号出力光パワー： $P_s = P_0 G^N$

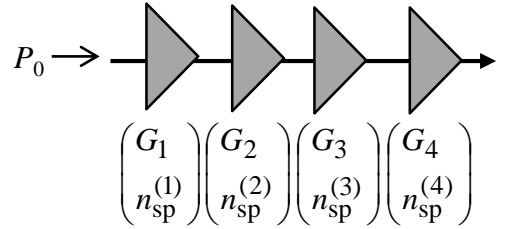
ASE出力光パワー： $P_{ASE} = P_a G^{N-1} + P_a G^{N-2} + \dots + P_a G + P_a = \frac{P_a (G^N - 1)}{G - 1}$



$$(\text{光 S N R}) = \frac{P_s}{P_{ASE}} = \frac{P_0 G^N}{P_a (G^N - 1) / (G - 1)} \approx \frac{P_0 G}{P_a} \quad (G \gg 1)$$

1段増幅器出力と同じ = 全体のNFは1段のNFと同じ

さらに、特性の異なる光増幅器を多段接続した場合；



信号出力光パワー： $P_s = P_0 G_1 G_2 \dots G_N$

ASE出力光パワー： $P_{ASE} = P_a^{(1)} G_2 G_3 \dots G_N + P_a^{(2)} G_3 G_4 \dots G_N + \dots + P_a^{(N)}$
 $= G_2 G_3 \dots G_N \left\{ P_a^{(1)} + \frac{P_a^{(2)}}{G_2} + \frac{P_a^{(3)}}{G_2 G_3} + \dots + \frac{P_a^{(N)}}{G_2 G_3 \dots G_N} \right\}$



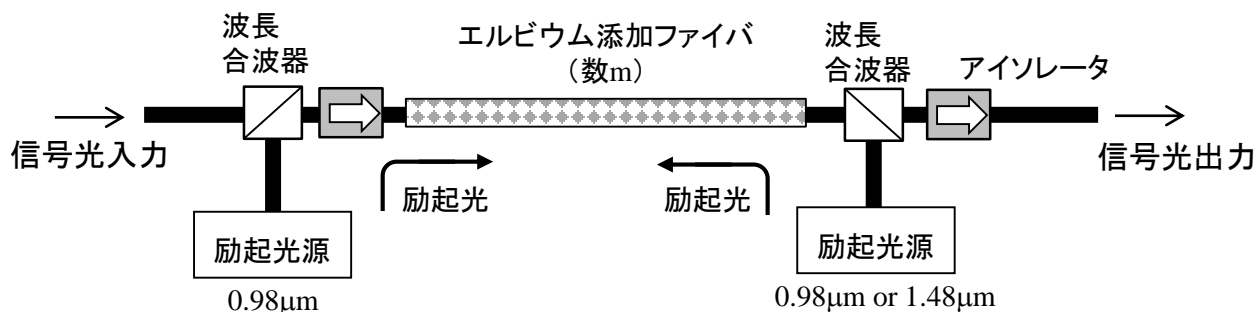
$$\begin{aligned} (\text{光 S N R}) &= \frac{P_s}{P_{ASE}} = \frac{P_0 G_1 G_2 \dots G_N}{G_2 G_3 \dots G_N \left\{ P_a^{(1)} + \frac{P_a^{(2)}}{G_2} + \frac{P_a^{(3)}}{G_2 G_3} + \dots + \frac{P_a^{(N)}}{G_2 G_3 \dots G_N} \right\}} \\ &= \frac{P_0 G_1}{P_a^{(1)} + \frac{P_a^{(2)}}{G_2} + \frac{P_a^{(3)}}{G_2 G_3} + \dots + \frac{P_a^{(N)}}{G_2 G_3 \dots G_N}} \\ &\approx \frac{P_0 G_1}{P_a^{(1)}} \quad \text{1段目の増幅器出力と同じ} \quad (G_k \gg 1) \\ &= \frac{P_0 G_1}{(G_1 - 1) n_{sp}^{(1)} h f} \approx \frac{P_0}{n_{sp}^{(1)} h f} \end{aligned}$$

多段増幅系の雑音性能は、1段目増幅器の雑音性能で決まる。

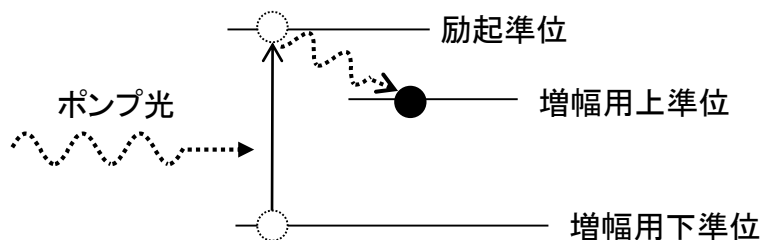


1段目増幅器にはなるべくNFの良いものを使うとよい。

エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)



◆ 励起光(ポンプ光)で反転分布を形成



◆ 信号利得は励起光パワーに依存;

励起光:大 → 反転分布:大 → 信号利得:大

◆ 前方励起は低雑音に有利

- 入力部の雑音性能が全体の雑音性能を決める(多段増幅の項参照)
- 反転分布が大きいほど雑音性能は良い
- 励起光パワーが大きいほど反転分布:大
- 励起光は伝搬につれて減衰する

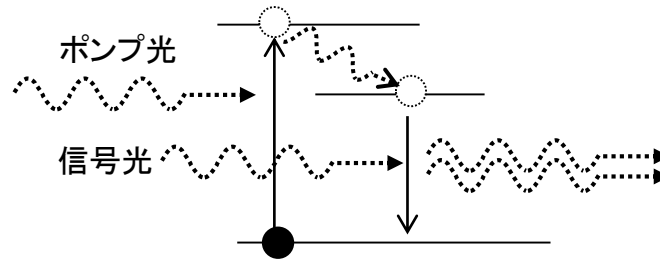
◆ 高性能を得るには、光アイソレータを前後の挿入して、光の共振を抑えることが必須(光増幅器一般)。

◆ 低雑音のためには、入力部の損失はできるだけ小さく。

$$P_{in} \rightarrow \left[\begin{array}{c} \text{光部品} \\ T \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{c} G \end{array} \right] \rightarrow \left. \begin{array}{l} TGP_{in} \\ P_{ASE} \end{array} \right\} \quad \text{光SN} = \frac{TGP_{in}}{P_{ASE}}$$

◆ 後方励起は高出力パワーに有利

- 利得飽和が起こりにくいほど高出力
- 利得飽和は誘導放出による反転分布の低下により起こる
- 下準位に遷移した原子を素早く上準位に励起すれば、反転分布の低下が防げる。
- 励起率はポンプ光パワーに比例



特長： ファイバ伝送系との整合性が良い。

波長多重信号光増幅時に、利得飽和状態でもチャンネル間クロストークが生じない。

欠点： 増幅波長帯域が限定。

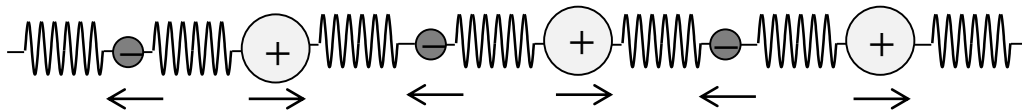
サイズ大。

ファイバ・ラマン増幅器

誘電体媒質内では、異種の原子が格子状につながれている。

各原子は熱的に微小振動している；格子振動（フォノン）

プラスに帯電している原子とマイナスに帯電している原子が逆方向に振動していると双極子と等価
 ||
 光学フォノン

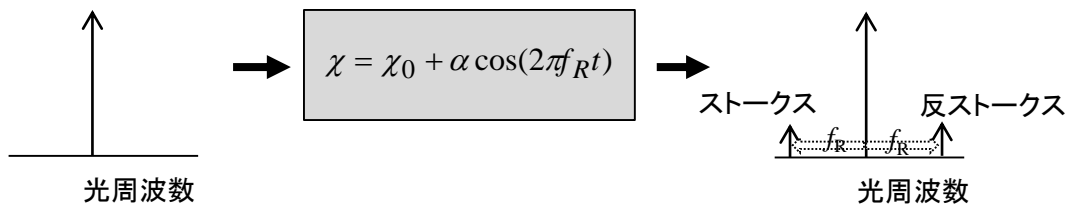


光学フォノンが存在していると、誘電率が光学フォノンの振動数で変調される。



そこへ外部から光が入射されると、光が変調され変調側帯波が発生。 ラマン散乱光

低周波数（長波長側）：ストークス光、高周波数（短波長）側：反ストークス光、と呼ぶ。



入射光とラマン散乱光が存在すると、差周波数成分が格子振動を駆動する。 ←



さらに変調側帯波（＝ラマン散乱光）が発生。

誘導ラマン散乱

誘導ラマン散乱はストークス光に対してのみ起こる。

発生した変調側帯波と元のラマン散乱光との位相関係が、ストークスは強め合い、反ストークスは弱め合う、ようになっているため。

誘導ラマン散乱が起こる状況に対して、信号光と光学フォノン振動数分だけ低周波数のポンプ光を入力する(上記との対応:外部入射光⇔ポンプ光、ストークス光⇔信号光)。

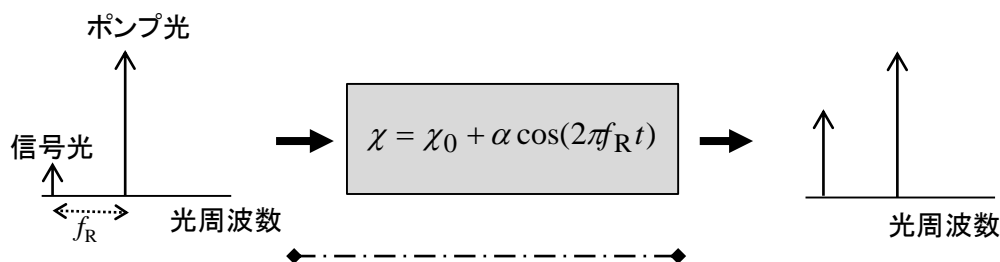


ストークス光と信号光が同期した誘導ラマン散乱が起こる。



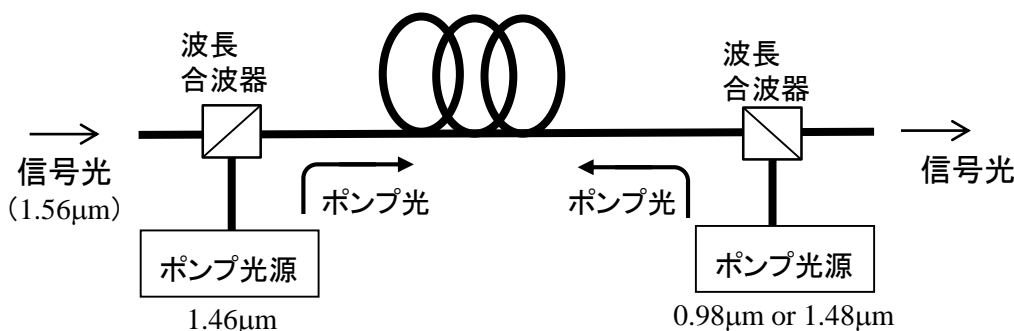
信号光から見たら増幅現象。

ラマン増幅

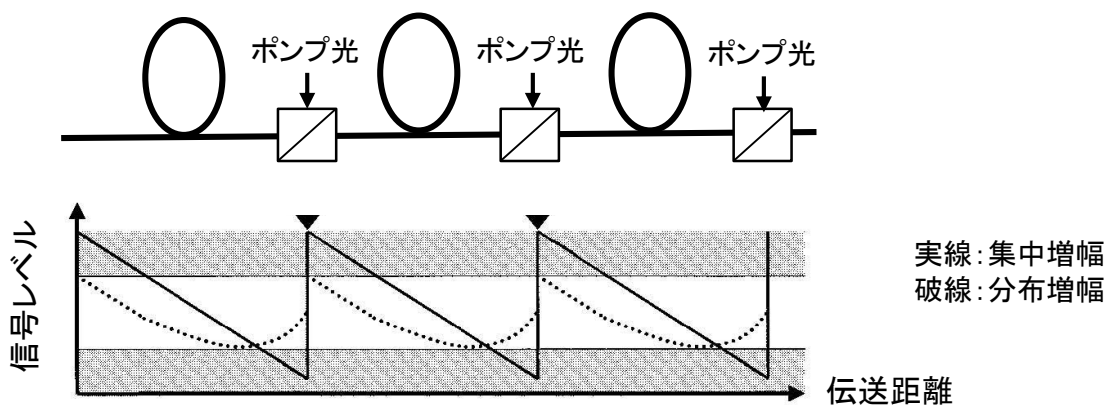


以上は一般的な話。このラマン散乱/ラマン増幅は光ファイバでも起こる。ファイバ・ラマン増幅器

なお、ガラス媒質の光学フォノン周波数は約130THz、波長差にすると約100nm(@1.5μm帯)。



伝送路がそのまま増幅媒質となることが特徴的(分布増幅)。



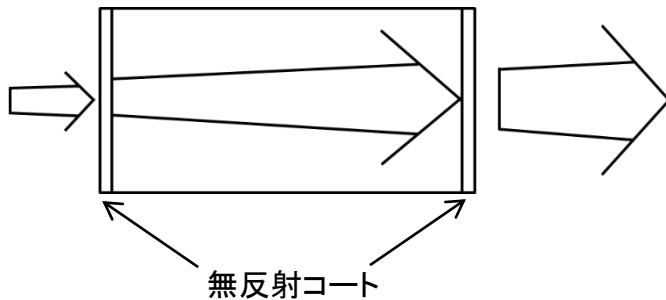
特長: ①雑音特性に優れる。(増幅器への入力レベルが高いため)

②光非線形現象が起こりにくい。(ピークパワーが低いため)

難点: 大きなポンプ光パワーが必要。

半導体光増幅器

半導体レーザの両端に無反射コートを施したデバイス



特長: 小型、他の光部品との集積化が可能。

光ゲートスイッチや非線形を利用した光機能素子として応用可能。

欠点: 利得飽和状態では、波形歪みが生じる。

利得飽和状態では、波長多重信号増幅時にチャンネル間クロストークが生じる。

演習問題

[4.1] 媒質長=10mで信号利得=20dBの増幅媒質がある。1m当たりの増倍率は線形単位(x 倍)でいくらか。但し、反転分布量は媒質長にわたって一様とする。

[4.2] 二準位媒質内の光子数の時間変化は次式に従う。

$$\frac{dn}{dt} = a(n+1)N_2 - anN_1 \quad \left(\begin{array}{l} anN_1: \text{吸収確率} \\ anN_2: \text{誘導放出確率} \\ aN_2: \text{自然放出確率} \end{array} \right)$$

- (a) 初期値を $n(0)$ として、時刻 $t = T$ における光子数を導け。但し、反転分布は一定とする。
- (b) T を光増幅器の入力端から出力端までの伝播時間とすれば、上記は増幅器への入力光子数が $n(0)$ のときの出力光子数となる。出力光子を信号増幅光子とASE光子とに分けて表せ。
- (c) 出力光子数を信号利得 G 及び $\{N_1, N_2\}$ で表せ。
- (d) 以上より、光増幅器から出力されるASE光パワーを $\{G, N_1, N_2, hf\}$ で表せ。

[4.3] 光増幅器で増幅された信号光を光バンドパスフィルタに通した後、直接受信して電気信号に変換する。

- (a) 光フィルタの透過帯域幅が十分狭いと、受信信号の雑音電力は信号光パワーに比例する。その理由を説明せよ。
- (b) 光フィルタの透過帯域幅が十分広いと、雑音電力の信号光パワー依存性が小さくなる。その理由を説明せよ。

[4.4] 光ファイバ増幅器は、増幅用ファイバと光アイソレータおよび励起光を入射するための波長合分波器から構成されている。増幅用ファイバ部でのNFが4dB、入力側の波長合波器+光アイソレータの信号光透過率が0.7、出力側の波長合波器+光アイソレータの信号光透過率が0.6であるとき、光増幅器全体のNFはいくらか。