

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。

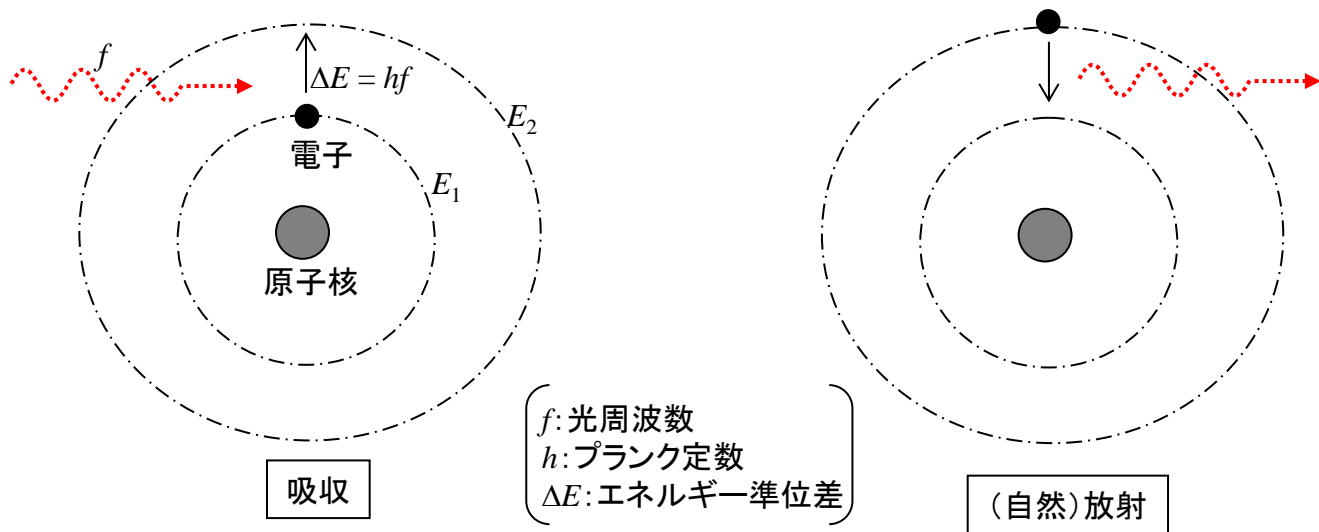
本章では光増幅伝送系における信号光の伝搬特性について述べる。まずは光増幅の基礎から。

誘導放出

物質には固有のエネルギー状態がある。

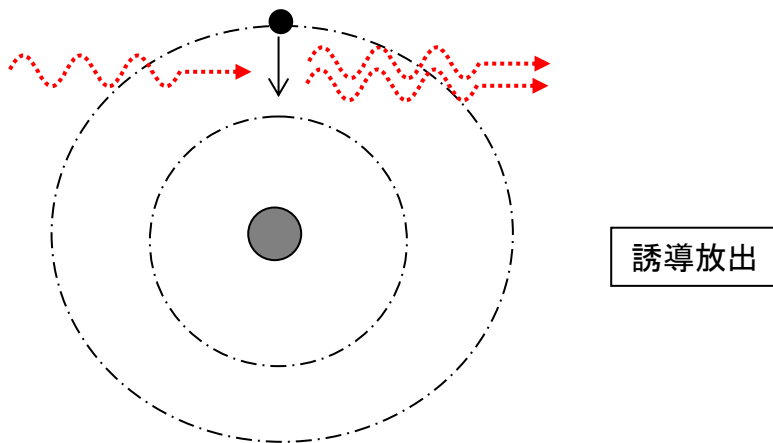
光が媒質に入射されると、物質は光からエネルギーを得て、高いエネルギー状態に遷移する。

光にとっては吸収。その逆過程として、物質が低いエネルギー状態に遷移すると、光が放射される。これらの過程では、エネルギー保存則より、(吸収/放射光子のエネルギー) = (物質状態のエネルギー差)、が成り立っている。



光の放射としては、光入射に刺激されて放射光が発生する場合がある(誘導放出)。

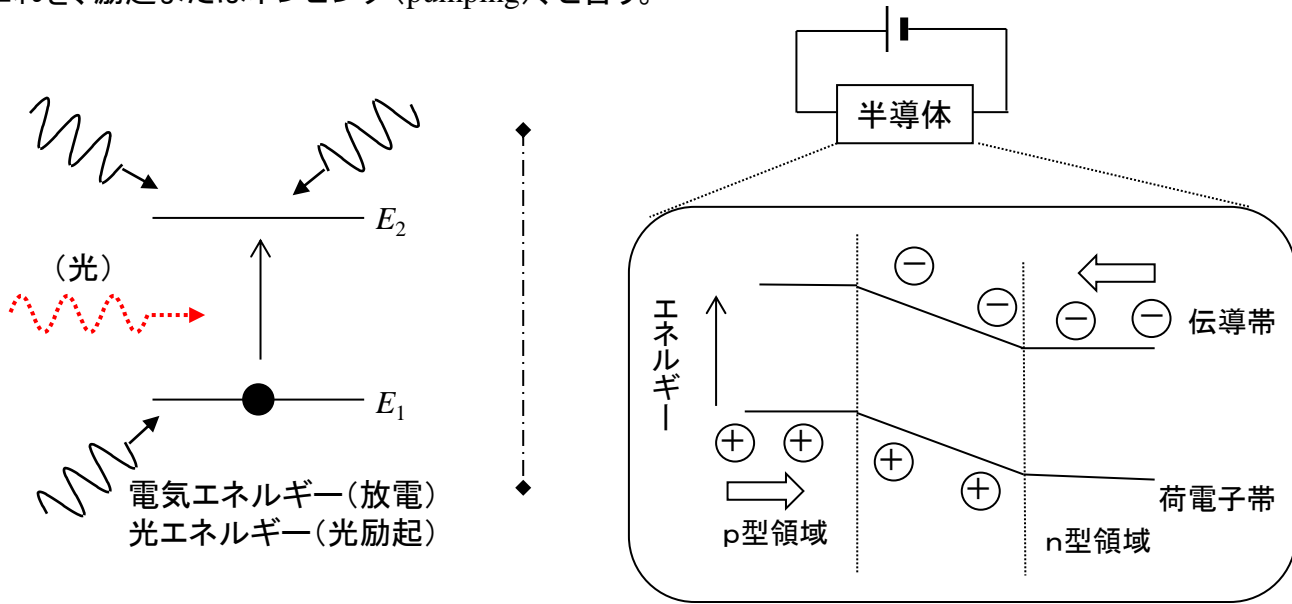
誘導放出では、入射光に同期した光が放射される。



入射光からみたら、これは光増幅。これが光増幅器の基本原理。

なお、これらのエネルギー変換過程は確率的に起こる。

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、熱平衡状態では物理系は概ね低エネルギー状態に落ち着いている。
 なので、光増幅のためには、何らかの方法で物質を高いエネルギー状態へ遷移させることが必要。
 これを、励起またはポンピング(pumping)、と言う。



通信用光増幅器の研究開発史

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ーが発明された(1960年)。その後、

1970年: 半導体レーザー室温発振。

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、
 など課題がたくさん。

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。

- 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)
- 当初は、0.8 μ m帯半導体レーザー励起 (多重励起現象のため低効率)
- 次に、1.48 μ mFセンターレーザー励起 (励起光源が大き過ぎ)

1988年: 1.48 μ m半導体レーザー励起による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。

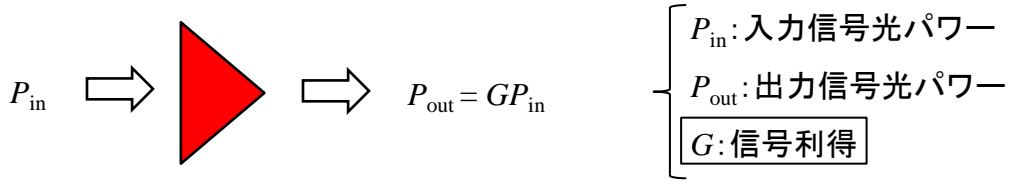
1990年代: EDFAの実用化へまっしぐら。現在に至る。

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。

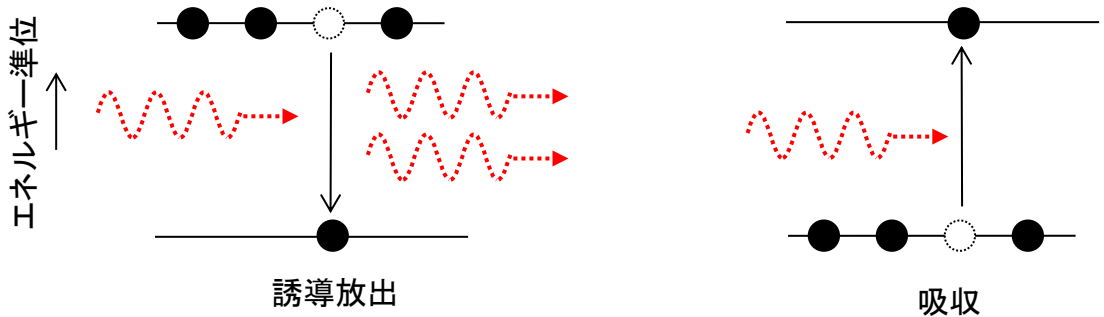
光増幅器の性能指数

光増幅器の伝送装置として重要な性能は、信号利得、出力光パワー、雑音。

信号利得



信号増幅は、(誘導放出確率) > (吸収確率)、のときに起こる。



誘導放出確率は、上準位にある原子数に比例。また、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 の増減の様子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。

↓ $(N_2 - N_1)$ 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光の伝搬時間とすれば、

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

として、

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

L : 増幅長
 v : 光速

$$G \equiv \exp[a(N_2 - N_1)(L/v)]$$

(未飽和) 信号利得

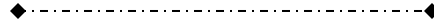
但し、 $(N_2 - N_1)$ 一定の場合

利得係数は、 $(N_2 - N_1)$ に比例。

||

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、この条件は成り立たない。

反転分布量の変化は、近似的に次のレート方程式により記述される。

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

励起率
↑
↑
↑
↑
自然放出による減少

誘導放出による減少
吸収による増加

定常状態では、 $dN_2/dt = 0$

$$\left[\begin{array}{l} N_2 + N_1 = N_0 \\ \Delta N = N_2 - N_1 \end{array} \right] \quad 2N_2 = \Delta N_1 + N_0$$

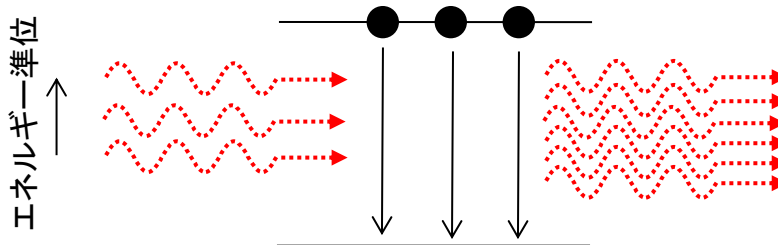
$$P - aN_2I + aN_1I - \frac{N_2}{\tau_{sp}} = 0 \rightarrow P - a\Delta NI - \frac{N_0 + \Delta N}{2\tau_{sp}} = 0 \rightarrow (aI + \frac{1}{2\tau_{sp}})\Delta N = P - \frac{N_0}{2\tau_{sp}}$$

$$\rightarrow \Delta N = \frac{2\tau_{sp}P - N_0}{1 + 2\tau_{sp}aI}$$

励起率が大きいと反転分布: 大

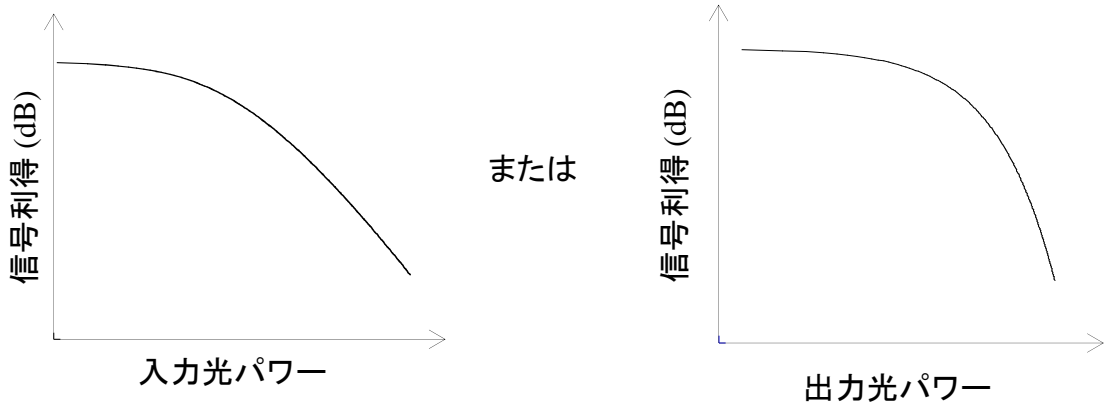
$I \ll 1/2\tau_{sp}a$ だと反転分布一定 → 未飽和利得

信号光強度 I が大きいと反転分布: 小 → 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。



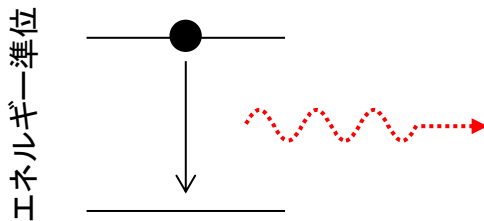
入力光パワーを上げていくと、出力光パワーが頭打ちとなる。
つまり、光増幅器からの出力光パワーには限界がある。

飽和出力パワー

光増幅器の用途によっては、利得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。

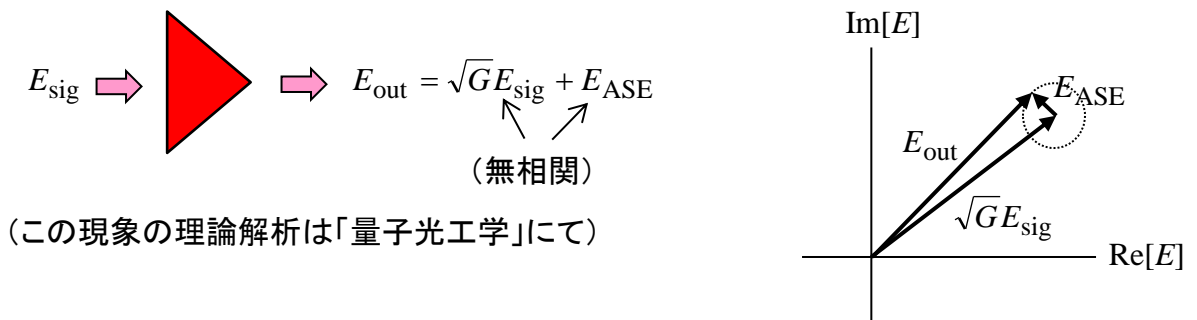
雑音

光増幅器からは、信号光入力に関係なく、自然発生的に光が出力される。
確率現象なので、自然発生光の振幅・位相はランダム。
一旦発生した光は増幅されて光増幅器出力端に到達する。



ASE (Amplified Spontaneous Emission)

ASE光は増幅信号光に重畳され、出力光に揺らぎ(雑音)が生じる。



ASE光の振幅が大きいほど揺らぎも大きい。
なので、ASEの出力光強度(またはパワー)が増幅器の雑音性能を表す指標となる。

光増幅器から出力されるASE光強度(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)

$$I_{ASE} = (G-1)n_{sp}hf$$

G : 信号利得

$n_{sp} \equiv \frac{N_2}{N_2 - N_1} = \frac{1}{1 - N_1/N_2}$: 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光強度は $(G-1)n_{sp}$ 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

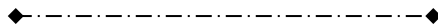
但し、信号利得 G が小さいのは光増幅器としては不都合。

そこで、ASE光強度を利得で規格化した(割り算した)値が増幅器の雑音性能を表す指標となる。

上式によれば、 n_{sp} により雑音性能が表されることになる(但し、 $G \gg 1$ として)。

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

n_{sp} が小さいほど雑音性能の良い光増幅器。最小値は $n_{sp} = 1$



ところで一般に、増幅器の雑音性能は雑音指数(Noise Figure: NF)で示される。

これは、入力信号の信号対雑音比(Signal-to-Noise Ratio: SN比)と出力信号のSN比の比率をデジベル表示した値。

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

では、光増幅器のNFは？

まず、信号光のSN比は、定常光の強度 I について定義される。

$$(SNR) = \frac{\langle I \rangle^2}{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2} \quad \left[\text{これは、元々の光通信では強度変調・直接検波方式が標準的であったため} \right]$$

この定義に基づいて、光増幅器の入出力光のSN比を考えていく。

まずは、出力光のSN比から。

増幅器出力は、増幅信号光とASE光の足し合わせ。

$$E_{out} = \sqrt{G}E_{sig} + E_{ASE}$$

これを光強度 I_{out} は、

$$\begin{aligned} I_{out} &= |\sqrt{G}E_{sig} + E_{ASE}|^2 = G|E_{sig}|^2 + |E_{ASE}|^2 + 2\sqrt{G} \operatorname{Re}[E_{sig}E_{ASE}^*] \\ &= G|E_{sig}|^2 + |E_{ASE}|^2 + 2\sqrt{G}|E_{sig}||E_{ASE}|\cos(\theta_{sig} - \theta_{ASE}) \end{aligned}$$

平均: $\langle I_{out} \rangle = G \langle |E_{sig}|^2 \rangle + \langle |E_{ASE}|^2 \rangle = G \langle I_{sig} \rangle + \langle I_{ASE} \rangle$

(ASE光は位相ランダム)

よって出力光のSN比は、

$$\text{SN比} = \frac{\langle I_{\text{out}} \rangle^2}{\sigma_{\text{out}}^2} = \frac{\{G \langle I_{\text{sig}} \rangle + \langle I_{\text{ASE}} \rangle\}^2}{G^2 \{\langle I_{\text{sig}}^2 \rangle - \langle I_{\text{sig}} \rangle^2\} + \{\langle I_{\text{ASE}}^2 \rangle - \langle I_{\text{ASE}} \rangle^2\} + 2G \langle I_{\text{sig}} \rangle \langle I_{\text{ASE}} \rangle}$$

しかしこのままだと、

- 分母第1項は入力光の状態に依存
- ASE光強度は想定する周波数帯域に依存

なので、一般性に欠ける。そこで、

- 入力光は理想的な単一周波数光(正弦波状電磁波)とする。 → $\langle I_{\text{sig}}^2 \rangle - \langle I_{\text{sig}} \rangle^2 = 0$
- ASE光帯域は信号光周波数近傍の単位周波数とする。

$$\rightarrow \begin{cases} \langle I_{\text{ASE}}^2 \rangle - \langle I_{\text{ASE}} \rangle^2 \ll 2G \langle I_{\text{sig}} \rangle \langle I_{\text{ASE}} \rangle \\ G \langle I_{\text{sig}} \rangle \ll \langle I_{\text{ASE}} \rangle \end{cases}$$

とすると、

$$\text{出力SN比} = \frac{G^2 \langle I_{\text{sig}} \rangle^2}{2G \langle I_{\text{sig}} \rangle \langle I_{\text{ASE}} \rangle} = \frac{G \langle I_{\text{sig}} \rangle}{2 \langle I_{\text{ASE}} \rangle} = \frac{G \langle I_{\text{sig}} \rangle}{2(G-1)n_{\text{sp}}hf} \approx \frac{\langle I_{\text{sig}} \rangle}{2n_{\text{sp}}hf} \quad (G \gg 1 \text{として})$$

次に、入力光強度のSN比について。

上述のように、入力光は理想的な単一周波数光とする。この場合、古典的には無雑音でありSN比無限大であるが、理想的な単一周波数光であっても量子力学的揺らぎを伴う。

これによる光子数揺らぎの分散は、平均光子数に等しい(詳しくは「量子光工学」参照)。

これを考慮すると、入力光子数 n_{in} のSN比は次式となる。

$$\text{入力光子数SN比} = \frac{\langle n_{\text{in}}^2 \rangle}{\langle n_{\text{in}} \rangle} = \langle n_{\text{in}} \rangle$$

光子数に1光子エネルギー hf を乗じたものが光強度。よって、

$$\text{入力光強度SN比} = \frac{\langle I_{\text{in}} \rangle}{hf}$$

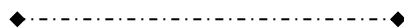
以上より、光増幅器の雑音指数NFは、

$$\text{NF} = 10 \log_{10} \left[\frac{(\text{入力SN比})}{(\text{出力SN比})} \right] = 10 \log_{10} \left[\frac{\langle I_{\text{sig}} \rangle / hf}{\langle I_{\text{sig}} \rangle / 2n_{\text{sp}}hf} \right] = 10 \log_{10} [2n_{\text{sp}}] \quad (\text{dB})$$

前述のように、

$$n_{\text{sp}} \text{の最小値} = 1 \rightarrow \text{NFの最小値} = 3 \text{ dB}$$

光増幅すると、SN比は必ず3dB以上劣化する。



雑音性能を決める要因

雑音性能は反転分布パラメータ n_{sp} で決まる。

$$n_{\text{sp}} = \frac{1}{1 - N_1 / N_2}$$

$$\left(\begin{array}{l} N_2: \text{上準位数} \\ N_1: \text{下準位数} \end{array} \right)$$

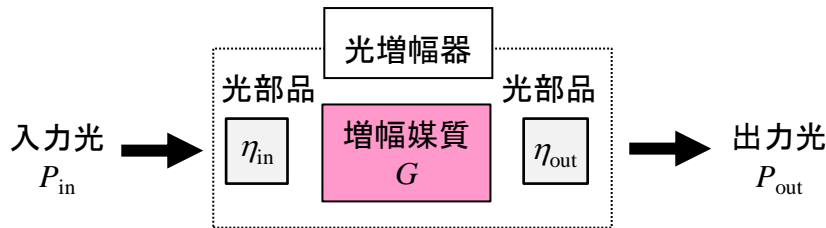
上式によれば、 N_1/N_2 :小 \rightarrow n_{sp} :小 \rightarrow 雑音性能:良



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、 $n_{sp} = 1$ 、すなわち、NF = 3 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、比を考えると n_{sp} となる。

上記は光増幅媒体についての話。

実際の光増幅モジュールには、入出力側に各種光部品(光カップラ、アイソレータ、光フィルタ等)が備えられている。光増幅器モジュールの雑音特性としては、これらの損失の効果を取り込むことが必要。



出力信号光パワー: $P_{in} \times \eta_{in} \times G \times \eta_{out}$ (実効的な利得)

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

実効利得で規格化したASE光パワーは

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

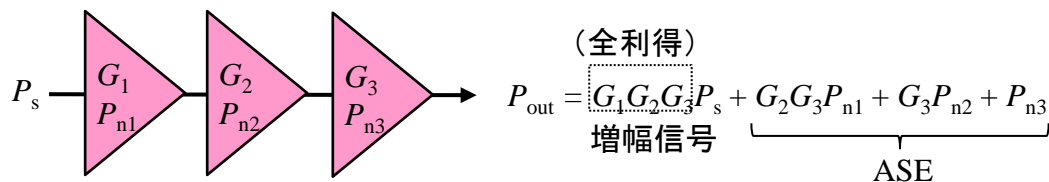
↑

入力損失分だけ雑音指数は劣化

(η_{in} : 入力部透過率、 η_{out} : 出力部透過率)

多段増幅の場合

光増幅器の使用にあたっては、複数の増幅器を多段接続して用いることも多い。
 その場合の雑音特性はどうであるか。



雑音性能は利得で規格化したASE光パワーで評価される

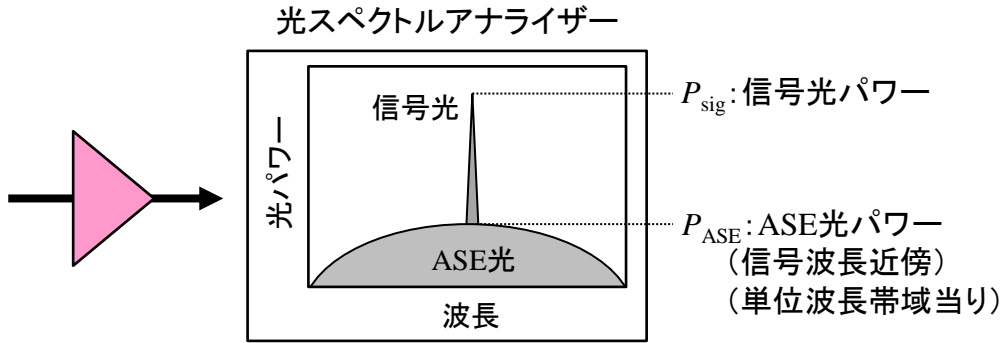
$$\frac{G_2 G_3 P_{n1} + G_3 P_{n2} + P_{n3}}{G_1 G_2 G_3} = \frac{P_{n1}}{G_1} + \frac{P_{n2}}{G_1 G_2} + \frac{P_{n3}}{G_1 G_2 G_3} \approx \frac{P_{n1}}{G_1} \quad (G_k \gg 1 \text{ として})$$

初段の雑音性能が支配的

伝送系への適用

光SN比

光増幅伝送系の伝送特性の評価指標としては、光SN比が用いられることが多い。



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

〔註: ASE光は広波長帯にわたっているので、波長幅の指定が必要。通常は0.1nm幅〕

光SN比は信号品質と次のように関係付けられる。

まず、信号光+ASE光の光強度は、

$$I = |E_{sig} + E_{ASE}|^2 = |E_{sig}|^2 + |E_{ASE}|^2 + 2\text{Re}[E_{sig} E_{ASE}^*] = I_{sig} + I_{ASE} + 2|E_{sig}| |E_{ASE}| \cos(\theta_{sig} - \theta_{ASE})$$

$$\langle I \rangle = \langle I_{sig} \rangle + \langle I_{ASE} \rangle + 2\langle |E_{sig}| |E_{ASE}| \cos(\theta_{sig} - \theta_{ASE}) \rangle = \langle I_{sig} \rangle + \langle I_{ASE} \rangle \approx \langle I_{sig} \rangle$$

光強度の分散は、

$$\begin{aligned} \sigma_1^2 &= \langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2 = \langle \{I_{sig} + I_{ASE} + 2|E_{sig}| |E_{ASE}| \cos(\theta_{sig} - \theta_{ASE})\}^2 \rangle - \langle I_{sig} \rangle^2 \\ &= \langle I_{sig}^2 \rangle + \langle I_{ASE}^2 \rangle + 4\langle |E_{sig}|^2 |E_{ASE}|^2 \cos^2(\theta_{sig} - \theta_{ASE}) \rangle + 2\langle I_{sig} \rangle \langle I_{ASE} \rangle \\ &\quad + 4\langle I_{sig} |E_{sig}| |E_{ASE}| \cos(\theta_{sig} - \theta_{ASE}) \rangle + 4\langle I_{ASE} |E_{sig}| |E_{ASE}| \cos(\theta_{sig} - \theta_{ASE}) \rangle \\ &\quad - \langle I_{sig} \rangle^2 \\ &= \underbrace{\langle I_{sig}^2 \rangle - \langle I_{sig} \rangle^2}_0 + \langle I_{ASE}^2 \rangle + 2\langle I_{sig} \rangle \langle I_{ASE} \rangle + 2\langle I_{sig} \rangle \langle I_{ASE} \rangle \\ &\approx 4\langle I_{sig} \rangle \langle I_{ASE} \rangle \end{aligned}$$

なので、光強度のSN比は、

$$(SN)_1 = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_1^2} = \frac{\langle I_{sig} \rangle^2}{4\langle I_{sig} \rangle \langle I_{ASE} \rangle} = \frac{\langle I_{sig} \rangle}{4\langle I_{ASE} \rangle} = \frac{1}{4}(\text{光SN比}) \quad \text{光SN比に比例}$$

光振幅については、

$$E = E_{\text{sig}} + E_{\text{ASE}}$$

実数成分と虚数成分に分けて考える。

$$E^{(r)} = E_{\text{sig}}^{(r)} + E_{\text{ASE}}^{(r)} \quad E^{(i)} = E_{\text{sig}}^{(i)} + E_{\text{ASE}}^{(i)}$$

$$\langle E^{(r)} \rangle = \langle E_{\text{sig}}^{(r)} \rangle + \langle E_{\text{ASE}}^{(r)} \rangle = \langle E_{\text{sig}}^{(r)} \rangle$$

$$\sigma_r^2 = \langle \{E^{(r)}\}^2 \rangle - \langle E^{(r)} \rangle^2 = \langle \{E_{\text{sig}}^{(r)} + E_{\text{ASE}}^{(r)}\}^2 \rangle - \langle E_{\text{sig}}^{(r)} \rangle^2$$

$$= \langle \{E_{\text{sig}}^{(r)}\}^2 \rangle + \langle \{E_{\text{ASE}}^{(r)}\}^2 \rangle + 2 \langle E_{\text{sig}}^{(r)} \rangle \langle E_{\text{ASE}}^{(r)} \rangle - \langle E_{\text{sig}}^{(r)} \rangle^2$$

$$= \underbrace{\langle \{E_{\text{sig}}^{(r)}\}^2 \rangle - \langle E_{\text{sig}}^{(r)} \rangle^2}_0 + \langle \{E_{\text{ASE}}^{(r)}\}^2 \rangle = \langle \{E_{\text{ASE}}^{(r)}\}^2 \rangle$$

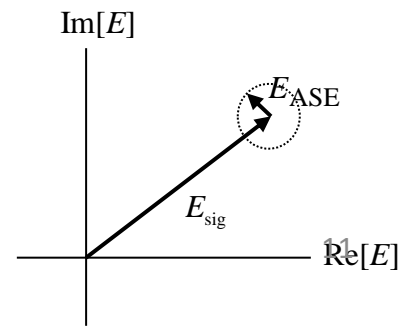
(同様に) $\langle E^{(i)} \rangle = \langle E_{\text{sig}}^{(i)} \rangle$ $\sigma_i^2 = \langle \{E_{\text{ASE}}^{(i)}\}^2 \rangle$

実数成分と虚数成分を合わせると、光振幅のSN比は、

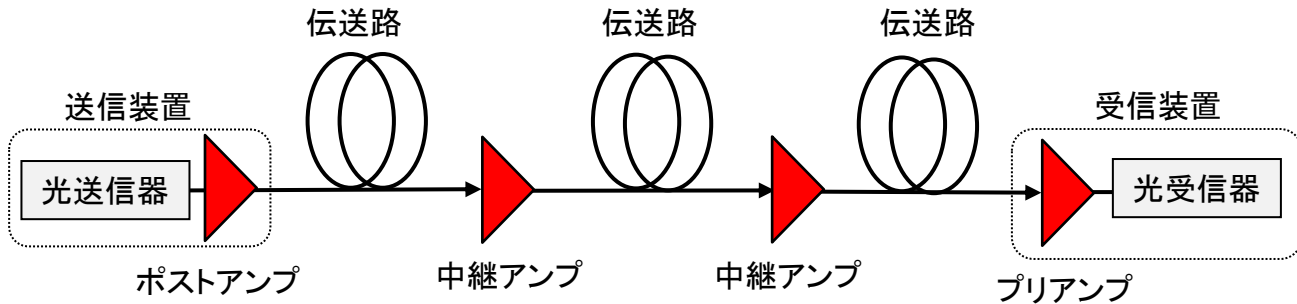
$$(SN)_A = \frac{\langle E^{(r)} \rangle^2 + \langle E^{(i)} \rangle^2}{\sigma_r^2 + \sigma_i^2} = \frac{\langle E_{\text{sig}}^{(r)} \rangle^2 + \langle E_{\text{sig}}^{(i)} \rangle^2}{\langle \{E_{\text{ASE}}^{(r)}\}^2 \rangle + \langle \{E_{\text{ASE}}^{(i)}\}^2 \rangle} = \frac{\langle I_{\text{sig}} \rangle}{\langle I_{\text{ASE}} \rangle} = (\text{光SN比})$$

光SN比と同じ

以上より、光SN比は光信号品質を表す指標となる。

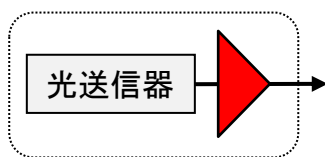


増幅伝送系の全体構成

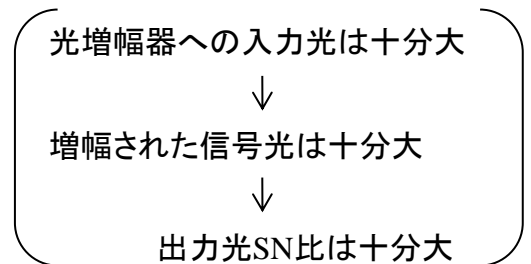


用途によって、光増幅器に要求される性能が異なる。

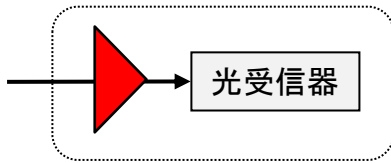
ポストアンプ



伝送路に大きな信号光パワーを送出する。
飽和出力光パワーが大事。
雑音性能は重要ではない。



プリアンプ(前置増幅)



受信回路雑音より十分大きな信号を光受信器に入力する



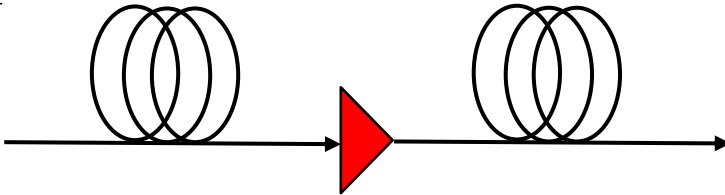
受信特性を決めるのは光増幅器雑音



光増幅器の雑音性能が重要

（入力光パワーは小さいので、利得飽和は気にしなくてよい。
利得は受信回路雑音が無視できる程度まで信号光を増幅する値。）

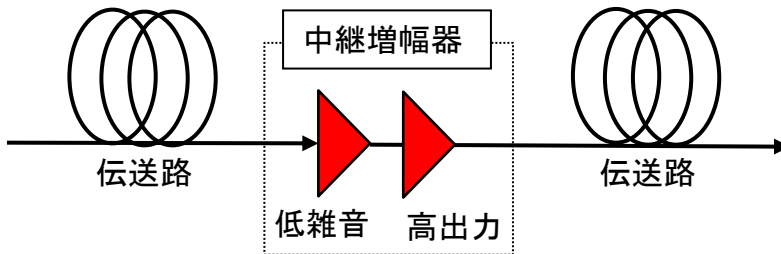
中継アンプ



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。

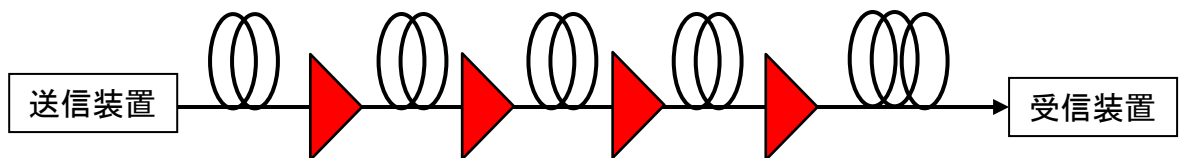
そこで、2段構成がよく用いられる。前段には低雑音アンプ、後段には高パワーアンプ。



多中継伝送系

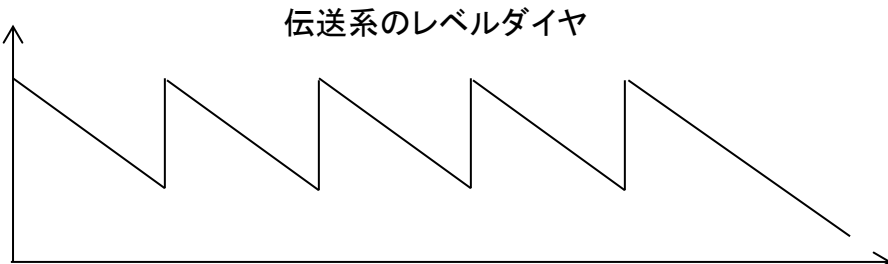
長距離伝送システムでは、中継アンプを多段に接続する。

1中継間隔の伝送損失=増幅器利得、とするのが標準的。



信号光パワー(dB)

伝送系のレベルダイヤ



このような伝送系の受信端での光SN比は次のように考えられる。

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

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

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

$$= N P_a T_f$$



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

$$(\text{光SNR}) = \frac{P_s}{P_{\text{ASE}}} = \frac{P_0 T_f}{N P_a T_f} = \frac{P_0}{N P_a} \propto \frac{P_0}{N n_{\text{sp}} G} \quad (G \gg 1)$$

中継段数に比例して光SNは劣化 → 伝送距離制限

長距離伝送の処方箋

総伝送距離 L が与えられたとする。

中継間隔を L_0 とおくと、 $T = 10^{(-\alpha L_0)}$ 、 $N = L/L_0$ (α : 損失係数、簡単のため $T_f = T$)。

$TG = 1$ なので、 $G = 10^{\alpha L_0}$

よって、

$$(\text{光SNR}) \propto \frac{P_0}{N n_{\text{sp}} G} = \frac{P_0}{(L/L_0) \cdot n_{\text{sp}} \cdot 10^{\alpha L_0}} \propto \frac{L_0}{10^{\alpha L_0}}$$



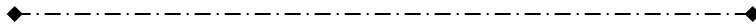
中継間隔が長いほど光SNは悪い



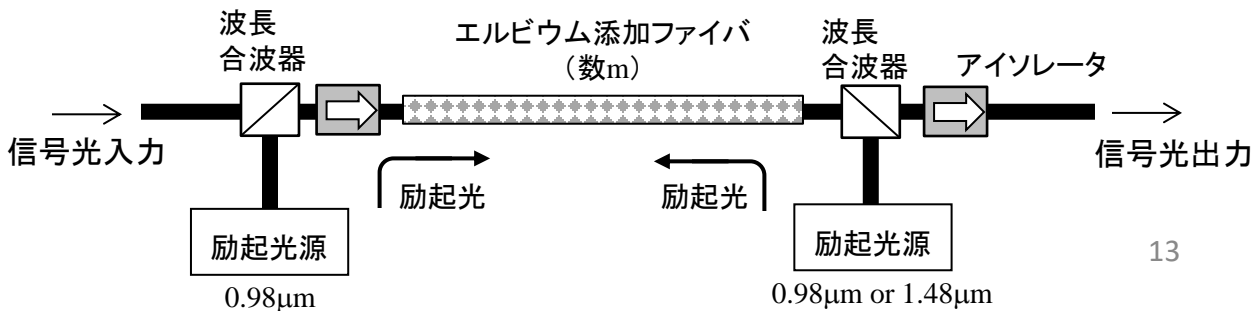
中継間隔が短いほど伝送可能距離は長くなる。

但し、中継増幅器をたくさん使うので高コスト。

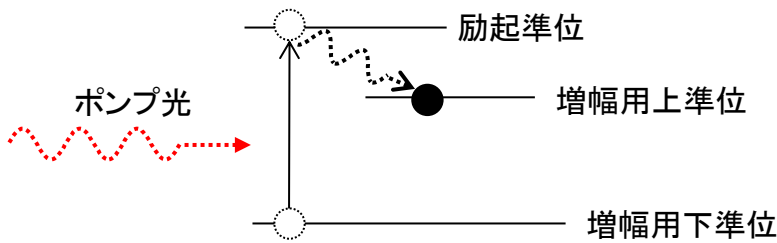
(実用システムでは80km程度)



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;

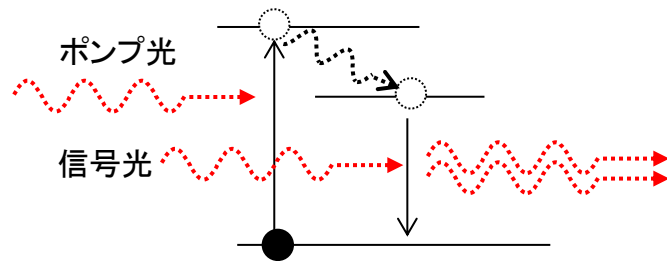
励起光:大 → 反転分布:大 → 信号利得:大

◆ 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

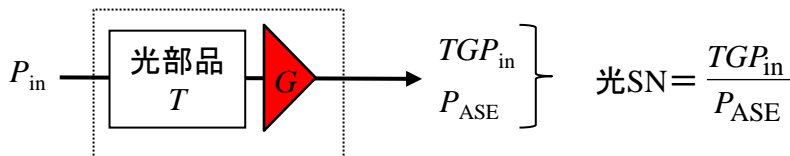
◆ 後方励起は高出力パワーに有利

- 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



◆ 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。

◆ 低雑音のためには、入力部の損失はできるだけ小さく。



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。

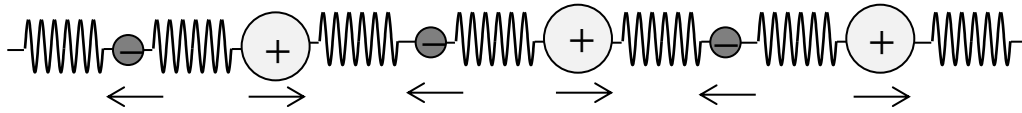
サイズ大。

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

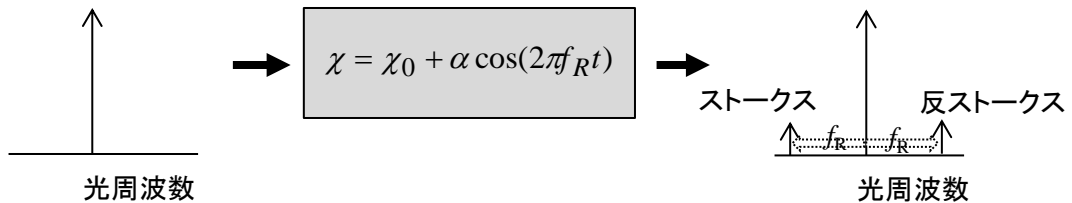


光学フォノンが存在していると、誘電率が光学フォノンの振動数で変調される。



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）。

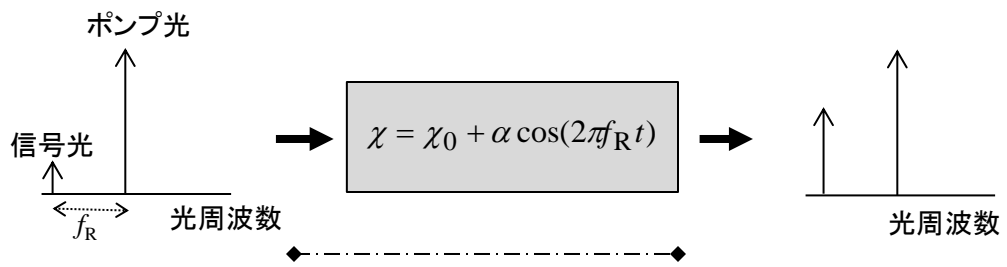


ストークス光と信号光が同期した誘導ラマン散乱が起こる。

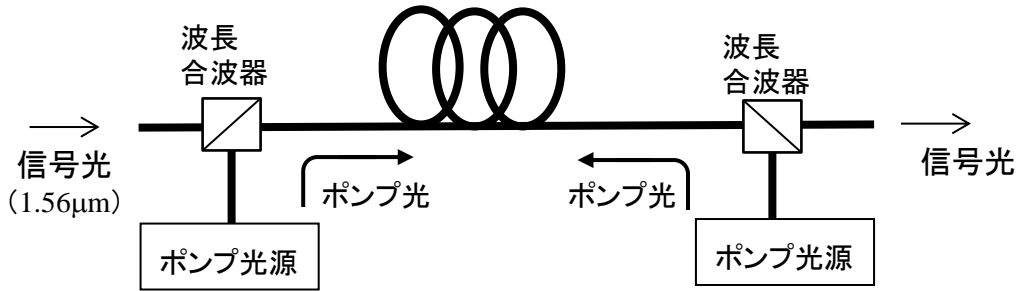


信号光から見たら増幅現象。

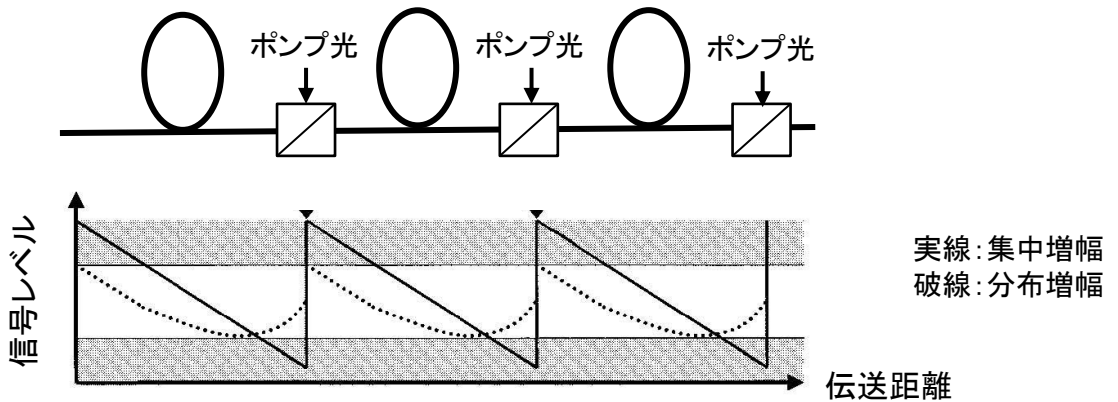
ラマン増幅



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(@1.5mm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。

演習問題

[4.1] 媒質長=10mで信号利得=15dB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(上準位数 N_2 , 下準位数 N_1)における光子数 n 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光強度を $\{G, N_1, N_2, hf\}$ で表せ。

[4.3] 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。

[4.4] 中継間隔が80kmで中継増幅利得が1中継間損失を補償する値である光増幅伝送系における、1偏波モード・波長幅0.1nm当りの光SN比を以下の手順に従って求めよ。但し、各解答は有効数字2桁とする。

- (a) 波長幅0.1nmを周波数幅に換算せよ。但し、光波長=1.5 μ m、光速=3 $\times 10^8$ m/sとする。
- (b) 中継増幅利得を求めよ。但し、伝送路損失=0.25dB/kmとする。
- (c) ひとつの増幅器から出力される0.1nm当りのASE光パワーを求めよ。但し、光増幅器のNF=6dB、光周波数=200 THz、プランク定数=6.6 $\times 10^{-34}$ J \cdot sとする。
- (d) N 段目増幅器出力における光SN比(1偏波モード/波長0.1nm当り)を表せ。但し、送信機出力光パワー1mWとする。