

《光纤通信》复习提纲

一、光纤通信概论

- 1、 “光纤通信之父”：高锟
- 2、 光纤中最常用的波长：850nm、1300nm、1550nm
- 3、 光纤有近乎完美的品质：
 - (1) 几乎是无限的带宽；
 - (2) 几乎是零的损耗；
 - (3) 几乎为零的信号失真；
 - (4) 几乎为零的功率消耗；
 - (5) 几乎为零的材料消耗；
 - (6) 几乎为零的占有空间；
 - (7) 几乎为零的价格。
- 4、 光纤通信的发展过程：
 - (1) 从短波长（850nm）到长波长（1300nm、1550nm）；
 - (2) 从多模光纤到单模光纤；
 - (3) 从低速率到高速率。
- 5、 推动光通信技术演进的新技术：
 - (1) 研制新型光纤，有源及无源光器件、系统端机的集成化与模块化，提高速率与性能，简化结构降低成本，是系统发展的技术基础；
 - (2) 波分复用（WDM）技术；
 - (3) 光放大器技术，尤其是掺铒光纤放大器（EDFA）、光纤拉曼放大器（FRA）及其应用；
 - (4) 高速大容量光网络技术；
 - (5) 光接入网技术；
 - (6) 自由空间光通信（FSO）技术；
 - (7) 光纤孤子通信技术；
 - (8) 量子光通信技术。

【问答】谈谈你对光纤通信未来发展的看法。

- 6、 数字信号是对连续变化的模拟电信号进行抽样、量化和编码产生的，称为脉冲编码调制（PCM）。
- 7、 准同步数字系列（PDH）
 - (1) PCM30/32 路系列（我国及西欧采用）

帧长 $125\mu s$ ，共有 32 个时隙（TS0~TS31），其中 30 个话路时隙（TS1~TS15 及 TS17~TS31），TS0 时隙用作帧同步，TS16 时隙用作信令及复帧同步。由于每个时隙包含 8 个 bit（1 个字节），故 1 帧共有 $8 \times 32 = 256\text{bit}$ ，相应的码速 $B = 8 \times 8 \times 32\text{kb/s} = 2.048\text{Mb/s}$ 。
 - (2) PCM24 系列（日、美采用）
- 8、 同步数字系列（SDH）及同步光网络（SONET）等级及速率

SDH 传输网中有一套标准化的信息结构等级，称为同步传送模块 STM N ($N=1,4,16,\dots$)，其中最基本的模块为 STM-1，传输的码速 $B = 155.520\text{Mb/s}$ 。更高的速率是基本码速的整数倍。

SDH	SONET	码速(Mb/s)	话路数
	OC-1	51.840	672
STM-1	OC-3	155.520 (51.840×3)	2016 (672×3)
STM-4	OC-12	622.080 (155.520×4)	8064 (2016×4)
STM-16	OC-48	2488.320 (622.080×4)	32256 (8064×4)

STM-64	OC-192	9953.280 (2488.320×4)	129024 (32256×4)
STM-256	OC-768	39813.120 (9953.280×4)	516096 (129024×4)

9、在数字光波通信系统中，通常传输的是二进制光脉冲“0”码与“1”码。按照“1”码时码元宽度相对于码元周期 T 的大小，分为归零 (RZ) 码与非归零 (NRZ) 码。

由于 NRZ 码的信号带宽仅为 RZ 码的一半，实用的光通信系统通常采用 NRZ 码。

10、光通信系统可以分为两大类

- (1) 导波光波系统：光纤通信系统；
- (2) 非导波光波系统（自由空间光通信系统）：如烽火台、红绿灯。

11、一个典型的点一点光通信系统主要包括收发信电端机、光发送端机、传输信道、光接收端机等几部分。

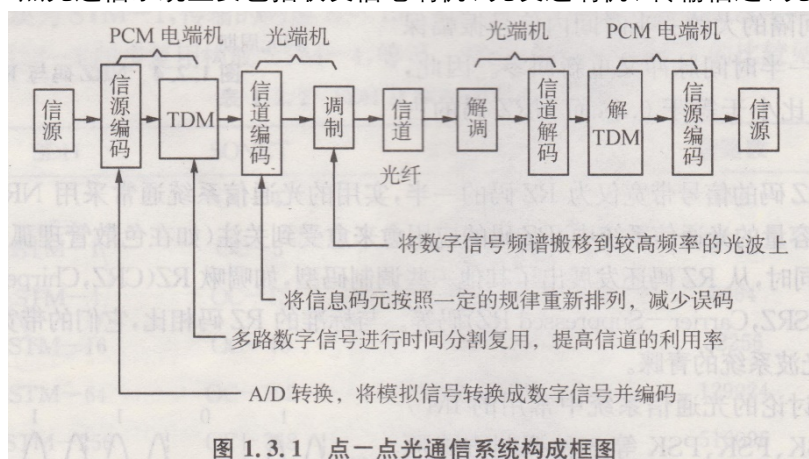


图 1.3.1 点一点光通信系统构成框图

【问答】信源编码、TDM（时分复用）、信道编码、调制的基本功能？（上图四个箭头）

12、传统光纤通信中继器：光—电—光 (O-E-O) 中继器

其把经过长距离传输衰减变得很微弱并畸变的光信号进行光检测变成电信号，经放大整形再生后再驱动光源，产生的光信号再送入光纤传输。

数字光纤通信中继器：3R 中继器

其基本功能为均衡放大 (Reshaping)、识别再生 (Regenerating) 和再定时 (Retiming)。

二、光纤

- 1、光纤的典型结构是多层同轴圆柱体，自内向外为纤芯、包层及涂覆层。
- 2、根据横截面上的折射率分布，光纤可分为两大类，即阶跃(SI)型和梯度(GI)型。
- 3、按光纤中传输模式的多少，光纤分为多模光纤和单模光纤两类。
- 4、阶跃光纤中的光线分析

光纤的导光特性基于光射线在芯包界面上的全反射，使光线限定在纤芯上传输。

子午光线在光纤中的传输特点可用右图来描述，图中示出了一个子午面上几条光线的传输情况。设纤芯折射率为 n_1 ，包层折射率为 n_2 。当光线射入纤芯后，在纤芯与包层界面处满足全反射条件的光线，就能在芯包界面间来回反射向前传输。在图中，光线从空气（折射率 $n_0 = 1$ ）射入光纤维端面，有 3 种典型情况。

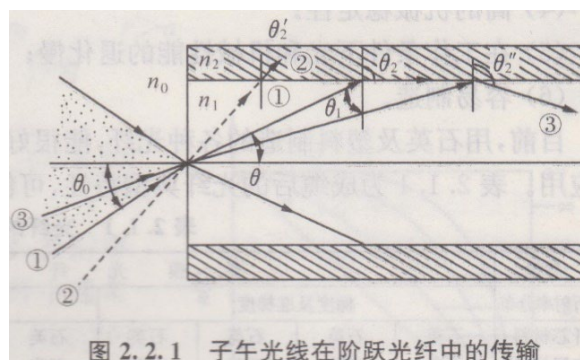


图 2.2.1 子午光线在阶跃光纤中的传输

(1) 设光线①以入射角 θ_0 入射到纤芯端面上，因 $n_0 < n_1$ ，光线产生折射，其折射角 θ 可从斯奈尔定律求得 $n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta$ 。显然， $\theta < \theta_0$ 。设该光线到达芯包界面时恰好产生掠射，即它在包层内的折

射角 $\theta_2 = 90^\circ$ ，令此时的入射角 $\theta_1 = \theta_c$ ，则由 $n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ$ 得 $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ 。定义 θ_c 为芯包界

面的全反射临界角，相应的入射角 θ_0 为入射临界角。

- (2) 光线②以入射角 θ'_0 入射光纤端面，且 $\theta'_0 > \theta_0$ ，它产生的芯包界面入射角 $\theta'_1 < \theta_c$ ，光线在包层的折射角 $\theta'_2 < 90^\circ$ ，该光线将射入包层。
- (3) 光线③以入射角 θ''_0 入射纤芯端面，且 $\theta''_0 < \theta_0$ ，则芯包界面处入射角 $\theta''_1 > \theta_c$ ，而 $\theta''_2 > 90^\circ$ ，因此该光线将在芯包界面产生全反射。

由此可见，当光线从空气入射纤芯端面的入射角小于等于 θ_0 时，进入纤芯的光线将会在芯包界面间产生全反射而向前传播，而入射角大于 θ_0 的光线将进入包层散失掉。因此入射临界角 θ_0 是个很重要的参量，它与光纤折射率的关系为

$$\sin \theta_0 = n_1 \sin(90^\circ - \theta_c) = n_1 \cos \theta_c = n_1 \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

凡角度在 θ_0 以内的入射光线均可在光纤内传播，定义入射临界角 θ_0 的正弦为数值孔径 NA ，即

$$NA = \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

【问答】推导全反射光线满足的条件。

【例题】设单模石英光纤的 $n_1 = 1.465$ ， $n_2 = 1.46$ ，计算其数值孔径及接收角。

$$\text{解： } NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1.465^2 - 1.46^2} = 0.121$$

$$\theta_0 = \arcsin(NA) = 6.95^\circ$$

- 5、单模光纤中只传输一个基模，没有模间色散，传输带宽很宽，是高速长距离光纤通信系统的理想传输介质。
- 6、 mW 与 dBm 的关系

在光纤通信中常用分贝毫瓦（ dBm ）作为功率单位，它是以 $1mW$ 为基准、用 dB 表示的相对功率大小，即

$$P(dBm) = 10 \lg \left(\frac{P(mW)}{1(mW)} \right)$$

因此， $P = 1mW$ 即为 $0dBm$ ， $1\mu W$ 即为 $-30dBm$ 。

- 7、光纤的损耗特性

设光纤的损耗常数 $\alpha_p(km^{-1})$ ，入纤光功率为 P_{in} ，则光纤输出端的光功率为

$$P_{out} = P_{in} e^{(-\alpha_p L)}$$

式中， $L(km)$ 为光纤长度。通常光纤损耗用单位长度的分贝(dB)数表示，定义为

$$\alpha = -\frac{10}{L} \lg \left[\frac{P_{out}}{P_{in}} \right] (dB/km)$$

将①式代入②式，可得 α 与 α_p 的关系为 $\alpha(dB/km) = 4.343\alpha_p(km^{-1})$

【例题】一光纤长 $80km$ ，损耗 $\alpha = 0.2dB/km$ 。当入纤功率为 $1mW$ 时，出纤功率为多少？

【法一】解：首先，为了便于计算，将 mW 换算成 dBm ， $P_{in} = 10 \lg \left(\frac{1(mW)}{1(mW)} \right) = 0(dBm)$

$$L = 80km \text{ 长光纤的总损耗为 } \alpha L = 0.2dB/km \times 80km = 16(dB)$$

$$\text{则经过 } 80km \text{ 传输后，出纤功率为 } P_{out} = 0dBm - 16dB = -16(dBm) \text{ 或 } 25(\mu W)$$

【法二】解：首先，将 dB/km 的光纤损耗单位换成 km^{-1} ，即此时 $\alpha_p = \frac{\alpha}{4.343} = \frac{0.2}{4.343} = 0.046(km^{-1})$

$$\text{然后可得 } P_{out} = P_{in} e^{(-\alpha_p L)} = 1mW \times e^{[-0.046(km^{-1}) \times 80km]} = 0.025(mW) = 25(\mu W)$$

- 8、时延失真由于光纤色散而产生的，光纤色散包括以下 4 种：

- (1) 模间色散 (2) 导波色散 (3) 材料色散 (4) 偏振模色散

9、单模光纤的色散特性：

对于普通的单模光纤，**全色散为零**的波长约在 $1.31\mu\text{m}$ ，这意味着在这个波长传输的光脉冲不会发生展宽。在 $1.55\mu\text{m}$ 波长下，虽然**损耗最低**，但在该波长上的色散较大。通过改变折射率分布及包层结构，可将零色散波长从 $1.31\mu\text{m}$ 移到 $1.55\mu\text{m}$ ，这就是色散位移光纤（DSF）。

【问答】为什么光纤通信选用 1300nm 和 1550nm 的工作窗口？

10、使得单模光纤中非线性影响愈来愈大的原因有：

- (1) 光源性能提高及光放大器的广泛采用，使入纤功率达到 10dBm 甚至 20dBm 以上；
 - (2) WDM 技术普遍采用，单个信道的功率即使可能不大，多个信道合成的功率则可能很大，光纤的非线性效应使信道间产生严重的相互串扰；
 - (3) 单信道速率愈来愈高，色散与非线性间的相互作用影响也愈来愈严重等等。
- 利用单模光纤中的非线性效应，构成许多有用的信号传输和处理器件，如放大器、调制器和激光器等。

三、光源与光发送机

1、光发送机的作用是将电信号转变成光信号。

2、光纤通信系统对光源的要求主要有：

- (1) 发射波长与使用的光纤传输窗口波长一致；
- (2) 调制容易、线性好、带宽宽；
- (3) 输出谱窄，以降低光纤色散的影响；
- (4) 辐射角小，与光纤的耦合效率高；
- (5) 寿命长、体积小、耗电省等。

3、两种半导体光源：发光二极管（LED）和激光二极管（LD）

这两种光源的主要区别在于：

LED 输出的是非相干光，其谱宽宽，入纤功率小，调制速率低；

LD 输出的是相干光，其谱宽窄，入纤功率大，调制速率高。

因此，前者适宜于短距离低速系统，后者适宜于长距离高速系统。

4、光源的工作原理基于光子的吸收、自发发射和受激发射。普通光源在热平衡下主要是自发发射。

5、半导体发光器件的发光效率

通常定义一个发光器件的总效率（或外量子效率），即

$$\eta_T = \frac{\text{每秒输出的光子数}}{\text{每秒注入的总电子数}} = \frac{P_e / hf}{I / e} \approx \frac{P_e}{IE_g}$$

式中： P_e 为输出光功率； I 为注入电流； E_g 为材料带隙能量（eV）。

另外，器件效率（即功率转换效率）为输出光功率 P_e 与输入电功率 IV 之比，即

$$\eta = \frac{P_e}{IV} \times 100\% = \eta_T \left(\frac{E_g}{V} \right) \times 100\%$$

式中： I 为注入电流； V 为工作电压。

【例题】— GaAs-LD 光源在外加电压 $V = 2.5\text{V}$ 时的注入电流 $I = 50\text{mA}$ ，发射功率 $P_e = 10\text{mW}$ 。计算它的功率转换效率。

解：对于 GaAs 材料，其带隙能量为 $E_g = 1.424\text{eV}$ ，则总效率为

$$\eta_T = \frac{P_e}{IE_g} = \frac{10(\text{mW})}{50(\text{mA}) \times 1.424(\text{eV})} = 14(\%)$$

功率转换效率为

$$\eta = \eta_T \left(\frac{E_g}{V} \right) \times 100\% = 0.14 \times \frac{1.424(\text{eV})}{2.5(\text{V})} \times 100\% = 8\%$$

6、LED 的输出光功率 P 与电流 I 的关系即 $P-I$ 特性如右图所示,它是非阈值器件,由图可知:

- (1) 发光功率随工作电流的增大而增大,并在大电流时逐渐饱和;
- (2) LED 的工作电流通常为 $50\sim 100\text{ mA}$,这时偏置电压 $1.2\sim 1.8\text{ V}$,输出功率约几毫瓦,而入纤功率在几到几十微瓦;
- (3) 工作温度提高时,同样工作电流下 LED 的输出功率要下降。例如当温度从 20°C 提高到 70°C 时,输出功率下降约一半。但相对而言,温度的影响要比 LD 小。

【问答】据图描述 LED 的 $P-I$ 特性。

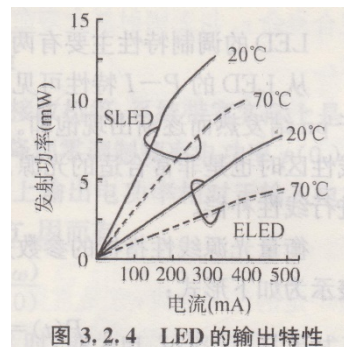


图 3.2.4 LED 的输出特性

7、调制谱特性

图 3.4.8 为 BH-LD 在直流下的谱特性。在阈值附近,输出较宽,而随着电流的增大,模式选择性增大,相邻模得到抑制。显然这时总的强度不变,但模式间的相对强度在改变。这种模色分配效应在直接调制下变得更为明显,并使长距离光纤系统中因光纤色散而在接收机内产生强度脉动,使误码率增大。

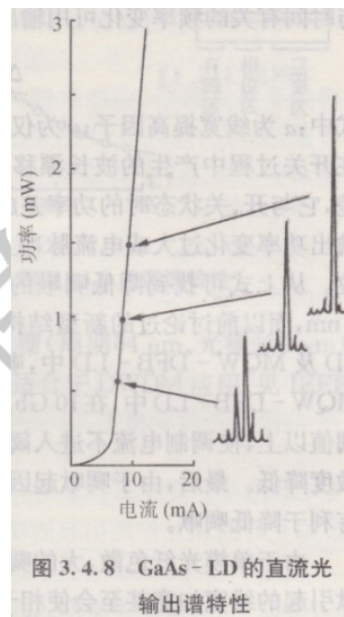


图 3.4.8 GaAs-LD 的直流光输出谱特性

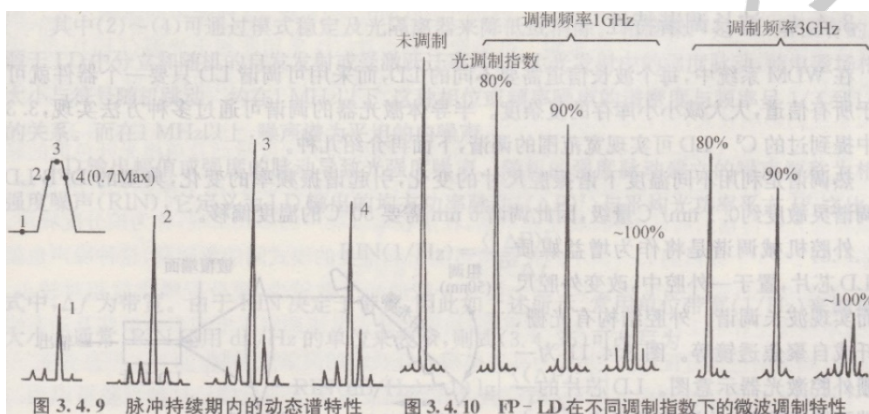


图 3.4.9 脉冲持续期内的动态谱特性

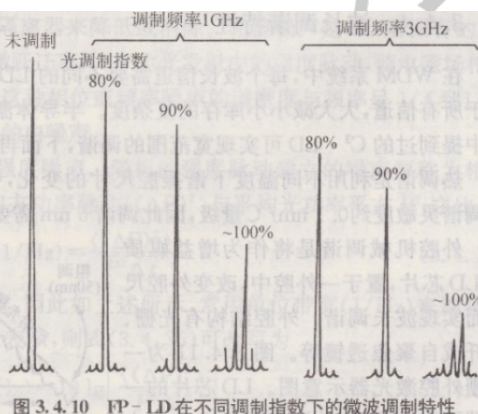


图 3.4.10 FP-LD 在不同调制指数下的微波调制特性

图 3.4.9 示出了 1 ns 宽单个脉冲持续期内的模式脉动现象。

LD 在高速调制下谱宽也会随调制指数的增加而增大;纵模数目也可能增加(见图 3.4.10)。

【问答】据图描述 LD 的谱特性。

9、LD 的噪声源主要有:

- (1) 相位或频率噪声;
- (2) 工作不稳定引起的噪声,如 $P-I$ 特性的扭折与自脉动;
- (3) 光纤端面与 LD 之间互作用引起的噪声;
- (4) 模噪声与模分配噪声。

10、光发送机由输入接口、光源、驱动电路、公务及监控电路、自动偏置控制电路、温控电路等组成,其核心是光源及驱动电路。

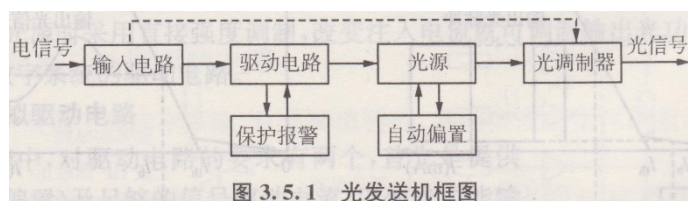


图 3.5.1 光发送机框图

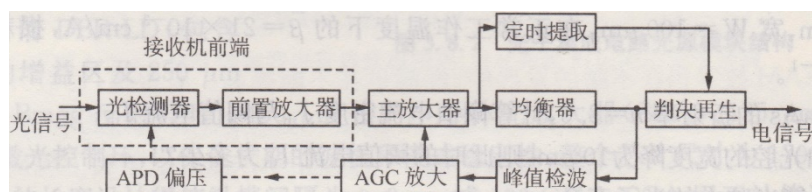
11、光发送机的性能主要包括以下几方面:

- (1) 光源性能,包括波长、谱宽、 $P-I$ 特性及寿命等;
- (2) 调制方式为模拟、数字或外调制;
- (3) 传输速率或带宽;

- (4) 输出光功率（入纤平均光功率为 $0.01\sim 10\text{mW}$ ，稳定度在 $5\%\sim 10\%$ 左右）；
 - (5) 数字光脉冲的消光比 $EXT < 0.1$ （ EXT 为全“0”平均光功率与全“1”平均光功率之比）；
 - (6) 无张弛振荡。
- 12、目前光纤通信中应用最多的是光源的基带直接强度调制、副载波强制调制及数字调制，高速率时采用外调制。

四、光检测器与光接收机

- 1、光纤通信系统有模拟及数字两大类，光接收机相应也有两类，即模拟接收机和数字接收机。下图为数字接收机框图。



- 2、光检测器的作用是**把接收到的光信号转换成光电流**。
- 3、**【填空】**对光检测器的基本要求：高的光电转换效率、低的附加噪声和快速的响应。
- 4、**【问答】**光纤通信系统对光检测器的要求主要有：
 - (1) 在工作波长上光电转换效率高，即对一定的入射光信号功率，光检测器能输出尽可能大的光电流；
 - (2) 检测过程中带来的附加噪声尽可能小；
 - (3) 响应速度快、线性好及频带宽，使信号失真尽量小；
 - (4) 高可靠长寿命，尺寸可与光纤直径相配，工作电压低等。
- 5、满足上述要求的光检测器是两种半导体光电二极管：**PIN 光电二极管**和**雪崩光电二极管（APD）**

五、光放大器

- 1、光放大器主要有 3 类：
 - (1) 半导体光放大器（SOA）；
 - (2) 掺稀土元素光纤放大器，其中应用最广泛的是掺铒光纤放大器（EDFA）；
 - (3) 非线性光纤放大器，主要是光纤拉曼放大器（FRA）。
- 2、半导体光放大器（SOA）的主要优点：带宽大、体积小、功率消耗少，同时在波长的选择上比 EDFA、FRA 有更大的自由度，能填补 EDFA 不能工作的波长间隙。
 半导体光放大器（SOA）的主要问题：高的噪声系数、多信道应用时的信道间串扰和增益对偏振态灵敏，限制了它在光纤通信系统，尤其是 WDM 系统中的应用。
- 3、掺铒光纤放大器（EDFA）的主要优点：增益高、带宽大、输出功率高、泵浦效率高、噪声低、对偏振态不灵敏等，尤其是多信道放大应用时信道间串扰小，特别适合于 WDM 系统应用。
- 4、在光通信系统中，光放大器既可作为光发送机的功率提升放大器以提高发送功率，也可作为接收机的前置放大器以提高接收灵敏度，最主要的是可代替传统的光—电—光中继器，延长传输距离。
- 5、半导体光放大器（SOA）可分为两类：FP 放大器（FPA）和行波放大器（TWA）。
- 6、半导体光放大器（SOA）的增益特性：

峰值增益：
$$G_{FP}^{max} = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_s}{(1-G_s\sqrt{R_1R_2})^2}$$

式中： R_1 、 R_2 为两个端面的功率反射系数； G_s 为单通增益。

为了获得更大的增益，应使 $G_s\sqrt{R_1R_2} \rightarrow 1$ 。极限情况下，当 $G_s\sqrt{R_1R_2} = 1$ 时， $G_{FP} \rightarrow \infty$ ，光放大器开始成为激光器。

两个 FP 增益峰间的最低增益：
$$G_{FP}^{min} = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_s}{(1+G_s\sqrt{R_1R_2})^2}$$

FP 增益的峰谷比（即增益起伏）：
$$\Delta G = \frac{G_{FP}^{max}}{G_{FP}^{min}} = \frac{(1+G_s\sqrt{R_1R_2})^2}{(1-G_s\sqrt{R_1R_2})^2}$$

通常认为： $\Delta G > 3dB$ 时，放大器带宽由 FP 腔谐振决定，是 FP 放大器（FPA）；

$\Delta G < 3dB$ 时，放大器带宽由增益谱决定，是行波放大器（TWA）。

为保持 $\Delta G < 3dB$ ，令 $R_1 = R_2 = R$ ，端面反射率须满足的条件是 $G_s R < 0.17$ 。

【例题】现有一功率反射系数 $R_1 = R_2 = R = 0.32$ ，单通增益 $G_s = 2$ 的半导体光放大器（SOA），判断其是 FP 放大器（FPA）还是行波放大器（TWA）？

$$\text{解：} \because \Delta G = \frac{G_{FP}^{max}}{G_{FP}^{min}} = \frac{(1+G_s\sqrt{R_1R_2})^2}{(1-G_s\sqrt{R_1R_2})^2} = \frac{(1+2 \times 0.32)^2}{(1-2 \times 0.32)^2} = 20.75 = 10 \lg(20.75) \text{ dB} \approx 13.17 \text{ dB} > 3 \text{ dB}$$

\therefore 该半导体光放大器（SOA）是 FP 放大器（FPA）

- 7、掺铒光纤放大器（EDFA）的噪声特性与半导体光放大器（SOA）相似，即主要的噪声源是 ASE 与信号光在光检测器内产生的拍频噪声，并主要决定于自发发射系数 n_{sp} （ $n_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1)$ ）。

六、光纤通信系统

- 1、主要的光复用技术：

- (1) 波分复用（WDM）：当今最主要的光复用技术
- (2) 光时分复用（OTDM）
- (3) 空分复用（SDM）
- (4) 光码分复用（OCDM）

- 2、在 WDM 系统中，由于 N 个光波长是互相独立的，各波长可传送不同的信息。
- 3、WDM 系统中通常采用光放大器（如 EDFA）作为功率提升或中继放大。
- 4、光放大器是 WDM 系统实用化的最重要、最关键的技术。
- 5、WDM 主要指在 1550 nm 附近的 EDFA 带宽内的波分复用。