1. $B \geq (2\Delta f)\log_2 M$. $B \geq (\frac{\Delta f}{3}) SNR$. $SNR \Rightarrow dB$.

2) 光纤. 临界角 θ_c: $\sin\theta_c = n_2/n_1$ 数值孔径 $NA = n_0\sin\theta_i = \sqrt{n_1^2-n_2^2} = n_1\sqrt{2\Delta}$. $\Delta = \frac{n_1^2-n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1-n_2}{n_1}$

色散(传输延时差): $\Delta T = \frac{L}{c}\frac{n_1^2}{n_2}\Delta = \frac{L}{2c}\frac{NA^2}{n_2}$. $\Delta T < \frac{1}{B}$ 容量距离积 $BL < \frac{n_2}{n_1}\frac{c}{\Delta} = 2c\frac{n_2}{NA^2}$.

多模光纤可传模式数量: $\frac{1}{2}(\frac{光纤芯径 \times NA \times \pi}{光波长})$. 梯度光纤: $\Delta T = \frac{n_1\Delta^2}{8cL}$. $BL < \frac{8c}{n_1\Delta^2}$

2. 光纤 → 单模光纤

单模条件: $V = k_0 a\sqrt{n_1^2-n_2^2} = k_0 a n_1\sqrt{2\Delta} < 2.4048$. $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_c}$. (HE_{11}, LP_{01}). V→归一化频率.

截止波长. $\lambda > \lambda_c = \frac{2\pi a\sqrt{n_1^2-n_2^2}}{2.4048} = \frac{2\pi a n_1\sqrt{2\Delta}}{2.4048}$. $V_c = 2.4048$.

模场直径: $\frac{w}{a} = 0.65 + 1.619V^{-\frac{3}{2}} + 2.879V^{-6}$. $(1.2 < V < 2.4)$. 高斯场: $\psi_g = \psi_0 e^{-\frac{r^2}{2w^2}}$

光纤有效面积: $A_{eff} = \pi w^2$. 全宽度 $2w$

纤芯内模式功率占比: $T = 1 - e^{-\frac{2a^2}{w^2}} \left(= 1 - e^{-\frac{(2a)^2}{2w^2}}\right)$. (单模光纤限制作用).

⇒ 已知 V. a. 可求出 W. 进而求 T.

2. 光纤 → 传输理论与信号损伤

损耗系数: $\alpha(dB/km) = \frac{10}{L}\lg\frac{P_{in}}{P_{out}}$. $\alpha_p = \frac{\alpha_{dB}}{4.34}$. $4.34 = \frac{10}{\ln 10}$.

色散, 相速度 $v_p = \frac{\omega}{\beta}$. 群速度 $v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$. 群延迟 $\tau(\omega) = \frac{L}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega} \cdot L = \beta_1 L$.

光脉冲展宽: $\Delta T = \frac{d\tau}{d\omega}\cdot\Delta\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2 \cdot L \cdot \Delta\lambda = DL\Delta\lambda$

群速度色散 $\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$ (ps^2/km). 色散 $D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2$ $(ps/nm\cdot km)$.

阶跃型光纤中的模式色散: $\frac{\Delta T}{L} = \frac{n_1}{c}(\frac{1}{\sin\theta_c} - 1) = \frac{1}{c}\frac{n_1^2}{n_2}\Delta$.

渐变型光纤中的模式色散: $\frac{\Delta T}{L} = n_1\Delta^2/8c$.

材料色散: $D_m(\lambda) = \frac{\lambda}{c}\cdot\frac{d^2n}{d\lambda^2}$. n→材料折射率 ⇒ 脉冲展宽 $\tau_m(\lambda) = D_m(\lambda)\cdot\Delta\lambda\cdot L$.

波导色散: $D_w(\lambda) = -\frac{n_2\Delta}{c}\cdot\frac{1}{\lambda}[V\frac{d^2(Vb)}{dV^2}]$. V→归一化频率. ⇒ 脉冲展宽: $\tau_w(\lambda) = D_w(\lambda)\cdot\Delta\lambda\cdot L$.

偏振模色散(PMD): $\Delta\tau = \left|\frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}}\right| = L|\beta_{1x} - \beta_{1y}| = L(\Delta\beta_1)$.

光纤总色散: (多模) $\tau = \sqrt{\tau_M^2 + (\tau_m+\tau_w)^2}$. (单模) $\tau = \tau_m + \tau_w$.

高斯输入脉冲 - 脉冲功率 $\frac{1}{e}$ 强度点半宽 T_0.

脉冲功率半极大值全宽/半高全宽 (FWHM) $T_{FWHM} = 2\sqrt{\ln 2}\,T_0 = 1.665T_0$.

经光纤传输 z 后输出脉宽 ($\frac{1}{e}$ 强度半宽) T_1:

$$\frac{T_1}{T_0} = \left[\left(1+\frac{C\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\left(1+\frac{Cz}{L_D}\right)^2 + \left(\frac{z}{L_D}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}. \quad L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \xRightarrow{C=0} \frac{T_1}{T_0} = \left[1+\left(\frac{z}{L_D}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

输入脉冲啁啾: $\delta\omega = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2\right] = \frac{C}{T_0^2}t$.

传输 z 后啁啾 (色散诱导啁啾): $\delta\omega = \left.\frac{d\phi}{dT}\right|_{(T=t)} = \frac{(CT_0^2 + \beta_2 z + C^2\beta_2 z)T}{(T_0^2 + C\beta_2 z)^2 + (\beta_2 z)^2}$. C=0 时 $\delta\omega = \frac{\beta_2 z T}{T_0^4 + \beta_2^2 z^2} = \frac{sgn(\beta_2)(\frac{z}{L_D})}{1+(\frac{z}{L_D})^2}\cdot\frac{T}{T_0^2}$

C≠0 时: $\beta_2 C > 0$. 脉冲展宽.
$\beta_2 C < 0$. 窄化后展宽. $z_{min} = \frac{C}{1+C^2}L_D$. $T_1^{min} = \frac{T_0}{(1+C)^{1/2}}$.

均方根脉宽 (rms): $\frac{\delta_1}{\delta_0} = \left[\left(1+\frac{C\beta_2 z}{2\delta_0^2}\right)^2 + (1+4\delta_\omega^2\delta_0^2)\left(\frac{\beta_2 z}{2\delta_0^2}\right)^2\right]^{1/2}$. 高斯脉冲 $\delta_0 = \frac{T_0}{\sqrt{2}}$.

光纤色散对系统限制：$\delta < \frac{\varepsilon}{B}$

窄光源谱宽(忽略δ_w)：$B^2 L < \frac{\varepsilon^2}{|\beta_2|} = \frac{2\pi c \varepsilon^2}{\lambda^2 |D|}$.（无啁啾脉冲$C=0$).

宽光源谱宽：$\delta_1 = \sqrt{\delta_0^2 + \delta_D^2} = \sqrt{\delta_0^2 + (|D| L \delta_\lambda)^2} < \frac{\varepsilon}{B}$.

对窄输入脉宽($\delta_0 \approx 0$)：$\delta_1 = |D| L \delta_\lambda < \frac{\varepsilon}{B}$. $BL < \frac{\varepsilon}{|D| \delta_\lambda}$.

(非线性效应)有效长度 $L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$. L很大时 $L_{eff} \approx \frac{1}{\alpha}$. Δ注意α单位为neper. $\rightarrow \frac{\alpha(dB)}{4.34}$.

有效面积：$A_{eff} = \pi w^2$.

受激布里渊散射(SBS)：功率阈值 $P_{th} \approx \frac{21 b A_{eff}}{g_B L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta f_{source}}{\Delta f_B}\right)$ mW. $\rightarrow g_B P_{th} L_{eff}/A_{eff} \approx 21$. Δf_B 布里渊增益带宽.

受激拉曼散射(SRS)：功率阈值 $P_{th} \approx \frac{16 b A_{eff}}{g_R L_{eff}}$.

SRS对系统限制：$P_{total} B_{WDM} L_{eff} < 40000\,mW$. $B_{WDM} = (n-1)\Delta\lambda$(信道间隔). $P_{total} = nP$ (n:信道数).

自相位调制(SPM)：相位调制导致频率啁啾 $\Delta\nu_{spm} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{L_{eff}}{L_{NL}} \cdot \frac{d\tilde{P}(0,t)}{dt}$.

$\tilde{P}(0,t) = \frac{P(0,t)}{P_0}$ 归一化光强脉冲. $L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}$. $\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{n_2}{A_{eff}}$ 非线性系数.

互相位调制(XPM)：$\omega_1 \cdot \omega_2$ 传输后 ω_1 相位 $= \phi_1 = k_0 n L + k_0 n_2 \frac{L_{eff}}{A_{eff}} (P_1 + 2P_2)$.

XPM导致的频率调制：$\Delta\omega_{1,xpm} = -2 \frac{n_2 L_{eff}}{A_{eff}} \cdot \frac{dP_2}{dt}$.

走离长度：$L_W = \frac{T_0}{|\beta_{11} - \beta_{12}|} \approx \frac{T_0}{|\beta_2(\omega_1 - \omega_2)|}$. β_2 为光纤色散. $\omega_1 \cdot \omega_2$ 为脉冲中心频率.

自相位调制引起的非线性相移 $= \phi_{NL} = \gamma P_{in} L_{eff}$. 若忽略损耗则 $L_{eff} = L$. $\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{n_2}{A_{eff}}$.

⇒求最大频移 $\max(\Delta\nu_{spm}) = P(0,t) = P_0 \exp(-\frac{t^2}{T_0^2})$. $\frac{d\tilde{P}(0,t)}{dt} = -\frac{2t}{T_0} \exp(-\frac{t^2}{T_0^2})$.

$\Delta\nu_{spm} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{L_{eff}}{L_{NL}}\right) \left(\frac{2t}{T_0^2}\right) \exp\left[-\frac{t^2}{T_0^2}\right]$. 由 $\frac{d\nu_{spm}}{dt} = 0$ 得 $t = \frac{T_0}{\sqrt{2}}$.

3. 光源—物理基础

自发辐射跃迁几率 $= R_{spon} = A N_2$. A爱因斯坦系数. N_2 激发态原子密度 ($\rightarrow N_1$).

受激辐射跃迁几率 $= R_{stim} = B N_2 \rho_{ph}$. B爱因斯坦系数. ρ_{ph} 辐射能量谱密度. N_2.

受激吸收 〃〃〃〃 $= R_{abs} = B' N_1 \rho_{ph}$. N_1 基态原子密度.

3. 光源—激光器工作特性(LD)

速率方程：$\frac{dP}{dt} = GP + R_{sp} - \frac{P}{\tau_p}$. $\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{N}{\tau_c} - GP$. G净受激辐射速率. P光子数.

其中 $G = G_N(N - N_0)$. $R_{sp} = n_{sp} G$. $\tau_p^{-1} = v_g(\alpha_{mir} + \alpha_{int})$. $n_{sp} \approx 2$

$G\tau_p < 1$ 时 $P = 0$：载流子阈值 $N_{th} = N_0 + \frac{G}{G_N} = N_0 + \frac{1}{G_N \tau_p}$; ($G\tau_p = 1$).

电流阈值 $I_{th} = \frac{q N_{th}}{\tau_c} = \frac{q}{\tau_c}\left(N_0 + \frac{1}{G_N \tau_p}\right)$

辐射功率：$P_e = \frac{\hbar\omega}{2q} \frac{\eta_{int} \alpha_{mir}}{\alpha_{mir} + \alpha_{int}} (I - I_{th})$. 内量子效率 $\eta_{int} = \frac{P/h\nu_p}{I/e}$.

$I > I_{th}$ 时：$P = \frac{\tau_p}{q}(I - I_{th})$. $P_e = \frac{1}{2}(v_g \alpha_{mir}) \hbar\omega P$. 斜率效率 $\eta_d = \frac{\eta_{int} \alpha_{mir}}{\alpha_{mir} + \alpha_{int}}$ → 微分量子效率. $\frac{dP_e}{dI} = \frac{\hbar\omega}{2q} \eta_d$.

$P_e = \frac{1}{2} \frac{c}{n_g} \alpha_{mir} \hbar \frac{c}{\lambda} P$. $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

~~微分量子效率~~ 外量子效率 $\eta_{ext} = \eta_d \left(1 - \frac{I_{th}}{I}\right)$. 总量子效率(插座效率) $= \eta_{tot} = \frac{2P_e}{V_0 I} = \frac{\hbar\omega}{q V_0} \eta_{ext} \approx \frac{E_g}{q V_0} \eta_{ext}$

V_0 = 外加电压. $\hbar\omega = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$

LD的P-I特性：$P=\frac{\eta_{ext}h\nu}{q}(I-I_{th})$. $\eta_{ext}=\frac{dP}{dI}\cdot\frac{q}{h\nu}$

温度特性：$I_{th}=I_0e^{\frac{T}{T_0}}$. $T_0\rightarrow$激光器的特征温度.

4.光接收机—光电检测器.

电子扩散长度 $L_n=(D_n\tau_n)^{1/2}$. D_n扩散系数. τ_n电子寿命

空穴扩散长度 $L_p=(D_p\tau_p)^{1/2}$. D_p扩散系数. τ_p空穴寿命

光在耗尽区经过距离x后被吸收的功率 $P(x)=P_0(1-e^{-\alpha_s(\lambda)x})$. $\alpha_s(\lambda)\Rightarrow$材料对波长λ吸收系数.

P_0入射光功率. $P_0e^{-\alpha_s(\lambda)x}$损耗功率

(光电二极管) pin.

截止波长 $\lambda_c=\frac{hc}{E_g}$. E_g:带隙能量. $\lambda<\lambda_c$

初级光电流：$I_p=P_{in}(1-R_f)(1-e^{-\alpha_s(\lambda)w})\cdot\frac{q}{h\nu}$. $R_f\Rightarrow$二极管入射表面反射系数. w耗尽层宽度

量子效率：$\eta=\frac{I_p/q}{P_{in}/h\nu}=\frac{I_p hc}{P_{in}q\lambda}=(1-R_f)(1-e^{-\alpha_s(\lambda)w})$.

响应度：$R_d=\frac{I_p}{P_{in}}=\frac{\eta q}{h\nu}(A/W)$. $I_p=R_dP_{in}$, $R_d\approx\frac{\eta\lambda}{1.24}$ (λ单位μm).

(雪崩二极管) APD.

倍增因子：$M=\frac{I_M}{I_p}=\frac{1}{1-(V/V_B)^n}$. V反向偏压. V_B:二极管击穿电压.

响应度：$R_{d,APD}=R_{d,pin}\cdot M$. $I_M=I_{pin}\cdot M$. $R_{d,APD}\approx M\frac{\eta\lambda}{1.24}$. $\lambda\Rightarrow\mu m$.

(噪声来源).

输出端信噪比：$\frac{\text{光电流信号功率}}{\text{光检测器噪声功率}+\text{放大器噪声功率}}$.

初级光电流：$i_{ph}(t)=\frac{\eta q}{h\nu}P(t)=I_{DC}+i_p(t)$. $I_p=\frac{\eta q}{h\nu}P_{in}$

pin均方信号电流 $\langle i_s^2\rangle=\langle i_p^2(t)\rangle$. APD均方信号电流 $\langle i_s^2\rangle=\langle i_p^2(t)\rangle M^2$.

量子噪声：~~均~~量子噪声均方根电流 $\langle i_Q^2\rangle=(2qI_pB)M^2F(M)\Rightarrow$APD. $\langle i_Q^2\rangle=2qI_qB\Rightarrow$pin.

B⇒接收机接收带宽. I_p光电流. $F(M)\approx M^x$雪崩过程噪声系数.

暗电流噪声：体暗电流 $i_{DB}\Rightarrow\langle i_{DB}^2\rangle=(2qI_DB)M^2F(M)\Rightarrow$APD. $\langle i_{DB}^2\rangle=2qI_DB\Rightarrow$pin.

$I_D=I_{DB}+I_{DS}$.

(二极管) 表面暗电流 $i_{DS}\Rightarrow\langle i_{DS}^2\rangle=2qI_LB.\Rightarrow$APD+pin.

总均方噪声电流：$\langle i_N^2\rangle=\sigma_N^2=\sigma_Q^2+\sigma_{DB}^2+\sigma_{DS}^2=\langle i_Q^2\rangle+\langle i_{DB}^2\rangle+\langle i_{DS}^2\rangle$

$=2q(I_p+I_D)M^2F(M)B+2qI_LB$. 散弹噪声 $\sigma_S^2=2q(I_p+I_d)B$.

热噪声(放大器)：$\langle i_T^2\rangle=\sigma_T^2=\frac{4k_BT}{R_L}BF_n$ T⇒绝对温度. R_L负载：F_n放大倍数. 3dB→$F_n=2$.

信噪比：$\frac{S}{N}=\frac{\langle i_p^2\rangle M^2}{2q(I_p+I_D)M^2F(M)B+2qI_LB+4k_BTB/R_L}=\frac{I_p^2}{\sigma_S^2+S_T^2}$ $R_L=\frac{1}{2\pi BC_T}$

(光电检测器带宽).

光生载流子渡越时间 $t_d=\frac{w}{v_d}$. w耗尽层宽度. v_d漂移速度.

检测器带宽：$B=\frac{1}{2\pi R_TC_T}$. R_T电路电阻. C_T光电二极管结电容与放大器输入电容之和.

4. 光接收机—光接收机性能

相干检测：$P=2A_sA_{LO}$、$Amp=\frac{2A_sA_{LO}}{A_s^2}=2\sqrt{\frac{P_{LO}}{P_s}}$

误码率=误比特率 $BER=\frac{N_e}{N_t}=\frac{N_e}{Bt}$. N_e误判的码元数.

$BER=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_{Q/\sqrt{2}}^{\infty}e^{-x^2}dx\approx\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\frac{e^{-Q^2/2}}{Q}$、$Q=\frac{V_{th}-b_{off}}{\sigma_{off}}=\frac{b_{on}-V_{th}}{\sigma_{on}}$，$V_{th}=\frac{b_{on}\sigma_{off}+b_{off}\sigma_{on}}{\sigma_{off}+\sigma_{on}}$

$\sigma_{on}=\sigma_{off}=\sigma$. $b_{off}=0$. $b_{on}=V$. ⇒ $V_{th}=2$. $P_e(\frac{V}{\sigma})=\frac{1}{2}[1-erf(\frac{1}{2\sqrt{2}}\cdot\frac{V}{\sigma})]$. $\frac{V}{\sigma}\uparrow$. $P_e\downarrow$

$\frac{V}{\sigma}$ ⇒信噪比. $Q=\frac{V}{2\sigma}$.

(补充)

探测过程中受散弹噪声限制：$SNR=\frac{R_LR_d^2P_{in}^2}{4K_BTF_n\Delta f}$. 噪声等效功率 $NEP=\frac{P_{in}}{\sqrt{\Delta f}}$.

受热噪声限制：$SNR=\frac{R_dP_{in}}{2q\Delta f}$.

热噪声对噪声功率的贡献：$\frac{\sigma_T^2}{\sigma_S^2+\sigma_T^2}$. $\sigma_S^2=2q(I_p+I_d)\Delta f$. 对零差光接收机 $P_{LO}\gg P_s$. $I_d\ll I_p=R_dP_{LO}$. $\sigma_S^2\approx2qR_dP_{LO}\Delta f$

5. 光纤传输系统

链路功率损耗 $P_t=P_s-P_r=2I_c+\alpha_fL+redundance\,(dB)$. 损耗 $10\lg\frac{P_{out}}{P_{in}}(dB)$.

P_s⇒光纤入纤功率. P_r接收机灵敏度. I_c连接损耗. L光纤长度. α_f光纤衰减系数.

链路总展宽时间 $t_{sys}=(t_{tx}^2+t_{GVD}^2+t_{mod}^2+t_{rx}^2)^{1/2}$.

t_{tx}⇒接收机展宽时间 $t_{tx}=\frac{0.35}{B_{rx}}$. B_{rx}接收机3dB带宽(HZ)→上升时延. $t_{tx}(s)$.

群速色散展宽时间 $t_{GVD}=|D|L\sigma_\lambda$. D平均色散系数. L光纤长度. σ_λ光源半功率谱宽.

多模← 模式色散展宽时间 $t_{mod}=\frac{440L^q}{B_0}$. $B_0(MHz)$1公里光纤带宽, $t_{mod}(ns)$.

允许的展宽=$t=\frac{0.7}{B_{NRZ}}=\frac{0.35}{B_{RZ}}$.

对渐变折射率光纤=$t_{mod}=\frac{n_1\Delta^2}{8c}L$.

6. 光放大器—半导体光放大器(SOA)

SOA有源区z点处增益系数=$g(z)=\frac{g_0}{1+P_{sig}(z)/P_{sat}}$. g_0⇒无输入时最大增益系数

$P_{sig}(z)$⇒z点信号光功率. P_{sat}⇒放大器增益饱和时的入射光功率 g_{sat}饱和增益

长度dz内光信号功率增量=$dP_{sig}=g(z)P_{sig}(z)dz$.

增益 $G=\frac{P(L)}{P(0)}=G_0\exp(-\frac{P_{out}-P_{in}}{P_{sat}})$. $P(L)=P_{out}$输出光功率. $P(0)=P_{in}$输入光功率.(超越方程).

$G_0=\exp(g_0L)$饱和增益系数. L有源区长度. ⇒ G、G_0单位不是dB.

P_{sat}⇒从最大增益G_0下降到(G_0-3dB)处时的输入光功率

SOA增益=$G(\omega)=\exp[g(\omega)L]$. $g(\omega)=\frac{g_0}{1+(\omega-\omega_0)^2T_2^2+P/P_s}$. $\omega=\omega_0$时. $g(\omega)$取最大值$g(\omega_0)$

半高全宽($\frac{1}{2}g(\omega_0)$处的频率)=$\Delta\omega_g=\frac{2}{T_2}$. $\Delta\nu_g=\frac{\Delta\omega_g}{2\pi}=\frac{1}{\pi T_2}$ ⇒增益系数$g(\nu)$的3dB带宽

SOA增益带宽=$\Delta\nu_A=\Delta\nu_g[\frac{\ln2}{\ln(G_0/2)}]^{1/2}$.

6. 光放大器—掺铒光纤放大器(EDFA).

$P_{s,out}\le P_{s,in}+\frac{\lambda_p}{\lambda_s}P_{p,in}$. $P_{s,in}$⇒EDFA输入功率. $P_{s,out}$⇒EDFA输出功率. $P_{p,in}$⇒注入的泵浦能量.

功率转换效率=$PCE=\frac{P_{s,out}-P_{s,in}}{P_{p,in}}\approx\frac{P_{s,out}}{P_{p,in}}=\frac{\lambda_p}{\lambda_s}=\frac{\nu_s}{\nu_p}$ $(P_{s,in}\approx0)$. ≤1

若无自发辐射：$P_{s,out} \lessapprox P_{s,in} + \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \cdot P_{p,in}$.

增益 $G = \frac{P_{s,out}}{P_{s,in}} \leq 1 + \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \cdot \frac{P_{p,in}}{P_{s,in}}$. $P_{s,in} \gg \frac{\lambda_p}{\lambda_s} P_{p,in}$ 时. $G \approx 1$. $P_{s,out}, P_{s,in} \Rightarrow mW$.

长为L的EDFA最大增益 $G_{max} = e^{\rho\sigma_e L}$. $\Rightarrow G \leq \min\{e^{\rho\sigma_e L}, 1 + \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \cdot \frac{P_{pin}}{P_{s,in}}\}$.

6. 光放大器—拉曼光纤放大器 (FRA)

P_0 = 输入泵浦功率 $\alpha_s = \frac{\alpha_s(dB)}{4.34}$.

输出信号功率 $= P_s(L) = P_s(0) exp(g_R P_0 L_{eff}/a_p - \alpha_s L)$. $a_p = A_{eff}$ = 有效模场面积.

$g_R \Rightarrow$ 拉曼增益系数 m/W.

拉曼放大器增益：$G_A = \frac{P_s(L)}{P_s(0) exp(-\alpha_s L)} = exp(g_0 L)$. $P_s(0)$ 入纤功率. 小信号忽略泵浦损耗.

小信号增益系数：$g_0 = g_R(\frac{P_0}{a_p})(\frac{L_{eff}}{L}) \approx \frac{g_R P_0}{a_p \alpha_p L}$. $\Rightarrow e^{g_0 L} P_s(0) = P_s(L)$. $L_{eff} = \frac{1 - exp(-\alpha_p L)}{\alpha_p} \approx \frac{1}{\alpha_p}$

6. 光放大器—放大器噪声.

$i_{PD} = R P_{opt} \propto (E_s + E_n)^2 = E_s^2 + E_n^2 + 2E_s E_n$. 噪声系数 $F_n = \frac{(SNR)in}{(SNR)out}$.

放大前：量子噪声极限 $\sigma_s^2 = 2q(R_d P_{in})\Delta f$、信噪比 $(SNR)in = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_s^2} = \frac{(R_d P_{in})^2}{2q(R_d P_{in})\Delta f} = \frac{P_{in}}{2h\nu\Delta f}$.

放大后：$\sigma^2 = 2q(R_d G P_{in})\Delta f + 4(R_d G P_{in})(R_d S_{ASE})\Delta f$. $(SNR)_{out} = \frac{(R_d G P_{in})^2}{\sigma^2} \approx \frac{G P_{in}}{(4S_{ASE} + 2h\nu)\Delta f}$.

$S_{ASE}(\nu) = n_{sp} h\nu (G-1)$.

$F_n = \frac{(SNR)in}{(SNR)out} = \frac{1 + 2n_{sp}(G-1)}{G} \approx 2n_{sp}$. 粒子数反转因子 $n_{sp} = \frac{n_2}{n_2 - n_1} \approx 1$.

$F_n \geq 2 = 3dB$. $F_{min} = 2 = 3dB$.

系统信噪比 (N段光纤. N+1级EDFA)：$(P_{out} e^{-\alpha L})G + 2n_{sp}(G-1)h\nu B_0 = P_{out}$

$Ge^{-\alpha L} = 1$ 时：$P_{ASE} = 2n_{sp}(G-1)h\nu B_0 (N+1) = F_n(G-1)h\nu B_0(N+1)$. $F_n = 2n_{sp}$. $G = e^{\alpha L}$

$OSNR = \frac{P_{s,out}}{P_{ASE}} = \frac{P_{s,out}}{F_n(G-1)h\nu B_0(N+1)}$. $\Delta P_{s,out} = P_{s,in}$. $\Rightarrow$ 无损耗.

$OSNR_{dB} = P_{s,out(dB)} - [F_{n(dB)} + G_{dB} + 10lg(h\nu B_0) + 10lg(N+1)]$.

$\Rightarrow$ 给定码率 B、中继距离配置，求系统最大传输距离.

7. 多信道系统 WDM.

传输容量 = 单信道比特率 (B) × 波长信道数 (N).

色散补偿光纤 (DCF)：$\beta_{21}L_1 + \beta_{22}L_2 = D_1L_1 + D_2L_2 = 0$.

啁啾光纤光栅补偿技术：色散 $= (2n_{eff} L/C)/(1/\Delta\lambda_c)$ ps/nm

受激布里渊散射限制了光纤最大入射光功率. 随入纤功率增加而增加，随光源线宽减小而减小.

受激拉曼散射限制WDM系统的总光功率和波长数.

自相位调制SPM与色散导致的啁啾效应的区别. 色散将SPM产生的相位调制转化为光强度畸变

大信道间隔. 大光纤色散 $\Rightarrow$ 减小XPM. XPM是IM-DD光纤通信系统最主要限制因素.

光源 → pn结加正向电压. 单纵模LD性能 → 边模抑制比

~~光检~~ 光电检测器 → pn结加反向偏压 — 光电二极管.

入射光功率较小时. 电路噪声 (热噪声) 占主要. APD较好. 功率较大时. 量子噪声为主. pin较好

模式分配噪声是单模光纤最主要的噪声，需使用单纵模激光器

光放大器与激光器唯一区别：光放大器没有正反馈机制

光放大器→PN结加正向偏压实现粒子数反转

光放大器引入ASE噪声，致累积OSNR下降，不考虑色散（损耗限制系统）成为限制传输距离主要因素。

级联EDFA系统：光纤损耗不是限制因素，⇒色散限制系统。

光纤色散为线性效应，可补偿，非线性效应不可补偿。

采用周期内分段补偿避免通道内非线性

采用预补偿值减低脉冲峰值功率减小非性