

学习整理

目录：

- 1、[激光原理](#)
- 2、[光纤光学](#)
- 3、[光通信器件&光纤传感](#)
- 4、[光学](#)
- 5、[固体激光简介](#)
- 6、[机器视觉](#)
- 7、[液晶显示](#)

进度：

日期：2020.06； 液晶显示

tip: 理论-实践-应用-工具-

[Principle of laser](#)

慕课

Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

? (Meser)

激光的特性：单色性好，相干性好，方向性好，亮度高

{

单色性？：飞秒种子光多纵模振荡，输出波长几十到几百纳米；光子晶体产生白色激光（
基于啁啾调制的非线性超晶格产生高次谐波）；相干性：单色性越好，相干长度越大，飞秒激光
相干长度短；方向性：M2；

}

高的光子简并度

光波模式、光子态、振荡频率空间分布

简介

光量子：黑体辐射、光电效应、康普顿散射

光子简并度：处于同一光子态的光子数

简并能级：能级对应多个电子态

自发辐射、受激辐射、受激吸收

$dn_2/dt = -A_{21} * n_2$ 产生噪声光子

$dn_1/dt = -W_{12} * n_1$

$$dn_2/dt = -W_{21} * n_2$$

由热平衡条件黑体辐射玻尔兹曼分布，普朗克公式得到 爱因斯坦关系：

$$B_{12}g_1 = B_{21}g_2$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} = n_v h\nu ;$$

$$\text{增益系数} G = \Delta n \sigma_{21}$$

条件：粒子数反转分布、正反馈 增益大于损耗 亚稳态能级，阈值

$$\text{光子数密度 } \frac{dN}{dt} = \rho B_{21} n_2 - \rho B_{12} n_1 = W_{21} n_2 - W_{12} n_1 = \Delta n W_{21}$$

$$n_2/g_2 > n_1/g_1; \quad n_2 - n_1 g_2/g_1$$

$$\text{正反馈: } \nu = \frac{c}{2nl} q; \quad \Delta\nu = \frac{c}{2nl} \text{ 驻波条件}$$

空间相干性-方向性、时间相干性-单色性、光子简并度-单色亮度

相干体积=相干面积：空间相干性 * 相干长度=相干时间*c：时间相干性

$$\text{相干长度 } \Delta c = \frac{\lambda^2}{\Delta\nu} \quad \text{线宽: 对于连续光谱的半高宽度 cw 窄线宽一般 khz}$$

窄线宽激光器

由于增益低，谐振腔一般用平凹腔（稳定腔模体积大几何损耗小）

光放大器、谐振腔：提供反馈、选模 增益介质 泵浦源

$$\text{模式密度 } n_v = \frac{8\pi h\nu^2}{c^3} \left(\text{二维: } \frac{4\pi h\nu}{c^2}, \quad F-P: \frac{4}{c} \right)$$

腔损耗：腔镜透射、衍射、几何偏折、腔内元件的吸收散射

- 单程损耗因子 δ
- 光子腔内平均寿命： $\tau = L/\delta c$
- 增益系数： $G = \Delta n \sigma_{21} = \delta/L$
- 无源腔线宽： $\Delta\nu = \Delta\lambda \left(\frac{c}{\lambda^2} \right) = 1/2\pi\tau$
- 品质因素Q：单位时间存储和损耗的能量之比 $\omega \cdot \tau = \frac{\nu}{\Delta\nu}$
- 纵横间隔： $c/2nl$
- 菲涅尔数： $N = \frac{a^2}{L\lambda}$

稳定腔：几何损耗小 模体积小 不同横模衍射损耗小容易多模振荡

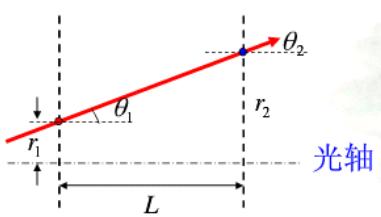
非稳腔：相反

实际中存在激光晶体（热效应不均匀性-存在热透镜f与泵浦功率有关[参考 2-4]），

调Q、非线性晶体 等效光程/腔长）

模体积：描述某一腔模在腔内扩展的空间体积

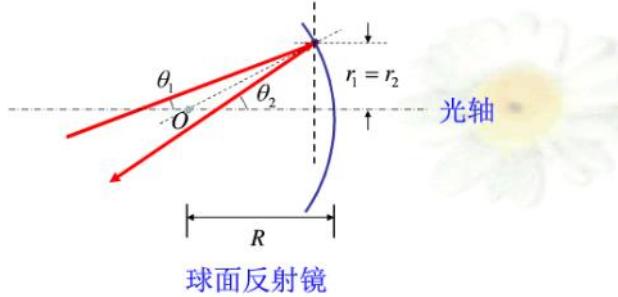
近轴传输矩阵



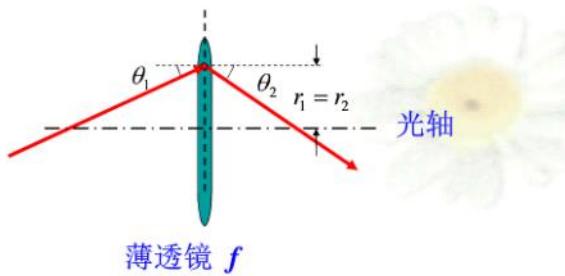
自由空间

$$\begin{cases} r_2 = r_1 + L \tan \theta_1 \\ \theta_2 = \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_2 = r_1 + L\theta_1 \\ \theta_2 = \theta_1 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$

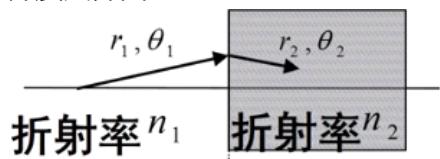


$$\begin{cases} r_2 = r_1 \\ \theta_2 = \theta_1 - \frac{2}{R} r_1 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$

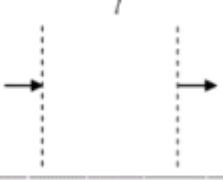
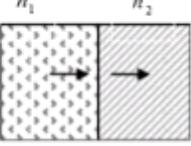
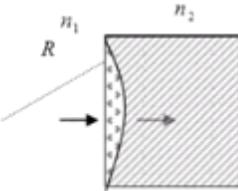
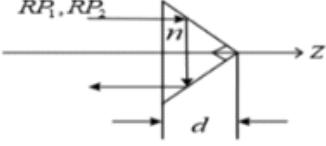
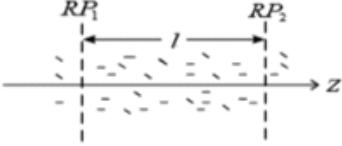
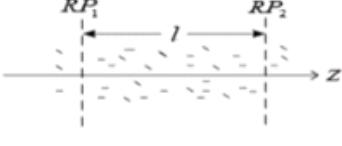


$$\begin{cases} r_2 = r_1 \\ \theta_2 = \theta_1 - \frac{1}{f} r_1 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$

介质交界面



$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1 / n_2 \end{pmatrix}$$

均匀介质		$T = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
折射率突变平面		$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1 / n_2 \end{pmatrix}$
折射率突变球面		$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & n_1 / n_2 \end{pmatrix}$
锥形反射镜		$T = \begin{pmatrix} -1 & \frac{2d}{n} \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$
正透镜介质		$T = \begin{pmatrix} \cos(\beta l) & \frac{1}{\beta} \sin \beta l \\ -\beta \sin \beta l & \cos \beta l \end{pmatrix}$ $n = n_0(1 - \frac{1}{2}\beta^2 r^2), \beta > 0$
正透镜介质		$T = \begin{pmatrix} ch(\beta l) & \frac{1}{\beta} sh(\beta l) \\ -\beta \sin(\beta l) & ch(\beta l) \end{pmatrix}$ $n = n_0(1 + \frac{1}{2}\beta^2 r^2), \beta > 0$

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_i \\ \theta_i \end{bmatrix}$$

往返一周变换矩阵：光线经过各光学元件变换矩阵的逆向乘积

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^n &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^n \\ &= \frac{1}{\sin \varphi} \begin{bmatrix} A \sin n\varphi - \sin(n-1)\varphi & B \sin n\varphi \\ C \sin n\varphi & D \sin n\varphi - \sin(n-1)\varphi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\varphi = \arccos \frac{1}{2}(A+D)$$

共轴球面腔的稳定性条件

$$-1 < \frac{1}{2}(A+D) < 1$$

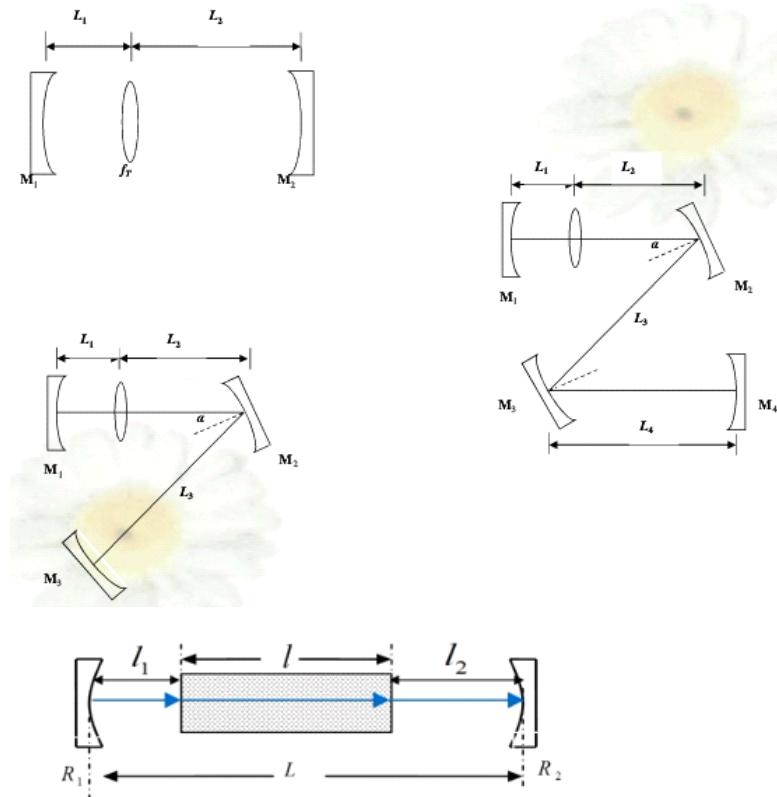
简单两镜共轴球面腔的稳定性条件:

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1$$

$0 < g_1 g_2 < 1$ g : 腔几何参数因子

等价对称共焦腔 (适用于两球面镜)

多元谐振腔只能用A+D判别

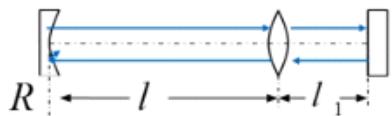


从左边镜面通过介质棒到达右边镜面
的变换矩阵:

$$T_L = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l/n \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & l/n + (L-l) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

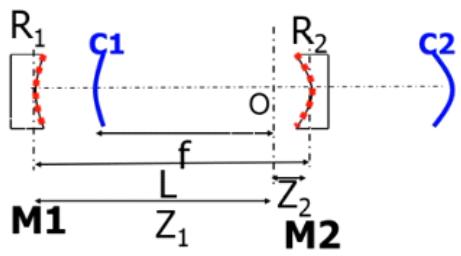
等效为腔长 $L_{eff} = L + l(1/n - 1)$
谐振腔



$$T_{F,l} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F & 1 \end{pmatrix}$$

$$T = T_R T_l T_{F,l} T_l$$

一个球面稳定腔唯一与一个对称共焦腔等价



$$R_1 = -R(z_1) = -(z_1 + \frac{f^2}{z_1})$$

$$R_2 = R(z_2) = z_2 + \frac{f^2}{z_2}$$

$$L = z_2 - z_1$$

$$z_1 = \frac{L(R_2 - L)}{2L - R_1 - R_2}$$

$$z_2 = \frac{-L(R_1 - L)}{2L - R_1 - R_2}$$

$$f = \left[\frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(2L - R_1 - R_2)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

球面稳定腔R1、R2、L -等价对称共焦腔得到Z1、Z2、f

谐振腔的衍射

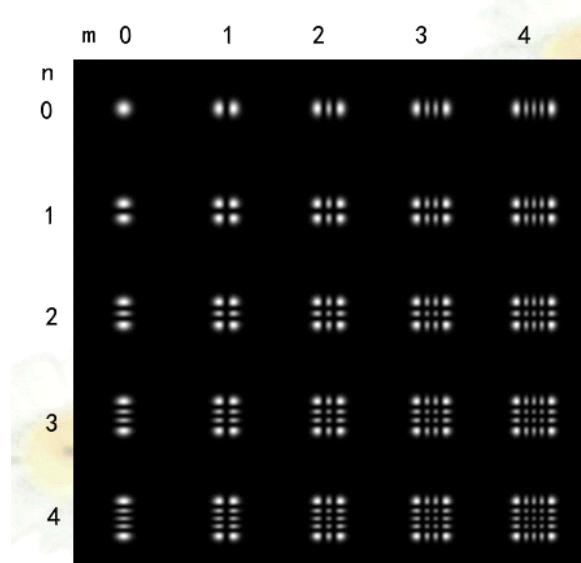
模式自再现：多次衍射后形成稳态场衍射后场分布不再变

衍射积分方程对应傅里叶变换

满足傅里叶变换为本身的解为厄米多项式和高斯函数

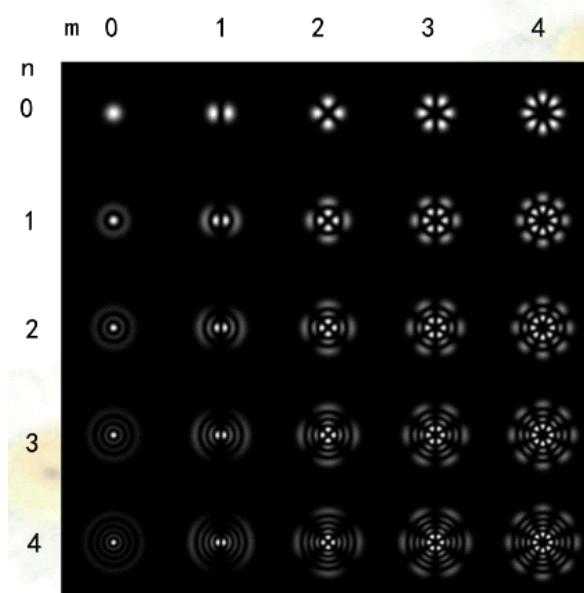
方形腔镜

厄米-高斯模式 (TEM_{mn})



圆形腔镜

拉盖尔-高斯模式 (TEM_{mn})



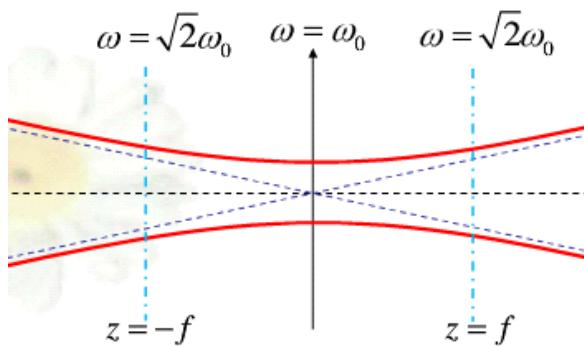
基模高斯光束

振幅部分	相位部分
$E(r, z) = A \frac{\omega_0}{\omega} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right) \exp\left(-ikz - i \frac{r^2}{2R} - \arctan \frac{z}{f}\right)$	

$$\omega = \omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2}$$

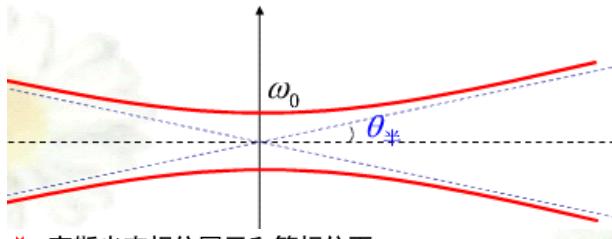
光腰半径: ω_0

准直距离/瑞利距离: $f = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$



$$\omega = \omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2}$$

远场半发散角: $\theta_{\pm} = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\omega(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi \omega_0}$



↳ 高斯光束相位因子和等相位面

$$\phi = -ikz - i \frac{r^2}{2R} - \arctan \frac{z}{f} \quad \Rightarrow \quad R(z) = z + \frac{f^2}{z}$$

高斯光束q参数 $q = z + if$ z : 光腰距离, f : 共焦参数

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)}$$

$$q = \frac{Aq + B}{Cq + D}$$

ABCD定律: $q_o = \frac{Aq_i + B}{Cq_i + D}$ 模式自再现 $q_o = q_i$

求解-> 由矩阵元 $AD - BC = 1$

q_o :

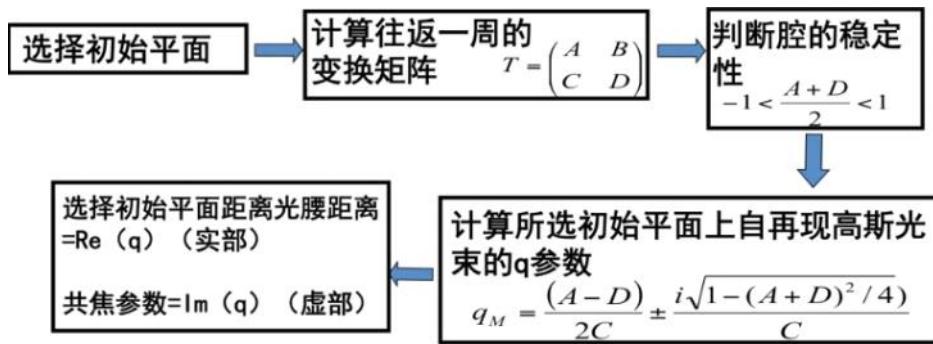
$$= \frac{(A - D)}{2C} \pm \frac{i \sqrt{1 - (A + D)^2 / 4}}{C}$$

\Rightarrow

$$\begin{cases} z_o = \frac{(A - D)}{2C} & \text{出发平面M处:} \\ f = \frac{\sqrt{1 - (A + D)^2 / 4}}{|C|} & \text{距离光腰的距离} \end{cases}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{D - A}{2B} \pm i \frac{\sqrt{1 - (A + D)^2 / 4}}{B}$$

$$\begin{cases} R_M = \frac{2B}{D - A} & \text{出发平面M处的:} \\ \omega_M = \left(\frac{\lambda |B|}{\pi (1 - (A + D)^2 / 4)^{1/2}} \right)^{1/2} & \text{等相位面曲率半径} \\ & \text{光斑半径} \end{cases}$$



高斯光束聚焦准直

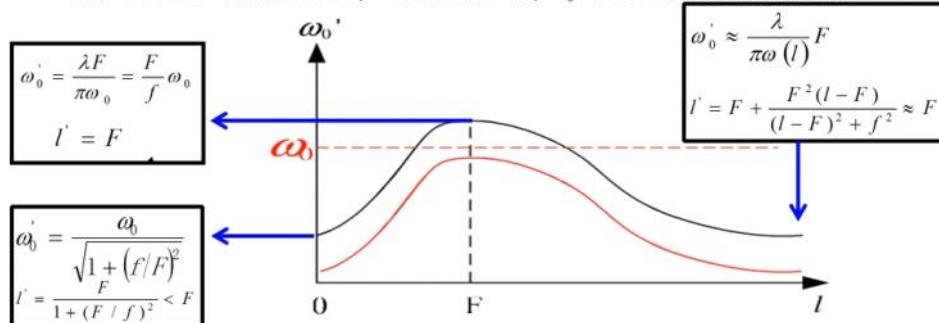
当 $|l - F| \gg f$ 时 (高斯光束光腰距离透镜很远 l 很大; 高斯光束光腰很小, 或者 f 很小) :

$$l' = \frac{lF}{l-F} \quad \frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{1}{F} \text{ 几何光学透镜成像公式}$$

$$\frac{\omega_0'}{\omega_0} = \frac{F}{l-F} = \frac{l'}{l} \quad \text{几何光学透镜成像放大率公式}$$

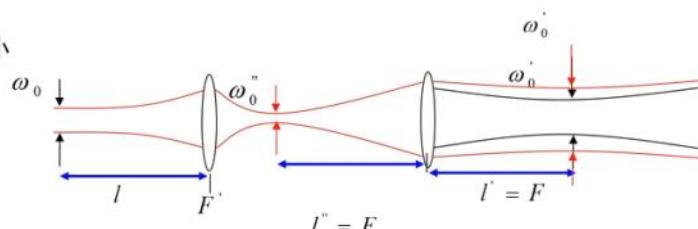
可用几何光学方法近似研究高斯光束成像规律

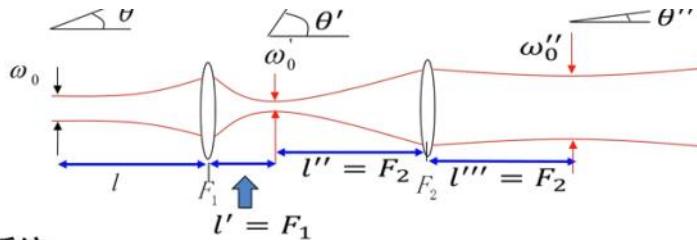
综合以上三点的讨论, F 为定值时, ω_0' 随 l 的变化规律为:



为获得好的聚焦效果, 可采用的方法有:

- 入射高斯光束光腰位置远离透镜的焦平面, $l \gg F, l \gg f$
- 入射高斯光束光腰位于透镜上, $l = 0$, 并设法满足 $f \gg F$
- 尽量采用短焦距透镜, F 要小
- 前面的讨论中有结论: 当 $l = F$ 时, ω_0' 有最大值 $\omega_0' = \frac{\lambda F}{\pi \omega_0} = \frac{F}{f} \omega_0$
- 此时 $\theta' = 2 \frac{\lambda}{\pi \omega_0} = 2 \frac{\omega_0}{F}$, $\frac{\theta'}{\theta} = \frac{f}{F}$
- 因此当物方高斯光束光腰位于透镜焦平面上时, 即 $l = F$ 时
 F 越大, 像方发散角越小
 ω_0' 越小, 像方发散角越小
- 更好方案?
• 先用一个透镜压缩高斯光束的光腰半径
($\omega_0 \rightarrow \omega_0'$ 变小)





倒置望远镜系统

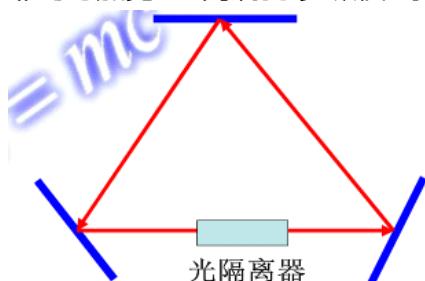
• F1为短焦距透镜, $l \gg F_1$, 将物方高斯光束汇聚于焦平面 $l' = F_1$, 像方光腰半径取最小值为 $\omega'_0 = \frac{\lambda}{\pi\omega(l)} F_1$

• F2为长焦距透镜, $l'' = F_2$ 时可准直, 发散角压缩率为

$$M = \frac{\theta}{\theta''} = \frac{\theta}{\theta' \theta''} \quad \frac{\theta}{\theta'} = \left(\frac{2\lambda}{\pi\omega'_0} \right) / \left(\frac{2\lambda}{\pi\omega_0} \right) = \frac{\omega'_0}{\omega_0} \quad \frac{\theta'}{\theta''} = \frac{F_2}{f'} = \frac{F_2\lambda}{\pi\omega_0'^2}$$

均匀加宽 增益饱和-纵模模式竞争 中心频率 单纵模

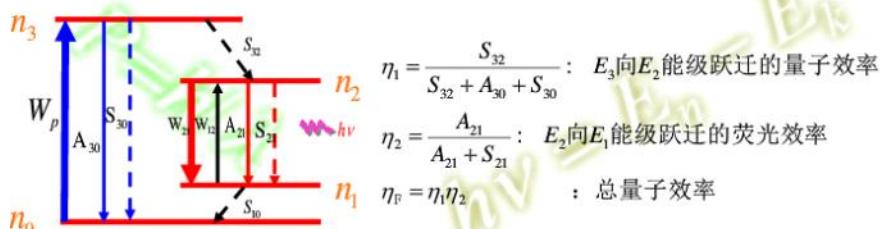
非均匀加宽 空间烧孔 多纵模 泵浦增大-满足阈值的纵模变多 多纵模振荡



光隔离器 单向传播 光波为行波, 消除空间烧孔。

速率方程

$$\begin{cases} \frac{dn_0}{dt} = n_1 S_{10} + n_3 (S_{30} + A_{30}) - n_0 W_p \\ \frac{dn_2}{dt} = n_1 W_{12} - n_2 W_{21} - n_2 (A_{21} + S_{21}) + n_3 S_{32} \\ \frac{dn_3}{dt} = n_0 W_p - n_3 (S_{30} + A_{30}) - n_3 S_{32} \\ n_0 + n_1 + n_2 + n_3 = n \end{cases} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \frac{dn_0}{dt} = n_1 S_{10} + n_3 (S_{30} + A_{30}) - n_0 W_p \\ \frac{dn_2}{dt} = n_1 W_{12} - n_2 W_{21} - n_2 \frac{A_{21}}{\eta_2} + n_3 S_{32} \\ \frac{dn_3}{dt} = n_0 W_p - n_3 \frac{S_{32}}{\eta_1} \\ n_0 + n_1 + n_2 + n_3 = n \end{cases}$$



假设腔内存在频率为 ν 的单模光场, 则

$$\frac{dN_l}{dt} = n_2 W_{21} - n_1 W_{12} - \frac{N_l}{\tau_{RL}}$$

受激辐射 受激吸收 谐振腔损耗项 自发辐射被忽略

准三能级 ND: YAG 946nm

受激吸收/发射截面

$$W_{12} = \sigma_{12} c_n N_l$$

$$W_{21} = \sigma_{21} c_n N_l$$

$$\sigma_{12} = \frac{g_2}{g_1} \sigma_{21}$$

$$\text{反转粒子数密度 } \Delta n = n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1$$

$$\text{增益系数 } G = \Delta n \times \sigma_{21} = \Delta n \frac{c^2 A_{21}}{8\pi v_0^2} g(v, v_0)$$

连续泵浦:

$$\text{阈值泵浦功率 } p_t = \frac{h\nu_p \Delta n_t A_{21}}{\eta_1 \eta_2}$$

- 三能级阈值>四能级阈值
- 四能级阈值由损耗决定
- 三能级阈值决定主要因素不是损耗，而是总粒子数n

$$\text{阈值泵浦功率 } p_t = \frac{h\nu_p n A_{21}}{2\eta_1 \eta_2}$$

$$\text{脉冲泵浦: 四能级阈值泵浦能量 } E_t = \frac{h\nu_p \Delta n_t}{\eta_1} \quad \text{三能级 } E_t = \frac{h\nu_p n}{2\eta_1}$$

增益饱和 增益烧孔 模式竞争 空间烧孔 (驻波波峰处出现饱和下降)

兰姆凹陷: 激光频率等于原子中心频率时, 激光功率下降

- 均匀加宽连续工作激光器, 存在模式竞争, 倾向于输出单模激光!
- 空间烧孔可能导致多模振荡

问题: 均匀加宽脉冲激光器, 也倾向于输出单模激光吗?

均匀加宽脉冲激光器, 如果脉冲时间小于模式竞争时间, 由于模式竞争过程没有结束, 所以不一定是单模输出!

模式竞争过程时间大约是微秒量级!

均匀加宽单模激光输出:

$$\text{腔外输出功率 } P_0 = \frac{1}{2} I_s(\nu_q) TS_{eff} \left[\frac{G_H^0(\nu_q)L}{\delta} - 1 \right]$$

腔外输出功率

$$P_0 = \frac{1}{2} I_s(\nu_q) TS_{eff} \left[\frac{2G_H^0(\nu_q)L}{\alpha' + T} - 1 \right]$$

谐振腔损耗

$$\delta = \alpha - \frac{1}{2} \ln(1-T) \approx \alpha + \frac{T}{2} \quad (T \rightarrow 0)$$

α ---单程损耗指数因子 (除有用透射外)

$\alpha' = 2\alpha$ ---往返损耗指数因子 (除有用透射外)

$$\delta = \frac{\alpha' + T}{2}$$

增加输出功率方法:

- ✓ 加大泵浦激励 ($G_H^0(\nu_q)$)
- ✓ 减小除有用透射外的其他损耗 (α')
- ✓ 增大工作物质长度 (L) 和面积 (大于 S_{eff})
- ✓ 透射率 T 存在最优值

多普勒加宽时:

$$\text{输出功率 } P_0 = I^+ TS_{eff} = S_{eff} T I_s \left\{ \left[\frac{G_i^0(\nu_0)L}{\delta} e^{-\frac{4\ln 2(\nu_q - \nu_0)}{\Delta\nu_D^2}} \right]^2 - 1 \right\}$$

$$\text{输出功率 } P_0 = I^+ TS_{eff} = \frac{1}{2} S_{eff} T I_s \left[\left(\frac{G_i(\nu_0)L}{\delta} \right)^2 - 1 \right]$$

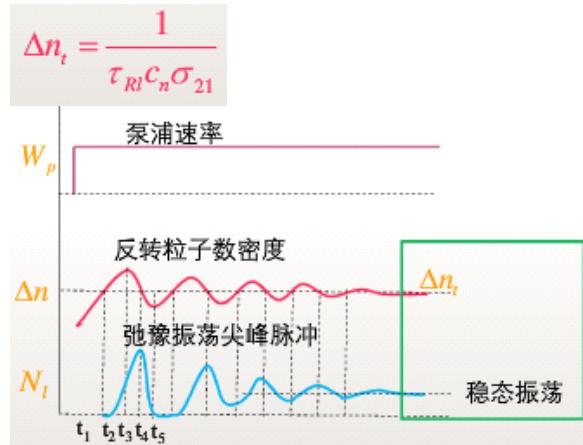
脉冲工作:

输出能量密度:

$$E_0 = \frac{\nu_0}{\nu_p} \eta_0 \eta_1 E_t \left(\frac{E_p}{E_t} - 1 \right)$$

$$E_t = \frac{h\nu_p \Delta n_t}{\eta_1}$$

弛豫振荡: 上能级反转粒子数密度变化的振荡过程, 激光打开瞬间产生纳秒量级的尖峰脉冲, 限制峰值功率, 加大泵浦增加尖峰脉冲个数。



线宽 (考虑自发辐射)

- 稳态时, 受激辐射产生的增益略小于损耗, 其不足部分由自发辐射补充。
- 激光输出功率由两部分组成: $P_0 = P_{st} + P_{sp}$
- 自发辐射部分具有随机相位, 输出激光是略有随机相位的有限长波列, 具有一定线宽

$$\Delta \nu_s = \frac{\delta_s c}{2\pi L}$$

$$\Delta \nu_s = \frac{n_{2t}}{\Delta n_t} \frac{2\pi (\Delta \nu_c)^2 h \nu}{P_0} \approx \frac{n_{2t}}{\Delta n_t} \frac{2\pi (\Delta \nu_c)^2 h \nu_0}{P_0}$$

其中无源腔线宽: $\Delta \nu_c = \frac{1}{2\pi \tau_R} = \frac{\delta c}{2\pi L} = \frac{Tc}{4\pi L}$

- 输出功率越大, 线宽越窄
- 光腔损耗越小及腔长越大, 线宽越窄

实际激光的线宽主要是受各种不稳定因素的影响, 即使最精密的频率稳定技术, 也很难将激光线宽稳定在上式所给出极限之内。

同时还存在 温度漂移, 折射率变化的影响

频率牵引 (工作物质的色散)

选模:

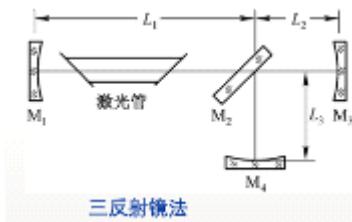
1. 短腔法单纵横选择

$\Delta \nu = \frac{c}{2nL}$ 缩短腔长, 使纵横间隔大于增益曲线阈值宽度。

2. F-P标准具

使对应频率透过

3.



两个谐振腔的纵模频率间隔分别为： $c/2n(L_1+L_2)$ 和 $c/2n(L_2+L_3)$

单横模选择：衍射损耗--菲涅尔数N增大而减少--通过光阑控制

调制：

电光调制：强度、相位调制

泡克耳斯效应（线性）、克尔效应（二次）

纵向（不存在自然双折射，半波电压高）、横向电光效应

起偏器 - 电光晶体 - 1/4波片 - 检偏器

声光调制：声光效应：超声场-弹性波应力-光弹效应-散射衍射

- 拉曼-奈斯衍射（声波频率低、作用长度短、传播方向垂直）- 平面相位光栅
- 布拉格衍射（声波频率较高、作用长度较长、传播方向成一定角度）- 相当于通过多个光栅产生0、1级衍射光

$$L_o = \lambda_s^2 \cos \theta_i / \lambda \approx \lambda_s^2 / \lambda$$

定量标准可以写为：

$$\begin{cases} L \geq 2L_o \text{ (布拉格衍射区)} \\ L \leq \frac{1}{2}L_o \text{ (拉曼-纳斯衍射区)} \end{cases}$$

声光体调制器AOM：由声光介质、电-声换能器（逆压电效应）、吸声/反射（行波/驻波）装置、驱动电源组成

磁光调制

直接调制：LD直接调制

调Q：抑制弛豫振荡--改变阈值（Q值/损耗突变）--巨脉冲

$$Q = 2\pi\nu \frac{\epsilon}{P} = \omega\tau = \omega \frac{L}{\delta c}$$

$$\Delta n_t = \frac{\delta}{\sigma_{21}} = \frac{2\pi\nu L}{\sigma_{21}lcQ}$$

增益介质几何长度

低重频调Q中通常取泵浦持续时间约等于或小于上能级寿命，以减少自发辐射损耗。

合适的上能级寿命、泵浦速率快、Q值改变要快

调Q速率方程：

$$\begin{cases} \frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{\Delta n}{\Delta n_t \tau_R} \phi \\ \frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{\Delta n}{\Delta n_t} - 1 \right) \frac{1}{\tau_R} \phi \end{cases}$$

$$\delta = \frac{1}{\tau_R} \text{ 单位时间的损耗}$$

1. 调Q脉冲的峰值功率

(d)

$$\text{若除输出外其它损耗可忽略 } P_m = \frac{\phi_m hV}{\tau_R} = \frac{hV}{2\tau_R} \left[\Delta n_t - \Delta n_f + \Delta n_t \ln \left(\frac{\Delta n_t}{\Delta n_i} \right) \right]$$

$$\text{否则 } P_m = \frac{\phi_m hV}{2L} \frac{-\ln(1-T)c}{}$$

如果初始反转粒子数 Δn_i 大大超过阈值反转粒子数 Δn_t (高Q值状态) 则得:

$$P_m \approx \frac{hV \Delta n_t}{2\tau_R}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta n_f}{\Delta n_i} = \exp \left(\frac{\Delta n_f - \Delta n_i}{\Delta n_t} \right)$$

有效输出占
总损耗的比重

$$\text{脉冲能量 } E = \frac{1}{2} (\Delta n_i - \Delta n_f) hV \frac{\delta_2}{2\delta}$$

$$\text{能量利用率 } \eta_E = \frac{\Delta n_i - \Delta n_f}{\Delta n_i}$$

Δn_f : 脉冲结束对应的反转粒子数

光子数密度 ϕ 满足:

$$\phi = \frac{1}{2} \left[\Delta n_i - \Delta n_f + \Delta n_t \ln \left(\frac{\Delta n_t}{\Delta n_i} \right) \right]$$

从而得到 ϕ 与 t 的关系, 进一步得到输出功率与 t 的关系。

$$\text{峰值光子数密度 } \phi_m = \Delta n_i - \Delta n_f + \Delta n_t \ln \left(\frac{\Delta n_t}{\Delta n_i} \right)$$

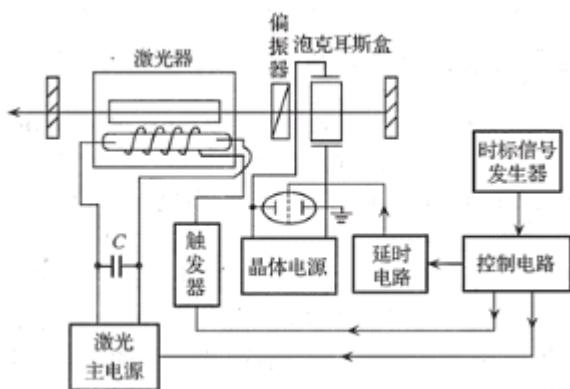
$$\text{峰值功率 } P_m = \frac{\phi_m hV}{2L} = \frac{hV}{2L} \left[\Delta n_i - \Delta n_f + \Delta n_t \ln \left(\frac{\Delta n_t}{\Delta n_i} \right) \right]$$

$$\text{脉冲能量 } E = (\Delta n_i - \Delta n_f) hV \frac{-\ln(1-T)}{2\delta}$$

$$\text{能量利用率 } \eta_E = \frac{\Delta n_i - \Delta n_f}{\Delta n_i}$$

$$\text{工程上脉冲宽度的计算公式: } \Delta t = \frac{E}{P_m}$$

电光调Q: 开关时间10-9s、输出脉冲-10ns



- 对电容C充电，并接于氙灯电极，但不导通故不点燃。
- 给KDP加电压，使腔处于关闭状态。
- 时标信号发生器发出脉冲信号，停止对电容充电，同时触发器点燃氙灯，反转粒子数开始大量积累。
- 当粒子数反转到最大时，通过延时电路的信号加到闸流管，电光晶体上的电压瞬时退掉，形成激光振荡和巨脉冲输出。
- 调节延时时间，使输出激光最强。

脉冲反射式PRM

透射式PTM调Q：输出镜为全反镜，Q开关打开反转粒子-腔内光子无输出（储能），瞬间将光子透射输出。先振荡到最大值，再瞬间释放（腔倒空）

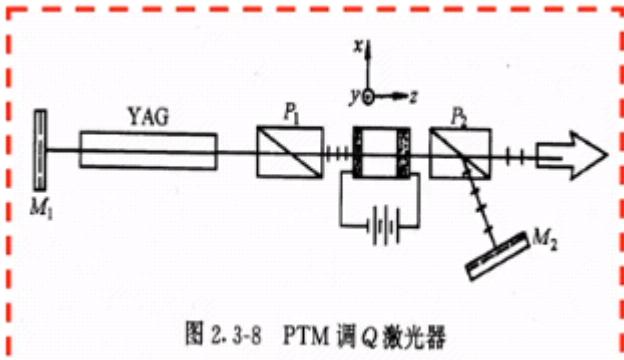


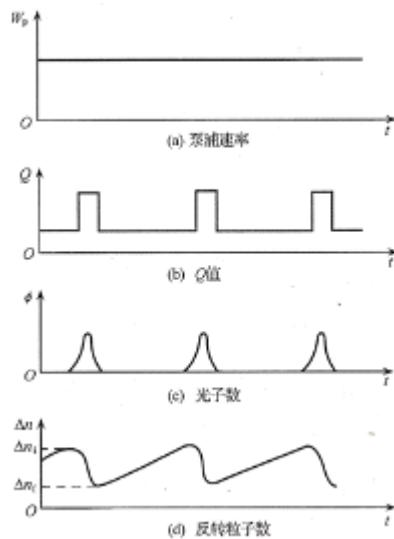
图 2.3-8 PTM 调 Q 激光器

特点：脉宽窄，噪声大、光束质量难以控制。

1. 调Q晶体材料的选择

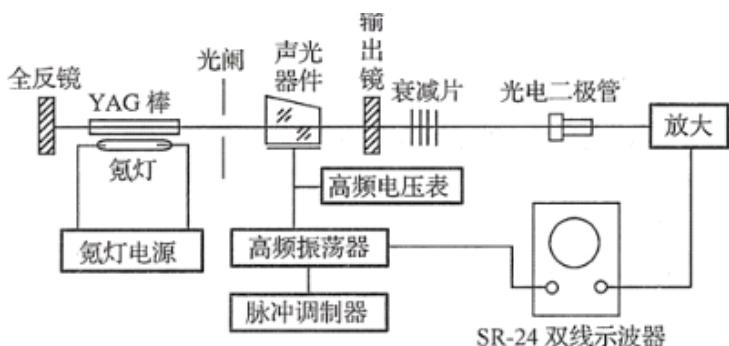
- 消光比高，晶体折射率的均匀性好
- 透过率高。
- 半波电压低，驱动功率低。
- 抗破坏阈值高。
- 晶体防潮，KDP类晶体易潮解，LN晶体不潮解

声光调Q：一般用于增益较低的连续泵浦激光器（打开时间小于脉冲建立时间），重频一般为1-200kHz，可达1MHz以上。



声光介质的选择应考虑介质的品质因数、对激光的透过率、热稳定性、光学均匀性、抗损伤阈值等。

- ①氧化碲和钼酸铅的品质因数高，但对 $1\mu\text{m}$ 激光透过率低，不适用于高功率激光。
- ②熔融石英品质因数不高，但透光性好、抗损伤阈值高、声光渡越时间小，是高功率激光器常用的声光介质。



被动调Q：饱和吸收（染料）体

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_s}}$$

初始吸收系数
饱和吸收光强

饱和吸收光强与染料的种类和浓度有关，一般随浓度的增加而增大。

调Q过程描述：（1）染料初始吸收系数较大，随着反转粒子数的积累，到足以克服初始吸收和其它损耗时，激光开始建立。（2）随着光强的增大，吸收系数减小，即谐振腔损耗减小，这种“正反馈”作用，加速了激光脉冲的建立，产生一个窄而强的调Q脉冲。

染料上能级寿命大于光脉冲建立时间

避免寄生振荡

可饱和吸收初始透过率约等于输出镜透过率

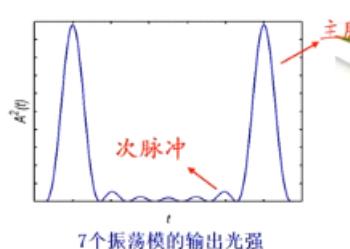
色心晶体

锁模：大量纵模振荡并保持固定相位关系，形成相干叠加 脉冲间隔 $t=2L/c$

$$\text{纵模间隔 } \Delta\nu = \frac{c}{2nL}$$

不同频率的纵模相干叠加（光学频率梳）

$$A(t) = E_0 \frac{\sin \left[\frac{1}{2} (2N+1) \Delta\omega t \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} \Delta\omega t \right]}$$



➢ $A(t)$ 为周期函数，从周期、极值、零点的角度讨论其特点：

- ① $A(t)$ 的周期为 $2L/c$ ，在一个周期内有 $2N$ 个零值点，以及 $2N+1$ 个极值点；
- ② 在 $t=0$ 和 $t=2L/c$ 时， $A(t)$ 取得极大值，振幅为 $(2N+1)E_0$ ；
- ③ $A^2(t)$ 在一个周期内有 $2N-1$ 个次极大，各极大值之间的间隔相等。

➢ 两个主脉冲的间隔恰好是一个光脉冲在腔内往返一周的时间；

➢ 锁模振荡事实上只有一个光脉冲在腔内往返传播。

- ① 激光器的输出是间隔为 $\tau=2L/c$ 的规则脉冲序列；

①激光器的输出是间隔为 $\tau=2L/c$ 的规则脉冲序列；

$$\text{②每个脉冲的宽度 } \Delta\tau = \frac{1}{2N+1} \frac{2L}{c} = \frac{1}{(2N+1)\Delta\nu_q}$$

近似等于振荡线宽的倒数；

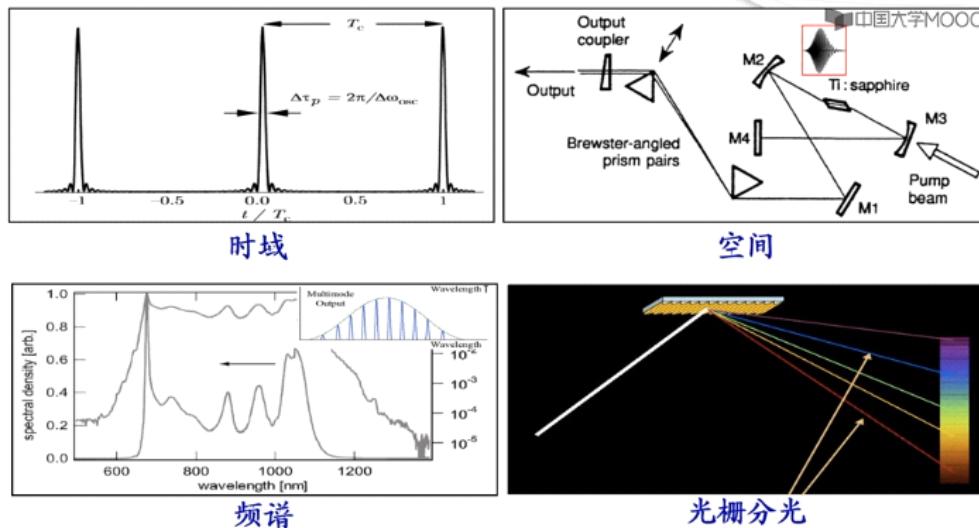
增益线宽越宽，可能得到的锁模脉宽越窄；

③输出脉冲的峰值功率正比于 $E_0^2(2N+1)^2$ ；

对比：自由运转的激光器的平均功率正比于 $E_0^2(2N+1)$ ；

④输出峰值功率高、脉冲宽度窄的脉冲序列。

特点：各振荡模发生功率耦合，每个脉冲的功率由所有模式提供。



主动锁模：周期性调制谐振腔的参量，调制频率与纵模间隔相等

振幅调制锁模：调制器放在腔一端，损耗调制频率 $=c/2L$ ，调制后产生相同相位的边频相干叠加。

相位调制锁模：插入电光调制器，产生相位延迟

主动锁模激光器中所有光学元件的要求应比一般调Q器件更加严格。

插入元件的端面反射率必须控制在最小，否则由于标准具效应会减少纵模个数，破坏锁模的效果。

为此，各元件的透射端面应切成布儒斯特角，或镀增透膜，反射镜作成楔形。



调制器尽量放在腔内靠近反射镜处，得到最大的纵模耦合。

调制频率满足：

$$f_m = \Delta\nu_q = \frac{c}{2L} \text{ (Phase modulation)} \quad f_m = \frac{1}{2} \Delta\nu_q = \frac{c}{4L} \text{ (Amplitude modulation)}$$

否则会使激光器工作超出锁模区

纵模间隔与调制频率存在偏差产生失谐，通过电子反馈电路补偿。

被动锁模：可饱和吸收体的非线性吸收特性

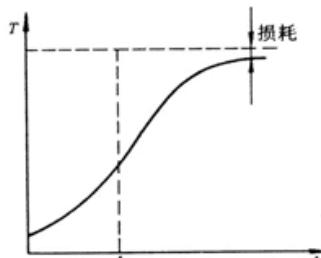
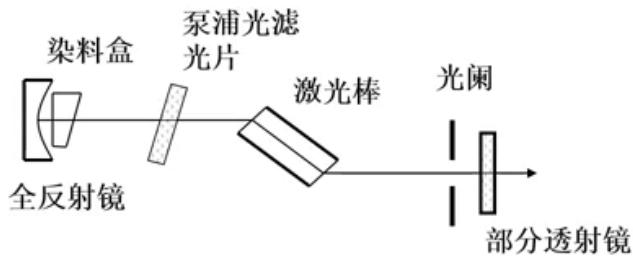


图 3.3-1 可饱和染料的吸收特性

- 光脉冲每经过染料和工作物质一次，其强弱信号的强度相对值就改变一次，在腔内多次循环后，极大值和极小值之差会越来越大。
 - 最终强脉冲的前沿不断被削陡，而尖峰部分能有效地通过，则使脉冲变窄。
- 要求可饱和吸收体的上能级寿命特别短，小于 $2L/c$ 。

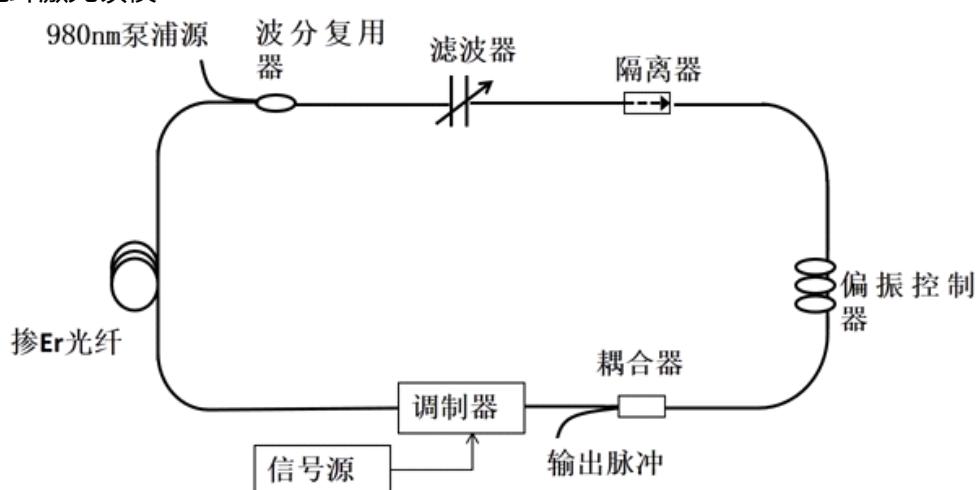
同步泵浦锁模：周期性的调制谐振腔增益

自锁模：激活介质的非线性效应

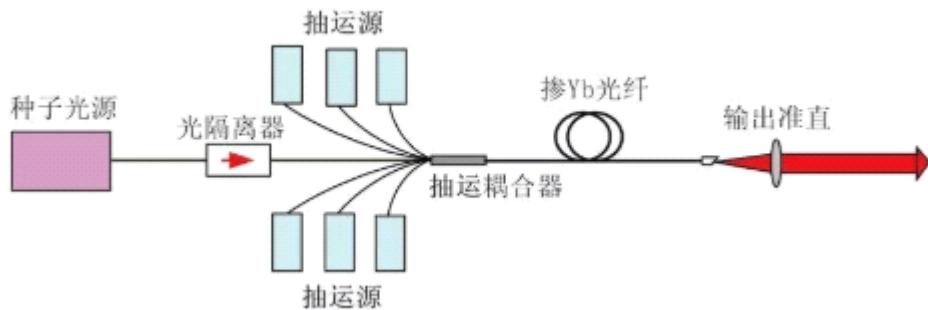
克尔透镜锁模（钛蓝宝石增益介质中的克尔效应引起的光束自聚焦有光）

SESAM锁模

光纤激光锁模



MOPA光纤



非线性效应:

非线性极化-张量

二阶非线性-倍频、和频、差频 (非对称晶体) 三阶-光学相位共轭 (球对称晶体)

非线性波动方程-和频或差频需满足动量 (相位) 匹配

耦合波方程解

倍频SHG

倍频效率为

$$\eta_{SHG} = \frac{I_2(L)}{I_1(0)} = \frac{2\omega_1^2}{\epsilon_0 c^3 n_2 n_1^2} d_{eff}^2 L^2 \frac{\sin^2(\Delta k L / 2)}{(\Delta k L / 2)^2} I_1(0)$$

(1) 倍频效率正比于基频光强，因此基频光能量密度越高，倍频效率越高。所以为了提高倍频效率，通常将基频光聚焦。

(2) 倍频效率正比于有效倍频极化系数的平方 d_{eff}^2 ，所以需选用非线性系数大的晶体。

(3) 在相位匹配 $\Delta k = 0$ 的情况下，倍频效率最高。由于

$\Delta k = (4\pi/\lambda)(n_2 - n_1)$ ，所以要实现相位匹配，基频光折射率要等于倍频光

(4) 倍频效率与晶体的长度有关。

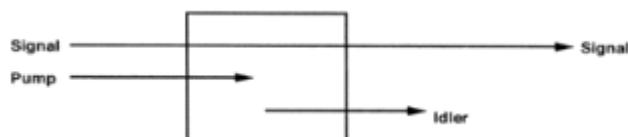
$$L_c = \frac{\pi}{\Delta k} = \frac{\lambda_1}{4(n_2 - n_1)}$$

在 $L=L_c$ 时，倍频光达到极大。 $L > L_c$ 后，倍频光逐渐减小
所以晶体的长度等于 L_c 即可。

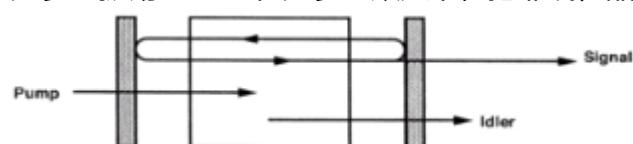
和频THG

差频DFG

光参量放大OPA



光参量振荡OPO: 在光参量放大下，把非线性晶体放在谐振腔内构成光参量振荡器



振荡的信号光和空闲光的频率决定于相位匹配条件

$$\begin{aligned}\hbar\omega_p &= \hbar\omega_s + \hbar\omega_i \\ \hbar\vec{k}_p &= \hbar\vec{k}_s + \hbar\vec{k}_i\end{aligned}\quad (8.3-21)$$

和纵模振荡条件

$$\varphi_s + \frac{\omega_s}{c} 2L_s = 2\pi s \quad (s = 1, 2, 3, 4 \dots)$$

通过连续调节晶体的角度或温度使不同频率的信号光和空闲光满足 (8.3-21) 式，从而实现大范围连续调谐。

OPA 光参量放大

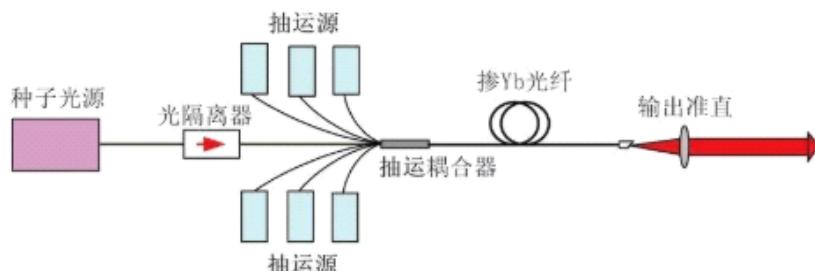
CPA 喷射脉冲放大

OPCPA 光参量喷射脉冲放大

DFB: Distributed Feedback 分布式反馈

DBR: Distributed Bragg reflector 分布式布拉格反射

MOPA: Master Oscillator Power Amplifier



SBS 受激布里渊散射

SRS 受激拉曼散射

光学镜片常用参数：



光学镜片常
用参数含义

光纤光学

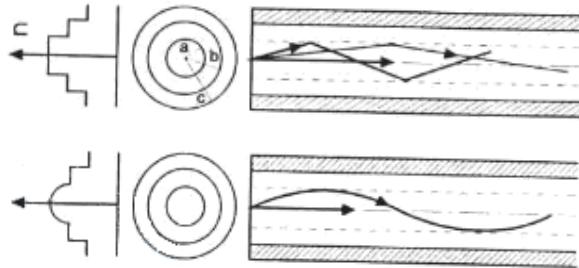
[慕课](#)

光纤：纤芯、包层、涂覆层

分类：

用途：通信/非通信（传感、传像）

纤芯折射率：阶跃折射率分布 (SIOF)、渐变折射率分布 (GIOF)



传输模式：单模、多模

$$\text{模式数 } M = \frac{g}{2(g+2)} V^2 \quad V: \text{归一化频率}$$

光纤芯包结构：芯包结构、微结构（光子晶体光纤）

微结构：折射率导引、带隙导引光子晶体光纤

材料：石英、塑料、红外光纤

特种光纤：保偏光纤、有源光纤、晶体光纤、色散位移、负色散光纤、特殊涂层…

光纤的设计制备（管外法）

改善光纤的传输特性：

- 减少OH⁻，降低损耗；
- 改变芯径和结构参数，色散位移；
- 改变折射率分布，降低非线性。

石英材料中 纤芯掺GeO₂和P₂O₅，折射率增加； 掺B₂O₃，折射率减少。

设计问题：

- 折射率剖面分布
- 掺杂浓度
- 纤芯与包层尺寸

考虑：损耗、色散、色散斜率、有效面积、宏弯特性、PMD等

预制棒法制备工艺：

清洗：碱洗-去除油脂、酸洗-去除金属氧化物、离子水冲洗

制棒：气相沉积法-管外法/管内法（OVD、VAD / MCVD、PCVD）

拉丝：预制棒加热到1850-2000°C、拉丝并检测光纤直径和控制拉丝速度、光纤外径

(125mm) 进行聚丙烯酸酯涂敷 (250mm)

控制参数：玻璃光纤外径圆度同心度、涂层厚度同心度质量

筛选、测试

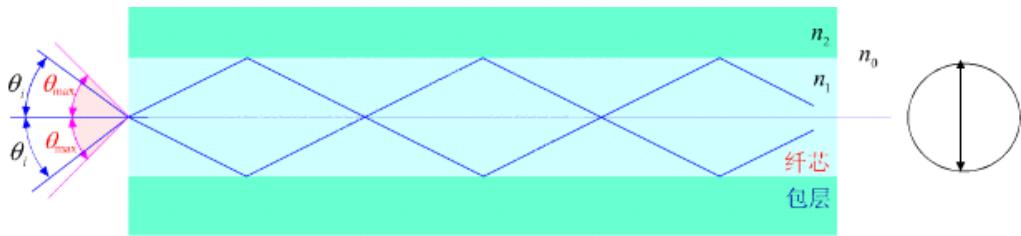
分析方法

几何光学：光线、光线轨迹

波动光学：模式、模式分布

麦克斯韦方程组-波动方程-亥姆赫兹方程-波导场 -边界条件-本征解

[分析过程（慕课）](#)



子午光线在阶跃光纤中的传输

临界角=arccos (n₂/n₁)

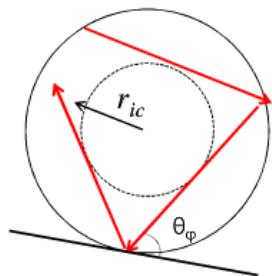
$$\text{数值孔径NA} = n_i \sin \theta_{im} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2 \text{ 相对折射率差}$$

$$\text{最大时延差}=t_0 \ (n_1/n_2-1) = 1/\text{通信容量}$$

→多模阶跃光纤：通信容量不高，光线不聚焦

倾斜光线



给定参数结构的光线中，模式分布固定，根据本征方程数值计算得到各阶导模传播常数与归一化频率的关系-色散曲线

根据色散曲线得到

$$\text{单模条件: } V_c = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2.405$$

$$\text{单模光纤尺寸: } a_c = \frac{1.202\lambda_0}{\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

$$\text{单模截止波长: } \lambda_c = \frac{\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{1.202}$$

传输的模式HE₁₁模

渐变折射率光纤分析

...

光纤的损耗

$$\alpha = -\frac{10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)}{L} \quad (\frac{dB}{km})$$

另一表达式

$$\alpha = -\frac{(P_{out}(dBm) - P_{in}(dBm))}{L}$$

$$dBm = 10 \log_{10}(P(mW))$$

衰减系数 α_f

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha_f L}$$

$$\alpha = 10 \alpha_f \log_{10}(e)$$

来源：材料的吸收散射损耗、微弯宏弯损耗、连接耦合损耗

通信窗口：

0.85um、1.31um、1.55um

S波 (1.49-1.53um)

C波 (1.53-1.57um)

L波 (1.57-1.61um)

光纤的弯曲损耗

对于一般的多模光纤， $R > 10\text{cm}$ 就可以不考虑弯曲损耗；

对于一般的单模光纤， $R > 6\text{cm}$ 就可以不考虑弯曲损耗。

补偿：电放大（光-电-光）、全光放大（EDFA、拉曼放大器）

光纤的色散与脉宽展宽



光纤色散->脉冲展宽

多模光纤色散：模间、材料色散

单模光纤色散：材料、波导、偏振模色散

色散在传输信号中反映为群延时

光纤色散：光源谱宽为1nm时，光脉冲信号传播1km所引起的脉冲展宽的ps数

$$D = \frac{d\tau_g}{d\lambda}$$

(Ps/km.nm)

$$\text{可以估计展宽 } \Delta\tau_g = \frac{d\tau_g}{d\lambda} \delta\lambda \quad \frac{\text{ps}}{\text{km}}$$

在多模光纤中，不同的模式以不同的群速度传输；

光脉冲由不同的模式支持传输，就会导致色散；

SIOF光纤的模间色散比GIOF的模间色散大；

利用光线传输模型，可以分析模间色散。

降低模间色散：采用GIOF减少不同模式的群速度差异、单模光纤SMF减少模式数目

最佳GIOF折射率分布参数 $g=2(1-\Delta)$ ，一般选择 $\Delta= 2\%$ ， $g = 1.96$

材料色散：

$$\frac{d\tau_n}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$$

材料色散是折射率对波长的二阶导数，
属折射率随波长的非线性变化

正常色散、反常色散...

光纤传输带宽：函数H(f)下降至最大值的一半对应的全频带宽

均方脉宽 σ ： $h(t)$ 下降到最大值 $e^{-\frac{1}{2}}$ 时所需的时间。

3dB和 e^{-1} 脉宽 τ_{3dB} 、 τ_e ：光脉冲下降到一半和 e^{-1} 时的全宽度脉宽。

$$\sigma = \frac{\tau_{3dB}}{2\sqrt{2\ln 2}} \approx 0.4247\tau_{3dB}$$

$$\sigma = \frac{\tau_e}{2\sqrt{2}} \approx 0.3536\tau_e$$

传输带宽BW=

$$\frac{2\ln 2}{\pi} \cdot \frac{1}{\tau_{3dB}} \approx \frac{0.4413}{\tau_{3dB}}$$

$$\frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi} \cdot \frac{1}{\tau_e} \approx \frac{0.53}{\tau_e}$$

G.652标准单模光纤 (SMF)

标准单模光纤是指零色散波长在 $1.3\mu m$ 窗口的单模光纤，国际电信联盟 (ITU - T) 把这种光纤规范为G.652光纤。

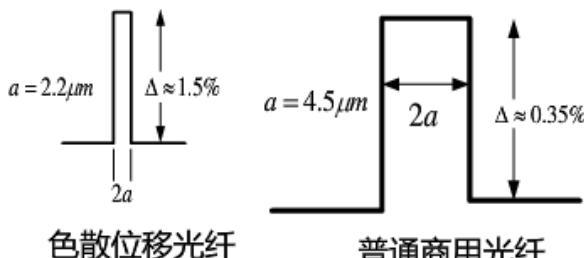
其特点是当工作波长在 $1.3\mu m$ 时，光纤色散很小，系统的传输距离只受光纤衰减所限制。但这种光纤在 $1.3\mu m$ 波段的损耗较大，约为 $0.3dB/km \sim 0.4dB/km$ ；在 $1.55\mu m$ 波段的损耗较小，约为 $0.2dB/km \sim 0.25dB/km$ 。色散在 $1.3\mu m$ 波段为 $3.5ps/nm\cdot km$ ，在 $1.55\mu m$ 波段的损耗较大，约为 $20ps/nm\cdot km$ 。这种光纤可支持用于在 $1.55\mu m$ 波段的 $2.5Gb/s$ 的干线系统，但由于在该波段的色散较大，若传输 $10Gb/s$ 的信号，传输距离超过50公里时，就要求使用价格昂贵的色散补偿模块。

色散位移光纤 (DSF)

短波 $0.85\mu m$ 材料色散大，波导色散可忽略

长波 $1.3-1.55\mu m$ ，材料色散随波长增加而减小，出现零色散区

G.653色散位移光纤



G.655 (非零色散光纤)

G.656色散平坦光纤

色散补偿光纤 (DCF)

光纤光栅色散补偿

单模光纤模场半径

$$\frac{2}{W_0} \exp\left(-\frac{r^2}{W_0^2}\right)$$

W_0 为模场半径，即为 $1/e^2$ 光场强度的半径，即在 W_0 处，光功率为中心的 $1/e^2$ 。

波长越短，模场半径越小

实验定义：功率传输函数、最大激发效率、近（远）场二阶矩阵定义模场半径

截止波长：临近基模的高阶模 LP11 截止的波长

光纤参数测量

损耗、折射率分布、带宽（色散与基带频率响应）、数值孔径、模场直径、截止波长

参 数	RTM	ATM
衰减系数	切断法	插入损耗法；背向散射法
折射率分布	折射近场法	近场法
基带响应	时域法；频域法	
色散系数	相移法；脉冲时延法	
数值孔径	折射近场法	远场法
模场直径	(无)	传输场法；横向偏移法
截止波长	传导功率法	模场直径与波长关系法

参考：[光纤光学慕课](#)

自聚焦透镜： 折射率分布沿径向渐变的柱状光学透镜，聚焦、成像，梯度变折射率透镜

自聚焦程数： $\sqrt{A} = \frac{\sqrt{2\Delta}}{a}$ Δ : 相对折射率差

GRIN透镜

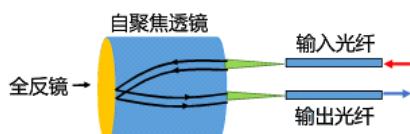
应用



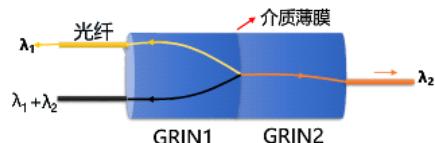
0.25P自聚焦透镜

光纤准直器、光开关

- 双光纤准直器（端面镀全反射膜）



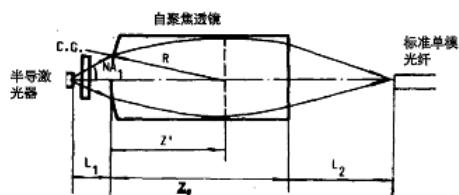
- 波分复用器件（端面镀带通滤波薄膜）



光源与光纤的耦合：0.23P 节距 角向压缩

光纤与光器件的耦合：0.29P 光斑压缩

● 光源与光纤间的耦合



● 光纤与半导体光放大器间的耦合



光纤耦合器：传送和分配光信号的无源器件（合波分波）

光纤中模式的耦合来实现：当两个光纤的纤芯平行靠近时，一个光纤中的波导场引起另外一个光纤介质极化，导致光纤中激起传导模，光场相互渗透交叠。

类型：（透射、反射、透反型）

耦合长度 L_0

针对具体的波长，光能量从一个光纤完全进入另一个光纤最小长度。

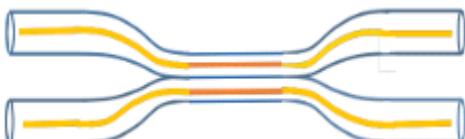
耦合长度 $L_0 = \pi / 2K$

耦合强弱 K

取决于两光纤纤芯的分离程度。

- 弱导阶跃光纤， K 可以表示如下：

$$K = \frac{\lambda_0}{2\pi n} \cdot \frac{U^2}{a^2 V^2} \cdot \frac{K_0(Wd/a)}{K_1^2(W)}$$
 d ：为两光纤之间的距离。



Y型：分光/合光

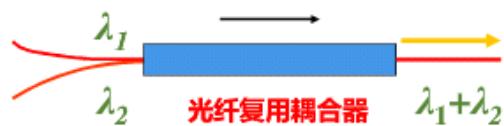
tap耦合器99: 1

主要参数：耦合比、附加损耗、插入损耗、隔离度

制备工艺：浸蚀、磨削、熔锥法

- ① 浸蚀法：腐蚀、匹配、胶合；
- ② 磨削法：磨、匹配液、对拼、精确对位、胶合；
- ③ 熔锥法：按所要求的端数、一定的耦合矩阵将光纤胶合在一起，加热拉伸成双锥形，控制过程中监控光功率。

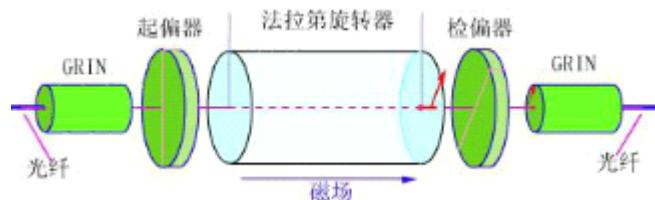
波分复用器



波分复用/解复用技术：将一系列载有信息、但波长不同的光信号合成一束并沿着单根光纤传输，最后在接收端将各个不同波长的光信号分开的通信技术

应用：光纤通信、光纤放大器（泵浦光和信号光的合波）、双向拉曼放大

隔离器

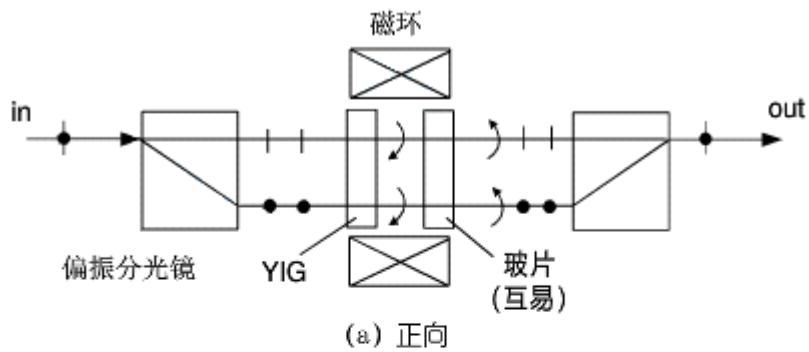


磁光介质 (YIG)

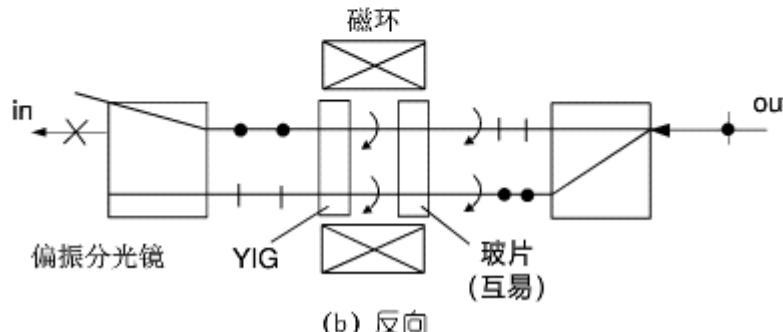
偏振相关->损失一半->无偏振

分解成两个正交偏振光，分别处理再合成。

(偏振分光棱镜PBS、法拉第旋光片、45°互易旋光片)



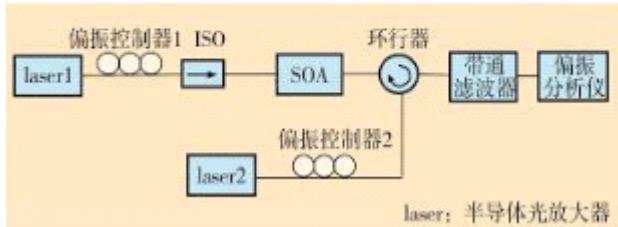
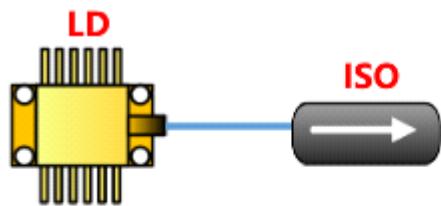
(a) 正向



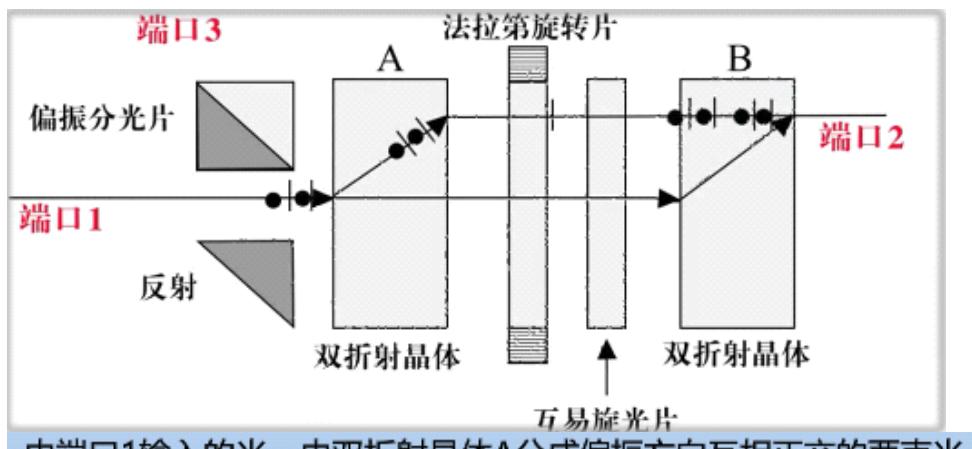
(b) 反向

主要参数：插入损耗、隔离比、偏振灵敏度、回波损耗、带通带宽

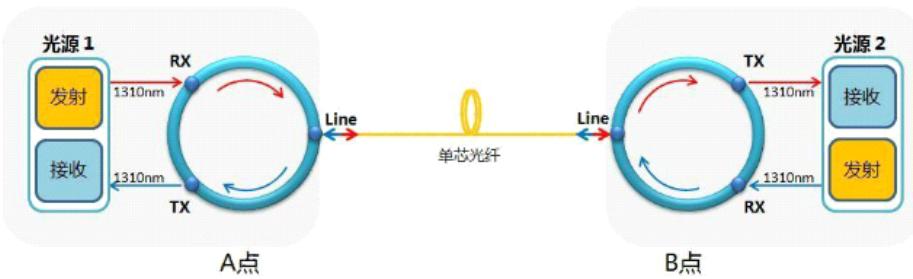
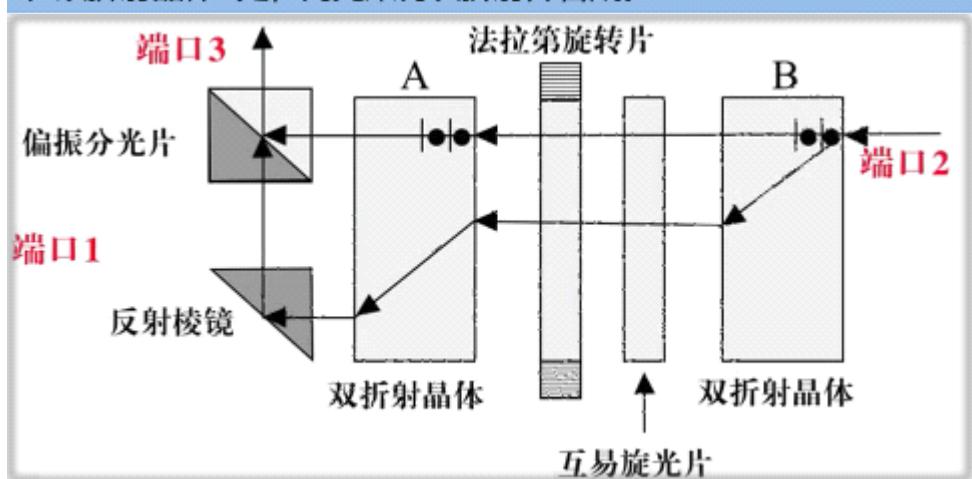
应用：半导体激光器、光纤放大器EDFA



光环形器



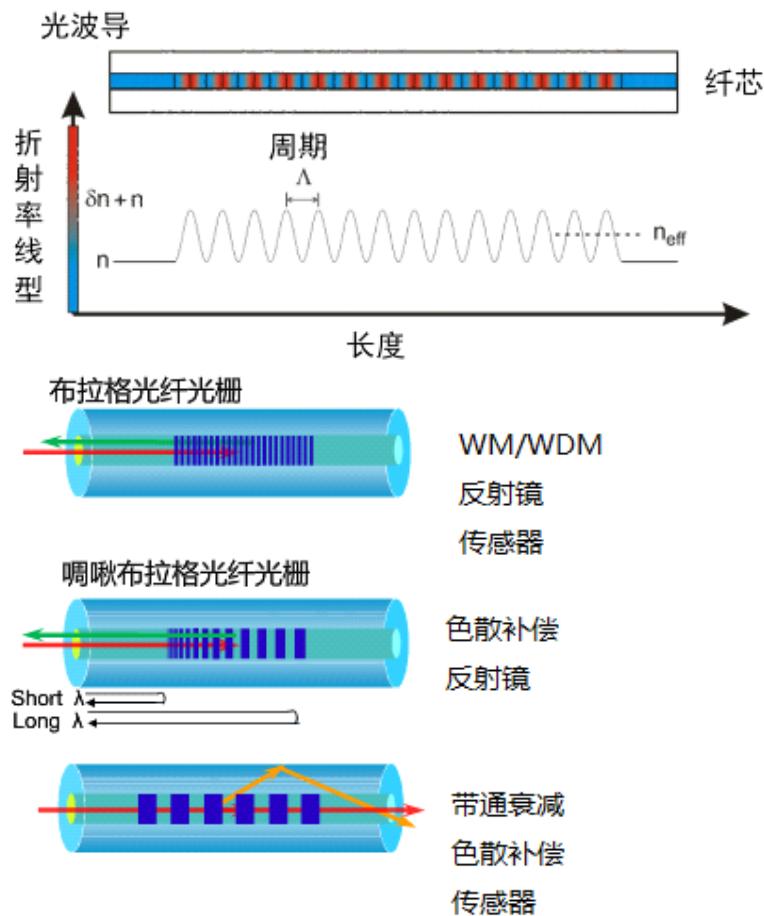
由端口1输入的光，由双折射晶体A分成偏振方向互相正交的两束光。
这两束光的偏振方向均发生 90° 的旋转。
在双折射晶体B处，两光束再次折射并合成。



在OTDR系统中的应用：利用单根光纤实现双向传输

光纤光栅

通过纤芯折射率调制



光纤模式耦合：

相向传播的导模间的耦合 -> 布拉格反射光纤光栅

导模与包层模间的耦合 -> 长周期光纤光栅（透射）

Bragg光纤光栅的传输特性的改变

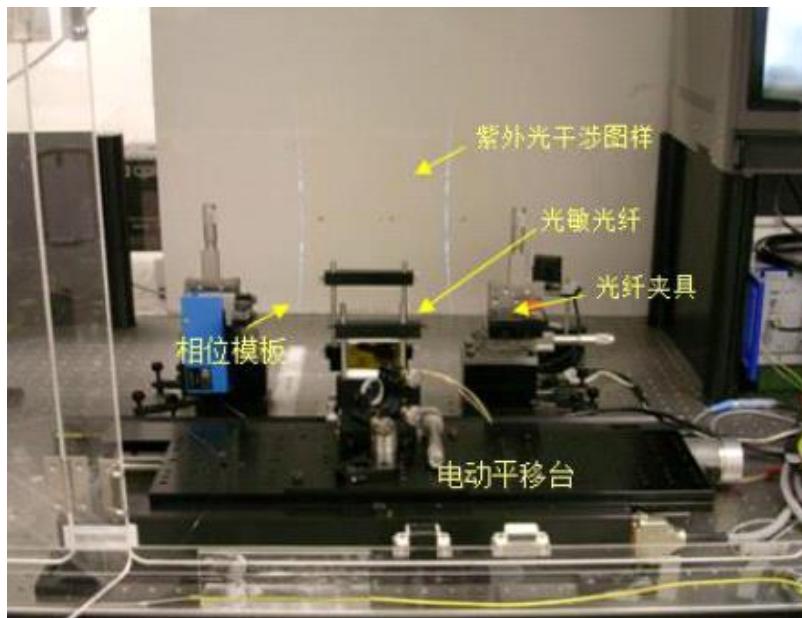
- 消除旁瓣：采用变迹光纤光栅（**折射率的调制沿z轴改变**）。
- 拓宽传输带宽：采用啁啾光纤光栅（**光栅周期沿z轴改变**）。
- 多通道：采用取样光纤光栅（**光栅结构沿z轴周期性出现**）。

闪耀光栅...

掺杂光纤中的光敏性（色心）

通过增加掺杂、共掺杂、载氢

制备方法：全息法、逐点写入、相位掩膜板



光纤光栅的应用：稳定激光器波长、色散补偿、WDM中波长选择，滤波、光纤传感

光纤放大器

半导体激光放大器SOA

掺杂光纤放大器DFA

拉曼放大器（光纤的非线性效应）

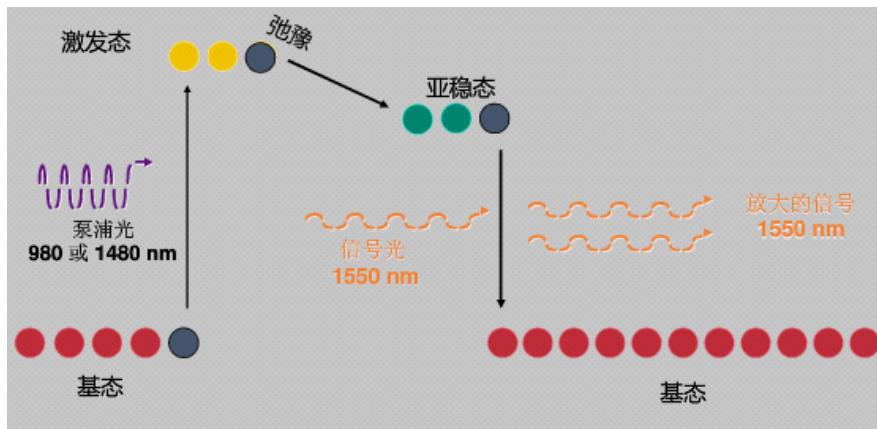
有源光纤 (Er 1.53μm)

EDFA

泵浦波长选择

1480nm (相当于二能级系统，粒子数反转不完全，泵浦效率高，噪声差)

980nm (相当于三能级系统完全的粒子数反转，噪声好效率低)



自发辐射产生噪声ASE

基本结构：前向泵浦、后向泵浦、双向泵浦

光纤激光器

与放大器区别：外部信号光引起受激辐射-自发辐射光子引起的受激辐射

存在谐振腔

光纤激光器=光纤放大器+谐振腔

谐振腔类型：

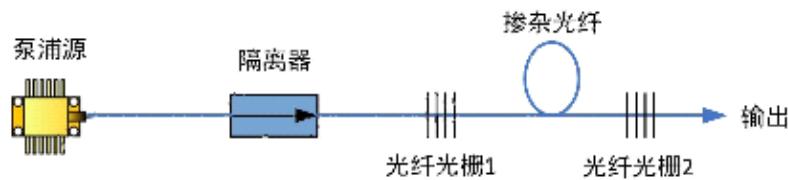
F-P腔

光纤环形镜：X型光纤耦合器两输出端相连构成Sagnac环

耦合器分光比为1：1时为全反射

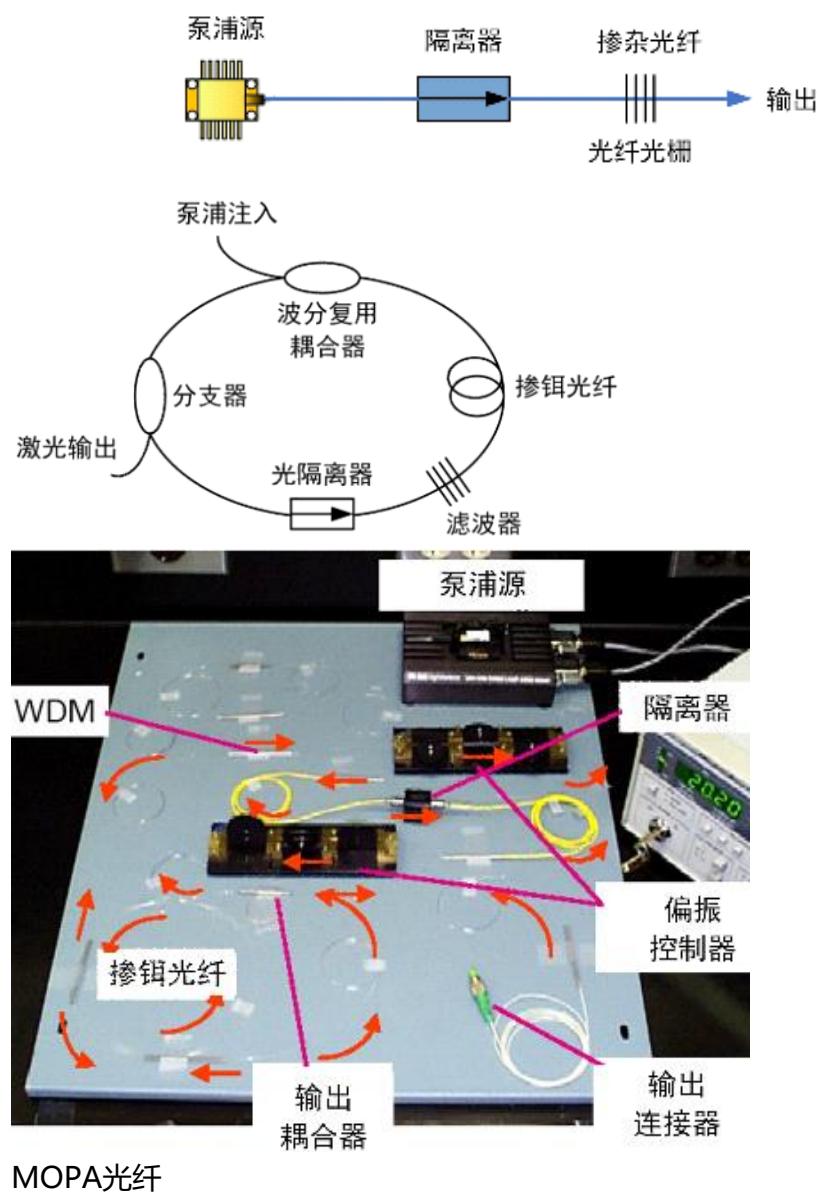
分布布拉格反射光纤激光器：

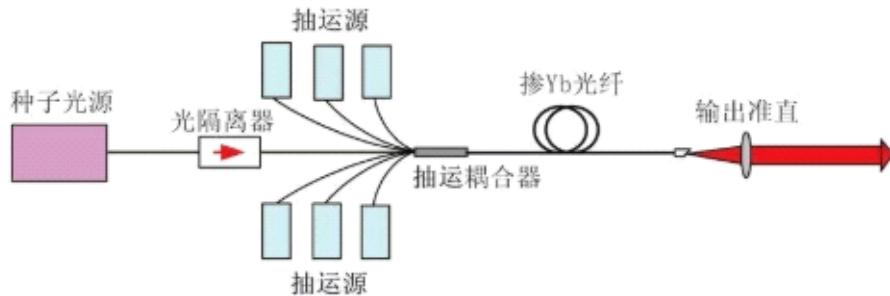
使用两个较高反射率的光纤光栅作为反射镜置于掺杂光纤的两端，构成线形谐振腔来增强模式选择，可以把光纤光栅熔接到掺杂光纤上，也可以直接把光纤光栅写到掺杂光纤上。



分布反馈 (DFB) 光纤激光器：

利用直接在稀土掺杂光纤写入的相移光栅来构成谐振腔。有源区和反馈区同为一体，只用一个光栅来实现光反馈和波长选择，因而频率稳定性较好，边模抑制比高。





脉冲种子光 Pulsed Seed Laser

光隔离器 Isolator

多模泵浦信号合束器 Pump/Signal Combiners

模场适配器 Mode Field Adaptor

包层功率剥离器 Cladding Power Stripper

大模场光纤隔离器 LMA Isolator

输出光隔离器

半导体泵浦 915/975nm

多模泵浦保护滤波器 Protection Filter

双包层掺Yb光纤

光子晶体光纤 PCF

光子晶体周期性结构（晶格尺度）和波长同数量级

光子晶体：

不同折射率的介质周期排列而成的微结构

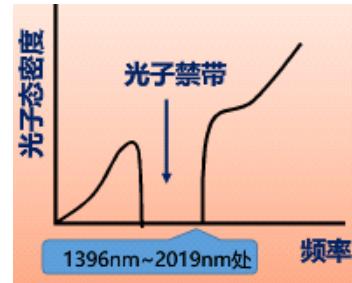
蝴蝶翅膀

孔雀的羽毛

金龟子的壳

澳洲海老鼠的毛发

光子带隙（禁带）

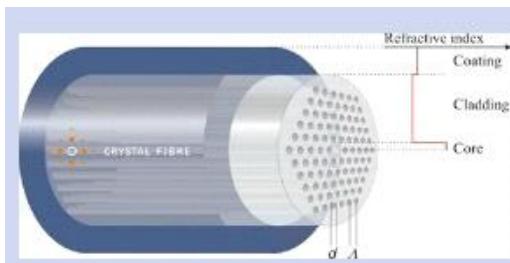


一维：一个方向上折射率周期分布 - 光纤光栅

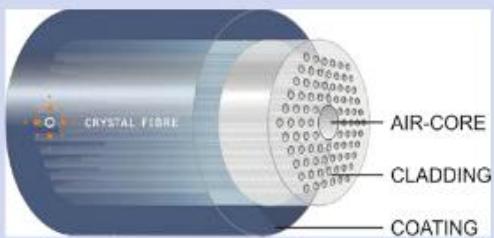
二维：光子晶体光纤

三维：蛋白石

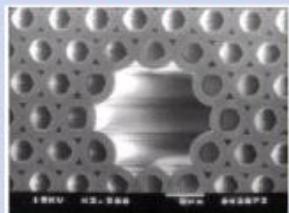
光子晶体光纤：光纤剖面复杂的微纳结构实现导光



全内反射型光子晶体光纤



光子带隙型光子晶体光纤



全内反射型TIR-PCF

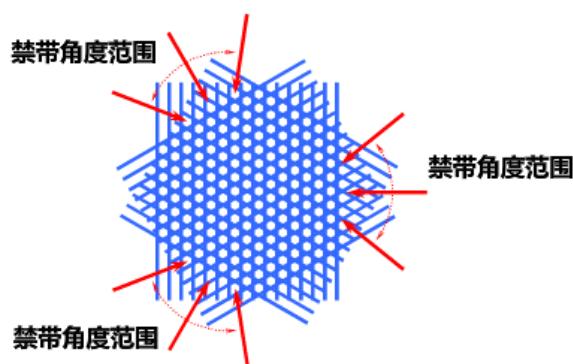
空气孔排列组成光纤包层的折射率低于纤芯折射率。

模式：所有的模式都是混合模式，基模TE11

特点：无截止单模（占空比小于等于0.4）、模场半径可调谐、色散可调

光子带隙型PBG-PCF

光在芯层中以某个角度入射至包层微结构，周期性包层结构产生多次散射，干涉减弱无法通过包层。



特点：易耦合，无菲涅尔反射、低损耗非线性、特殊的波导散射
分析

- 有效折射率模型

- 平面波展开法

- 时域有限差分

- 频域有限差分

- 多极法

- 传输矩阵法

- 束传输方法

- **有限元法** COMSOL Multiphysics

制备方法：

➤ 预制棒的制作



应用：TIR-PCF 超连续谱光源（非线性、四波混频、光孤子-脉宽展宽0.4-2.4um）

PBG-PCF 气体液体探测、增强拉曼效应 (SERS)

光通信器件

传输媒介、载体、信息处理

光通信系统：光发射机、光纤传输网、光接收机

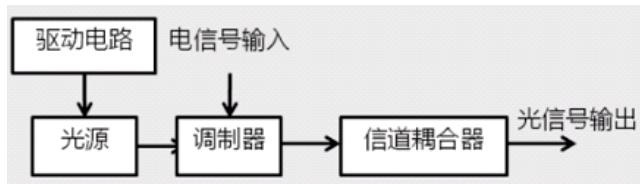
调制：直接（内调制：电信号-光功率）、间接（外调制：利用晶体效应制成调制器放在传输通道上，改变激光相关特性）

主要供应商：2015

产品领域	领导厂商
光纤光缆	Corning, 长飞, Prysmian, 亨通, 古河电工, Furukawa, 烽火, 富通, Sumimoto, 藤仓 Fujikura, Sterlite(印)
光纤收发模块	美：JDSU, Finisar, Oclaro, Oplink, Neophotonic, Fiberxon； 日：Sumimoto, Fujitsu Avago； 中：光迅, 华工正源, 苏州旭创, 极致兴通, 芯瑞科技
光纤放大器	JDS, SDL, 华创, 松下, KEYECE/基恩士, 东丽
光无源器件	大陶, 元影, Molex, 蒲朗克, Coming, 卓智, ADC, 百讯, DiCon
DWDM	Ciena, 华为, 中兴, Corvis, Alcatel, Nortel, Sycamore, Lucent, Siemens, NEC
通讯设备供应商	思科, 华为, 华三, 中兴, 惠普, 阿尔卡特, 3COM, JUNIPER, 锐捷

主要组成：

光发射器:



光源波长 (光纤传输窗口) : 0.85、1.31、1.55um; (S、C、L波)

半导体激光器

一般结构

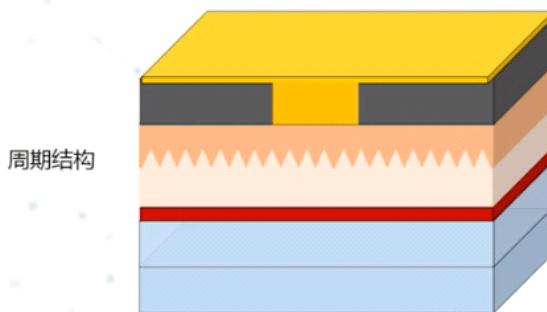


增益、折射率引导结构 略 属于F-P腔LD

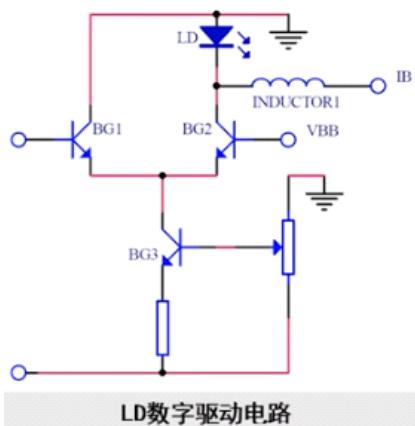
F-P LD在高速调制下及温度电流变化时，存在现模式跳跃和谱线展宽

-> DFB DBR LD 分布式反馈、分布式布拉格反射激光器

分布反馈结构

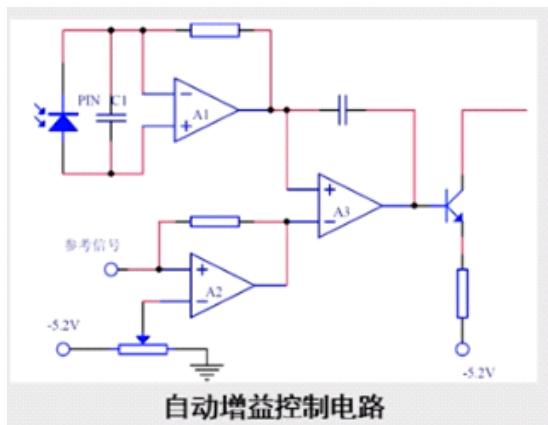


驱动电路: 模拟 (差分放大、共基极驱动电路) 、数字

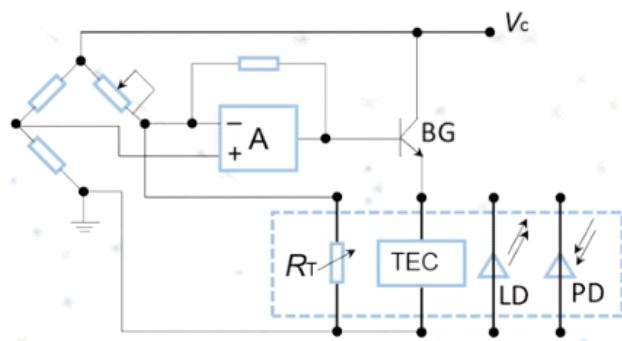


控制电路:

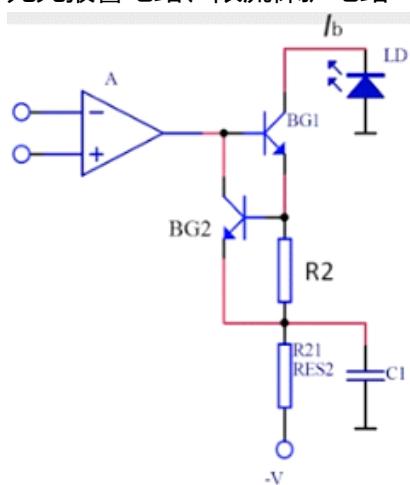
APC自动增益控制电路



ATC自动温度控制电路

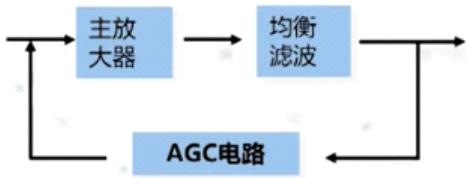


无光报警电路、限流保护电路



光接收器：



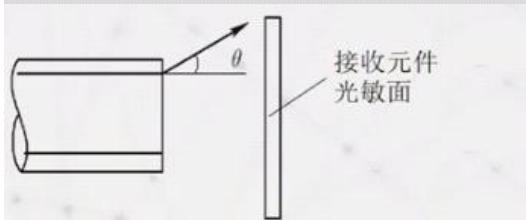


光电检测：

PN结光电二极管->PIN (PN结间插入非/低掺杂 (本征) 半导体材料，增大耗尽区宽度提高响应度)

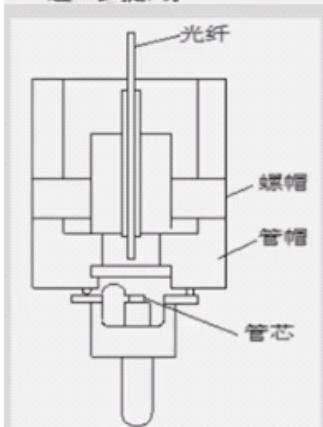
雪崩光电二极管APD

- 短距离通信：工作在850nm的Si器件
- 长距离链路：工作在1330nm和1550nm的InGaAs器件
- APD与PIN相比，具有载流子倍增效应，探测灵敏度很高，但需校的偏置电压和温度补偿电路。
- 要视具体应用场合而选定。



接收元件和光纤的出射位置的关系

- 检测器光敏面足够大(PIN直径1~2 mm；APD 150~300 μm)
- 常用NA=0.14光纤θ=8°
- 只要二者足够靠近，端面平整垂直，一般不加任何光学系统就可使耦合效率达85%以上。
- 二者间加合适匹配粘着剂，还可使耦合效率进一步提高。

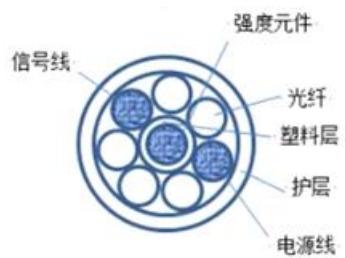


光纤与接收器耦合的装置

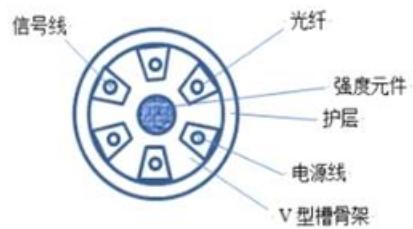
光纤

光纤光学、波动光学

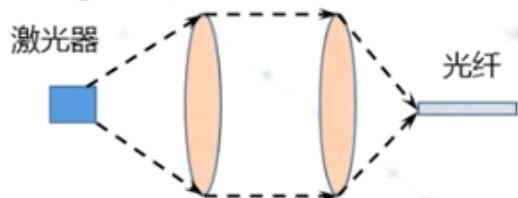
单模 8-10um 0.85um
多模 50-80um 1.31、1.55um



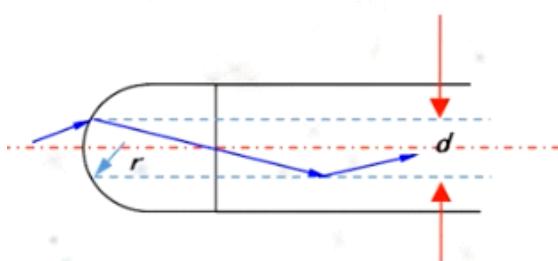
紧结构光缆（古典式）



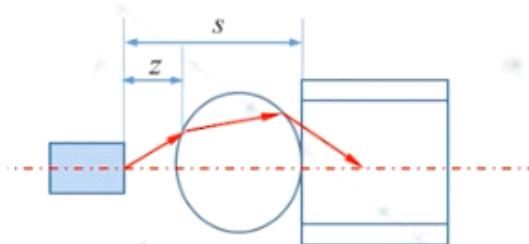
松结构光缆（骨架式）



双透镜耦合

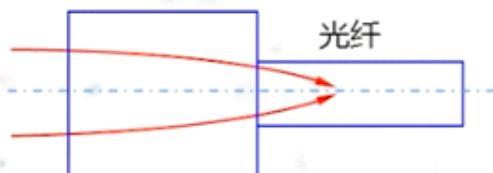


光纤端头透镜耦合



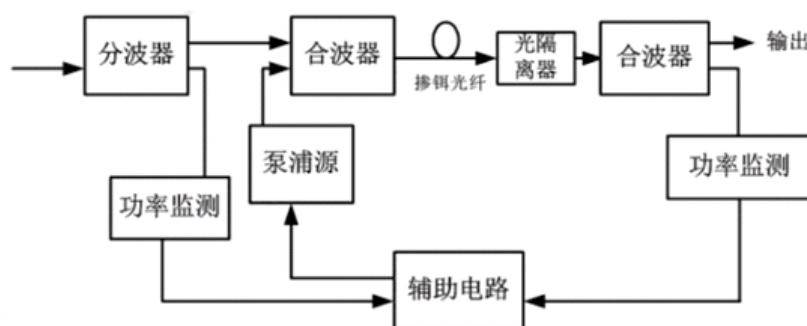
圆柱透镜耦合

自聚焦透镜



自聚焦透镜耦合

放大器:



半导体光波导
放大器(SOA)

谐振式：法布里-玻罗型
行波式：行波光放大器

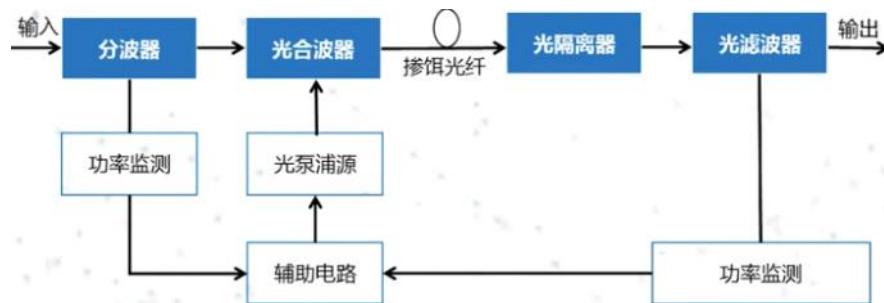
光纤放大器
(FOA)

掺稀土元素光
纤放大器
非线性光纤放
大器

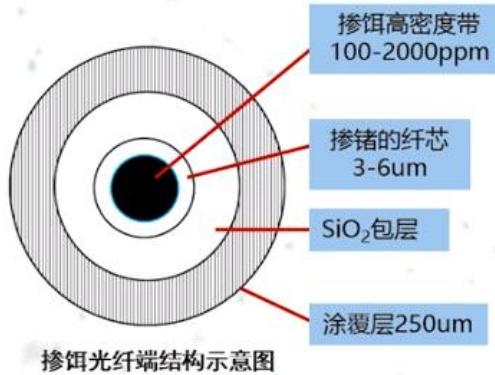
掺铒光纤放大器(EDFA) 1550nm
掺镨光纤放大器(PDFA) 1310nm
拉曼光纤放大器(FRA)
布里渊光纤放大器(FBA)

放大器

掺铒光纤放大器EDFA:



掺铒光纤



掺铒光纤端结构示意图

光合波器

信号光和泵浦光合入掺铒光纤中

980/1550nm、1480/1550nm

光隔离器、光滤波器（多介质膜带通滤波器）、泵浦光源

辅助电路（监控检测、自动温控ATC、自动功率APC控制电路）

主要参数：功率增益、饱和输出功率、噪声系数

光纤拉曼放大器：整个波段放大

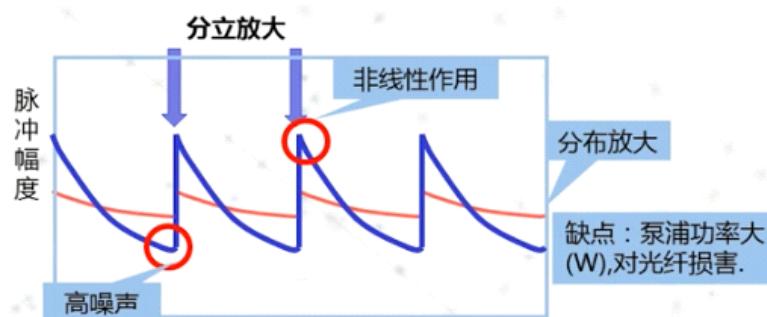
受激拉曼散射把泵浦光能量转移到信号光实现放大

结构与EDFA基本一致

传输光纤作为增益光纤（EDFA- 掺铒光纤）放大介质

分布式放大：沿光纤分布进行光信号放大，普通光纤较长，信号光功率小

分立式放大：集中对光信号放大



受激拉曼散射SRS：一个泵浦光子湮灭，产生一个下移stokes频率光子和相当能量动量的光子，与泵浦光子相差stokes频率的信号光子，经过受激散射放大。

- 基于非线性光学效应
- 利用强泵浦光产生受激拉曼散射
- 使光纤的石英晶格振动和泵浦光发生相互作用，
- 产生斯托克斯光($\omega_p - \omega_s$)
- 波长相同的信号光($\omega_p - \omega_s$)重叠而放大

应用：采用多波长泵浦形成宽带放大、与EDFA混合使用

光开关：可选择的传输端口，对光信号进行转换或逻辑操作

机械式（移动光纤、套管、透镜、棱镜）、MEMS（移动微镜、光纤）、固体波导（波导结构光子集成电路、电光声光磁光效应）

液晶偏振控制、全息光栅（全息反射在晶体内生成布拉格光栅）其他...

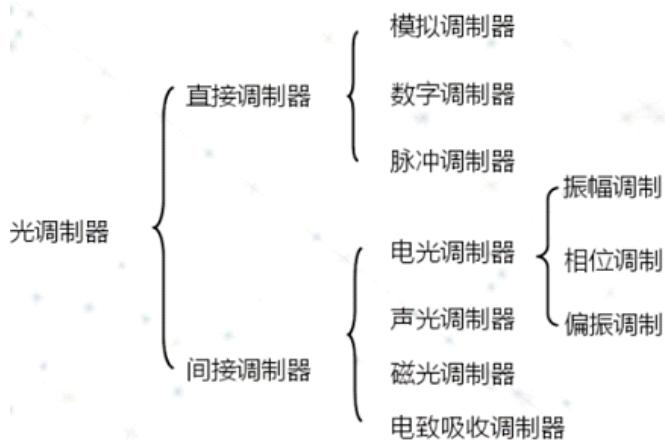
器件类型	气泡开关	热光开关	微机电	旋光开关	磁光开关	声光开关	电光开关
开关时间	10ms	2ms	1ms	100μs	30μs	10ns	1ns

克尔效应Kerr、表面等离子体激元SPP、金属纳米结构、光子晶体

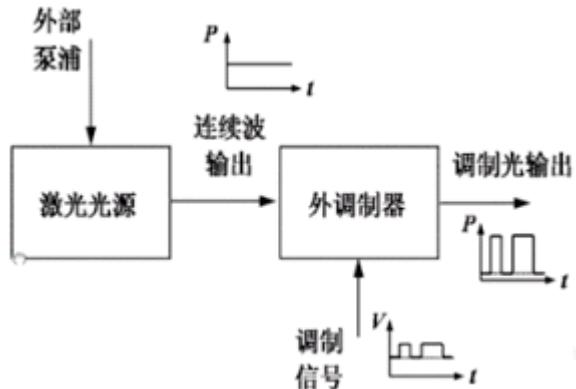
新型光开关各自的一些问题：

- Kerr效应光开关：需要泵浦光能量较大
- 表面等离子体激元光开关：金属器件的能量损耗非常大
- 纳米孔及光子晶体光开关：开关比较低，通常无法做到完全关闭的状态，看上去更像是一种调制器而不是开关

光调制

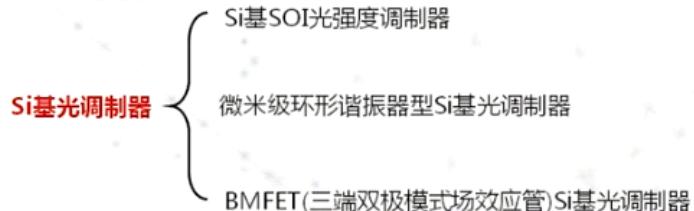


电光调制 (波导型电光调制器)



MZI波导调制器

电吸收调制器



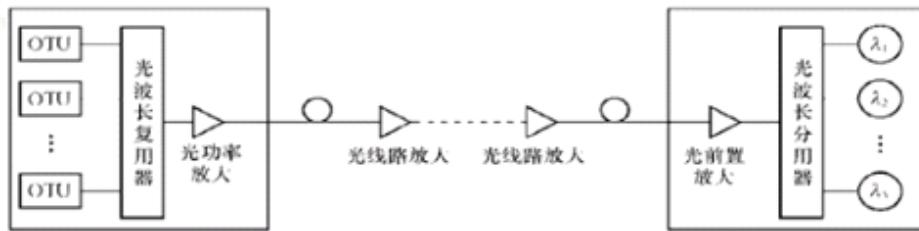
载流子注入，折射率、吸收系数改变

波分复用WDM

波分复用功能

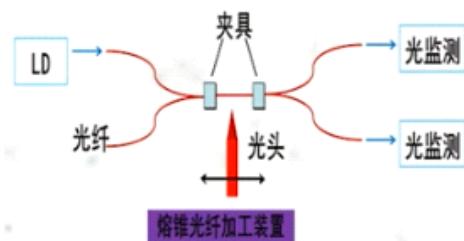
分波（光分用）：
将来自于单一光纤的多个波长载波信号分离成各个波长分量并耦合到各自光纤中。

合波（光复用）：
从多根光纤接收多个不同波长的载波信号，并将它们聚焦成一束光并耦合到单根光纤中传输。



光纤耦合型波分复用器

- 熔融拉锥型光纤耦合器
- 研磨式光纤耦合器



并排放置的两根或多根光纤的某一部位扭绞烧成熔融状态，拉伸光纤，形成双锥型耦合区。

光栅型波分复用器分类

- 体光栅型波分复用器
- 光纤光栅型波分复用器 (FBG)
- 蚀刻衍射光栅型波分复用器 (EDG)
- 阵列波导光栅型波分复用器 (AWG)

其他略...

密集波分复用 (DWDM)

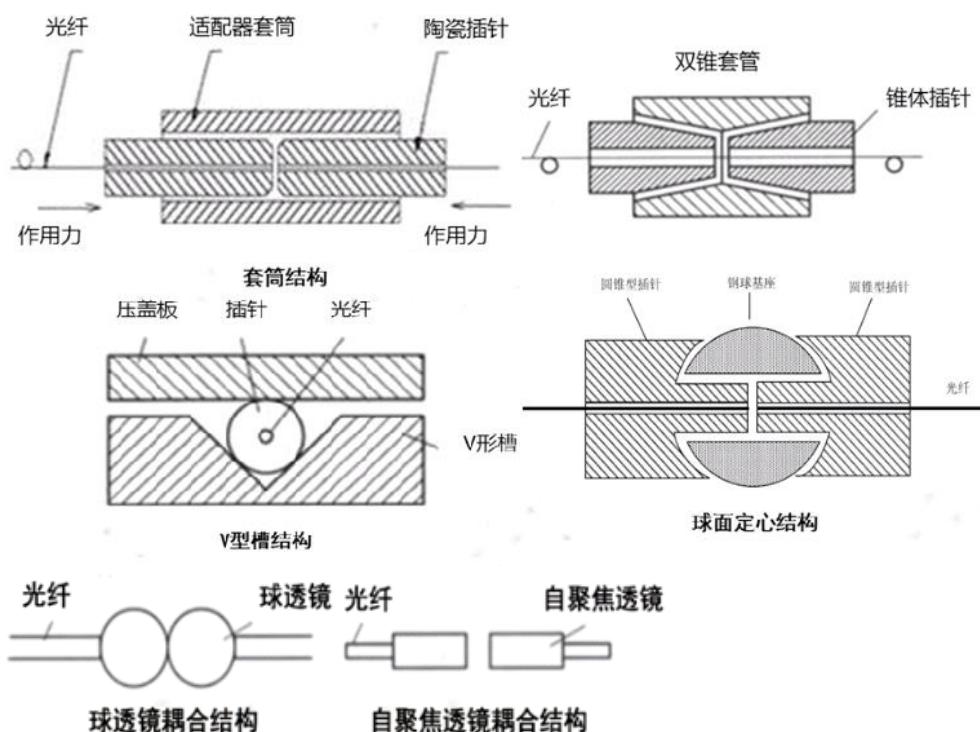
介质膜滤波 16信道 间隔200GHz

光纤布拉格光栅 16-40信道 100-50GHz

阵列波导光栅 40信道 50GHz以下

光无源器件

光纤连接器：



光纤连接器的分类

光纤数量	光耦合系统	机械耦合系统	套管结构	紧固方式
单通道	对接	套筒	直套管	螺纹
多通道	透镜	V型槽锥形	锥形套管	销钉
单/多通道	其他	其他	其他	弹簧销

平面对接FC型光纤连接器



ST型光纤连接器

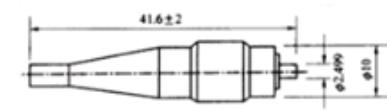
矩形SC型光纤连接器

MT-RJ型连接器

LC型连接器

MU型连接器

MC连接器



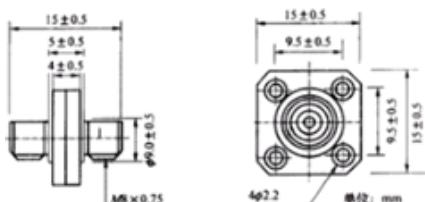
外部加强采用金属套，紧固方式为螺丝扣。

优点：

结构简单，操作方便，制作容易，

缺点：

端面对微尘敏感，易产生菲涅尔反射，提高回损困难。

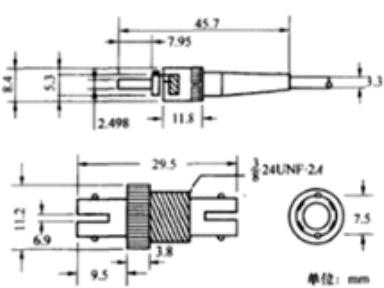


FC型光纤连接器结构图

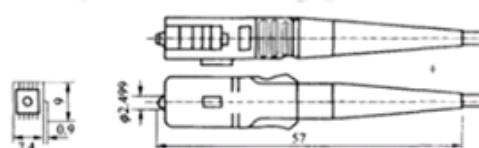
一种完全接触式光连接器；

键槽结构则防止了互连光纤端面因旋转而造成的损伤；

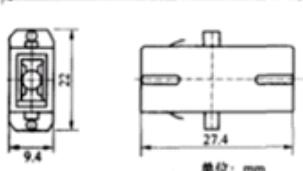
弹簧支撑的浮动式套管结构，降低了端面抛光要求。



ST型光纤连接器结构图



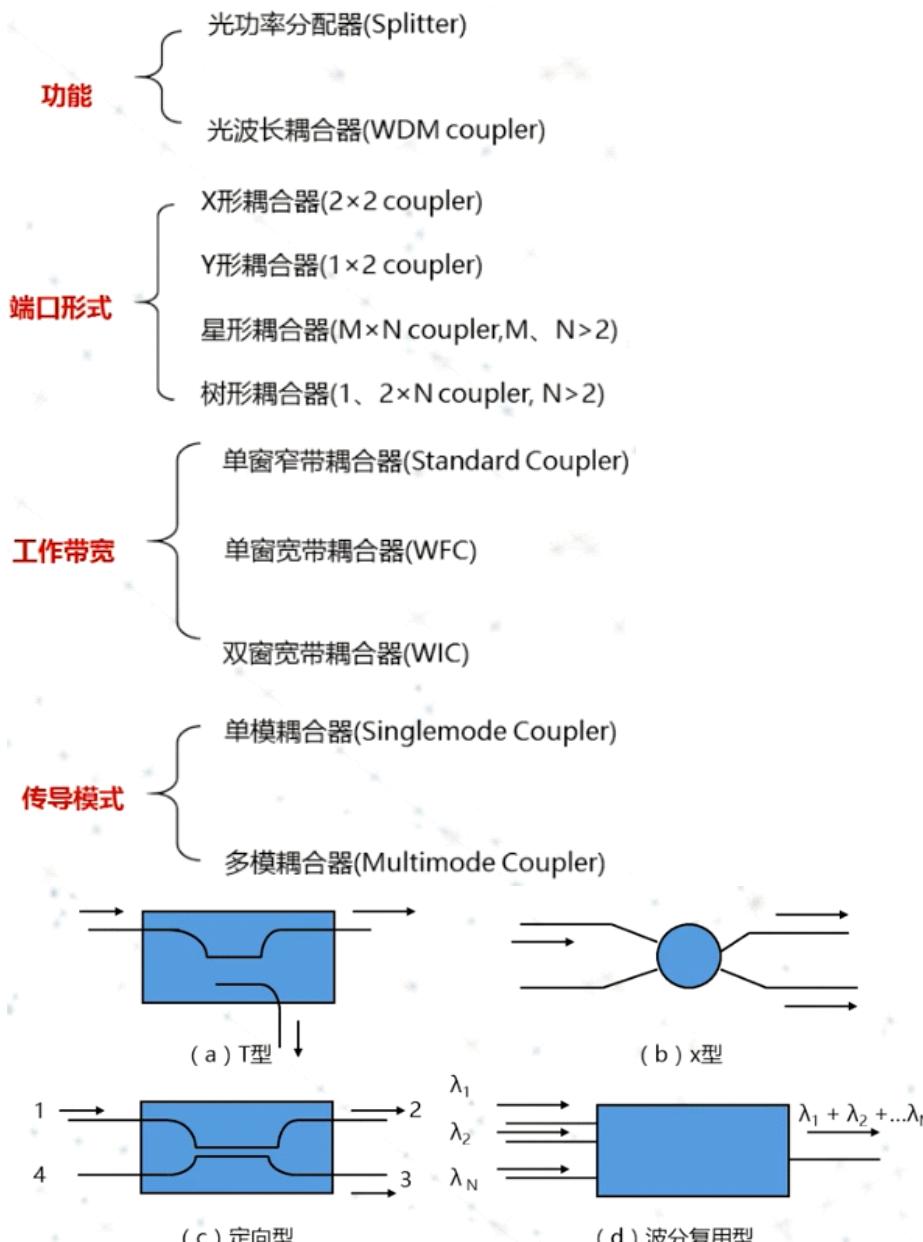
插入损耗低、回波损耗高、重复性高、密度高、成本低、使用方便、不需要留旋转空间、可制成单芯或多芯光纤连接器、体积小。



SC型光纤连接器结构图

MPO光纤连接器

光耦合器

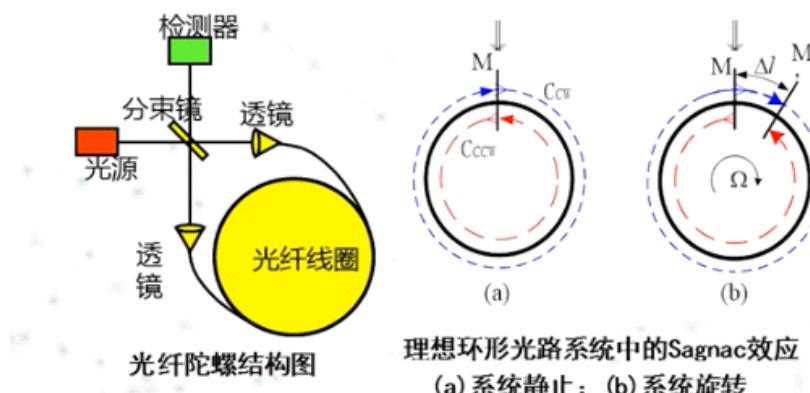


特性参数：插入、附加损耗、分光比CR、方向性、回波损耗、均一性、偏振损耗
熔融拉锥、平面波导耦合

应用：

光纤陀螺

工作原理：**Sagnac效应**。



光衰减器

空气隔离技术

位移错位技术

衰减光纤技术

吸收玻璃法

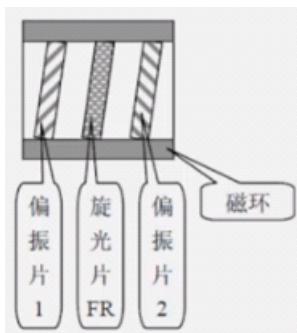
固态光衰减技术

可调衍射光栅技术
MEMS技术
液晶技术
热光衰减技术
⋮

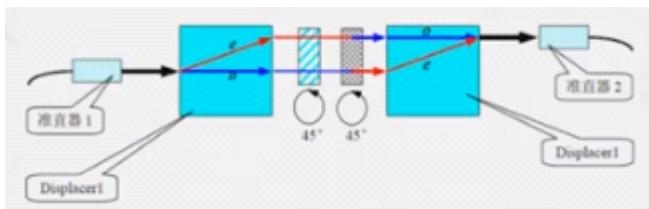
光纤准直器：尾纤自聚焦透镜Grin将光纤内传输的光转为准直光

光隔离器

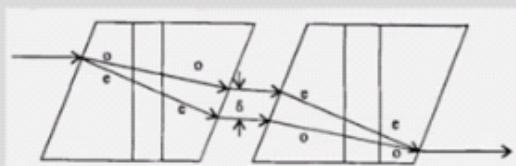
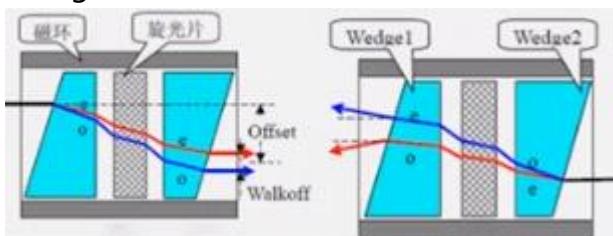
自由空间型



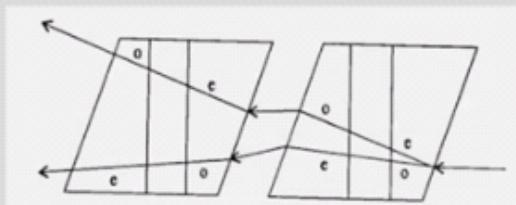
延迟器型



Wedge型



正向光传播示意图



反向光传播示意图

其他...

• 光源	半导体激光器
• 光信息加载	光调制器
• 光信息传输	光纤
• 光信号接收	光接收器
• 光中继与放大	EDFA
• 复用	光波分复用器
• 光交换	光开关
• 光通信网	其他光无源器件

光通信系统、波分复用系统、空间光通信系统

参考

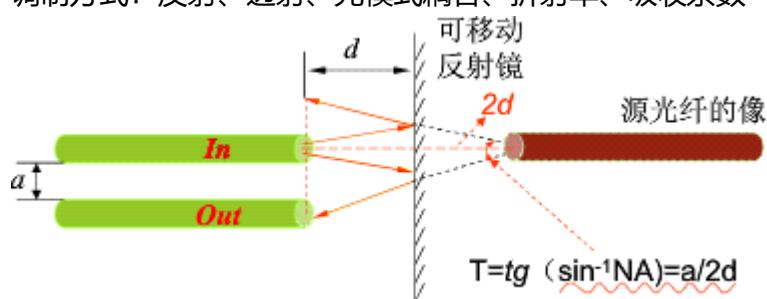
光纤传感

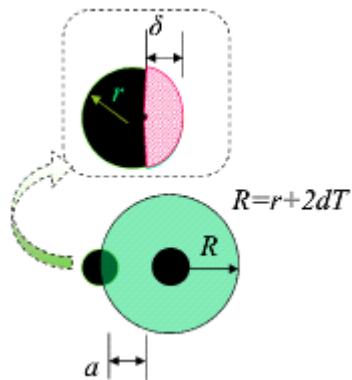
光纤的损耗



强度调制光纤传感器

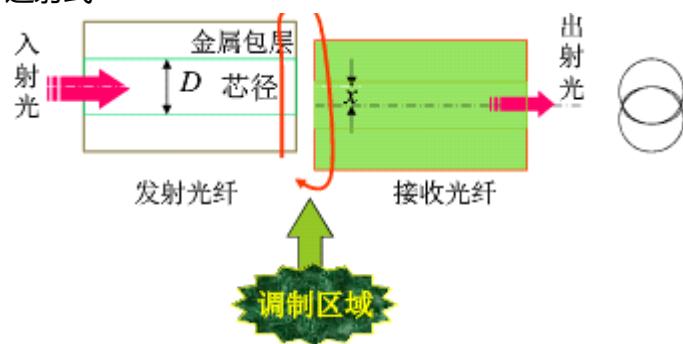
调制方式：反射、透射、光模式耦合、折射率、吸收系数





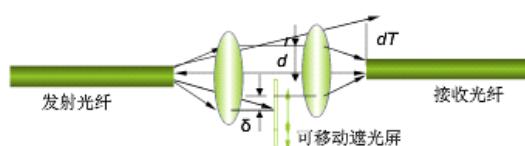
反射强度调制位移传感

透射式

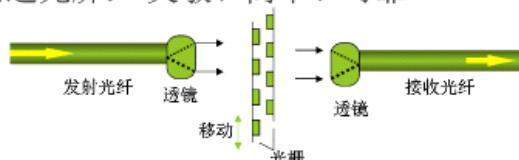


光纤→光纤直接耦合：灵敏度低、动态范围小

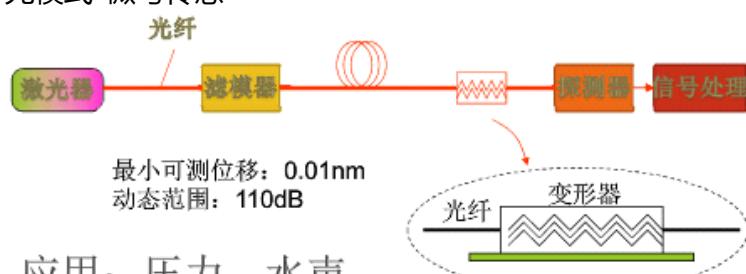
光纤→光纤透镜耦合： F 与反射式计算相同



光栅遮光屏： 灵敏、简单、可靠



光模式-微弯传感

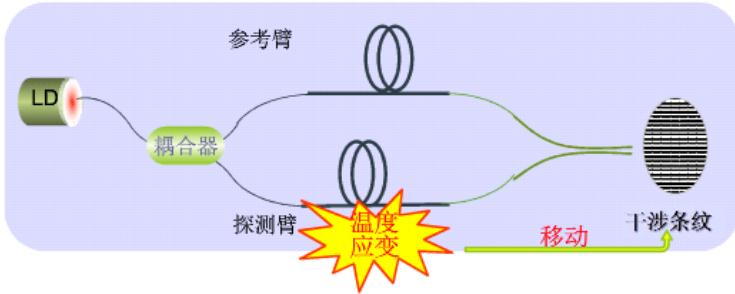


应用：压力、水声

补偿技术

其他...

双光纤M-Z干涉温度传感



$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n\Delta L + L\Delta n)$$

相位调制光纤传感

波长调制光纤传感

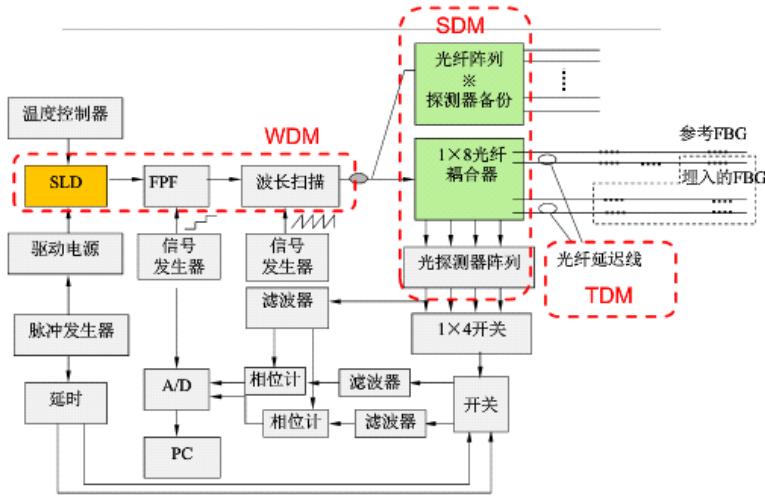
偏振调制光纤传感

参考

光传感网络

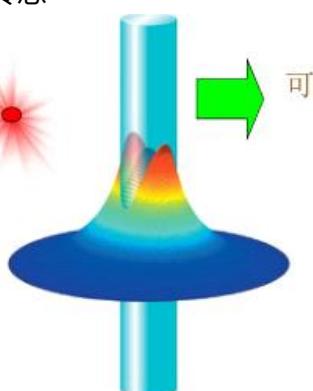
多传感器与光纤连接、复用解调、串扰问题

SDM+WDM+TDM布局



纳微光纤传感

散射
吸收
发光



可检测物理量:
(1) 强度
(2) 相位
(3) 光谱

分布式光纤传感网络

OTDR (光时域反射)



光学

略...

[物理光学](#)

[应用光学](#)

[光学设计工艺](#)

[光学实验](#)

相关资源：[爱特蒙特 -优酷](#)、[Thorlabs](#)、[Newport -优酷](#)、[大恒光电 -主站](#)

[V20版大恒光电实验系统样本\(最新\).pdf](#)

——2020已更新

固体激光简介

技术指标、总体设计、谐振腔设计

例：

波长：1064/532/355nm

单脉冲能量：>3mj

重复频率：1-200KHz

脉冲宽度：10ps

功率稳定性：<1%

M2：<1.2

泵浦结构选择、谐振腔结构、激光介质选择、冷却方式 散热（模式匹配）、选模、整体结构
(MOPA、CPA、OPCPA)、(输出特性、市场情况)

泵浦方式

DPSS

半导体激光器 (单管、Bar条、水平阵列、垂直叠阵封装)

制造：晶体衬底上的有源层、注入电流的金属电极、腔面

衬底外延生长 (气相外延、分子束外延)、表面制作形成绝缘区导电区、解理面和腔面镀膜形

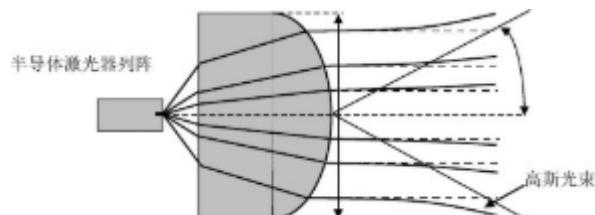
成谐振腔、芯片固定热沉 (铟焊、AuSn焊) 封装

传导冷却型CS封装和微通道液体制冷型封

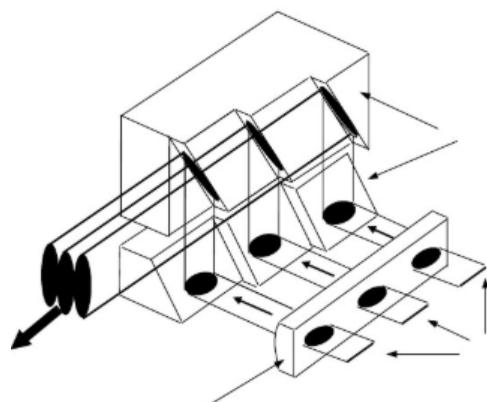
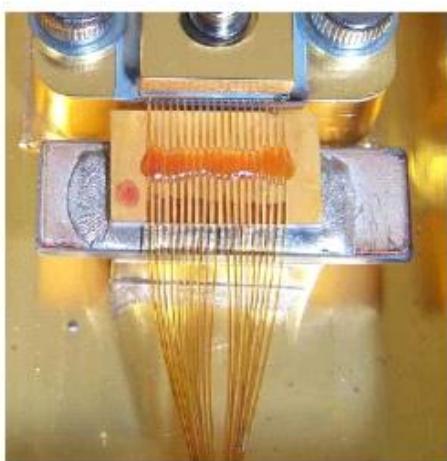


TO、C-mount, butterfly

光纤耦合 (光纤微透镜、柱透镜Grin透镜、BTS微透镜、微棱镜等...)



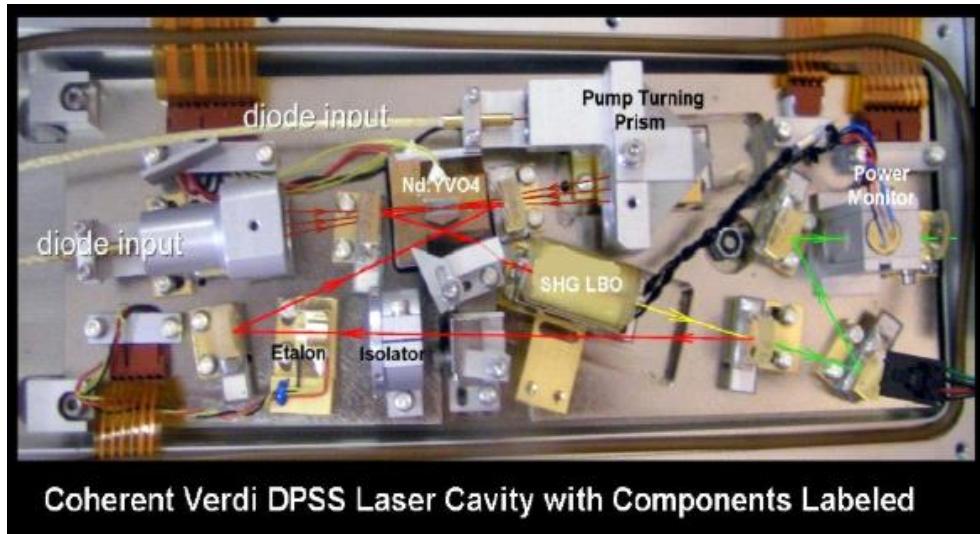
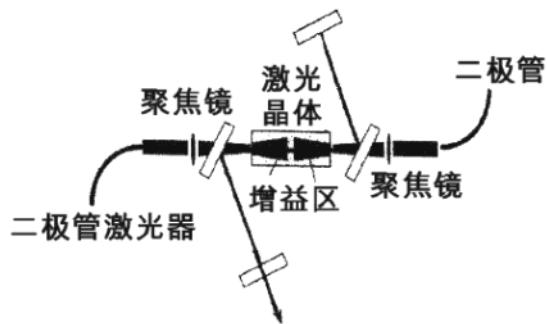
光束对称化



[大功率半导体激光器](#)

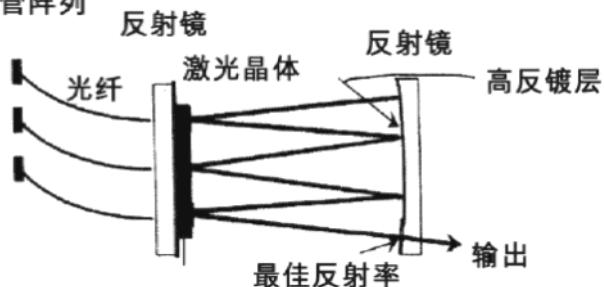
端面泵浦：效率高：60%以上、光束质量好

双端面泵浦

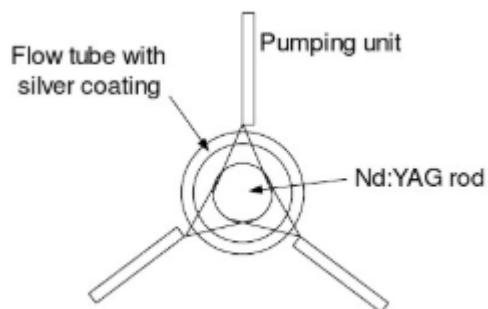


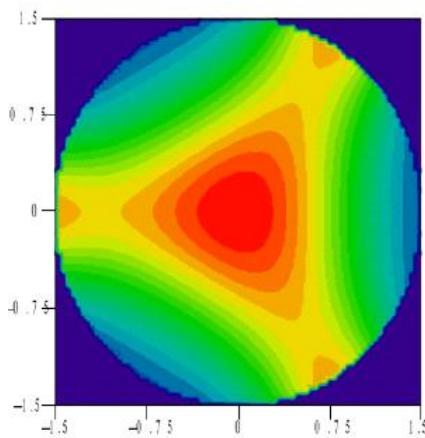
多路泵浦

二极管阵列

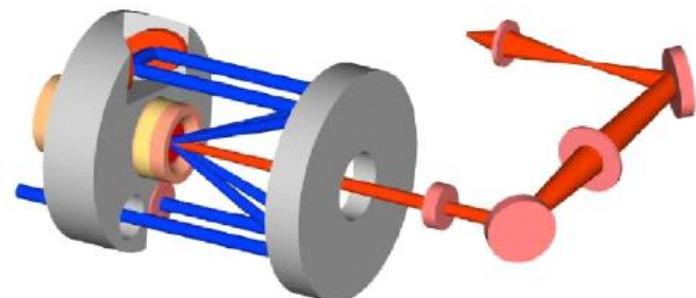
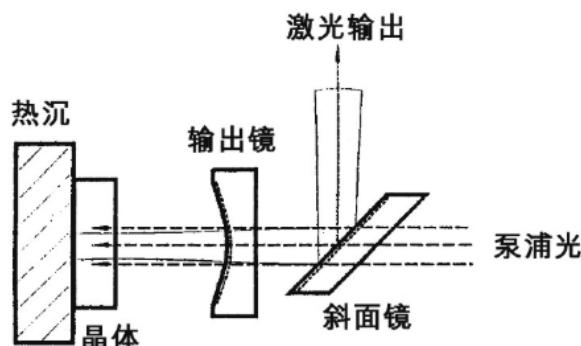


侧面泵浦：效率：30%以上 功率高





圆盘Disk Laser



[Trudisk 视频](#)

其他...

谐振腔

谐振腔稳定性 (g_1 、 g_2 无法计算一般腔型)

$$\text{传输矩阵 } M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

$-1 < (A+D)/2 < 1$ - 稳定性条件

q参数

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)}$$

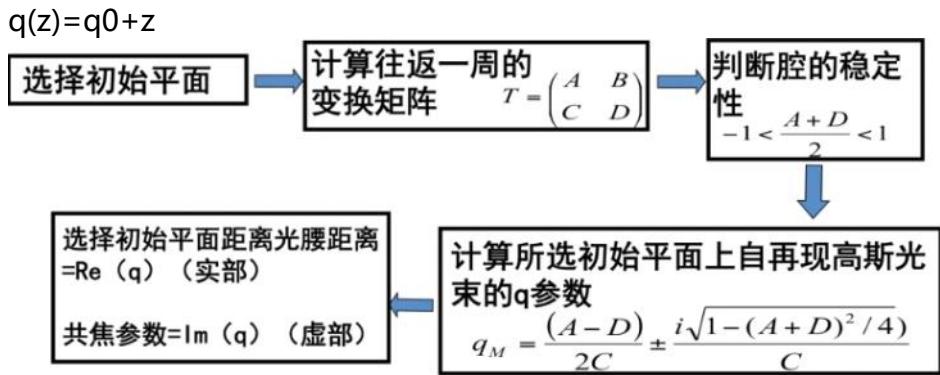
$$q = \frac{Aq + B}{Cq + D}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_0 = \frac{(A - D)}{2C} \\ f = \frac{\sqrt{1 - (A + D)^2 / 4}}{|C|} \end{array} \right.$$

出发平面M处：
距离光腰的距离

共焦参数

激光光束束腰位置波前曲率半径无限大 → 束腰位置宽度



热效应 (应力、端面热畸变-横模光束质量变差、热透镜-模式匹配)

晶体热效应计算-有限元分析

$$-\operatorname{div}[\kappa(T)\nabla(T)] = Q(x, y, z)$$

K 热传导系数

T 开氏温度

Q 热负载分布

晶体热应力

$$(\varepsilon_{ij}) = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)(T - T_0) + \frac{1}{E} C^{-1}(\sigma_{ij})$$

$\sigma_{i,j}$ 应力张量

α_i 热膨胀系数

E 弹性模量

C 杨氏模量

- 热源和冷却模型—初始边界条件确定

- Mesh 或 Grid 网格大小—影响计算速度

- 收敛阈值条件—计算速度

- 叠代次数—计算速度

有限元分析过去需要自己编程计算，现在有了

许多工具软件可以提供辅助：

LS-DYNA, ABAQUS, ANASYS, COSMOS,

热透镜

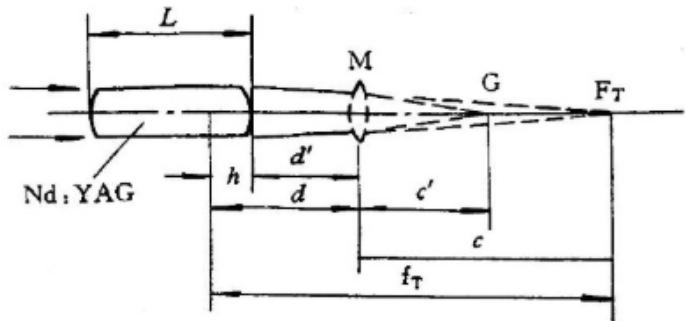
折射率变化引起热焦距

$$f_T = \frac{1}{n_2 L} = \frac{K}{QL} \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^3 \alpha C_{r,\phi} \right)^{-1}$$

端面效应

$$f_T = \frac{R}{2(n_0 - 1)} = \frac{K}{\alpha r_0 Q (n_0 - 1)}$$

辅助透镜法测量



$$f_T = d + c = d + \frac{C f_M}{f_M - C}$$

根据以往经验可以直接利用薄透镜代替热透镜
改变薄透镜焦距计算稳定性和腔内模式

激光晶体选择

YAG掺Nd、掺Er-2900nm、掺Yb-1030nm、Tm-2020nm、HoTmCr-2090nm
Cr4+-被动调Q

YVO4 GdVO4 大吸收截面-高增益系数

YLF、YAP 负折射率-大能量

Nd: GGG Er, Cr: YSGG ICF应用

Ti: Sapphire 可调谐

非线性晶体

KTP、KDP、BBO、LBO等...

Nd:YAG 晶体的性能 (1.0at%Nd)

化学式	Nd: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$
晶体结构	Cubic
莫斯硬度	8.5
熔点	1970 °C
密度	4.55 g/cm³
折射系数	1.8197
热膨胀系数	$6.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{-1}$ (111)
热导性	0.14 W cm⁻¹ K⁻¹
波长	946nm, 1064nm, 1122nm, 1319nm, 1338nm
原子密度	$1.38 \times 10^{20} \text{ atoms/cm}^3$
荧光寿命	230μs
杨氏模量	$3.17 \times 10^4 \text{ Kg/mm}^2$
有效发射截面	$2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
泊松系数	0.25
泵浦波长	807.5nm

Nd:YVO4

晶体结构	tetragonal 四方
莫斯硬度	4.6 ~ 5
熔点	1810 °C
密度	4.22 g/cm ³
折射系数	$n_0 = 1.9573 \quad n_e = 2.1652 @ 1064nm$
热导性	0.051 W cm⁻¹ K⁻¹
波长	942nm, 1064nm, 1342nm
荧光寿命	90μs
杨氏模量	
有效发射截面	25x10⁻¹⁹ cm²
泊松系数	0.25
泵浦波长	808nm

根据输出波长选择（倍频等非线性效应）晶体吸收带宽对应LD

大功率（导热率-增益-机械性能）中小功率（增益-导热-机械性能）

晶体、泵浦的易获取性

吸收波长系数、带宽、荧光谱宽、增益线形、阈值、上能级寿命、导热机械性能等

例如：1um波段晶体目前是激光应用领域使用最多的晶体，常规晶体如Nd: YAG; Nd: YVO4; Nd: GdVO4; 等产量大、价格低廉、性能稳定可以通过倍频、和频获得绿光和蓝光输出，设计过程中应优先考虑。Nd: YAG热和机械性能优良；Nd: YVO4吸收带宽大，增益高，但热性能一般；Nd: GdVO4增益高，热性能优良，吸收带宽与Nd: YAG相近。

常用晶体：

- | | | |
|-------------------|--------------------|----------------|
| 1、Nd:YVO4 | 1、Tm:YSO | 1、LBO |
| 2、Nd:GdVO4 | 2、Tm:GdVO4 | 2、KTP |
| 3、Yb:YAG | 3、Tm:YAP | 3、BBO |
| 4、Cr4+:YAG | 4、Tm:YLF | 4、BIBO |
| 5、Nd:YLF | 5、Tm,Ho:YLF | 5、LN |
| 6、Nd:GGG | 6、Tm,Ho:YAG | 6、Mg:LN |
| 7、Nd:glass | 7、Ho:YAG | 7、PP*** |
| 8、Er:glass | 8、Tm:LuAG | 8、KN |
| 9、Er:YAG | 9、Tm:YAG | |
| 10、Nd:KGW | | |
| 11、Nd:YAG | | |

可以出1um附近波段的晶体

可以出2um附近波段的晶体

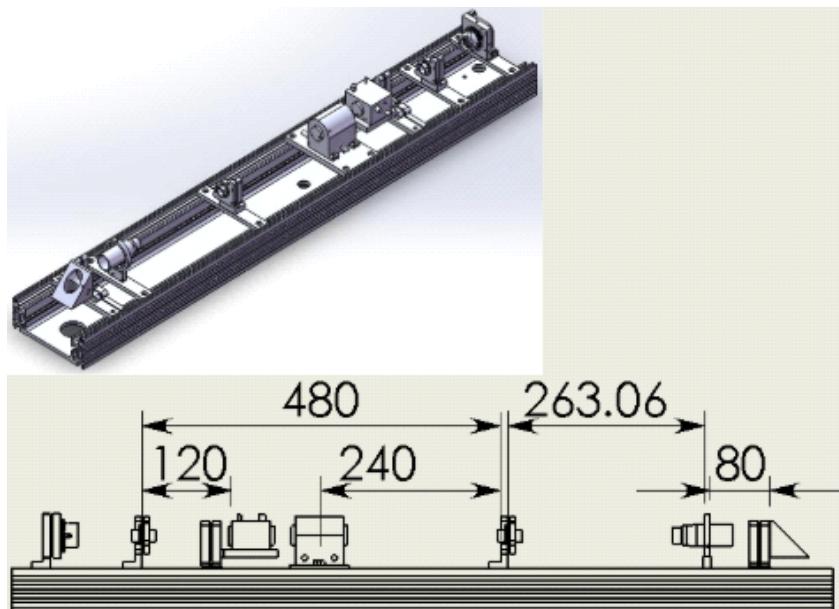
非线性晶体

[参考Lascad使用](#)



激光谐振腔
设计-less...

百度文库 [例](#):

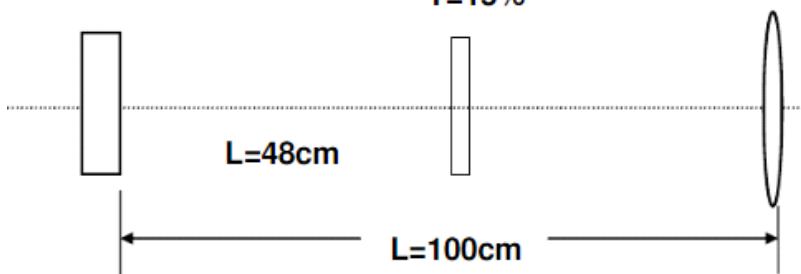


$R_1 = \infty$

$R_2 = 5m$

$F = 45mm$

$T = 15\%$

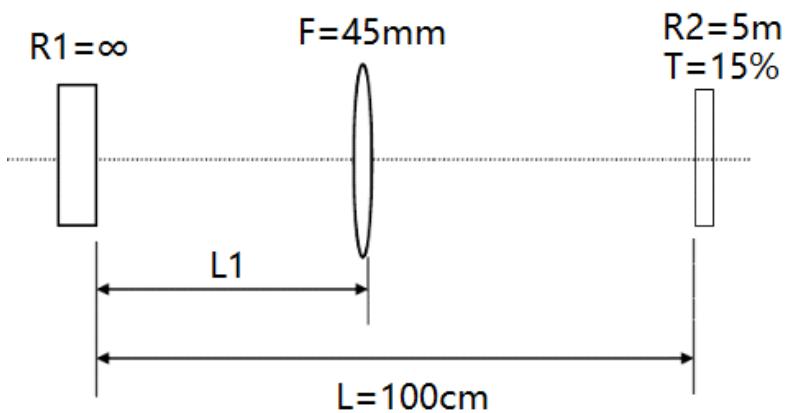


$R_1 = \infty, R_2 = 5.00m, L_{12} = 0.48m, L = 1.00m, F = 0.045m$

用q参数计算光斑

$$\text{传输矩阵 } T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix}$$

? R_1, R_2 构成谐振腔 晶体热透镜看作薄透镜f



往返一周传输矩阵 $T =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/F & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L-L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L-L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/F & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$q = \frac{Aq + B}{Cq + D} \Rightarrow$$

共焦参数f 光斑束腰w

例：LD端面泵浦1064nm Nd: YVO₄ 的Z型折叠腔

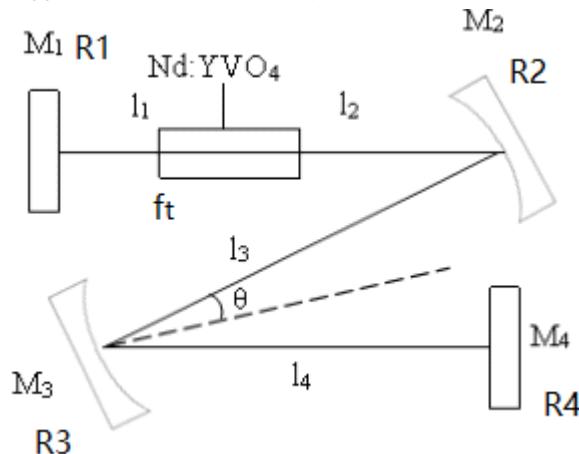
谐振腔参数计算

热透镜焦距

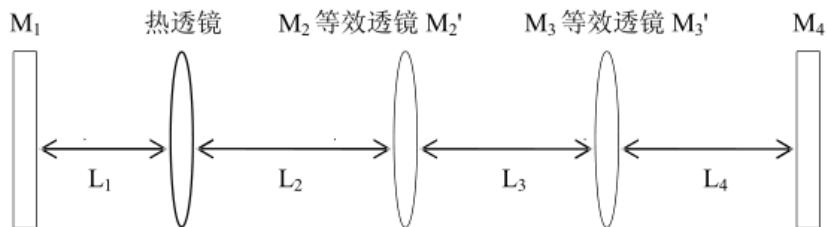
$$f_T = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{in} \xi (dn/dT)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right]$$

导热系数K，吸收系数α，ξ为泵浦转化为热的效率20%，热色散系数dn/dT，ω晶体内部泵浦光平均半径。参考【高功率端面泵浦激光器热效应及激光特性研究】

晶体Nd: YVO₄ 掺杂浓度0.5%，尺寸5X5X10mm²



等效直腔，凹面折叠腔斜入射造成子午弧矢像散。分别考虑？



ABCD传输矩阵

$$\begin{aligned} T = & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/ft & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2\cos\theta/R2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2\cos\theta/R3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R4 & 1 \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} 1 & L4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2\cos\theta/R3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2\cos\theta/R2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/ft & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \end{aligned}$$

稳定性条件

光斑束腰

代入matlab计算各个变量的关系

取合适值，束腰随热透镜焦距变化

腔内模式考虑？

输出镜透过率

泵浦阈值

四能级系统速率方程，基模稳态

$$P_{th} = \frac{\pi h v_p \cdot n \cdot \delta \cdot (\overline{\omega_p}^2 + \omega_0^2)}{4\eta_a \cdot \sigma \tau_f}$$

$$P_{out} = \frac{\pi h c \omega_0^2}{4\lambda_s \sigma \tau_f} \left[\frac{4\sigma \tau_f \lambda_p P_{in} \eta_a}{\pi h c (\overline{\omega_p}^2 + \omega_0^2)} - (T + \delta_0) \right] \cdot \frac{T}{T + \delta_0} = N_1 [N_2 - \delta] \frac{T}{\delta}$$

$$T_{opt} = \sqrt{N_2 \delta_0} - \delta_0$$

式中: $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha_p l)$ 为增益介质对泵浦光的吸收效率, 其中 α_p 为增益介质对泵浦光的吸收系数, l 为增益介质的长度; P_{in} 为入射到增益介质表面的泵浦功率; $\overline{\omega_p}$ 为泵浦光斑的平均半径; ω_0 为振荡光斑的半径; $\delta = T + \delta_0$ 为腔内损耗, 其中 T 为输出透过率, δ_0 为散射吸收等腔内的固有损耗; τ_f 为激活介质的荧光寿命; σ 为受激光辐射截面; λ_s 为发射波长; n 为激光晶体的折射率; λ_p 为泵浦波长。对于 Nd:YVO₄ 晶体的特性参数为: $\tau_f = 98\mu s$, $\sigma = 25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\alpha_p = 28 \text{ cm}^{-1}$, $n = 1.96$, $\lambda_p = 808 \text{ nm}$, $\lambda_s = 1064 \text{ nm}$,

平台:

光学平台、洁净室、氦氖激光器、精密可调镜架、功率计、光束质量分析仪、示波器、信号发生器、线规(红光对准)、相关固定夹具、胶水(铟膜等)、加热、干燥、显微镜等、清洁用无尘纸、无水酒精(异丙醇、丙酮)等耗材。

光学部件:

- 1、LD-电源-温控
- 2、激光晶体 (Nd: YVO₄ 掺杂浓度0.3/0.5%、尺寸3X3X10/12/15mm、切割a-cut、镀膜AR-1064/880+/-5nm)
- 3、非线性LBO (倍频、第一类相位匹配: $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 11.2^\circ$, 匹配温度30C°、镀膜AR1064/532)、(和频、第二类相位匹配: $\theta = 42.8^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, 匹配温度30C°、切割布鲁斯特角1064水平偏振57.4°)
- 4、声光Q开关-驱动器
- 5、光学镜片

反射镜, 输出镜, 双波长反射镜, 二向色镜, 泵浦透镜, 平平镜(窗口镜、反射镜), 补偿镜等...
材料与折射率(折射率与波长的关系-晶体折射率方程)的信息参考: [Thorlabs等](#);

透镜公式:

$$\frac{f}{r_1} = \frac{n}{n_L - n} + \frac{n' - n_L}{r_2} \quad \text{如果物象方折射率 } n = n' \approx 1, \text{ 则有}$$

$$\frac{f'}{r_1} = \frac{n'}{n_L - n} + \frac{n' - n_L}{r_2} \quad f = f' = \frac{1}{(n_L - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}$$

以球面与光轴交点为中心, 球面曲率中心在该点左边为负, 右边为正, 单个球面成像公式:

$$\frac{n}{s} + \frac{n'}{s'} = \frac{n' - n}{r} \quad f = \frac{nr}{n' - n}$$

$$\frac{f}{s} + \frac{f'}{s'} = 1 \quad f' = \frac{n'r}{n' - n}$$

$$\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'} \quad V = -\frac{ns'}{n's} = -\frac{y'}{y}$$

如 $n = n'$, $f = f'$ 则有

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \text{薄透镜的物象距公式的高斯形式}$$

$xx' = ff'$ 薄透镜公式的牛顿公式

$$V = -\frac{s'}{s} \quad (n = n', f = f')$$

薄透镜的横向放大率公式

主点位置:

$$l'_H = -f' \frac{d}{f'_1} = \frac{-dr_2}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}$$

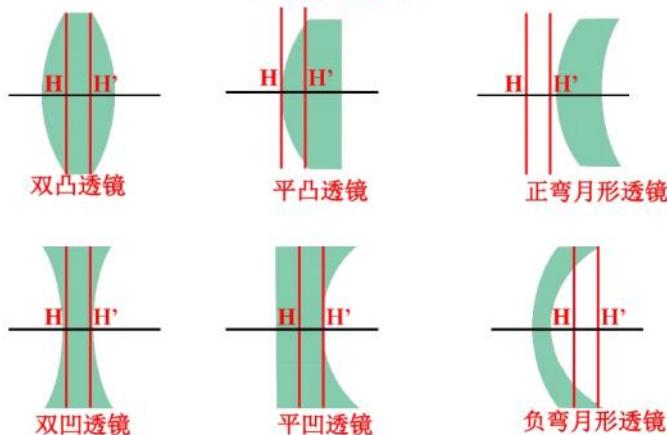
$$l_H = f \frac{d}{f_2} = \frac{-dr_1}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d}$$

=> 泵浦透镜组: 30-60, 泵浦光斑放大率为 F_2/F_1 , $R=R_0 \cdot F_2/F_1$;

镜片焦距曲率半径关系: $f=1/(n-1)(1/r_1-1/r_2)$, 平凸镜, $f=r/(n-1)$;

镜片厚度d、主平面位置H=d/n=f-fb、后焦距fb

一些厚透镜的主点



结构设计\机械加工

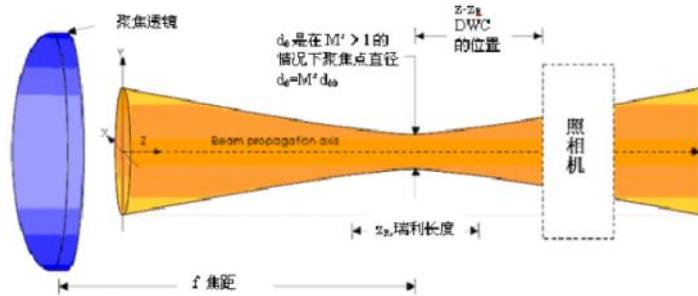
——2018 by qumoptly

相关仪器使用

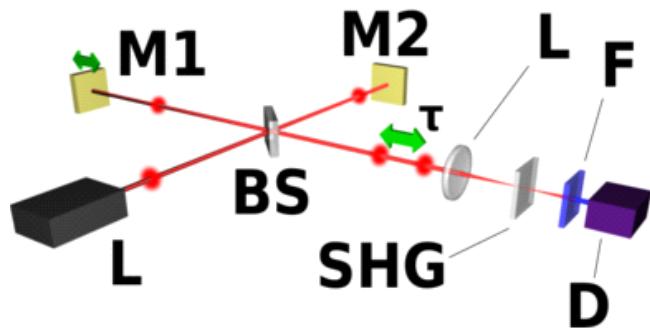
示波器

M2测试仪

波长、功率、光斑大小范围,



自相关仪



光纤处理:

[视频](#)

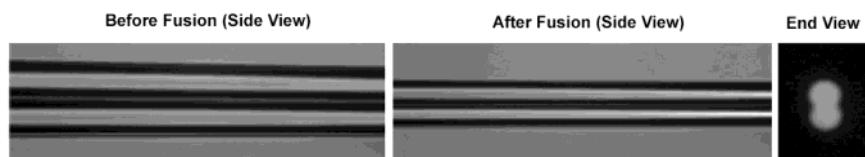
光纤剥离、切割、熔接、涂敷



光纤端面处理 (光纤剥覆、裸纤清洁、切割)

光纤熔接、拉锥、涂敷、测试

大纤芯光纤熔接拉锥处理机可将光纤并排融合



[GPX3000_Applications_720HD.mp4](#)

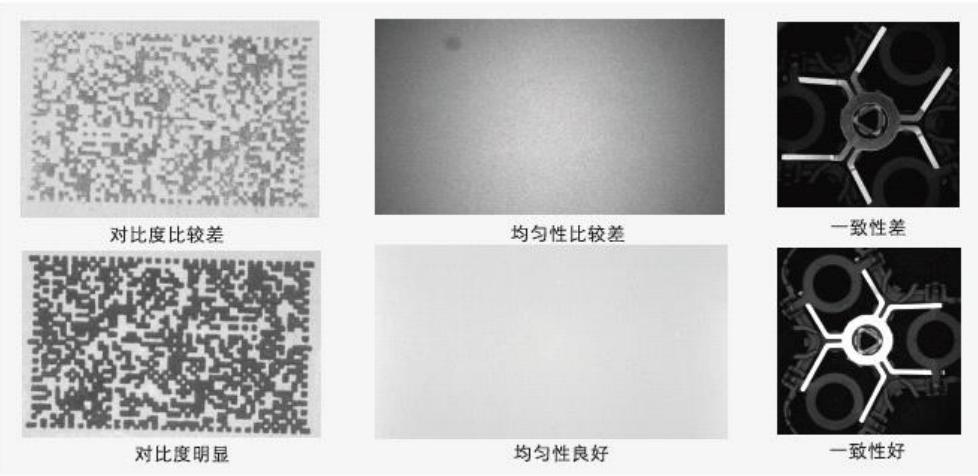
[Vytran_FFS-2000_720HD.mp4](#)

[GPX3000_Overview_720HD.mp4](#)

机器视觉

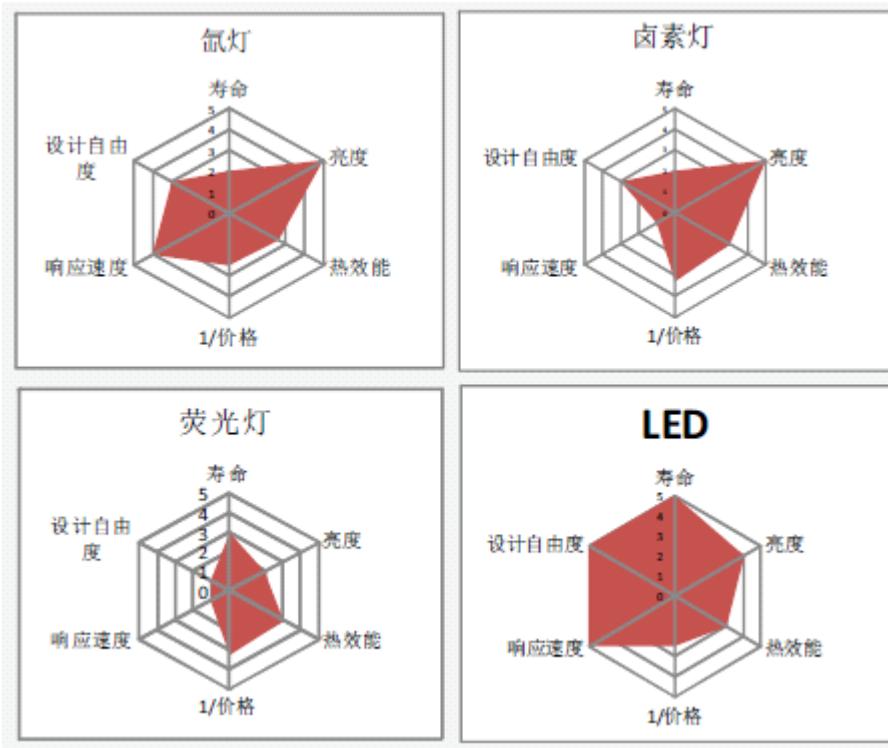
打光说明：目标信息与背景信息的分离

判断：对比度（目标与背景）、均匀性（背景淡化灰度判别）、一致性（目标提取完整）



明场-反射光、暗场-散射光

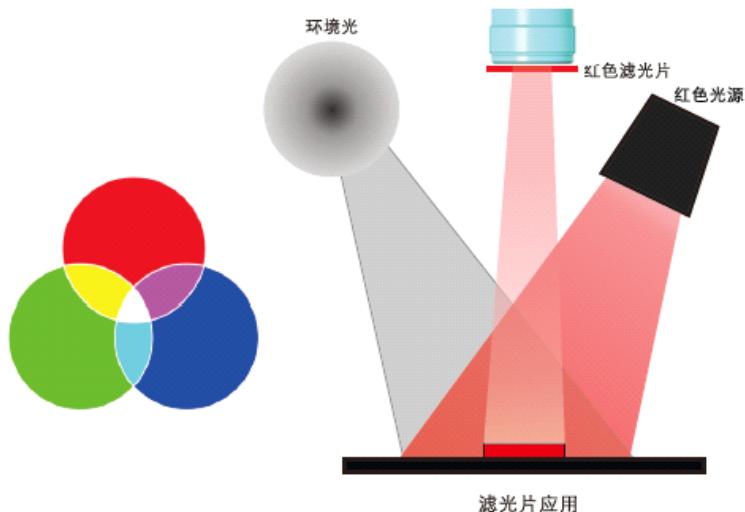
光源：氙灯、高频荧光灯、卤素灯、LED



光源参数:辐射通量/光通量w or lm、出射度w/mm² or 勒克斯lx或lm/mm²、强度w/sr or

坎德拉cd、亮度w/sr*mm² or cd/mm²=nit、照度。

颜色 色温、颜色合成与互补色，



偏振片过滤反光

光源选择

选光源一般过程

根据经验，选择一个视觉光源，一般遵循以下过程：

- 1、了解项目需求，明确要检测或者测量的目标；
- 2、分析目标与背景的区别，找出两者之间成像差异最大的光学现象；
- 3、根据光源与目标之间的配合关系，初步确定光源的发光类型；
- 4、拿实际光源测试，以确定满足要求的打光方式；
- 5、根据具体情况，确定适用于客户的产品。

打光结构



漫射背光源贯穿透射

主要应用：存在性检测、计数、薄片边缘检测、定位和尺寸检测、透明体表面和内部不透明异物或脏污检测、透明体和半透明体突变型和部分渐变缺陷、镂空打标检测等

优点：结构简单，整体价格较低，非尺寸检测效果稳定可靠，一般情况下图像只有黑白两种区域，便于处理，相机正对光源拍摄，亮度容易满足。

缺点：大部分在线检测项目不方便使用；多层交叠不透明体会互相干扰；有一定厚度，带倒角、圆角的物体或者圆柱体尺寸测量容易出现边缘发虚现象，结果会有偏差，如果测量精度要求很高，则可靠性不高。

应用技巧：光源面积够用即可，面积过大会影响边缘效果；光源距离工件远一些，效果会在一定程度上改善；使用物方远心镜头，可以提高稳定性；光源亮度适中即可，不宜过高。

平行背光源贯穿透射

主要应用：本身边缘形状导致的不适合使用漫射背光源的精确边缘检测、定位和尺寸测量等项目。

优点：光线平行性好，图像效果极佳，测量精度高，准确稳定。

缺点：光源本身价格高、对其他配套硬件要求也比较高（例如需配合远心镜头使用等）、安装调试要求高。

应用技巧：光源与镜头必须调同轴，如果对不准，效果很差，一旦对准，效果极好，调好后要稳妥固定

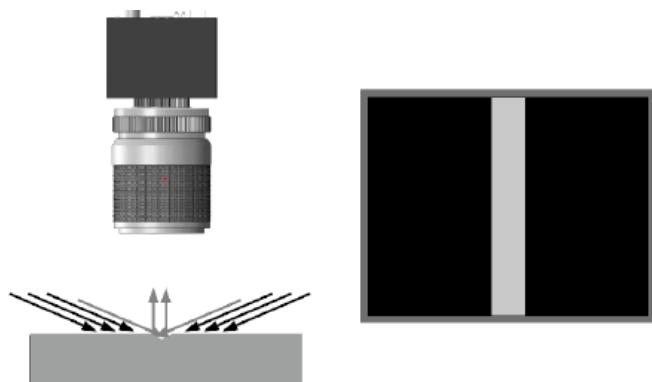
低角度直射光应用

主要应用：表面划伤检测、打标字符检测与识别、表面异物检测、边缘尺寸测量、定位、倒角测量、冲压、浇铸字符图案监测与识别等项目。

优点：便于安装、效果稳定。

缺点：透明物质、表面划伤边缘起毛的效果不明显，有些情况下现场要求光源必须处于一定高度之上，影响效果。

常用光源：条形光、线形光、低角度环形光等。



低角度直射光结构与虚拟效果

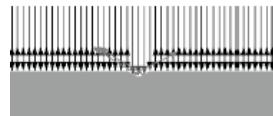
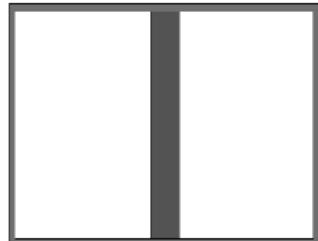
高角度直射光应用

主要应用：表面细微划伤检测、打标字符检测与识别、表面异物检测、边缘尺寸测量、定位、冲压、浇铸字符图案监测与识别等项目。

优点：效果明显，细节清晰。

难点：均匀性调节有一定难度。

常用光源：高角度环形光、条形光、面光源、同轴光、点光。



折射光的应用

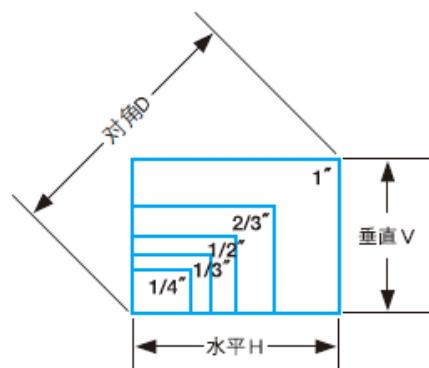
散射光的应用



红外光的透射、紫外荧光应用

相机: CCD、CMOS

传感器尺寸: 与镜头匹配-镜头最大CCD尺寸>传感器尺寸



CCD尺寸	图像尺寸(mm)		
	水平:H	垂直:V	对角:D
1"	12.8	9.6	16.0
2/3"	8.8	6.6	11.0
1/2"	6.4	4.8	8.0
1/3"	4.8	3.6	6.0
1/4"	3.6	2.7	4.5

分辨率、视场、精度关系: $\text{FOV/pix} = \text{像素当量 (mm/pix)}$

帧率

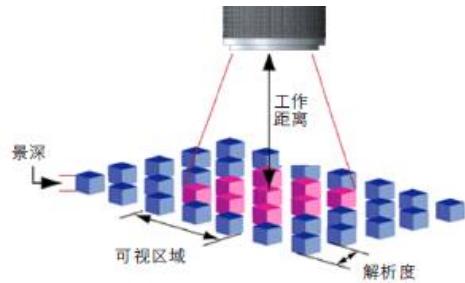
像元 (深度) : 芯片上每个像元的尺寸 3.45um...

物体移动不产生拖影的曝光时间: 曝光时间内, 物体移动不超过一个像元尺寸

例: 物体移动速度150mm/s、相机1/2" 6.4X4.8mm, 水平FOV为20mm, 像元4.65um, 像移动速度= $150\text{mm/s} \times 6.4\text{mm} / 20\text{mm} = 48\text{mm/s}$ 曝光时间 $t = <4.65\text{um} / 48\text{mm/s} = 97\text{us}$

接口: CS、C、F

镜头：光圈F数 f/D (相对孔径 D/f) 、视场、工作距离、景深 (f小景深大、光圈大景深小) 、



镜头选择：相机芯片配合、工作场景、视觉检测需求成本、采用工业镜头、CCTV、远心、广角长焦微距变焦等。



机器视觉系
统中光源...

——2018 by qumoptly

液晶显示

产品

新结构导入：公模-玻璃匹配-lightbar、膜材包材辅料-实装手工样品-试产资料输出、问题点改进-评审结案；

EVT-DVT-PVT-MP

分析报告AnalysisReport；

检验规范 (光学：对比度、白色均匀性、色纯度、色相、色差、灰阶、白平衡、亮度、视角、亮点暗点...)

测试仪器：CA-210/310, CA-s20w, CA-2000；

解析支架暗影，反射片打孔解亮边、水纹波解析（吸湿膨胀）...

导光板测试	灯条测试报 告	【CX】工程 师_产品设...	三星曲面设 计规范(20...

其他数据：/液晶显示

产品说明书Specifications

基本描述：

屏幕大小size: 57 inch；

显示区域Area、相关尺寸Dimension；

像素颜色: 4k、2k、1080p 8bit (16.7million) ;

...

逻辑驱动电压Vdd: 14v duration 50ms

信号电压Vin: 4v 50ms ;

光学说明

对比度Contrast ratio: 5000:1 ;

响应时间G to G T..: 8ms; 灰阶

色度Chromaticity: 标准光源"C", RGBW ;

视角Viewing angle: 89degree ;

BLU Film Structure;

其他 电子、机械结构说明...

LED

led (lightbar) : led芯片、制造流程、荧光粉

LED芯片制程

芯片: 透明导电电极-P型半导体层-发光层-N型半导体层-电极

发光波长-半导体禁带宽度, 蓝光led+YAG荧光粉

工艺流程: 衬底材料生长-LED结构MOCVD生长-芯片加工切割-器件封装

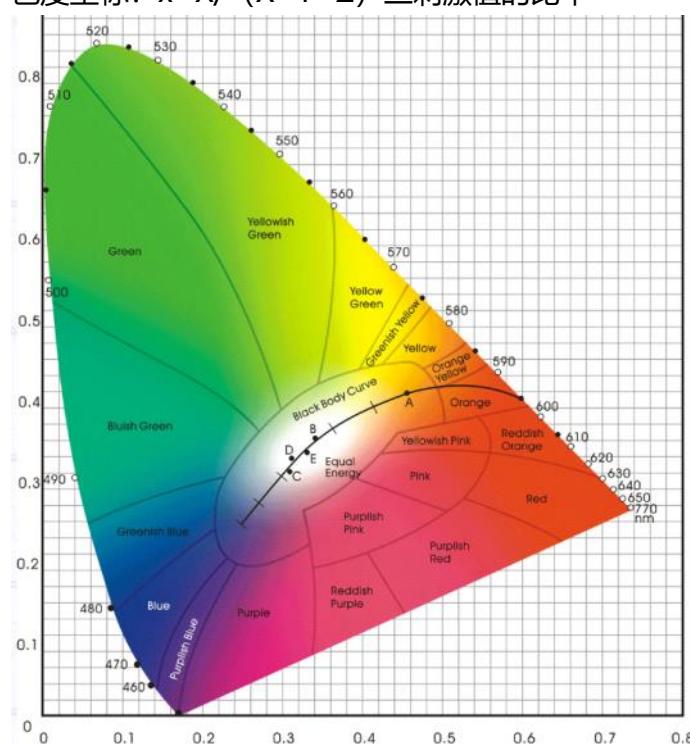
MOCVD: 有机化合物气相沉积, 光刻-去胶

...

色度学

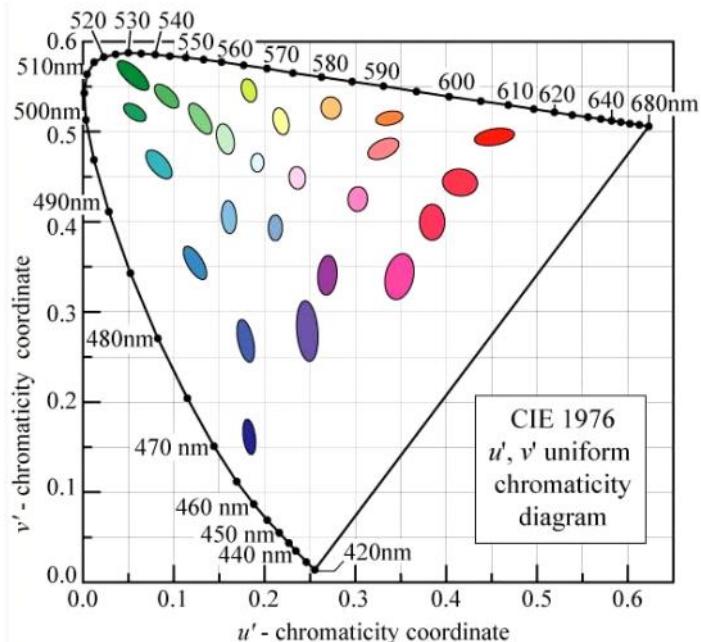
色温 (色块Bin-色温范围块) 、色域 (CIE1931) 、色度(色调+饱和度) +亮度

色度坐标: $x=X/(X+Y+Z)$ 三刺激值的比率



CIE1976 u、v坐标转换

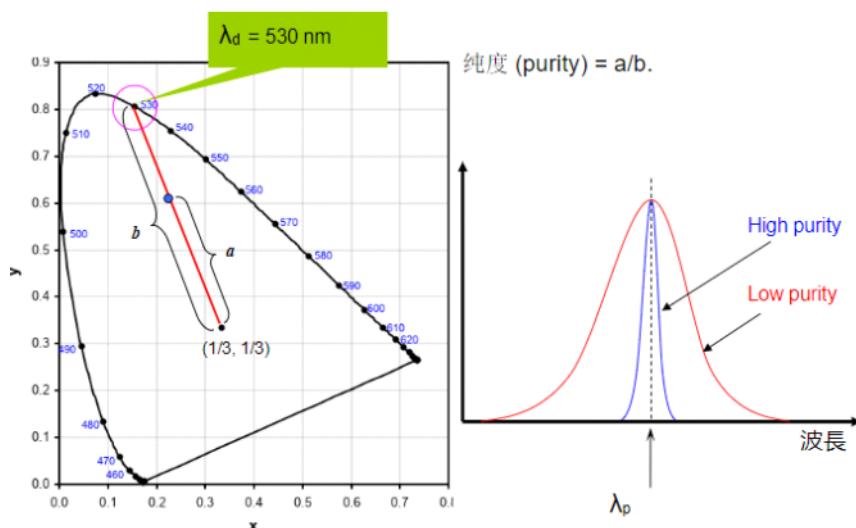
人眼颜色敏感度



三原色 (色光RGB) 色料: 品红、柠檬黄、青

色相、明度 (明暗) 、纯度 (成分) 、

波长纯度



主波长: 等能白光色度坐标 $(1/3, 1/3)$ 和颜色S坐标延长线交点为主波长530nm

纯度 a/b

背光模组

直下式: Lightbar、Films、扩散板 (微结构扩散板) 、支撑柱、二次光学透镜、反射片

侧入式: Lightbar、Films、导光板...

Films : 扩散片Diffusion、棱镜片Lens/BEF (BrightnessEnhancementFilm) 、DBEF (反射的偏振光再利用, Double-BEF) 、MLS (Micro-lens: lens层PMMA-subtracte层PET-Diffuseion层PMMA) 、POP复合膜等

前中框、背板、散热

新型成像技术简介

LCD-OLED-QLED/Micro-LED

激光显示

AR/VR显示

—— 截至至2020.06 by qumoptly