

固体激光和非线性光学

激光是光受激辐射放大的简称，英文简写为“**Laser**”。1917年，爱因斯坦在光量子论的基础上，首次提出受激辐射的概念，1960年梅曼（**T.H.Maiman**）首先研制成功了世界上第一台激光器—红宝石激光器。

激光特点：

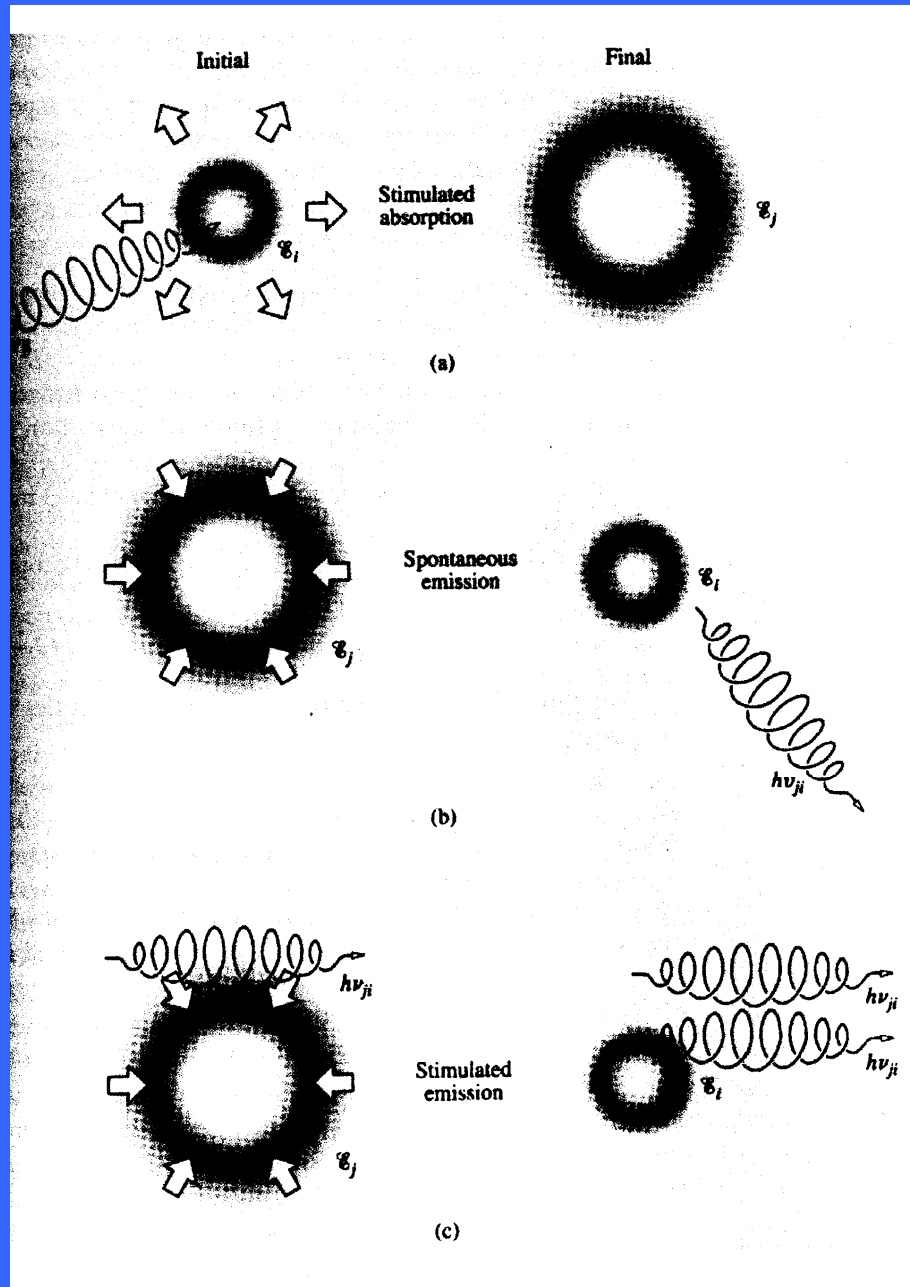
- 1、高单色性：波谱宽度可达 $\delta\omega/\omega \sim 10^{-15}$
- 2、高方向性：光束发散角可小到 10^{-4} 弧度
- 3、高亮度：可达GW 和TW
- 4、高相干性

激光之所以有以上特点是因为普通光源以自发辐射为主，各发光原子各自独立地发射，所发射的光波其方向、相位、偏振都各不相同；而激光器内各发光原子由于受激辐射过程而彼此相互关联，所辐射的光波，其方向、相位和偏振相同，是一个有序的相干叠加过程。

激光应用

- 生物学, 医学, 光化学
- 激光分离同位素, 激光诱导核聚变
- 光电子器件
- 光存储
- 全光和量子计算机
- 自适应光学
- 光通讯
- 光雷达
- 光加工、光表面处理等

自发辐射、受激吸收和受激辐射



吸收

自发辐射

受激辐射

形成激光的条件:

(1) 首先必须利用激励能源, 使工作物质内部的一种粒子在某些能级间实现粒子数反转分布, 这是形成激光的前提条件;

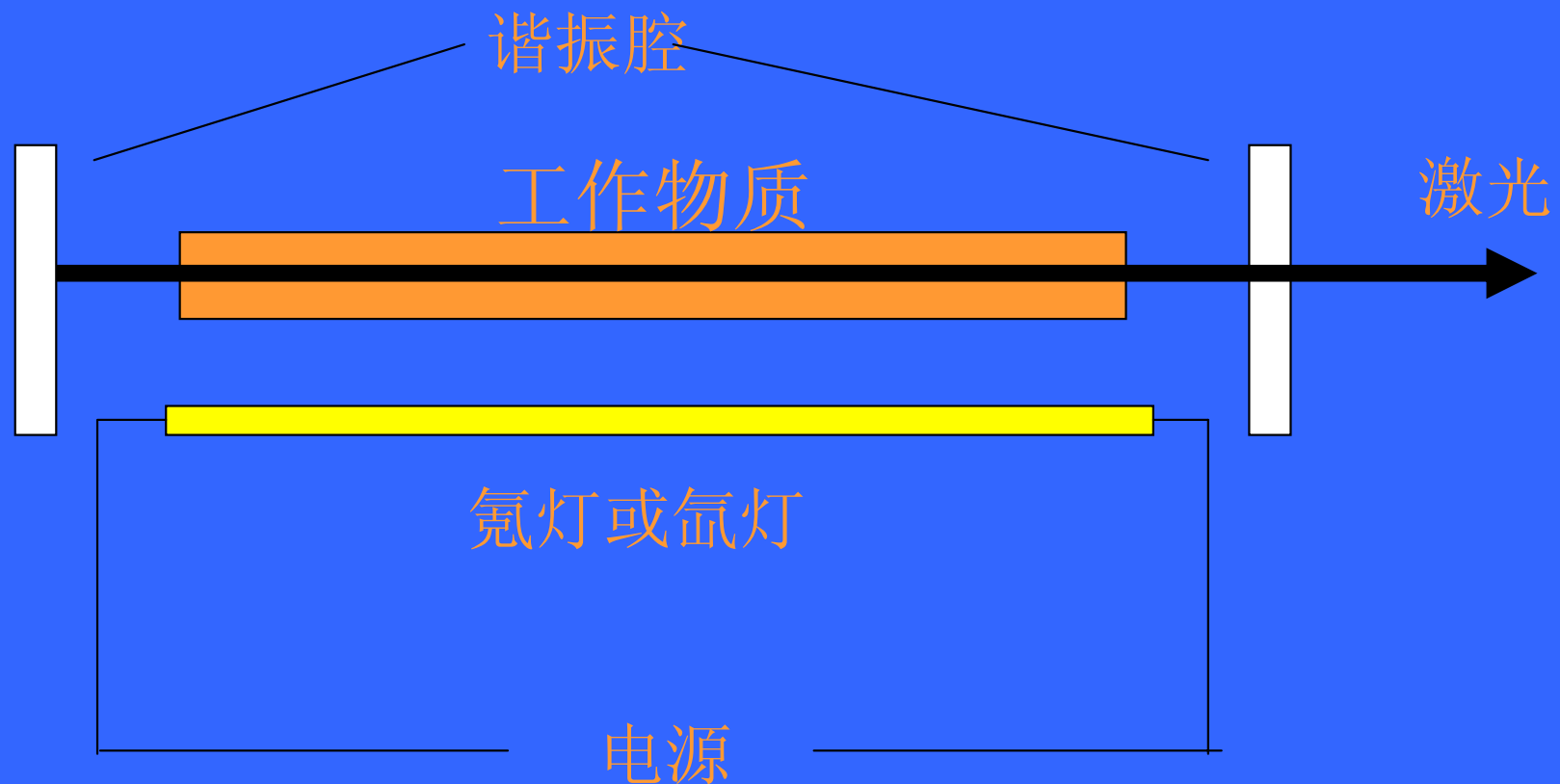
(2) 还必须满足阈值条件(即增益大于损耗), 这是形成激光的决定性条件。

$$I_1 = I_0 \exp \left[(G - \alpha_{\text{内}}) L \right] \quad I_2 = r_1 I_0 \exp \left[(G - \alpha_{\text{内}}) L \right]$$

$$I_3 = r_1 I_0 \exp \left[2(G - \alpha_{\text{内}}) L \right] \quad I_4 = r_1 r_2 I_0 \exp \left[2(G - \alpha_{\text{内}}) L \right]$$

阈值条件为: $I_4 > I_0$

一般的激光器由三部分构成，即工作物质、谐振腔和激励能源。



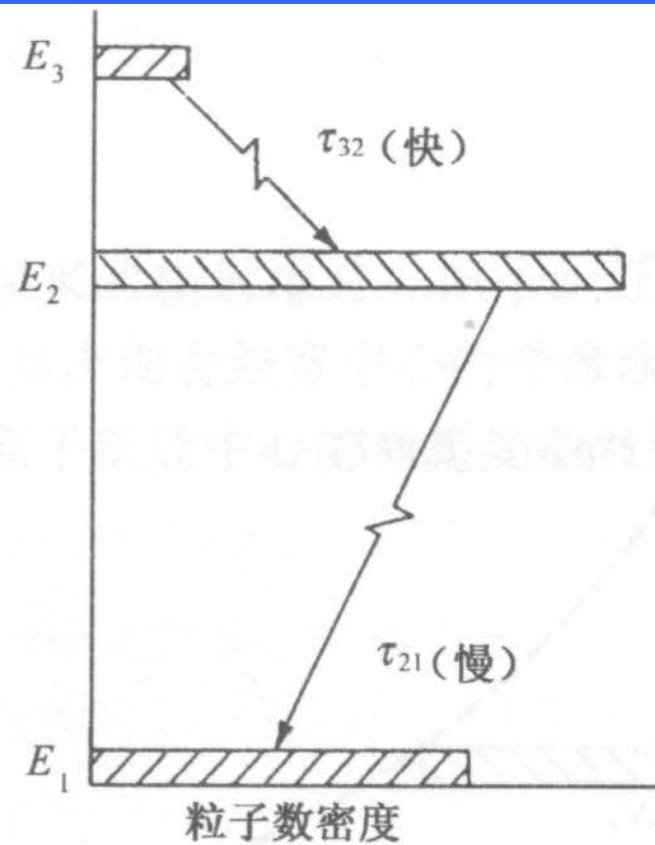
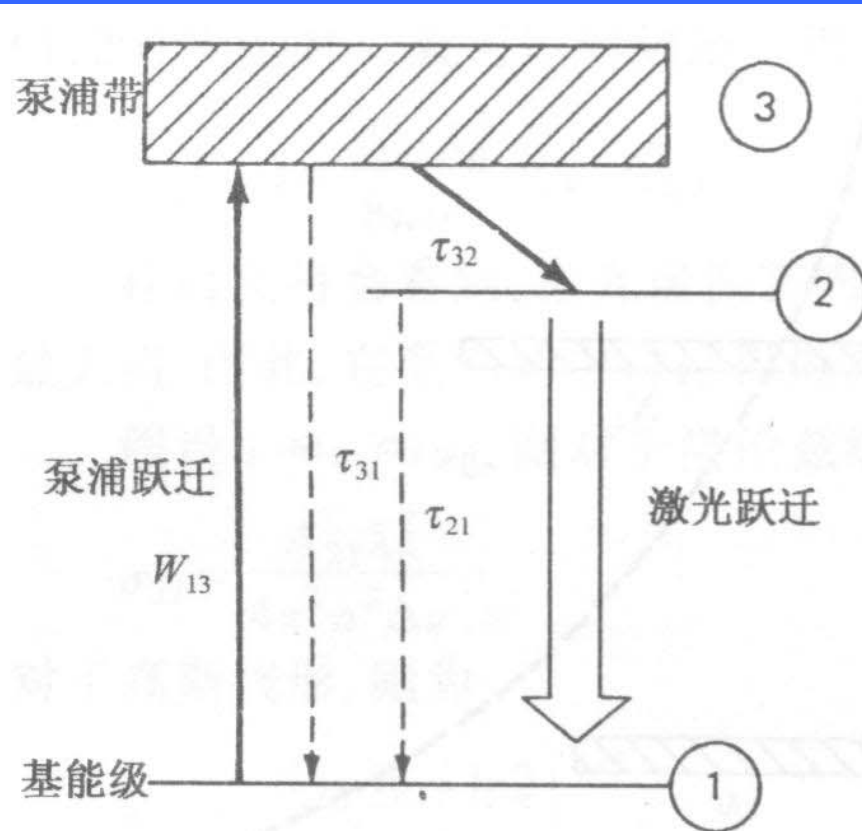
激光工作物质：固体（晶体、玻璃）、气体（原子气体、离子气体、分子气体）、半导体和染料等

光学谐振腔：

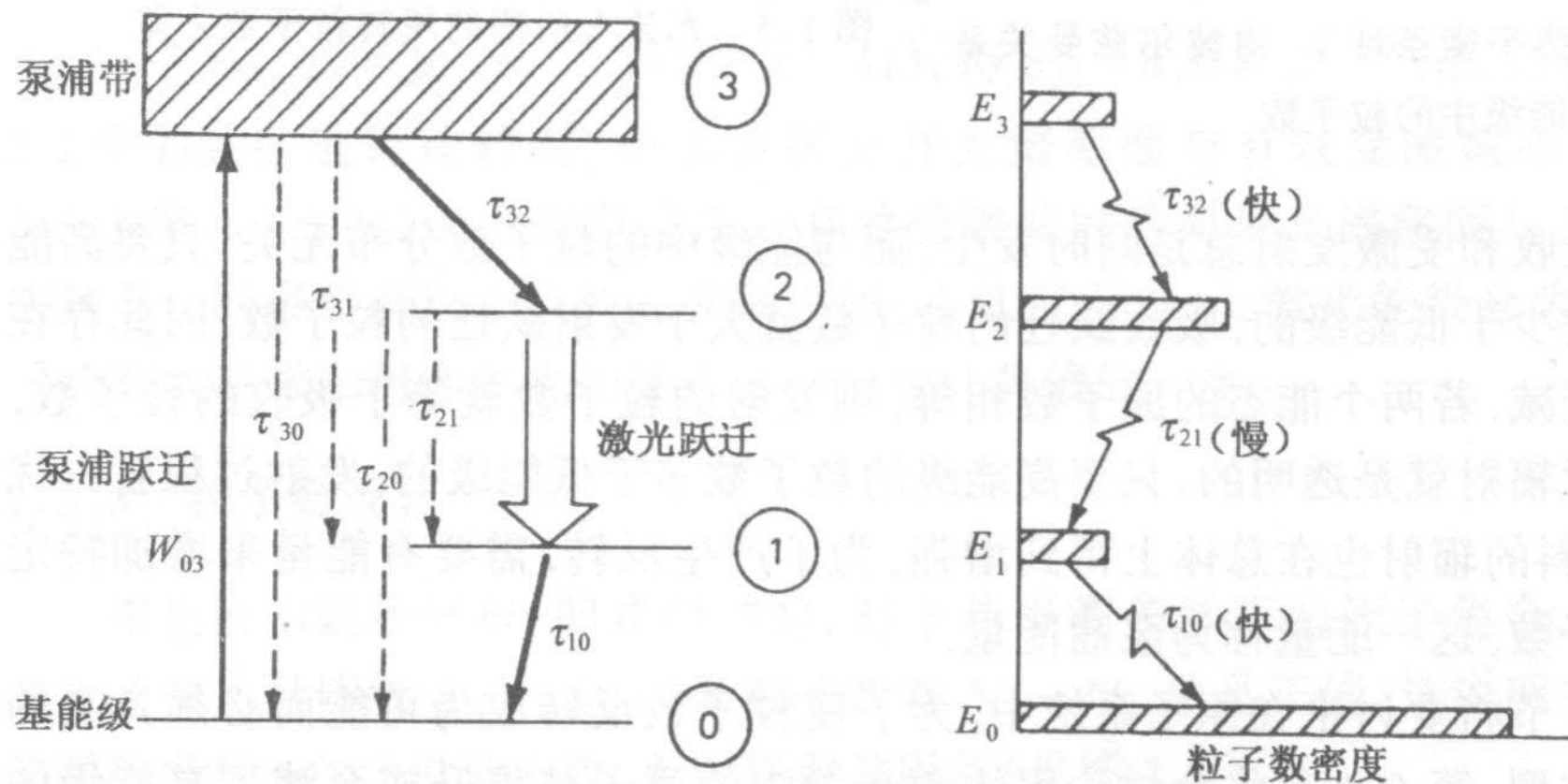
作用：①提供光学反馈能力，使受激辐射光子在腔内多次往返以形成相干的持续振荡；②对腔内往返振荡光束的方向和频率进行限制，以保证输出激光具有一定的定向性和单色性。

激励能源：即泵浦源，常见的方式有：光激励、高压气体放电激励、热激励、化学激励、电子束激励等。分脉冲激励方式和连续激励方式两种。

三能级激光系统



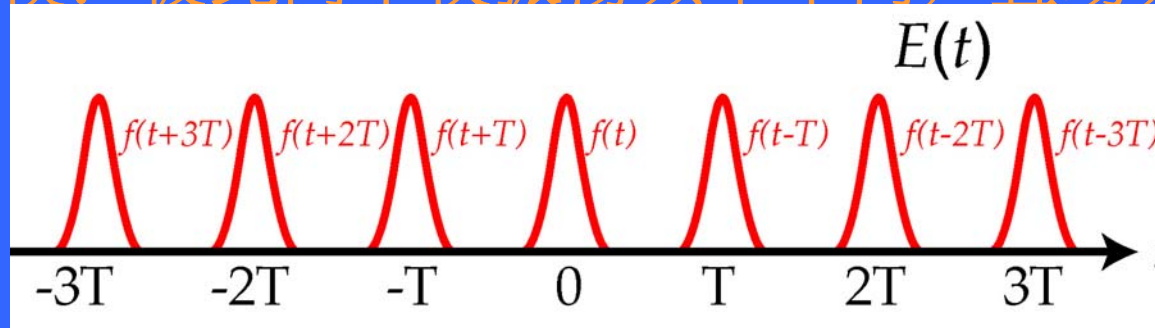
四能级激光系统



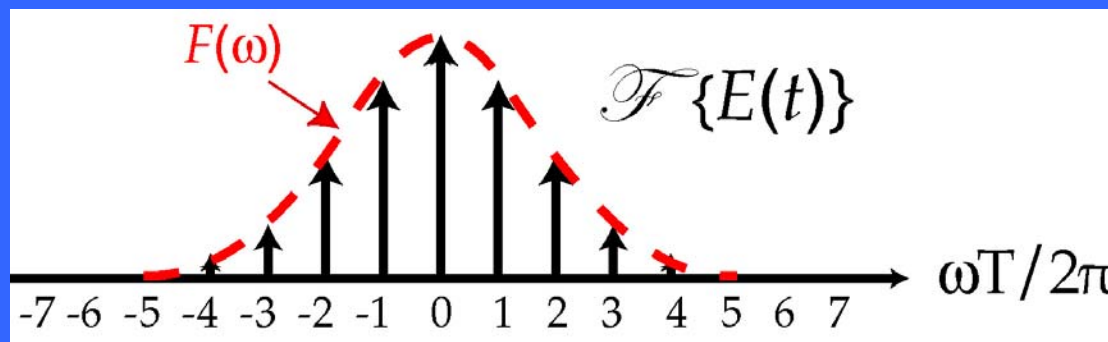
激光模式

纵模：纵模彼此间的差异仅在于它们具有不同的振荡频率；

横模：彼此间不仅振荡频率不同，且场分布也不同。



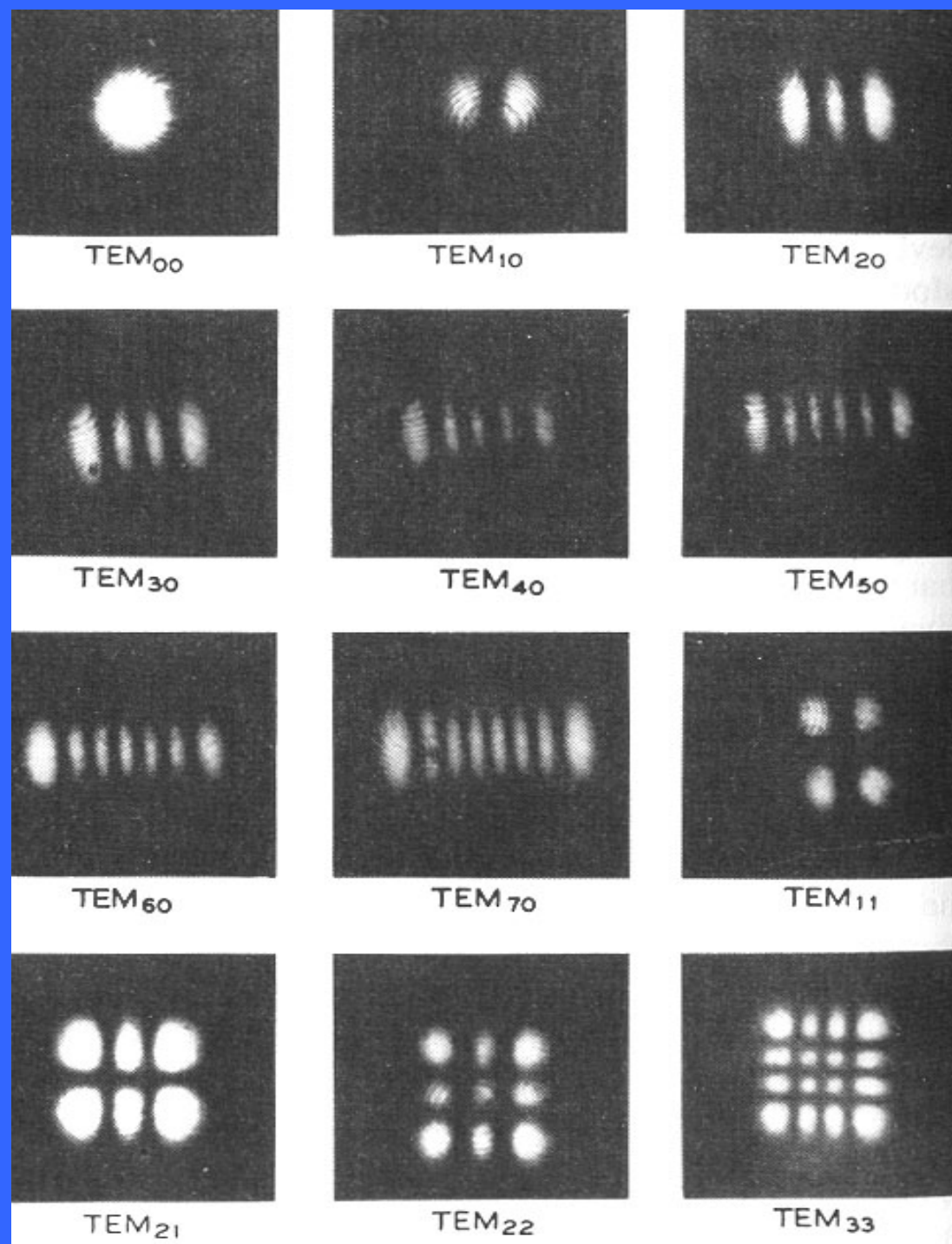
谐振腔的纵模间隔为： $\Delta \nu = c/2L$



实现单纵模的方法：内插选模元件或采用短腔长的谐振腔

激光的横模

实现单横模的方法：
内插选模光阑，自孔径选模，或在LD泵浦中减小泵浦光斑。



激光器的热效应

产生的原因：

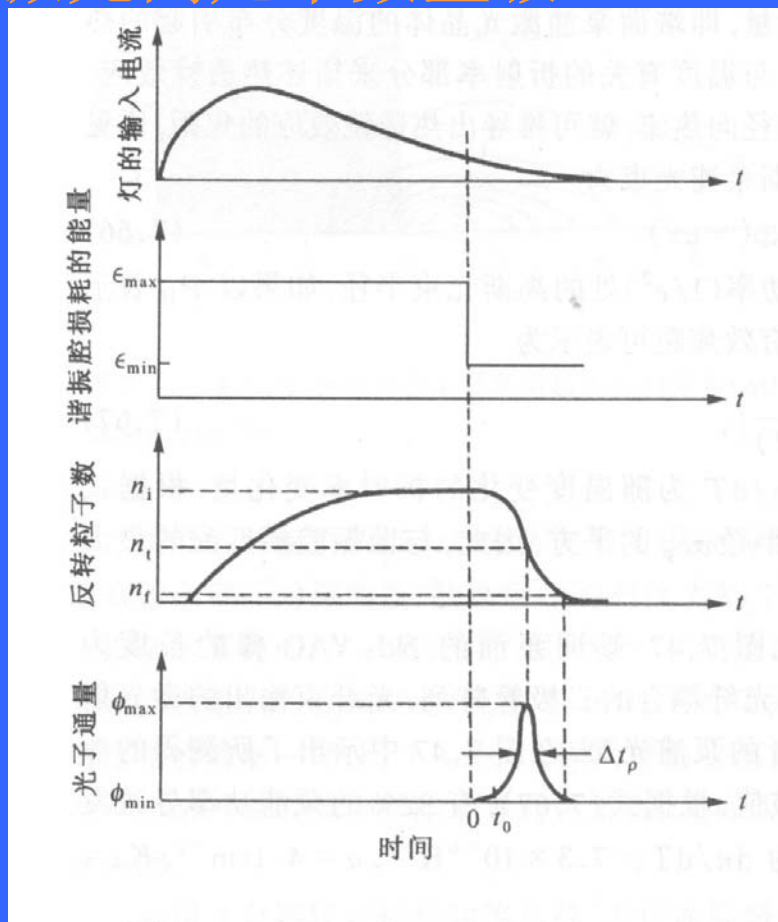
- 1、泵浦带与激光上能级之间的光子能量差转化为热
- 2、激光下能级与基态之间的光子能量差转化为热
- 3、激光跃迁的量子荧光效率小于1，多余的能量转化为热
- 4、宽光谱分布的泵浦源使激光材料对光能有大的吸收而产生热

激光材料吸收了泵浦辐射而发热，与表面散热一道造成激光材料内部不均匀的温度分布，由于热应力使折射率发生变化，导致激光束畸变，有热透镜效应和热致双折射。过强的材料发热还会导致材料损坏。

减小热效应的方法：设计对热效应不敏感的谐振腔，设计更优化的冷却方法，基质材料采用板条结构或叠片结构以改善热效应。

调Q技术

调Q技术是一种广泛使用于产生巨脉冲功率激光的技术，它能使谐振腔的光学品质因数 Q (腔内储能与每周期的能量损耗之比)发生突变，故得名。它产生脉冲峰值比普通长脉冲激光高几个数量级。



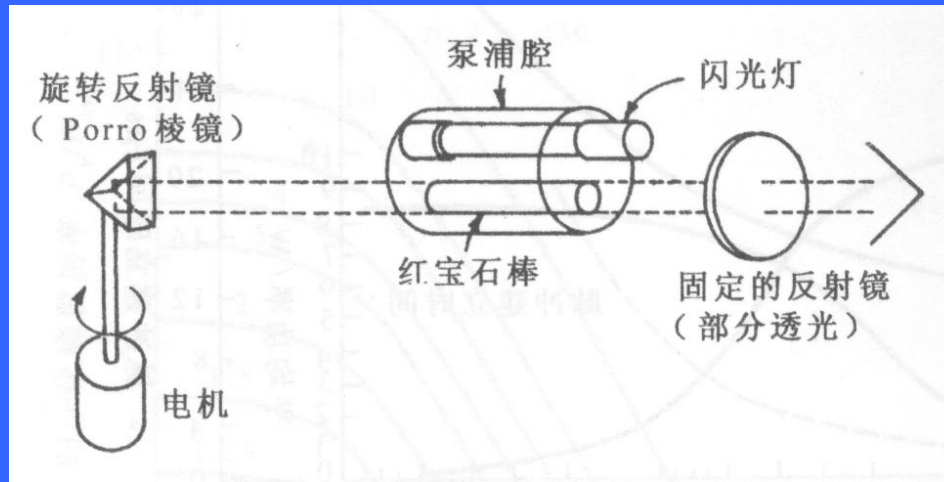
闪光灯输出能量

谐振腔损耗

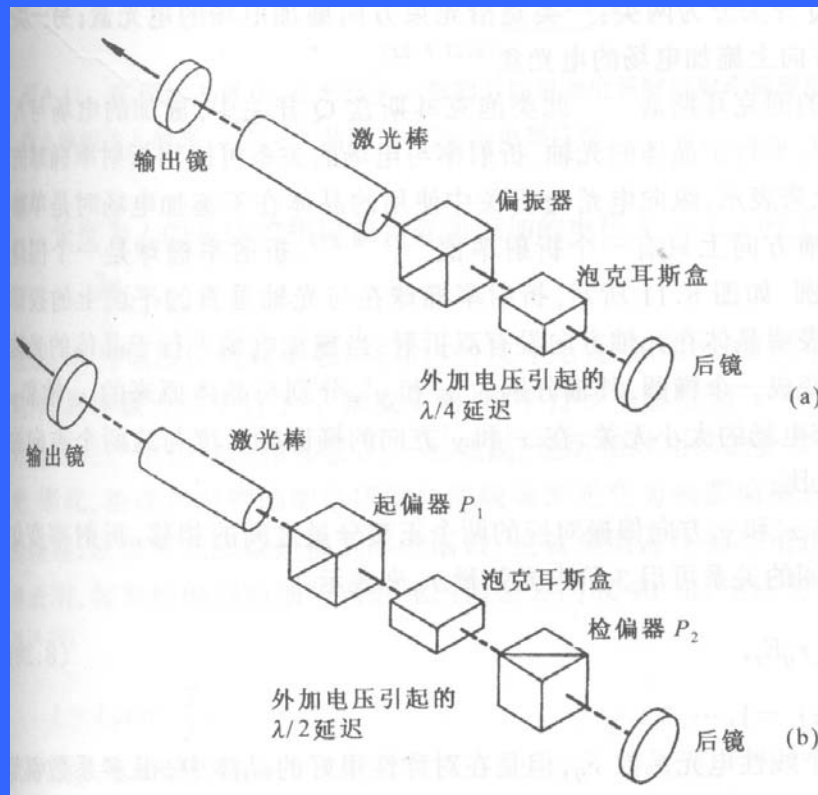
反转粒子数

光子通量

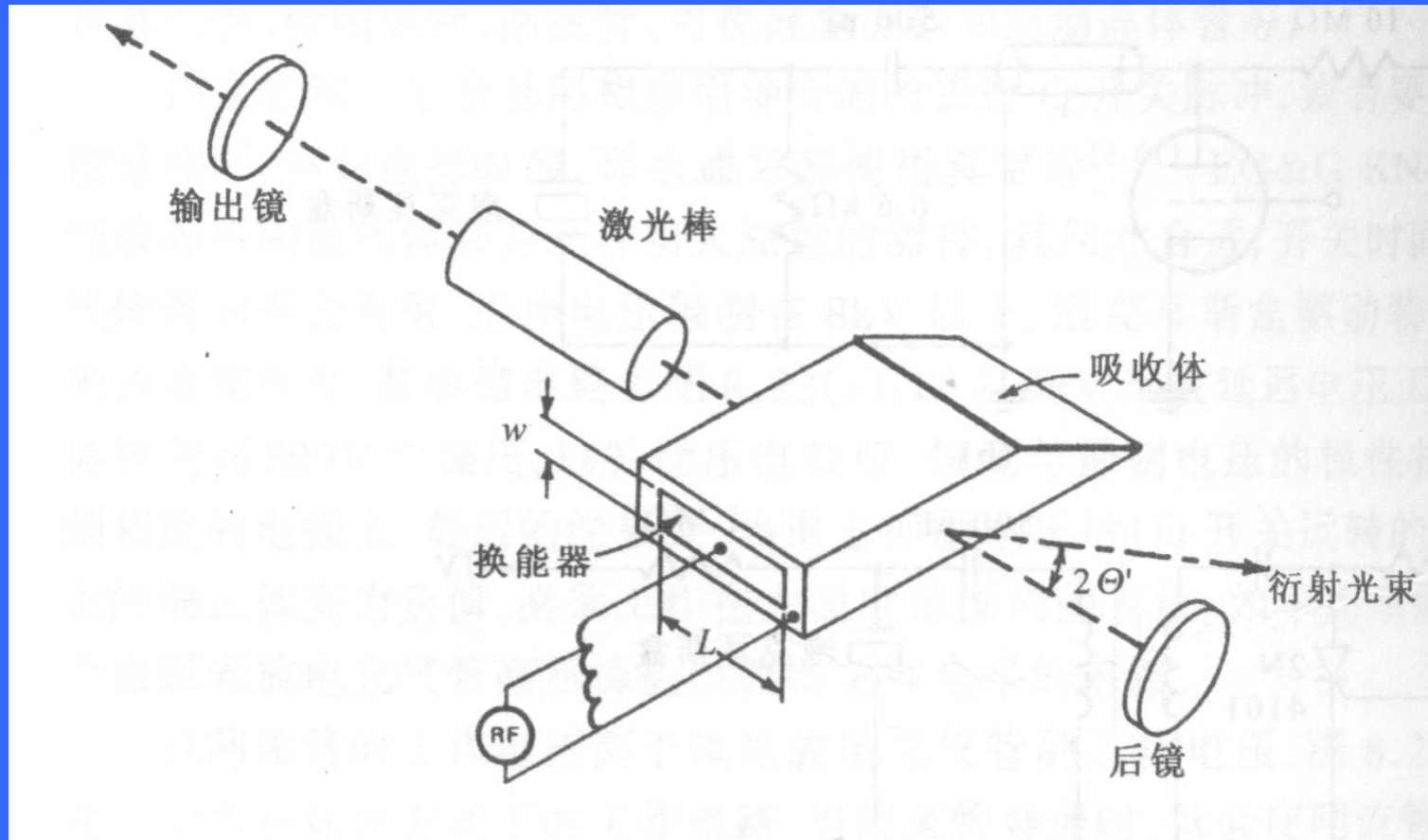
机械Q开关



电光Q开关



声光Q开关



被动Q开关：可饱和吸收

锁模技术

采用合适的非线性器件或外部驱动光调制，使各纵模保持固定的相位关系，可在腔内形成相位规则且功率很大的单脉冲，这种技术称位锁模技术。锁模技术可产生ps和fs量级的超短光脉冲，其脉冲峰值功率可达TW量级。

被动锁模：可饱和吸收体锁模、添加脉冲锁模、克尔透镜锁模、半导体可饱和吸收反射镜。

主动锁模：电光调制器、声光调制器

锁模可分位调频锁模和调幅锁模两种。

固体激光材料

要求：尖锐的荧光谱线、强吸收带、高的量子效率。

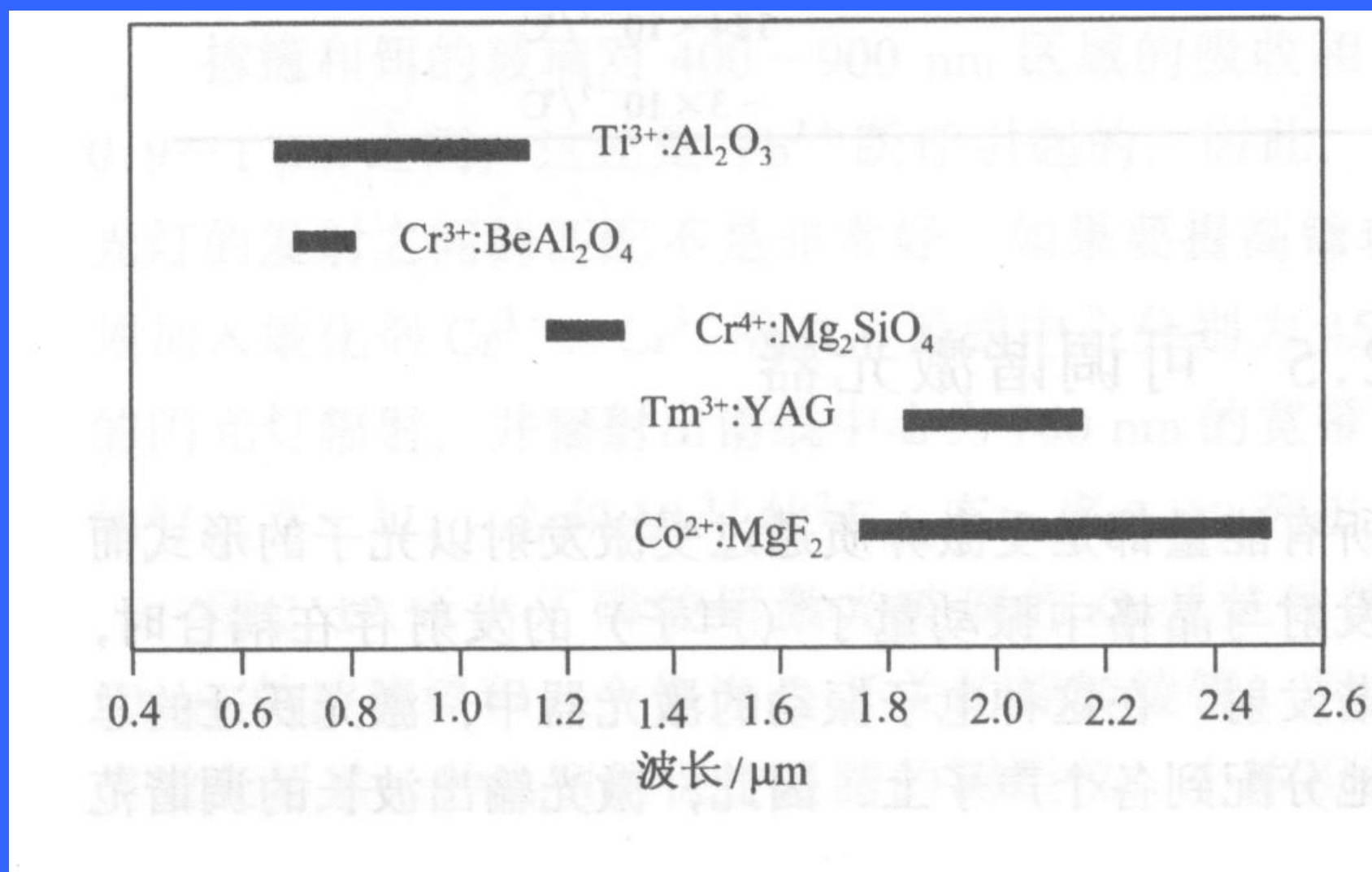
基质材料+激活/敏化离子

常用的基质材料：玻璃、晶体(**YAG**、**YVO₄**、**YLF**、**YAP**、蓝宝石、祖母绿等)，要求具有有利的光学特性，良好的机械、热特性，晶体晶格位能够接受掺杂离子，局部晶场具有对称性和感应出期望的光谱特性必需的强度，基质内的离子具有长的辐射寿命，能够生长出大尺寸的掺杂晶体。

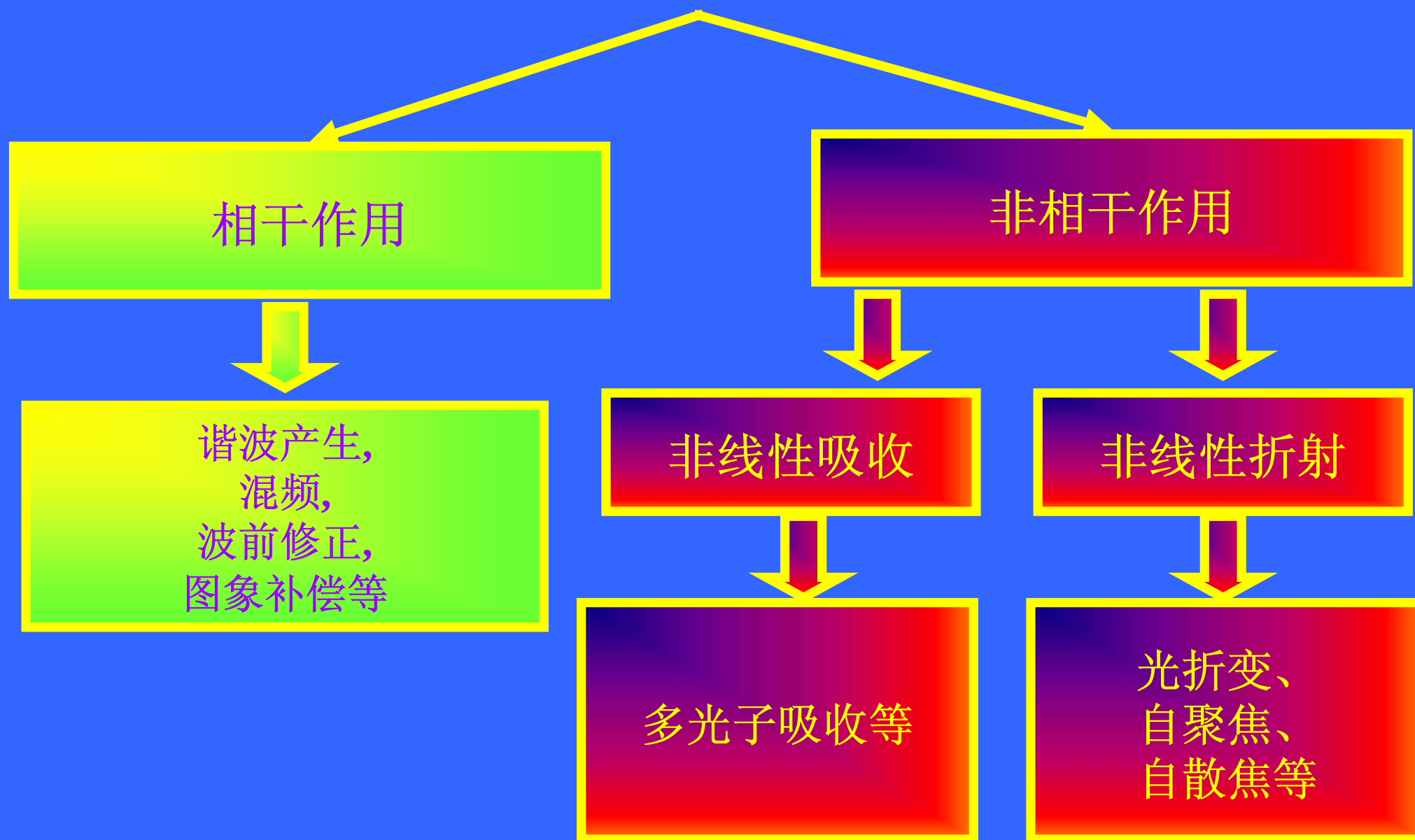
常用的激活离子：稀土离子(**Nd**、**Er**、**Ho**、**Yb**等)，过渡金属离子(**Cr**、**Ti**、**Ni**、**Co**等)

可调谐激光晶体

电子-声子耦合实现可调谐发射



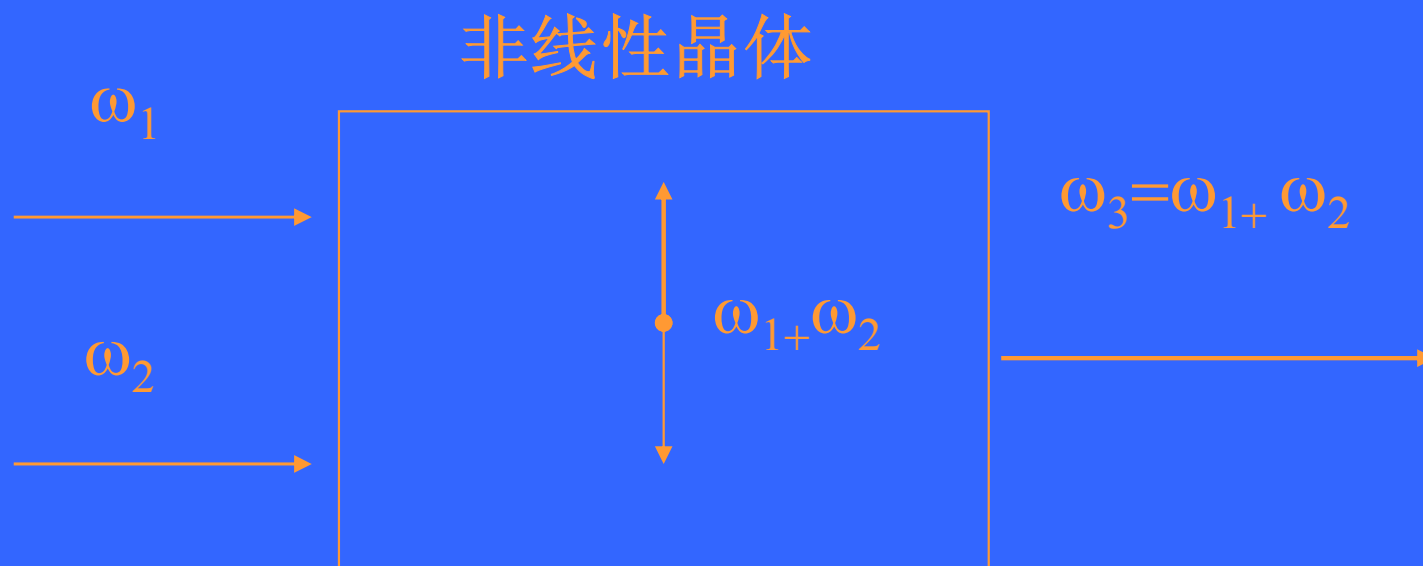
非线性光学



Franken等人“所做的二次谐波产生的实验标志了非线性光学这个领域的诞生。他们用一束波长为**694.2nm**的红宝石激光通过石英晶体，然后观测到从石英晶体发射出来的波长为**347.1nm**的紫外辐射。在观测光学谐波产生时，必须用激光束，因为非线性效应要求外加光场达到与晶体的内部场相当的程度，要产生可观察的谐波发生一般要有一个大约**1kv/cm**的场才能在介质内感应起非线性的响应，这相当于大约**2.5kW/cm²**的光束强度，通常的光源无法实现。

自**1961**年以来，已经发现了大量的非线性光学现象，它们大大增长了我们的有关光与物质相互作用的知识，而且也使光学技术产生了革命性的变化。每一种非线性光学过程都可以由两个部分组成，强光首先在介质内感应非线性响应，然后介质在产生反作用时非线性地改变该光场，前一个过程遵循本构方程，而后一过程遵循麦克斯韦方程。

倍频与和频



电偶极矩极化强度 $\mathbf{P}$

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E} + \dots$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon \mathbf{E}$$

在线性光学中 $n^2 = 1 + \chi^{(1)}$

在非线性光学中，由于E很大，二阶甚至三阶以上的分量不能被忽略，故极化强度与高频分量有关。 $n = n_0 + n_2(I)$

二阶极化强度：

和频： $P_1^{(2)}(\omega_1 + \omega_2) = \chi_{lmn}^{(2)} E_m(\omega_1) E_n(\omega_2)$

当 $\omega_1 = \omega_2$ 时，即为倍频。

差频： $P_1^{(2)}(\omega_1 - \omega_2) = \chi_{lmn}^{(2)} E_m(\omega_1) E_n(\omega_2)$

对于无损介质，根据晶体对称性理论，二阶非线性极化率 $\chi_{lmn}^{(2)}$ 的独立分量大大减少，而中心对称晶体中， $\chi_{lmn}^{(2)}$ 的值为0，故不存在二阶非线性效应。

相位匹配条件

和频光的强度

$$I_3 = \frac{512\pi^5 d^2 I_1 I_2}{n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 c} L^2 \text{sinc}^2(\Delta k L / 2)$$

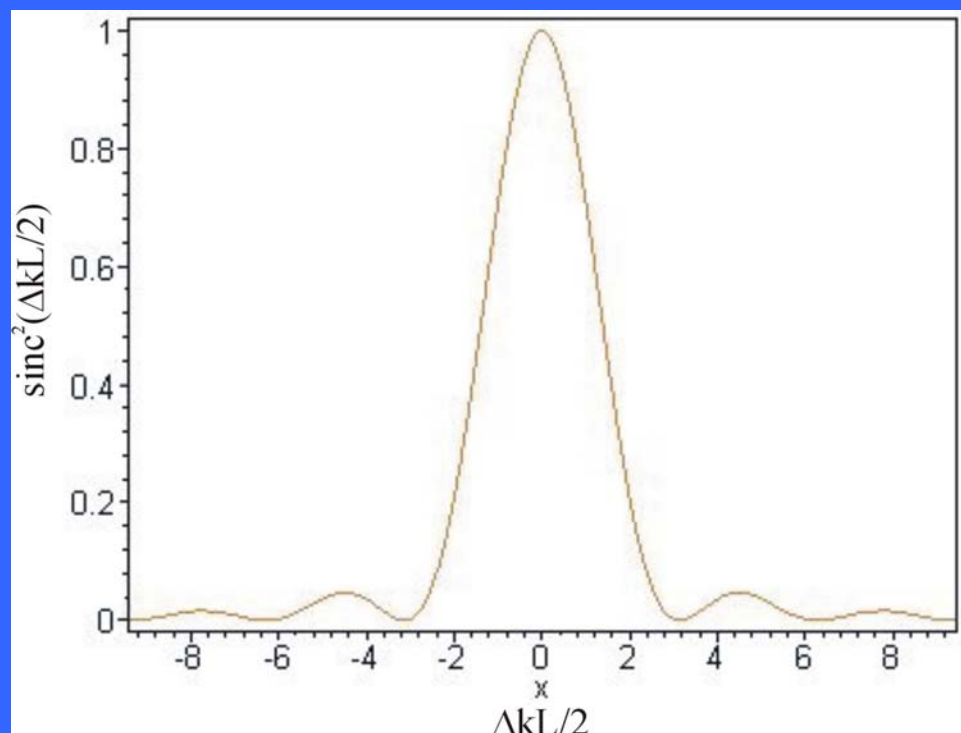
$$\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$$

因此，有效和频、倍频的条件是 $\Delta k=0$ ，称为相位匹配条件

$$\omega_1 n_1 + \omega_2 n_2 = \omega_3 n_3$$

对于倍频

$$n_1 + n_2 = 2n_3$$



相干长度

$$L_c = 2 / \Delta k$$

I类匹配： ω_1 与 ω_2 具有相同的偏振

II类匹配： ω_1 与 ω_2 具有正交的偏振

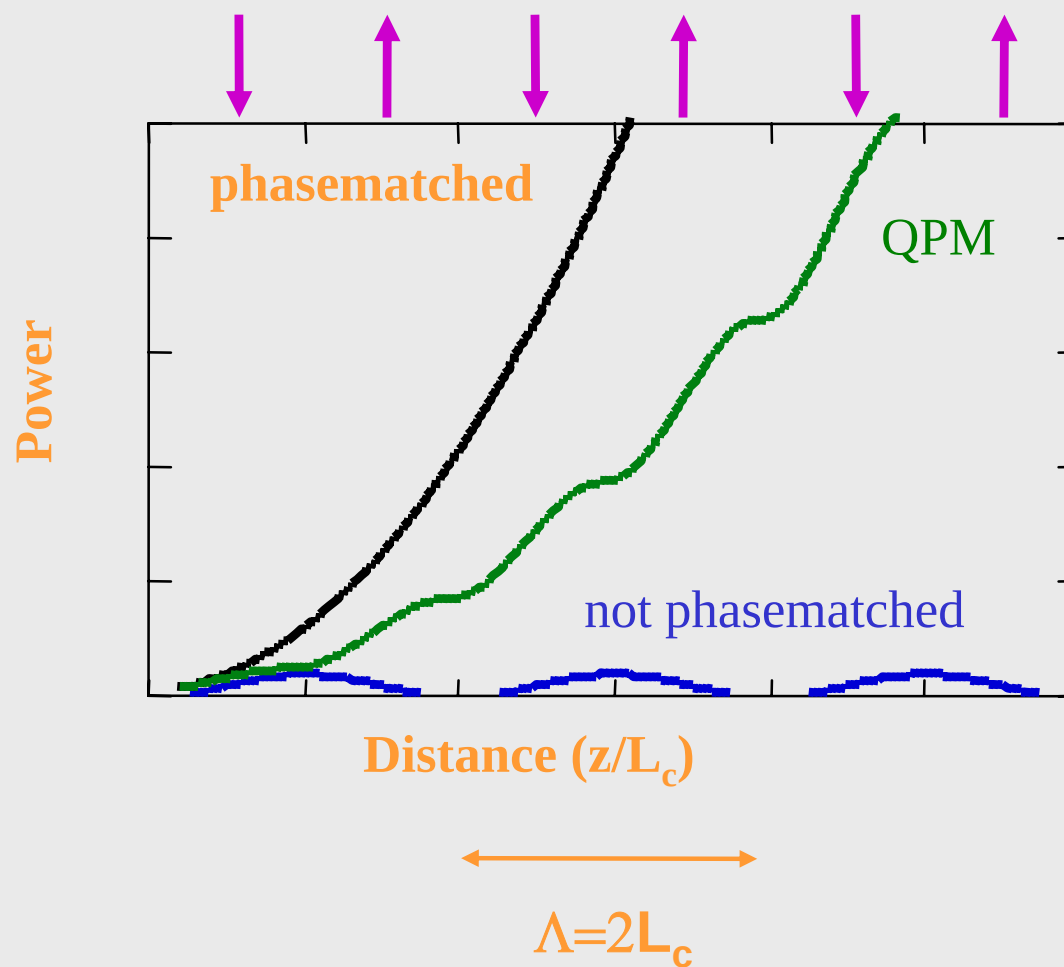
根据非线性晶体的双折射与色散，可以实现倍频、和频的相位匹配。

非临界相位匹配：当匹配方向与晶体x轴或y轴重合时，此时的相位匹配称为非临界相位匹配。非临界相位匹配不存在双折射引起的离散效应，而且具有较大的角度容忍度。

准相位匹配(quasi-phasematching)

采用周期极化晶体PPLN等

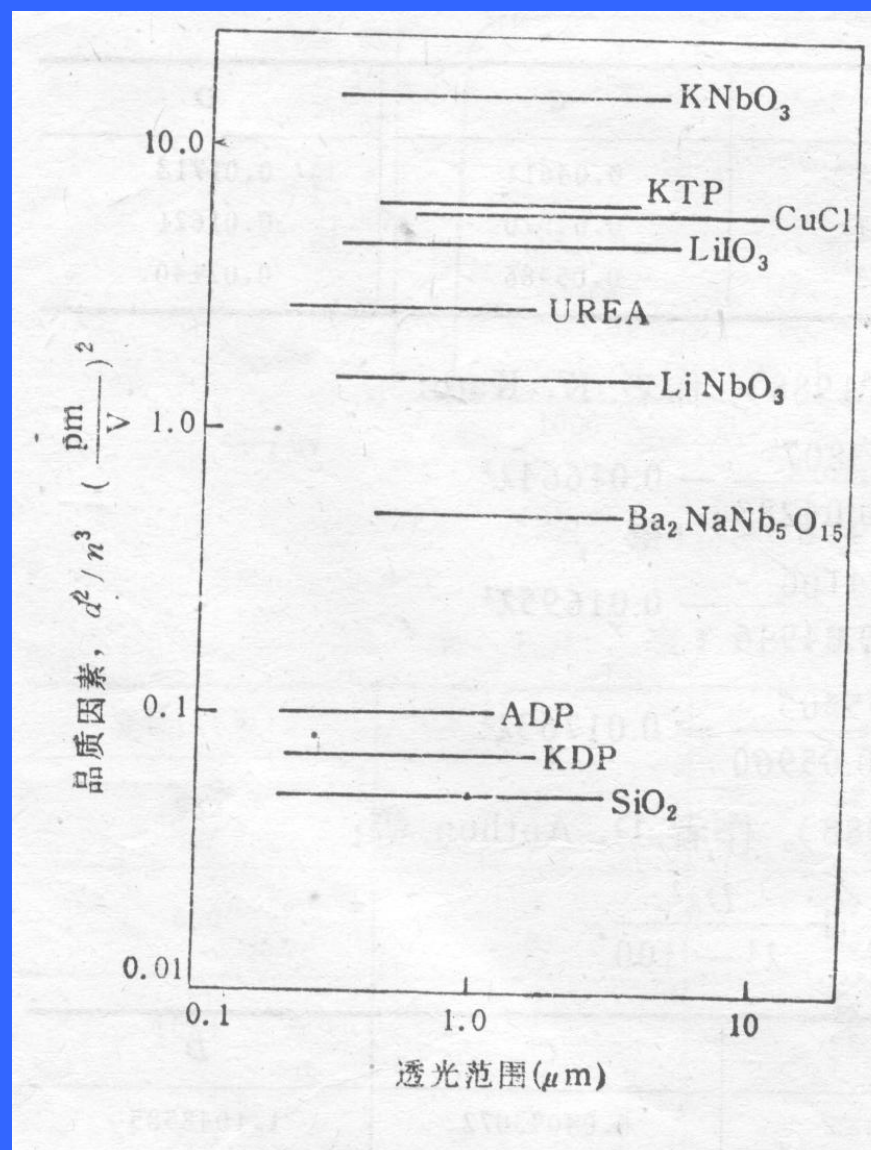
periodically alternate
sign of $\chi^{(2)}$



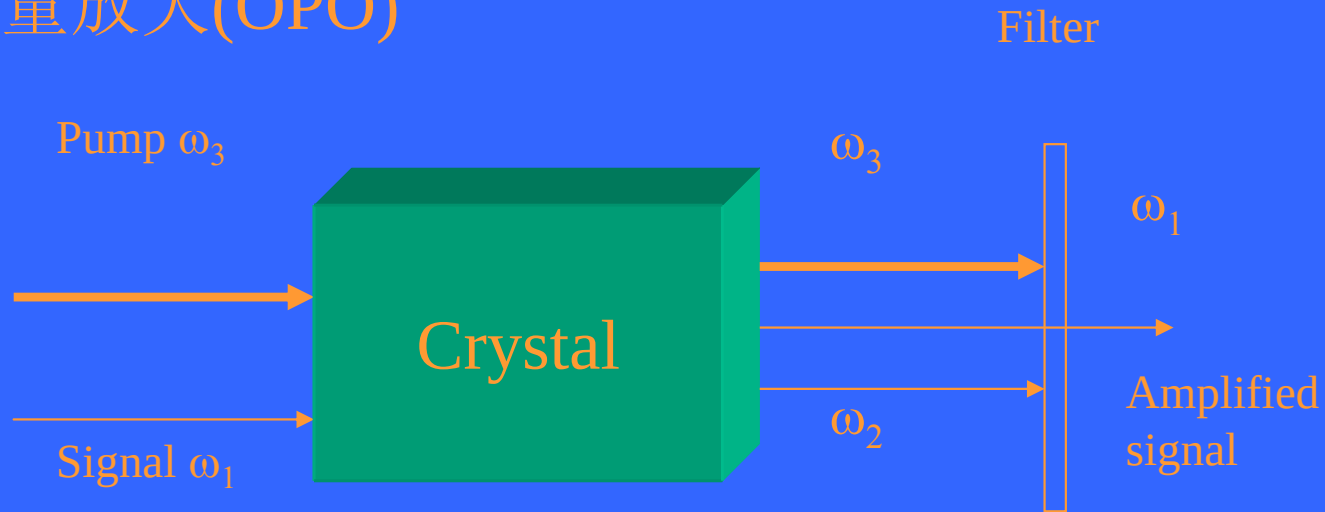
影响倍频效率的参量

- 1、非线性系数
- 2、相位匹配角
- 3、吸收
- 4、光学均匀性
- 5、温度

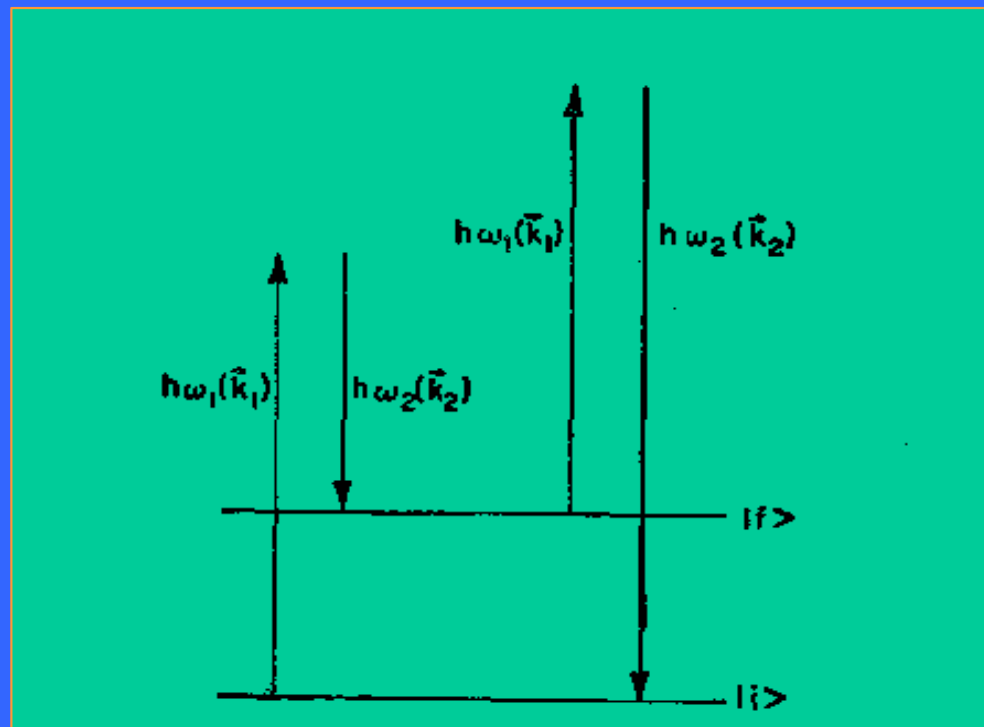
以上影响倍频效率的参量可以集中成品质因数，以衡量材料的优劣。



光参量放大(OPO)



受激拉曼散射(SRS)



非线性材料的性能

非线性系数、损伤阈值、相位失配及透光范围、晶体尺寸及光学均匀性、物理及化学稳定性。

对于高功率的器件，损伤阈值和好的光学质量很重要，非线性系数较小的晶体可通过提高基波激光的功率密度来实现高效率的倍频转换。

相位失配主要与晶体双折射的变化有关，一般来说，非临界相位匹配的性能优于临界相位匹配。

目前最常用的倍频晶体有：KTP、LBO、BBO、KNbO₃、KDP等。

多通道跃迁的钕晶体激光研究

晶体	波长(nm)	跃迁能级	温度(K)
Nd:YAG	946	$^4F_{3/2}-^4I_{9/2}$	300
	1064	$^4F_{3/2}-^4I_{11/2}$	300
	1319 1338	$^4F_{3/2}-^4I_{13/2}$	300
Nd:YAP	930	$^4F_{3/2}-^4I_{19/2}$	300
	1079.5	$^4F_{3/2}-^4I_{11/2}$	300
	1341.4	$^4F_{3/2}-^4I_{13/2}$	300
Nd:YVO ₄	(π)1064.1	$^4F_{3/2}-^4I_{11/2}$	300
	1342	$^4F_{3/2}-^4I_{13/2}$	300
Nd:YLF	(π)1047 (σ)1053	$^4F_{3/2}-^4I_{11/2}$	300

双波长激光研究

利用**YAP**研制成世界上首台固体双波长连续激光器

双波长运转条件：
等阈值条件

Crystals	Nd:YAG	Nd:YLF	Nd:BEL	Nd:YAP
Lifetime(μ s)	230	480	144	150 ^b
${}^4F_{3/2}-{}^4I_{11/2}$				
λ (nm)	1064	1074/1053	1070	1079.5
$\sigma(\times 10^{-19}\text{cm}^2)$	4.6	3.7/2.6	2.1	4.6
${}^4F_{3/2}-{}^4I_{13/2}$				
λ (nm)	1338/1318	1313	1351	1341.4
$\sigma(\times 10^{-19}\text{cm}^2)$	0.9/0.92	0.6	0.4	2.2

钕晶体次强谱线激光研究

激光晶体	Nd:YAG	Nd:YLF	Nd:YAP	Nd:BEL	Nd:YVO ₄
波长(μm)	1.338 /1.318	1.313	1.3414	1.351	1342
跃迁截面 $\sigma(\times 10^{-9}\text{cm}^{-2})$	0.9 /0.92	0.6	2.2	0.4	6.0
荧光寿命 $\tau(\mu\text{s})$	230	480	150	144	99
$\sigma\tau(\times 10^{-9}\text{cm}^{-2}\mu\text{s})$	207 /211.6	288	330	57.6	594

抑制强线获得弱线，在Nd:YAG和Nd:YAP中实现弱线激光。

1.34微米Nd:YAP连续激光输出达188W

晶体激光腔内倍频的可见波段激光研究

绿光： **1.06微米Nd:YAG或1.08微米Nd:YAP+KTP**

红光： **1.3414微米Nd:YAP+LBO**

蓝光： **1.3414微米Nd:YAP三倍频**

未调**Q**红光输出达**3.3W**，已用于光动力学治疗
癌症研究和泵浦祖母绿可调谐激光。

腔内倍频基波功率高，能有效提高倍频转换效率。光腔设计时需综合考虑热效应、光腰半径等因素，以获得基波光斑大、倍频晶体处光斑小且热稳定的谐振腔。

选择合适的倍频晶体(以1.34微米倍频为例)

晶体	KTP	LBO	BBO	LiIO ₄	KNbO ₃
匹配方式	II类	I类	I类	I类	I类
最佳匹配方向	$\theta=58.58^\circ$ $\phi=0^\circ$	$\theta=86.13^\circ$ $\phi=0^\circ$	$\theta=26.26^\circ$ $\phi=0^\circ$	$\theta=23.94^\circ$ $\phi=0^\circ$	$\theta=35.22^\circ$ $\phi=0^\circ$
有效非线性系数 (pm/V)	3.016	1.012	1.476	2.656	10.949
走离角(°)	2.631	0.201	2.868	3.608	3.696
允许角度(mrad-cm)	$\Delta\theta=2.829$ $\Delta\phi=173.56$	$\Delta\theta=21.038$ $\Delta\phi=76.770$	$\Delta\theta=$ 1.338	$\Delta\theta=$ 1.063	$\Delta\theta=1.039$ $\Delta\phi=62.875$
允许波长 (nm-cm)	1.2595	-8.8481	5.2759	1.0922	0.3936
孔径相干长度(光束 半径假设为0.1mm)	2.18mm	28.5mm	1.996mm	1.59mm	1.55mm

采用长腔结构克服波动问题

“绿光”问题：多纵模竞争导致的不稳定性

解决方法：单模或长腔结构。

RGB激光研究

采用的方法：

气体激光器

OPO+倍频

自倍频、自混频

我们采用的技术路线：

1微米和1.3微米双波长激光腔内倍频、混频