

光电子技术 (9)

声波是纵波，在介质中传播时会引起介质的密度随声波周期性变化，进而折射率周期性变化，形成折射率光栅。光通过这种折射率光栅后，位相会受到调制而产生衍射，即声-光衍射。声-光衍射可分为拉曼-奈斯衍射和布拉格衍射，后者的衍射效率高，所以，声光调Q通常采用布拉格衍射调Q。

声-光调制器可以设计成行波型和驻波型两种结构。驻波型的驱动功率比行波型低，但驻波超声场在声光介质中不易迅速消除，因而开关时间较长，故实际使用中多采用行波型。

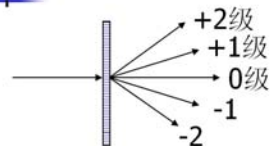
声光调Q激光器结构与工作原理如图。

PTM声光调Q激光器结构与原理如图。采用共焦腔提高倒出效率。

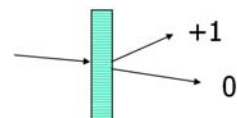
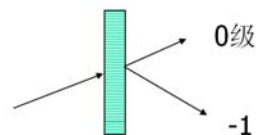
倒出效率为： $2\eta(1-\eta)$ 最大值为50%，当 $\eta=50\%$

注意， $\eta>50\%$ ，就不要使用双通，否则反而降低倒出效率

光电子技术



拉曼-奈斯衍射



布拉格衍射

光电电子技术 (9)

声光调Q易于实现高重复率调Q，从数10K-数MHz

四、可饱和吸收体调Q

可饱和吸收体主要有染料，利用染料的非线性吸收特性实现调Q。

染料的吸收特性曲线如图。在低强度时，吸收大于损耗，激光不振荡，处于粒子数反转积累阶段，当积累到增益大于损耗时，脉冲开始振荡，在振荡过程中，由于脉冲前后沿的强度较低，所以吸收大于中心处，反过来，就是脉冲中心（峰）处的增益大于前后沿，所以，振荡放大的结果是脉冲越来越窄。

染料调Q激光器结构如图。结构简单，染料调Q经历三个阶段：

（1）线性吸收；（2）非线性吸收；（3）非线性放大。

光电电子技术 (9)

染料的要求：（1）吸收峰波长与激光波长重合。（2）染料浓度适当，具有合适的饱和光强。（3）染料溶液要稳定。

§ 2.12 激光器锁模技术

一、激光器的多纵模工作

当激光介质的增益线宽大于纵模间隔时，激光器就会出现多纵模振荡。

二、多纵模振荡的输出表示

设激光器输出N个纵模，则多纵模输出的总电场为：

$$E(t) = \sum_{q=1}^N E_q \cos(\omega_q t + \varphi_q)$$

光电子技术 (9)

式中 E_q , ω_q , φ_q 分别为第 q 个纵模的振幅, 角频率, 初相位。

多纵模输出的强度为:

$$I(t) \propto |E(t)|^2 = \sum_{q=1}^N E_q^2 \cos^2(\omega_q t + \varphi_q) + 2 \sum_{q \neq p}^N E_p E_q \cos(\omega_q t + \varphi_q) \cos(\omega_p t + \varphi_p)$$

测量到的输出强度为时间平均。当 $\varphi_p - \varphi_q \neq \text{常数}$, 在 $0-2\pi$ 间均匀变化时, 此平均强度为:

$$I_0 = \overline{I(t)} = \sum_{q=1}^N \frac{E_q^2}{2} + 0$$

上式表明各多纵模的初相位差随机变化时, 多纵模输出的平均强度为各纵模的平均强度之和。

反过来, 假设各纵模间的初相位差恒定, 即 $\varphi_p - \varphi_q = \text{常数} = \alpha$, 并设

光电子技术 (9)

激光增益曲线中心频率为 ω_0 , 有 $2M+1$ 个纵模, 每个纵模的振幅相同, 各纵模的频率为:

$$\omega_0 - M\Delta\omega, \quad \omega_0 - (M-1)\Delta\omega, \quad \dots, \quad \omega_0, \quad \omega_0 + \Delta\omega, \quad \dots, \quad \omega_0 + M\Delta\omega.$$

各纵模的初相位为:

$$-M\alpha, \quad -(M-1)\alpha, \quad \dots, \quad -\alpha, \quad 0, \quad \alpha, \quad \dots, \quad M\alpha$$

$$\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu, \quad \Delta\nu \text{ 为纵模间距}$$

多纵模输出的激光电场表示为:

$$\begin{aligned} E(t) &= E_0 \sum_{q=-M}^M \cos((\omega_0 + q\Delta\omega)t + q\alpha) \\ &= E_0 \{ \cos(\omega_0 t) + 2 \cos(\omega_0 t) \sum_{q=1}^M \cos[q(\Delta\omega t + \alpha)] \} \end{aligned}$$

光电子技术 (9)

$$\begin{aligned}
 &= E_0 \cos \omega_0 t \left\{ 1 + 2 \sum_{q=1}^M \cos[q(\Delta\omega t + \alpha)] \right\} \\
 &= E_0 \cos \omega_0 t \left\{ 1 + \frac{2 \sum_{q=1}^M \cos[q(\Delta\omega t + \alpha)] \sin(\Delta\omega t + \alpha) / 2}{\sin(\Delta\omega t + \alpha) / 2} \right\} \\
 &= E_0 \cos \omega_0 t \left\{ 1 + \frac{\sum_{q=1}^M \left[\sin \frac{(2q+1)(\Delta\omega t + \alpha)}{2} - \sin \frac{(2q-1)(\Delta\omega t + \alpha)}{2} \right]}{\sin(\Delta\omega t + \alpha) / 2} \right\} \\
 &= E_0 \cos \omega_0 t \left\{ 1 + \frac{\sin(2M+1)(\Delta\omega t + \alpha) / 2 - \sin(\Delta\omega t + \alpha) / 2}{\sin(\Delta\omega t + \alpha) / 2} \right\}
 \end{aligned}$$

光电子技术 (9)

$$= E_0 \cos \omega_0 t \sin \frac{(2M+1)(\Delta\omega t + \alpha)}{2} / \sin \frac{\Delta\omega t + \alpha}{2}$$

输出光强度为:

$$I(t) \propto |E(t)|^2 = E_0^2 \cos^2 \omega_0 t \left[\frac{\sin \frac{(2M+1)(\Delta\omega t + \alpha)}{2}}{\sin \frac{(\Delta\omega t + \alpha)}{2}} \right]^2$$

讨论: 1) 是一个调幅波, 载波频率为 ω_0 。幅度调制因子为

2) 极大值在 $\sin(\Delta\omega t + \alpha)/2 = 0$ 时取得, 所以相邻极大值之间的时间间隔为:

光电子技术 (9)

$$\tau = t_n - t_{n-1} = \frac{2n\pi - \alpha}{\Delta\omega} - \frac{(2n-2)\pi - \alpha}{\Delta\omega} = \frac{2\pi}{2\pi\Delta\nu} = \frac{1}{\Delta\nu} = \frac{2L}{c}$$

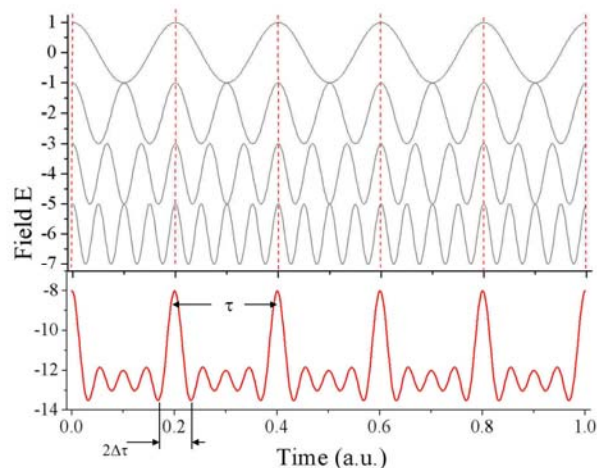
即相邻极大值间隔为光在腔内往返一次的时间，所以锁模后激光器内只有一个脉冲在来回振荡。

3)、脉冲宽度 $\Delta\tau$ 定义为半高全宽。由调幅函数可得脉冲宽度为：

$$\Delta\tau = t_1 - t_0 = \left(\frac{2\pi}{(2M+1)} - \alpha \right) / \Delta\omega - \alpha / \Delta\omega = \frac{1}{(2M+1)\Delta\nu} = \frac{1}{2M+1} \frac{2L}{c}$$

4)、脉冲幅度极大值为 $E_0(2M+1)$ ，所以脉冲峰功率正比于 $[E_0(2M+1)]^2$ 。而非锁模多模自由运转，峰功率是在 $E_0^2(2M+1)$ 量级。锁模后峰功率提高了 $(2M+1)$ 倍，而固体激光器中振荡模数 $(2M+1)$ 可大 10^3 - 10^6 。所以，锁模能极大地提高峰功率。

锁模的物理本质？



锁模的物理本质，同相点相干迭加形成峰，异相点干涉相消，纵模数越多，相消越干净



光电子技术 (9)

二、锁模技术

由上面的定性讨论可知，锁模实质上就是锁各个纵模间的初始位相。使它们之间保持恒定差。

锁模技术包括主动、被动和自锁三种。

(一)、主动锁模

主动锁模包括损耗调制和位相调制。

1、损耗调制锁模原理

在谐振腔内放置一损耗调制器，设损耗调制为正弦型，频率为 $2\pi c/2L=\omega_m$ ，则损耗调制可表示为：



光电子技术 (9)

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \Delta\alpha \cos(\omega_m t + \varphi_1)$$

或者透射调制表示为：

$$T(t) = T_0 + \Delta T \cos(\omega_m t + \varphi_2)$$

设未调制激光中心模电场为：

$$E(t) = E_0 \sin(\omega_c t + \varphi_c)$$

此电场通过调制器后表示为：

$$\begin{aligned} e(t) &= E(t)T(t) = E_0[T_0 + \Delta T \cos(\omega_m t + \varphi_2)]\sin(\omega_c t + \varphi_c) \\ &= A_c[1 + m \cos(\omega_m t + \varphi_2)]\sin(\omega_c t + \varphi_c) \end{aligned}$$

式中 $A_c = E_0 T_0$ ， $m = \Delta T / T_0 < 1$ 。

展开上式得：

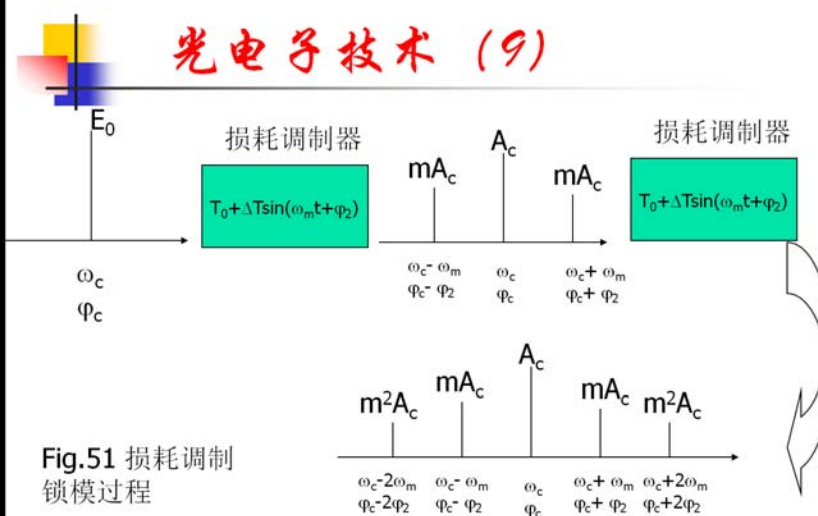
光电子技术 (9)

$$e(t) = A_c \sin(\omega_c t + \varphi_c) + \frac{mA_c}{2} \sin[(\omega_c - \omega_m)t + \varphi_c - \varphi_2] + \frac{mA_c}{2} \sin[(\omega_c + \omega_m)t + \varphi_c + \varphi_2]$$

上式表示三个频率分别为 $\omega_c - \omega_m$, ω_c , $\omega_c + \omega_m$ 的平面波的迭加, 即一个调幅平面波可以分解为三个平面波的迭加。而调制新产生的两个频率 $\omega_c - \omega_m$ 和 $\omega_c + \omega_m$ 刚好是谐振腔允许的两个纵模的频率, 所以它们能维持振荡。而三个纵模中相邻两纵模间的初始位相差恒为 φ_2 。这表明损耗调制实现了锁模。如图。

同理, 上述三个平面波再次通过调制器调制后, 又会激发上下边频 $\omega_c + 2\omega_m$ 和 $\omega_c - 2\omega_m$, 依次继续调制下去, 激发起所有谐振腔允许的纵模 $\omega_c - N\omega_m$, $\omega_c - (N-1)\omega_m$, ..., $\omega_c - \omega_m$, $\omega_c + \omega_m$, ...,

光电子技术 (9)



光电子技术 (9)

$\omega_c + (N-1)\omega_m$, $\omega_c + N\omega_m$ 。这些纵模中相邻纵模间的位相差为 φ_2 。它们的迭加产生锁模脉冲，脉冲周期为 $2\pi/\omega_m$ 。脉冲宽度约：

$$\Delta\tau = \frac{2\pi}{(2N+1)\omega_m} = \frac{1}{(2N+1)\Delta\nu} = \frac{1}{\Delta\nu_g} = \frac{2L}{(2N+1)C}$$

式中 $\Delta\nu_g$ 为增益线宽。

对于非正弦型周期损耗调制 $T(t) = T(t + 2\pi/\omega_m)$ ，可以展开为正弦型调制的组合，正弦调制的角频率为基频的整数倍，即 $q\omega_m$ 。所以，非正弦损耗调制一次就能激发起所有上、下边频带。因而，锁模过程更快。

2、相位调制锁模原理

通过周期调制平面波电场的相位也能实现锁模。

光电子技术 (9)

设周期位相调制为： $\varphi(t) = m \sin \omega_m t$

被调制平面波电场为： $E(t) = E_0 \sin(\omega_c t)$

相位调制波为：

$$\begin{aligned} e(t) &= E_0 \sin(\omega_c t + \varphi(t)) = E_0 \sin(\omega_c t + m \sin \omega_m t) = E_0 \operatorname{Im} \{ e^{j[\omega_c t + m \sin(\omega_m t)]} \} \\ &= E_0 \{ J_0(m) \sin \omega_c t + J_1(m) [\sin(\omega_c + \omega_m)t - \sin(\omega_c - \omega_m)t] \\ &\quad + J_2(m) [\sin(\omega_c + 2\omega_m)t + \sin(\omega_c - 2\omega_m)t] + \dots + \\ &\quad J_n(m) [\sin(\omega_c + n\omega_m)t + (-1)^n \sin(\omega_c - n\omega_m)t] + \dots \} \end{aligned}$$

式中 $J_n(m)$ 为 n 阶一类贝塞尔函数。展开上式利用了公式：

$$e^{ix \sin \theta} = \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(x) e^{iq\theta} \quad \text{和} \quad J_{-q}(x) = (-1)^q J_q(x)$$



复习要点

- 1、声光调制器的工作原理，行波性，驻波性声光Q开关的特点，声光Q开关的调Q原理，布拉格和拉曼-奈斯衍射的特点。声光调Q的优点？腔倒空声光调Q的倒出效率？
- 2、染料调Q的原理，优缺点？属于什么类型调Q技术？
- 3、调Q技术的分类，主、被动型？
- 4、何谓锁模？锁模技术的分类？锁模的前提？锁模脉冲宽度、峰功率，脉冲重复率？
- 5、损耗调制的锁模原理？相位调制的锁模原理？



作业九

- 1、声光调制器的工作原理？设计一种声光调Q激光器，并解释其工作过程。
- 2、何谓锁模？锁模能获得的脉冲宽度和脉冲重复率为多少？