

## 光电子技术 (10)

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:

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

式中  $J_n(m)$  为  $n$  阶一类贝塞尔函数。展开上式利用了公式:

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

## 光电子技术 (10)

上式表明, 周期正弦调制平面波的相位也能激发起谐振腔允许的**所有纵模**, 这些纵模间的初始位相差恒定, 它们的迭加即产生锁模脉冲。

### 3、主动锁模激光器的**结构Fig52.ppt**与设计考虑

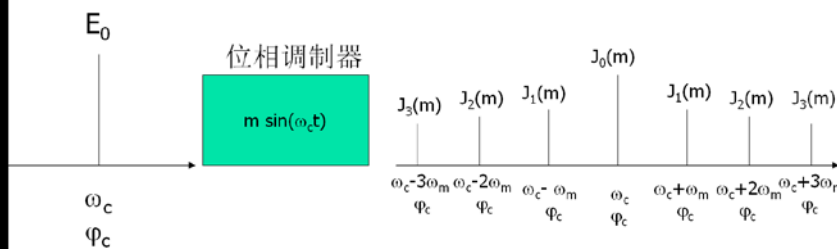
主动锁模调制器要求:

- (1) 主动锁模调制器的**调制频率必须与谐振腔允许的纵模间隔**相同。
- (2) 主动锁模激光器对光学元件质量要求更高, 对光学反馈更灵敏, 所以, 端镜基片要做成楔形, 透射面要切割成布儒斯特角等。
- (3) 调制器应放置在**尽量靠近输出端镜**, 保证光束的调制频率为  $\omega_m$  同时保证各纵模相位稳定。

#### (二)、被动锁模

##### 1、染料饱和吸收锁模原理

## 光电子技术 (9)



当 $\omega_m$ 等于纵模间隔乘 $2\pi$ 时，相位调制一次激发所有增益带宽内允许的纵模，位相相同，叠加形成巨脉冲。



图51a 正弦相位调制锁模过程

## 光电子技术 (10)

染料锁模可以定性理解为周期性损耗调制锁模，但每次损耗调制的调制度不同，所以数学处理更复杂。通常把染料锁模分成三个阶段。（1）线性吸收阶段。此阶段主要是增益积累。

（2）非线性吸收阶段。高增益模开始振荡，受到染料的调制。

（3）非线性放大阶段。脉冲被压缩，频谱展宽，更多纵模被激发，又进一步压缩脉冲。（可以近似看着周期损耗调制）

### 2、被动锁模激光器结构及设计考虑

腔内不容许任何副腔效应，反射镜基片要设计成楔形，透射端面要切割成布儒斯特角等。

对染料的要求：

（1）染料吸收中心波长要与激光中心波长重合。（2）染料吸收

## 光电子技术 (10)

线宽大于等于激光线宽。(3) 染料弛豫时间短于脉冲在腔内往返一周的时间。

### (三) 自锁模

自锁模指由激光增益介质自身产生的锁模。目前实现自锁模的激光器为钛宝石激光器。钛宝石有强的二阶电光效应，即克尔效应，或者强的三阶非线性效应。当强的激光通过时，就会引起折射率变化：

$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

进而引起光脉冲的位相变化：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L = \frac{2\pi L}{\lambda} n_2 I$$

## 光电子技术 (10)

这种由光脉冲强度引起的自己的相位变化，称为自相位调制。

自相位调制会引起频谱展宽，展宽量为：

$$\Delta\omega = \frac{d\Delta\phi}{dt} = \frac{2\pi L}{\lambda} n_2 \frac{dI}{dt}$$

所以，自相位调制使光波的频谱展宽为一个连续带。脉冲后沿( $dI/dt$ 为正)使频率向高频端扩展，而前沿( $dI/dt$ 为负)产生低频展宽。而扩展的连续带中仅有与谐振腔允许的纵模频率相同的谱线能够维持振荡，其它谱带消失。激发起的多纵模迭加，使脉冲变得更窄， $dI/dt$ 更大，频谱展宽更大，激发起更多的纵模。更多的纵模迭加产生更窄的脉冲，进而更大 $dI/dt$ ，这种正反馈过程继续，直至达到一个稳定锁模状态

## SPM展宽频谱

SPM使频谱展宽主要发生在脉冲的前后沿

非线性折射率:  $\Delta n(t) = n_2 |E(t)|^2$  (a)

$$n_2 = 3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2 \text{ W}^{-1}$$

自相位调制  $\Delta \phi(t) = \left( \frac{\omega}{c} \right) \Delta n_{\text{eff}} = \left( \frac{\omega}{c} \right) n_2 |E(t)|^2 l_{\text{eff}}^{(b)}$

频率调制  $\Delta \omega(t) = - \frac{\partial(\Delta \phi)}{\partial t} = \left( \frac{\omega}{c} \right) n_2 \frac{\partial |E(t)|^2}{\partial t} \cdot l_{\text{eff}}^{(c)}$

对高斯轮廓的激光脉冲

$$\Delta \omega(t) = \frac{2\pi n_2}{\lambda n \epsilon_0 c} \left( \frac{2t}{t_p^2} \right) I(t) \cdot l_{\text{eff}}$$

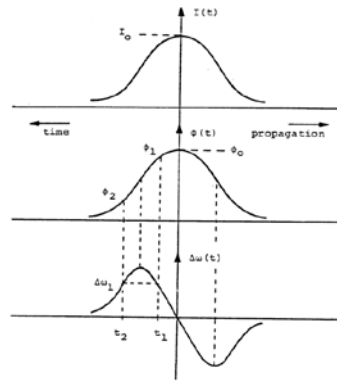
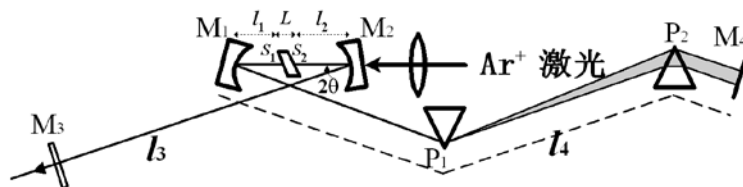


图  $I(t)$ 、 $\phi(t)$  和  $\Delta \omega(t)$  的关系

## 光电子技术 (7)



掺钛蓝宝石激光器结构



## 光电子技术 (10)

目前在钛宝石激光器上实现自锁模，获得了几飞秒的锁模脉冲。自锁模激光器的结构和锁模原理如图。

### 第三章、激光光束的调制与偏转

激光调制的目的就是为了把信号加载到激光束上，以激光为载波，将信息传递到远处。

#### § 3.1、激光调制原理

所谓调制就是使激光束的振幅、强度、相位、频率随信号而变化。完成激光调制的装置称为激光调制器。

激光调制分类：内调制和外调制。



## 光电子技术 (10)

内调制：指直接调制激光振荡器的参数，使输出的激光束的某个参数随调制信号而变化。

外调制：指调制激光器输出的稳定光束的某个参数，使其随调制信号而变化。外调制是目前广泛使用的调制方法。

按照激光束的受调制参数分类，激光调制可分为调幅、调频、调相和强度调制。

按激光载波的能量分布形式分类：连续调制和脉冲调制。其中脉冲调制又分模拟调制和数字调制。

一、连续调制

1、幅度调制



## 光电子技术 (10)

设激光辐射的偏振电场为:

$$E(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

则使 $A_0$ 按调制信号的规律变化的过程称为幅度调制, 简称调幅。

设调制信号为正弦波, 即

$$E_m(t) = 1 + m_A \cos \omega_m t$$

调幅信号表示为:

$$\begin{aligned} e(t) &= E(t)E_m(t) = A_0(1 + m_A \cos \omega_m t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \\ &= A_0 \left\{ \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{m_A}{2} \cos[(\omega_0 + \omega_m)t + \varphi_0] + \frac{m_A}{2} \cos[(\omega_0 - \omega_m)t + \varphi_0] \right\} \end{aligned}$$



## 光电子技术 (10)

上式表明, 正弦调幅波可以用频率分别为 $\omega_0$ ,  $\omega_0 - \omega_m$ ,  $\omega_0 + \omega_m$ 的三个平面波的迭加合成。

实际的调制信号可以是任意的, 通过调制器使激光的幅度随其变化。

### 2、频率调制

频率调制就是使激光束的频率随调制信号而变化。设频率调制引起的相角变化量为:

$$\Delta \omega t = \frac{\omega_d}{\omega_m} \sin \omega_m t$$

则调频波可表示为

$$\begin{aligned} e(t) &= A_0 \cos[(\omega_0 + \Delta \omega)t + \varphi_0] = A_0 \cos\left[\left(\omega_0 + \frac{\omega_d}{\omega_m} \sin \omega_m t\right)t + \varphi_0\right] \\ &= A_0 \cos(\omega_0 t + M_f \sin \omega_m t + \varphi_0) \end{aligned}$$



## 光电子技术 (10)

式中 $\omega_d$ 为最大角频偏， $M_f = \omega_d / \omega_m$ 称为调频系数。

利用贝塞尔函数展开可得与位相调制锁模类似的结果：

$$e(t) = A_0 J_0(M_f) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + A_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(M_f) \{ \cos[(\omega_0 + 2n\omega_m)t + \varphi_0] + \cos[(\omega_0 - 2n\omega_m)t + \varphi_0] \} \\ + A_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(M_f) \{ \cos[(\omega_0 + (2n-1)\omega_m)t + \varphi_0] - \cos[(\omega_0 - (2n-1)\omega_m)t + \varphi_0] \}$$

当 $M_f \ll 1$ ，上式可简化为：

$$e(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{A_0 M_f}{2} \cos[(\omega_0 + \omega_m)t + \varphi_0] - \frac{A_0 M_f}{2} \cos[(\omega_0 - \omega_m)t + \varphi_0]$$

弱调频类似于调幅，只产生上、下边频带，而强调频产生多级高阶上、下边频带。

### 3、相位调制



## 光电子技术 (10)

相位调制是指激光的初始相位受到调制信号的调制而随信号变化。

设初相位 $\varphi_0$ 受到一相位增量调制：

$$\phi_m(t) = m_\varphi \sin \omega_m t$$

则相位调制信号为：

$$e(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + (\varphi_0 + \phi_m(t))] = A_0 \cos[\omega_0 t + (\varphi_0 + m_\varphi \sin \omega_m t)] \\ = A_0 \cos(\omega_0 t + m_\varphi \sin \omega_m t)$$

上式形式上与调频一样，所以也可以分解为上、下边频的线性组合。

调频与调相虽然数学处理和形式上一样，但两者的物理调制过程是不同的，所以调制设备完全不同。通常调相更容易，由于激光频率太高，调频实现较困难。如图 所示为调频、调相信号。



## 光电子技术 (10)

### 4、强度调制

强度正比于振幅的平方，所以强度调制就是对电场的平方进行调制。

设激光电场平方为：

$$I(t) = A_0^2 \cos^2 \omega_0 t$$

设调制信号为：

$$I_m(t) = 1 + m_I \sin \omega_m t$$

强度调制信号为：

$$I_I(t) = I(t)I_m(t) = A_0^2(1 + m_I \cos \omega_m t) \cos^2 \omega_0 t$$

强度调制与幅度调制实质上没有区别，调制设备很类似。所以有时也把强度调制称为幅度调制，主要差别在于探测方法是对幅度或是强度敏感。而通常的探测器是对强度敏感，所以强度调制应



## 光电子技术 (10)

用较广泛。强度调制可以看成一种单边调制，而载波频率为激光频率的两倍。如图1所示。

### 二、脉冲调制

脉冲调制指激光载波为脉冲串。根据采样定理，只要对连续信号的采样频率大于被采样信号带宽的2倍，就可以根据采样脉冲系列恢复连续信号。基于这一原理，没有必要传输连续信号的所有信息，所以发展了脉冲调制。使用脉冲调制可以节约传输带宽和发射功率。

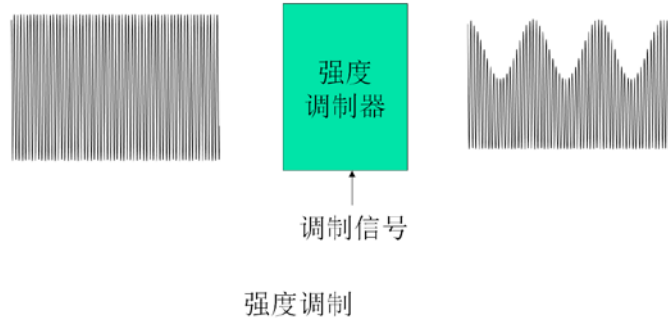
脉冲调制仍然包括调幅、调频、调相和强度调制

#### 1、脉冲调幅（PAM）

脉冲调幅可以理解为对连续调幅信号的离散采样。采样频率只要大于调制信号的带宽的2倍，通常取4-5倍。



## 光电子技术 (7)



## 光电子技术 (10)

用较广泛。强度调制可以看成一种单边调制，而载波频率为激光频率的两倍。[如图所示](#)。

### 二、脉冲调制

脉冲调制指激光载波为脉冲串。根据采样定理，只要对连续信号的采样频率大于被采样信号带宽的2倍，就可以根据采样脉冲系列恢复连续信号。基于这一原理，没有必要传输连续信号的所有信息，所以发展了脉冲调制。使用脉冲调制可以节约传输带宽和发射功率。

脉冲调制仍然包括调幅、调频、调相和强度调制

#### 1、脉冲调幅（PAM）

脉冲调幅可以理解为对连续调幅信号的离散采样。采样频率只要大于调制信号的带宽的2倍，通常取4-5倍。

## 光电子技术 (10)

脉冲调幅信号可表示为:

$$\begin{aligned} e(t) &= A_0[1 + M_n(t_n)]\cos\omega_0 t & (t_n < t < t_n + \tau) \\ \text{或} \\ e(t) &= A_0[1 + M(t)]\cos\omega_0 t_n & t_n < t < t_n + T_0 \end{aligned}$$

$|M_n(t_n)| < 1$  为离散化调制信号,  $\tau \gg 2\pi/\omega_0$  为采样时间,  $t_n = nT$ ,  $T$  为采样周期。脉冲调幅信号如图。

### 2、脉冲强度调制 (PIM)

脉冲强度调制是使脉冲的强度随信号变化, 数学表示为:

$$\begin{aligned} I(t) &= A_0^2[1 + M_n(t_n)]\cos^2\omega_0 t & t_n < t < t_n + \tau, t_n = nT, n = 0, 1, 2, \dots, \\ \text{或} \\ I(t) &= A_0^2[1 + M(t)]\cos^2\omega_0 t_n & t_n < t < t_n + T_0, t_n = nT, n = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned}$$

式中  $T$  为采样周期,  $\tau$  为采样脉冲宽度,  $T_0$  载波脉宽。PIM 信号如图。

## 复习要点

- 1、位相调制锁模原理, 锁模启动过程?
- 2、相位锁模调制器的调制频率为何要等于相邻纵模间的频率差? 锁模器为何要放置在尽量靠近端镜, 放在远离端镜的位置行否?
- 3、染料被动锁模的原理, 物理上它是属于损耗调制或是相位调制?
- 4、何谓自锁模? 自锁模原理, 如何激发纵模的? 自锁模的典型激光器是什么?
- 5、激光内、外调制? 连续、脉冲调制? 调幅、调频、调相和强度调制?



## 作业十

---

- 1、锁模所指的模是什么模？锁模的物理实质是什么？
- 2、激光束调制的目的？何谓内调制、外调制？脉冲调制与连续调制？什么条件下脉冲调制与连续调制等价？