

# 第五章

# 脉冲激光产生原理

## §5-3 调Q技术原理与装置

### 1.电光调Q

- 带偏振器的电光调Q器件；单块双45度电光调Q器件；腔倒空

### 2.声光调Q

- 声光调Q的基本原理；声光调Q器件的结构及设计；声光腔倒空激光器

### 3.被动式饱和吸收调Q

- 可饱和吸收体的调Q原理和机制：调Q原理和机制，染料、色心晶体和半导体饱和吸收体
- 染料激光器

## §5-3 调Q技术原理与装置

### 1. 电光调Q

**电光效应 Q开关时间短 $10^{-9}\text{s}=\text{ns}$  ;**

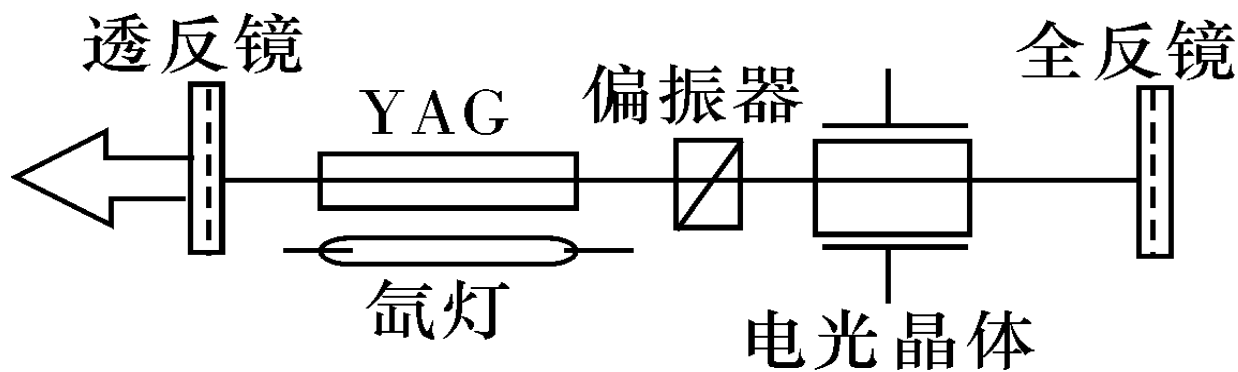
**调Q时刻精确控制 ;**

**输出脉冲宽度10-20ns**

## (1) 带偏振器的电光调Q器件

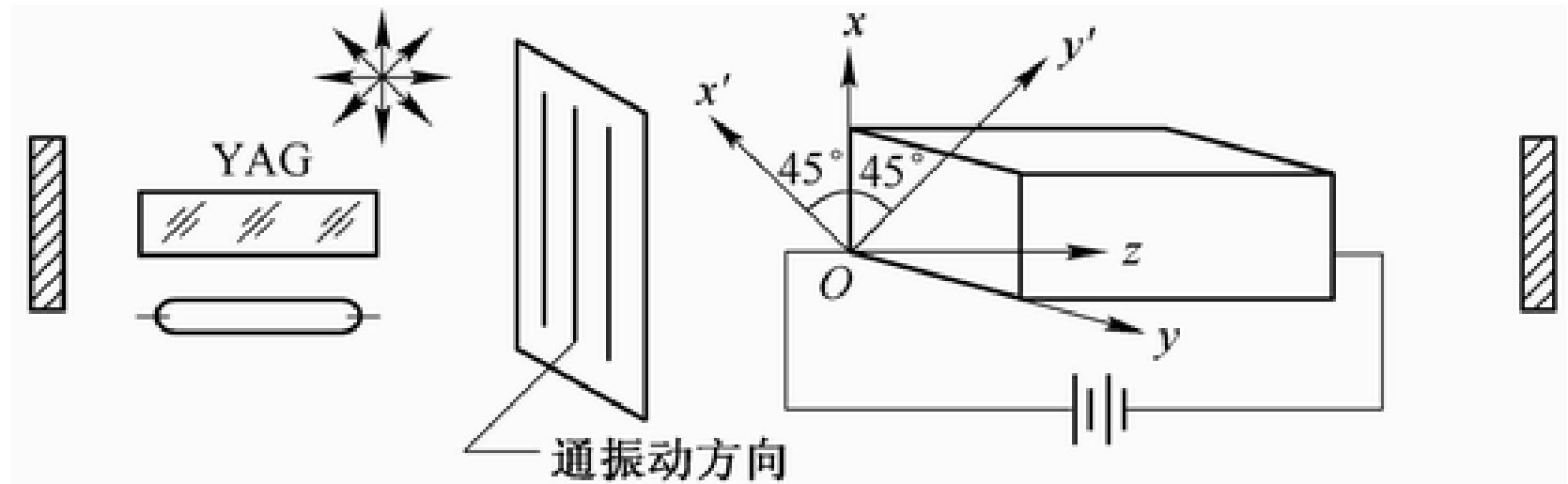
◆电光晶体加  $\lambda/4$  电压时：高损耗 $\delta'$ ，低Q  
-----关状态。

◆电光晶体去掉  $\lambda/4$  电压时：低损耗 $\delta$ ，高Q  
-----开状态



带偏振器的电光调Q装置

## 电光调Q装置示意图



**激光腔中插入起偏振片及  
作为Q开关的KD\*P晶体**

## ( 1 ) 带偏振器的电光调Q器件

- ◆ 工作物质，自发发射光经  $\lambda/4$  偏振器后沿电光晶体x方向偏振，经电光晶体时，在 $x'$  , $y'$  的分量间相位延时  $\pi/2$ ，合成为圆偏振光。
- ◆ 再经全反射镜反射回来再经  $\lambda/4$  电光晶体时， $x'$  , $y'$  的分量间相位延时  $\pi$ ，回到y方向偏振不能通过偏振器。

## (1) 带偏振器的电光调Q器件

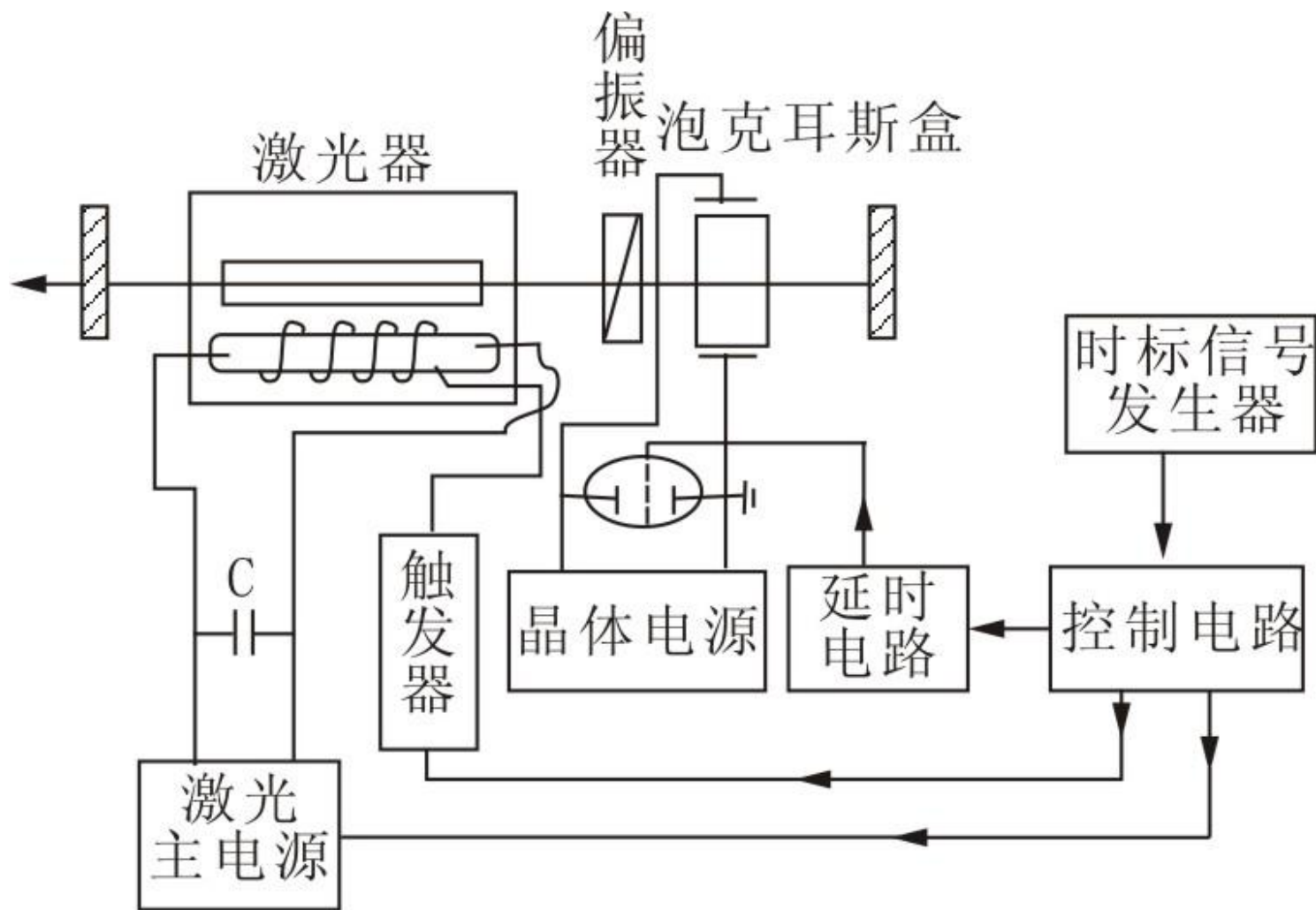
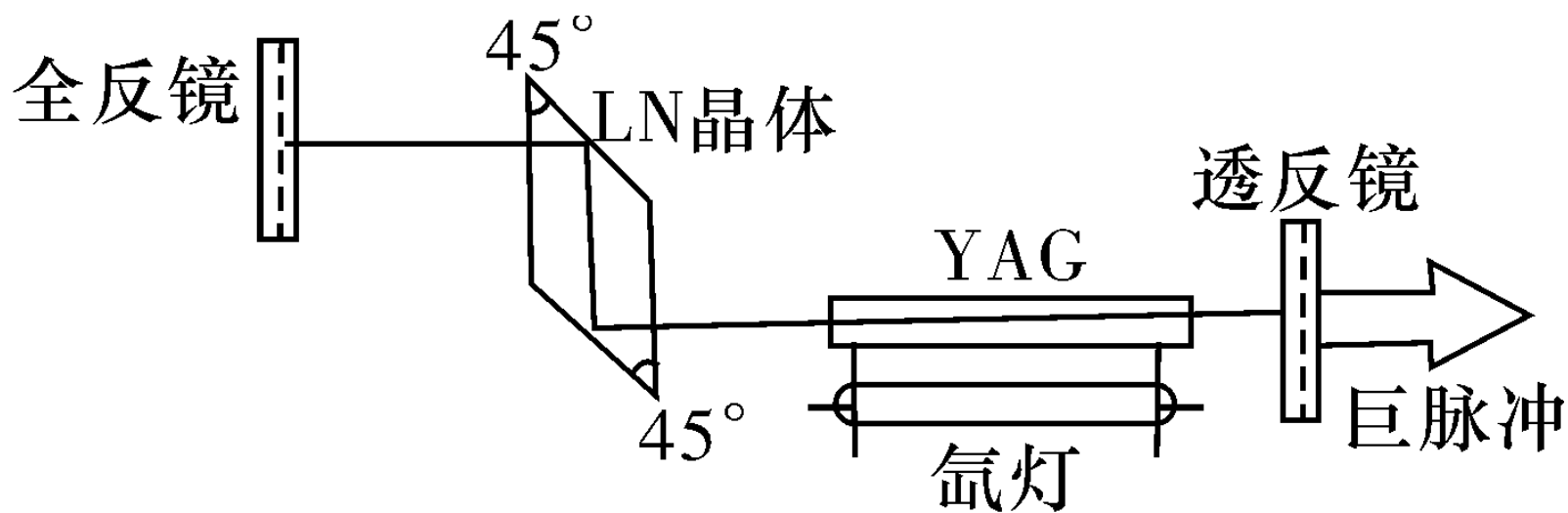


图2. 3-2. 电光调Q工作程序示意图

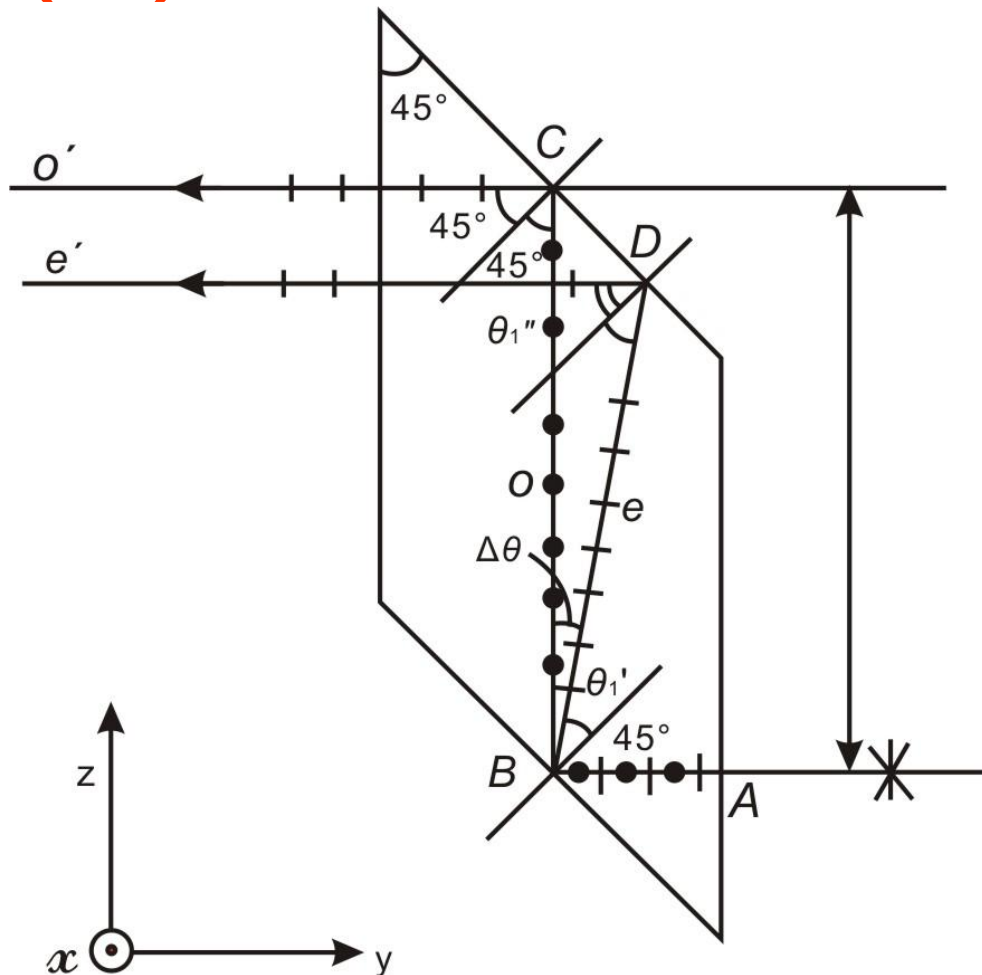
## (2) 单块双45度电光调Q器件



单块双45° 电光调Q激光器

## (2) 单块双45度电光调Q器件

### (A) X方向不加电压时



X方向o光，Y方向e光。  
反射斜面与光轴z成45度角，两束线偏振光在该反射面上全反射。O光45度反射，e光反射角  $\theta_1'$ ：

$$n_e \sin 45^\circ = n_o \sin \theta_1'$$

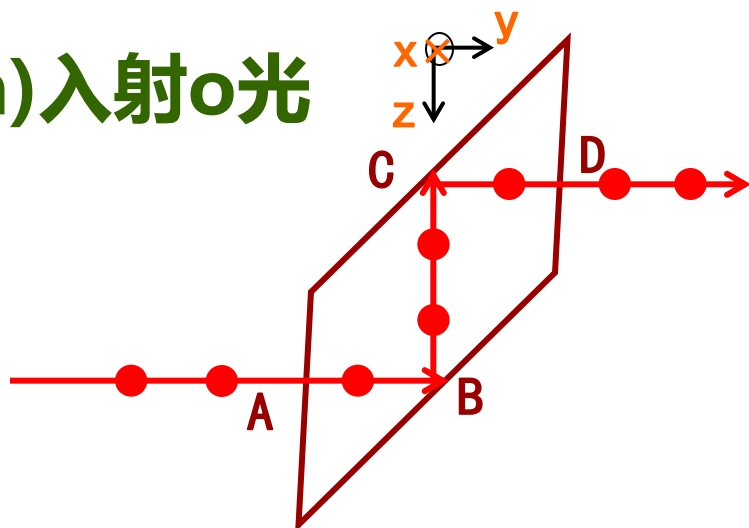
$$n_o > n_e$$

图2. 3-4  $V_x=0$ 时的光路图



# (A) X方向不加电压(Q开关打开)

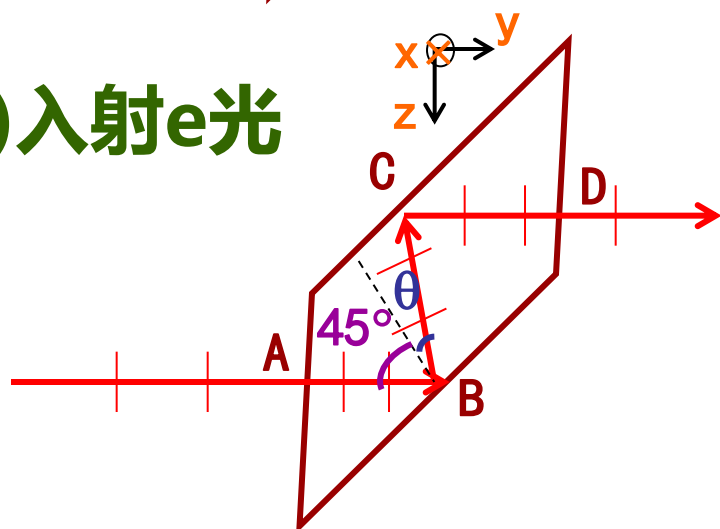
## a) 入射o光



	AB	BC	CD
光性质	<b>o光</b>	<b>o光</b>	<b>o光</b>
折射率	$n_o$	$n_o$	$n_o$

B和C点：45度反射都是o光

## b) 入射e光



	AB	BC	CD
光性质	<b>e光</b>	<b>e光</b>	<b>e光</b>
折射率	$n_e$	$n_o$	$n_e$

$$n_e \sin 45^\circ = n_o \sin \theta$$

$$n_o > n_e \quad \theta < 45^\circ$$

- ◆ 45度入射的e光在B点以小于45度反射为e' 光(折射率约等于 $n_o$ ) ;
- ◆ e' 光小于45度入射C点后以45度反射为e光

## (2) 单块双45度电光调Q器件

### (B) X方向加半波电压时

第一个45度反射面的前段相当于一个起偏器，产生o,e两束线偏振光；第二个45度反射面的后段相当于一个检偏器，中间段相当于调制器。当晶体加电压

$$V_x = V_{\lambda/2}$$

腔内处于低Q值状态，  
不能形成振荡。

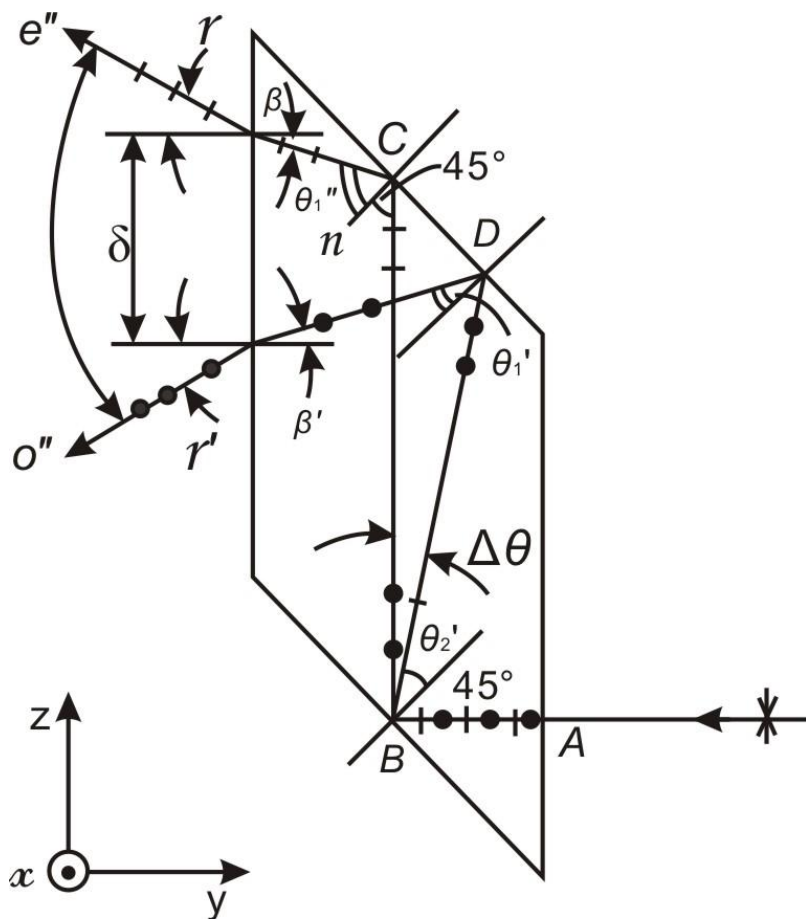
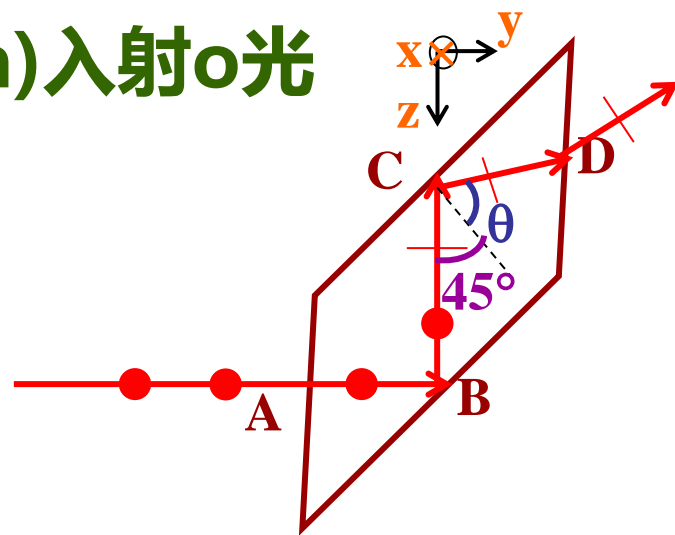


图2.3-5  $V_x \neq 0$ 时的光路图

(B)沿x方向加电压U<sub>π</sub>(Q开关关闭)

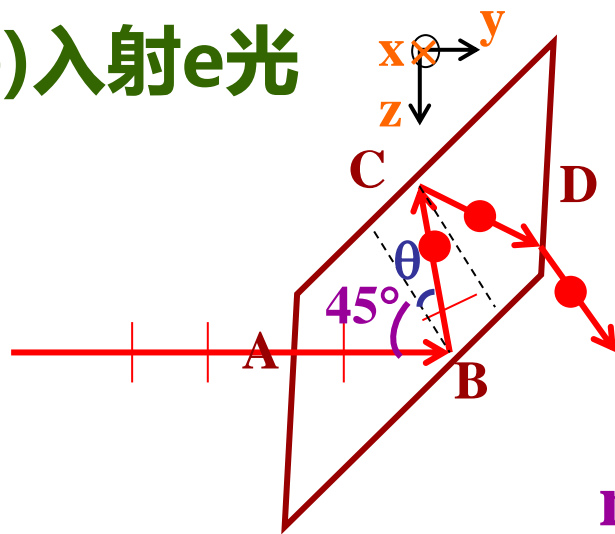
a)入射o光



	AB	BC	CD
光性质	<b>o</b>	<b>o→e</b>	<b>e</b>
折射率	<b>n<sub>o</sub></b>	<b>n<sub>o</sub></b>	<b>n<sub>e</sub></b>

$n_o \sin 45^\circ = n_e \sin \theta \quad n_o > n_e \quad \theta > 45^\circ$

b)入射e光

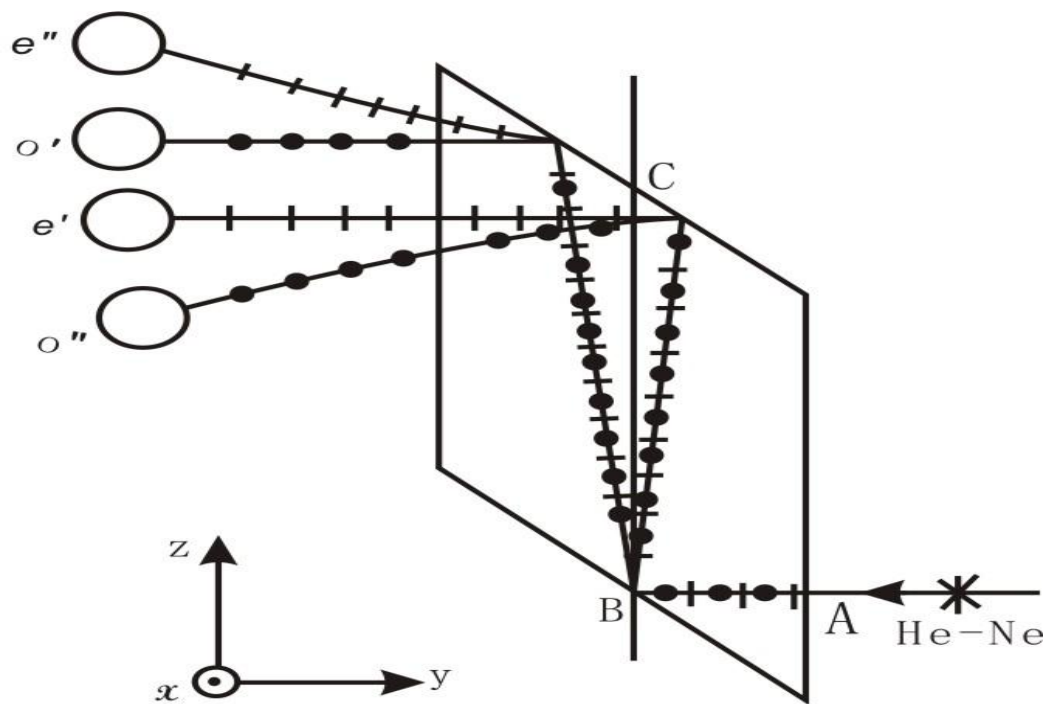


	AB	BC	CD
光性质	<b>e</b>	<b>e→o</b>	<b>o</b>
折射率	<b>n<sub>e</sub></b>	<b>n<sub>o</sub></b>	<b>n<sub>o</sub></b>

$n_e \sin 45^\circ = n_o \sin \theta \quad n_o > n_e \quad \theta < 45^\circ$

## (2) 单块双45度电光调Q器件

(C) 实际上：晶体存在退偏度和几何尺寸偏差，入射光发散角等



造成第一个反射面  
反射光是偏心率很  
大的椭圆偏振光，  
第二面反射同时出  
现四条光线

图2.3-8 双45° 晶体实际出射光斑情况

### (3) 单块单45度电光调Q器件

只对一个偏振光起振，  
效率低，不如双45  
度好。少采用。

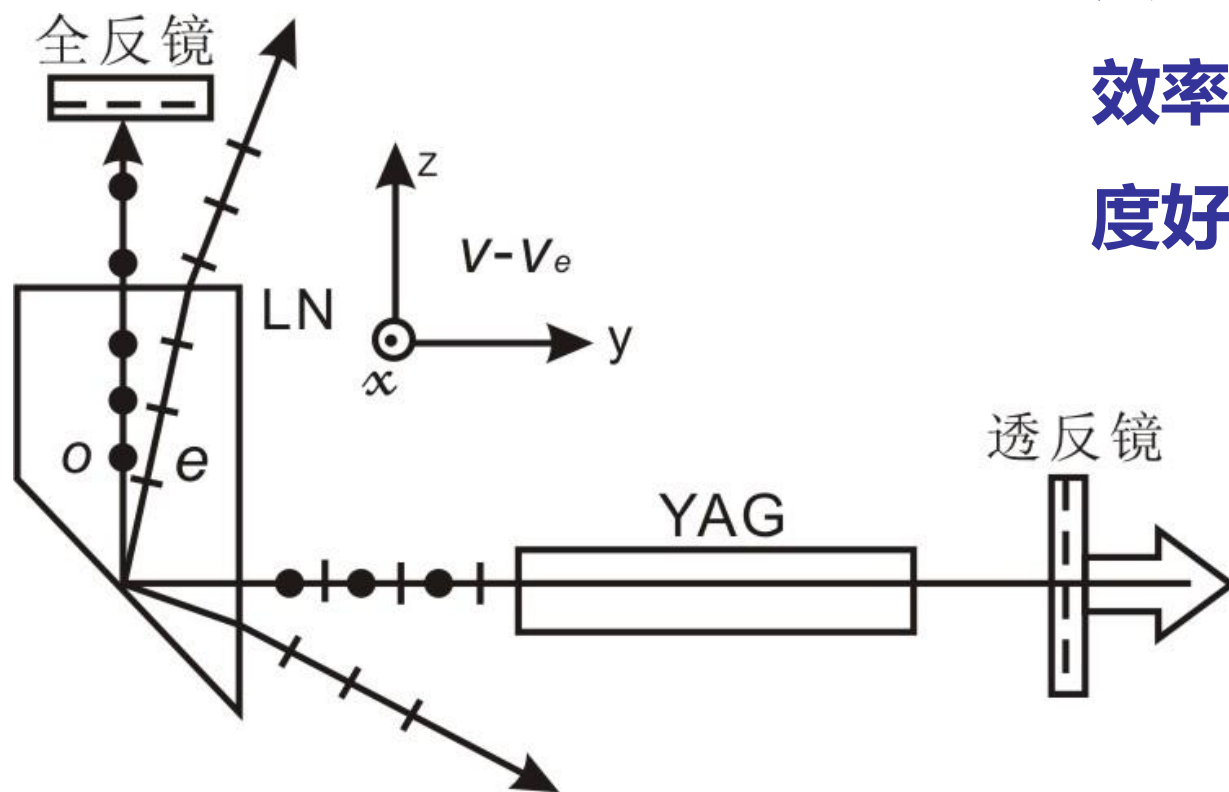


图2.3-7 单45°晶体Q开关

## ( 4 ) 脉冲透射式 ( PTM ) 调Q

### ---有称腔倒空激光器

- 以上介绍的都是工作物质储能调Q:能量以激活粒子的形式储存在工作物质高能态上。
- 谐振腔储能调Q：能量以光子的形式存储在谐振腔内。

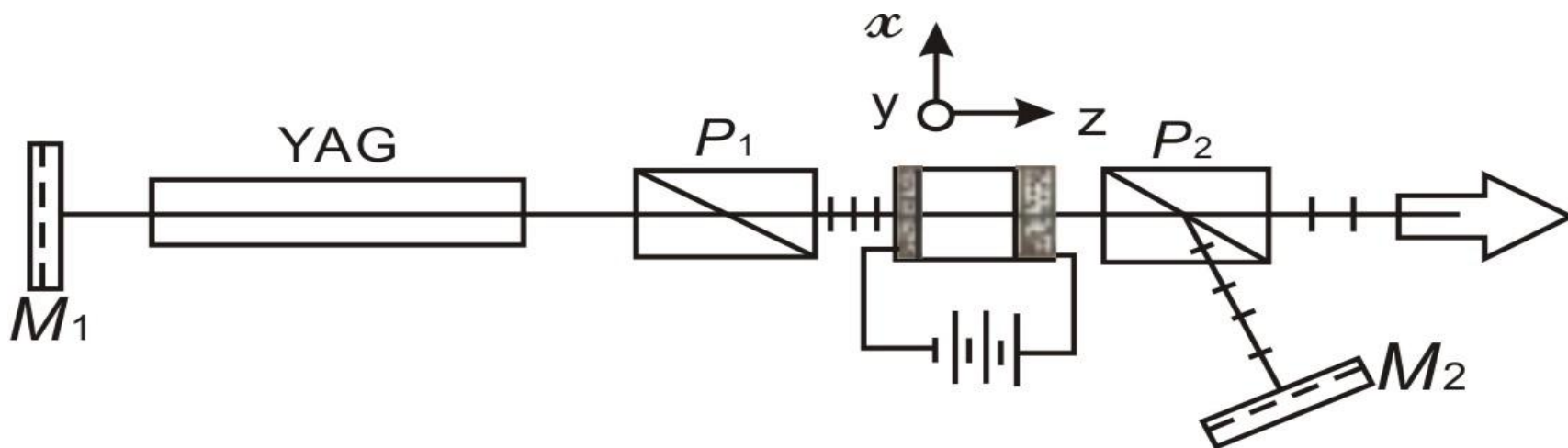


图2. 3-8 PTM调Q激光器

## ( 4 ) 脉冲透射式 ( PTM ) 调Q---

又称腔倒空激光器

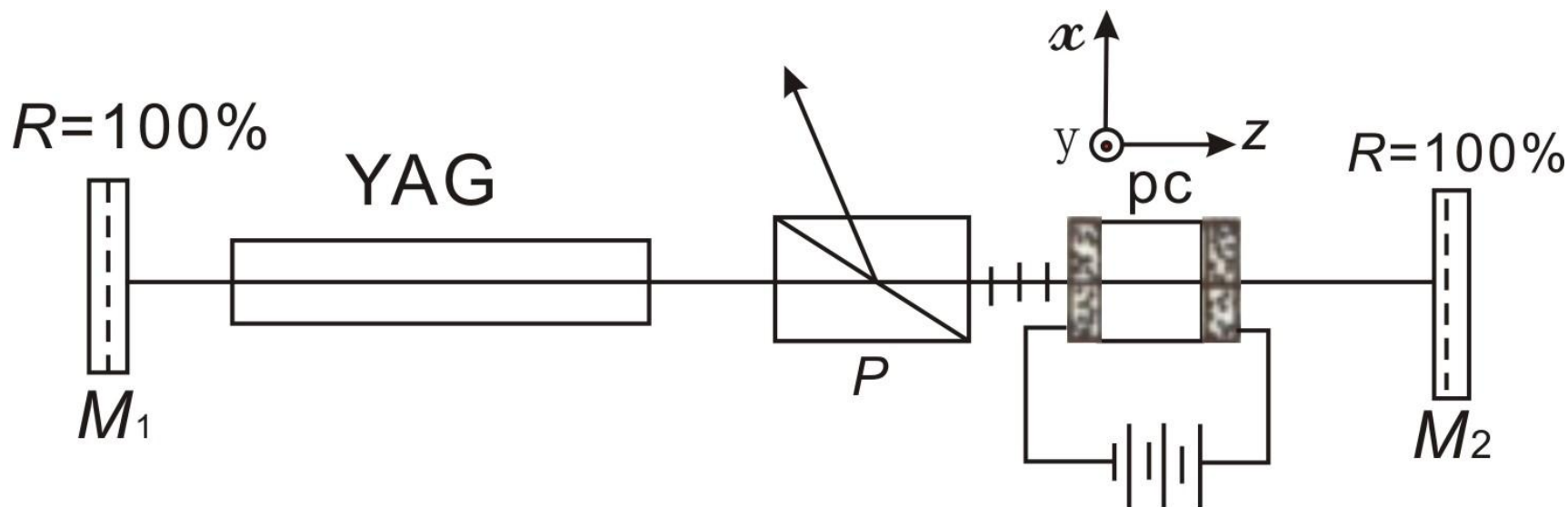
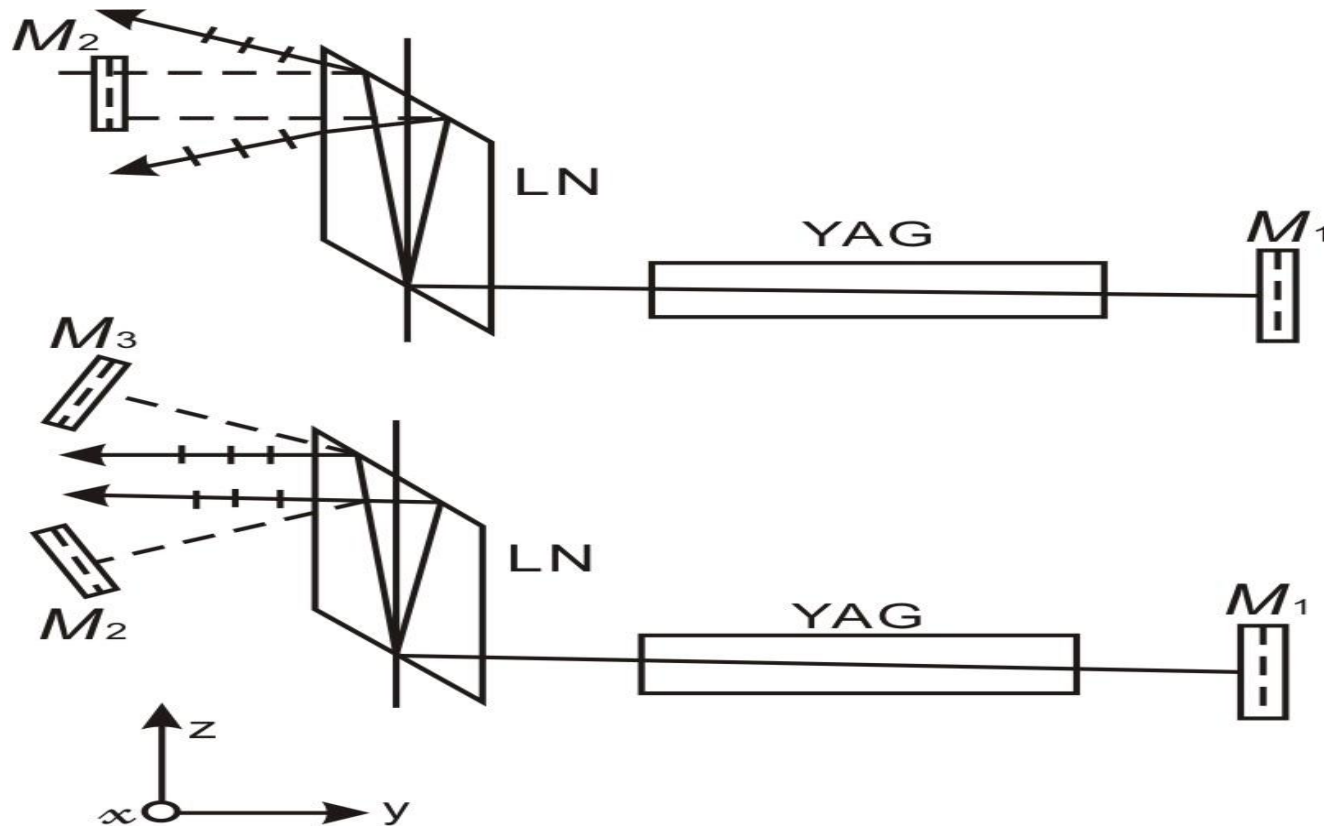


图2. 3-9 PTM式电光Q开关

## ( 4 ) 脉冲透射式 ( PTM ) 调Q---

又称腔倒空激光器



单块双45°PTM式电光调Q



# 主要电光晶体的性能

晶体名称	折射率n				电光系数	半波电压
	632.8nm		1060nm		$\gamma_{63}$	$V_{\lambda/2}$
	$n_o$	$n_e$	$n_o$	$n_e$	$10^{-16}$ cm/V	( V )
KDP	1.508	1.467	1.494	1.46	10.5	~ 15000
KD*P	1.508	1.468	1.494	1.461	26.4	~ 6000
LiNbO <sub>3</sub>	2.286	2.2	2.233	2.154	6.8	~ 9250 (d/l)

## 2. 声光调Q

### (1) 声光调Q的基本原理

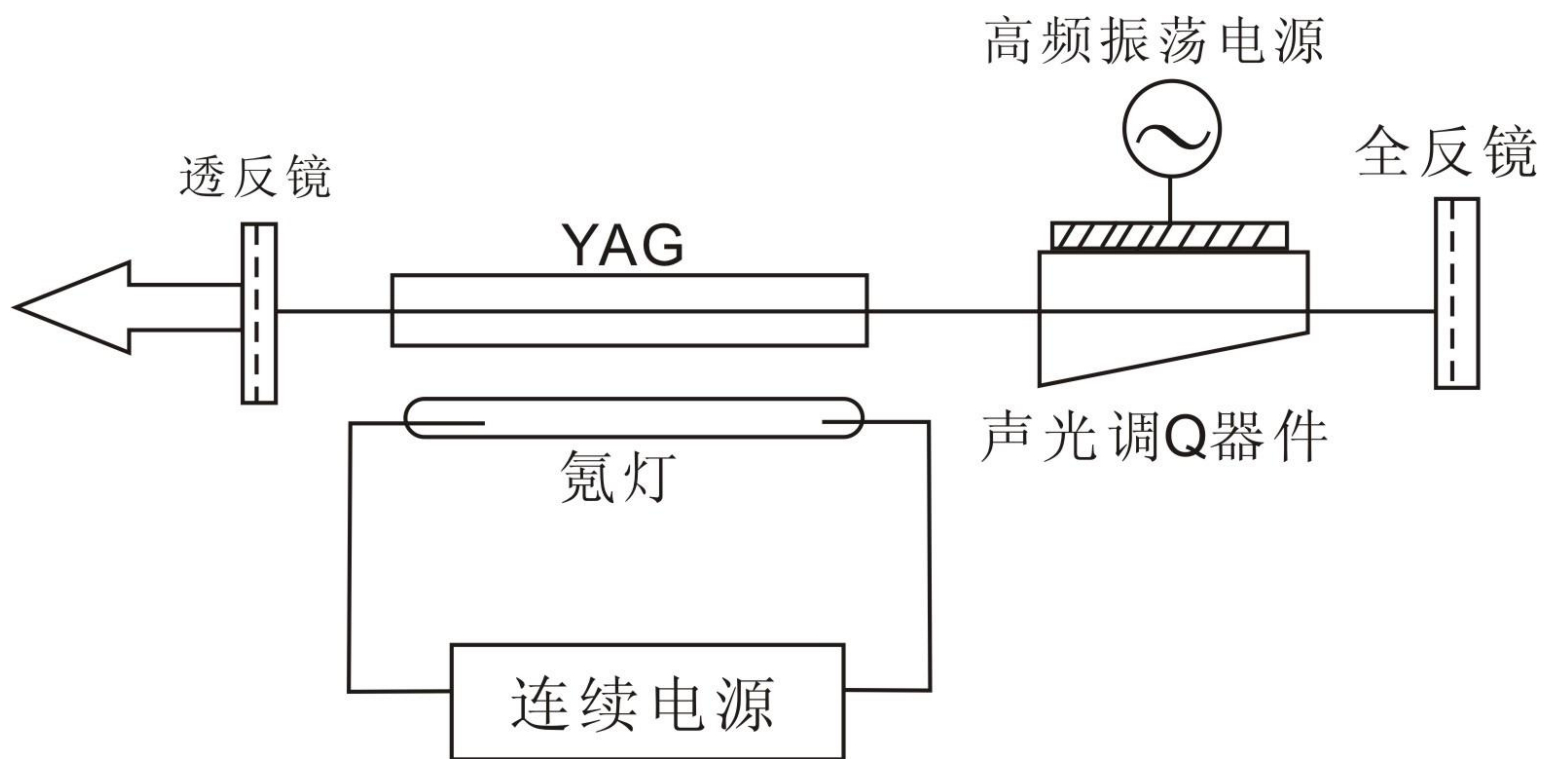
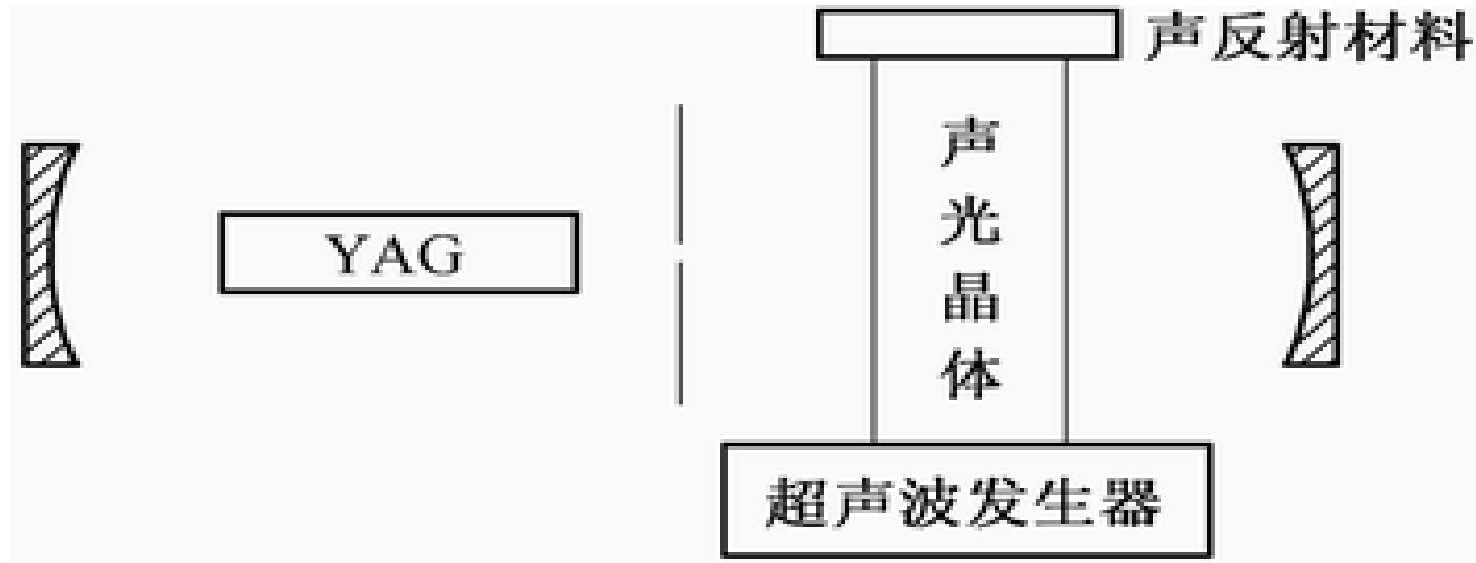


图2. 5-1 声光调Q激光器示意图

## 声光调Q装置示意图



声光调 $Q$ 的YAG激光器的示意图。腔内插入的声光调 $Q$ 器件由声光互作用介质(如熔融石英)和键合于其上的换能器所构成的。

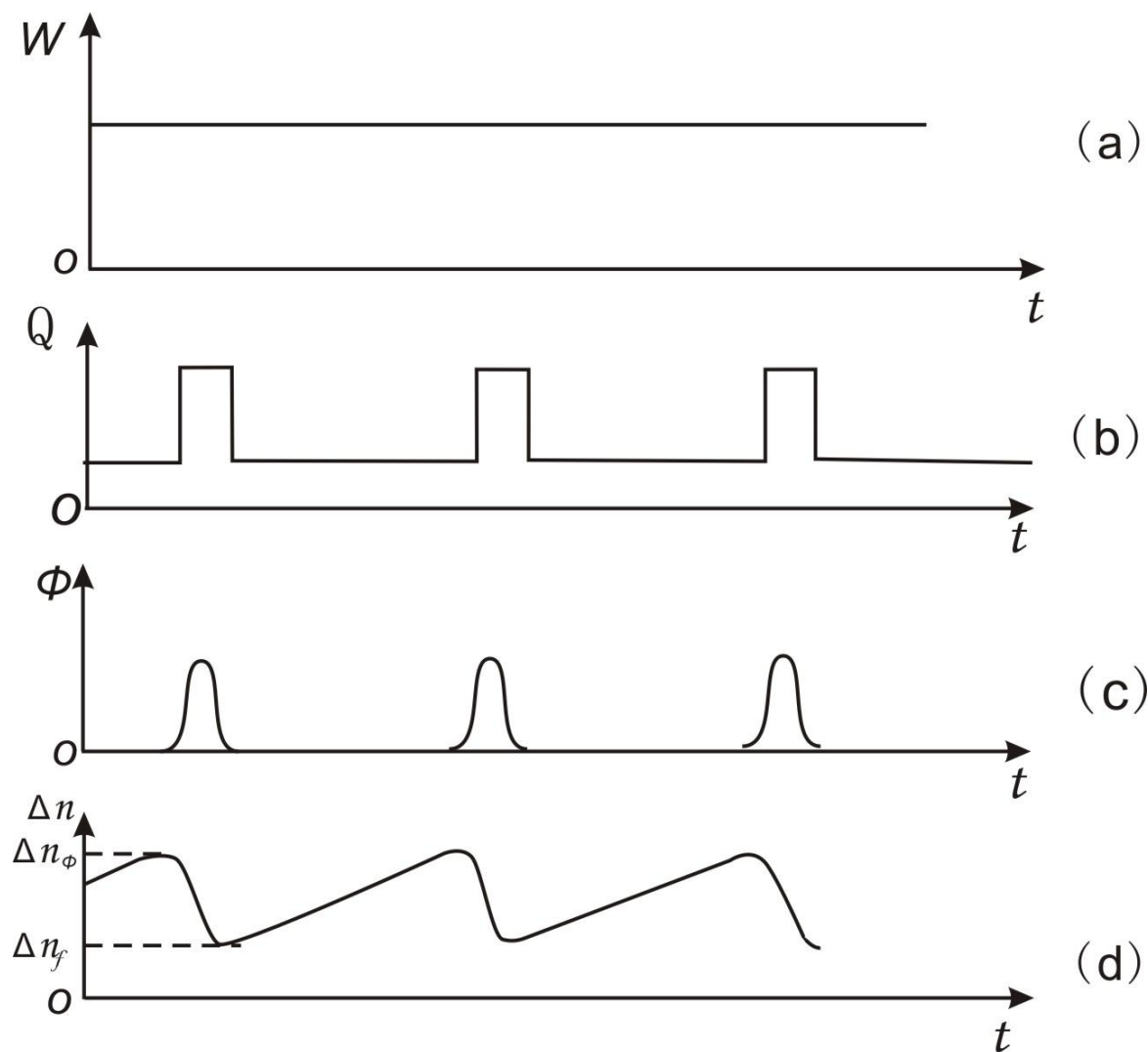


图2.5-2 连续激光器高重复率调Q过程

(a) 泵浦速率; (b) Q值;

(c) 光子数; (d) 反转粒子数

**加高频超声  
( 20-  
50MHz );  
一般用于较低  
增益的连续功  
率激光器**

## (2) 声光调Q器件的结构及设计

**为什么？**

- ◆行波工作方式：开关时间短；一般采用
- ◆驻波工作方式：开关时间长。不采用

- ◆ 声光调Q 多用于增益较低的连续激光器
- ◆ 超声场消失到巨脉冲产生有一时间间隔，即脉冲建立时间，一般在微秒量级；声光调Q开关时间小于该脉冲建立时间，但比电光调Q开关时间长很多。
- ◆ 一般声光调Q的  $\frac{\Delta n_i}{\Delta n_t}$  比电光调Q的低很多

### (3) 声光腔倒空激光器

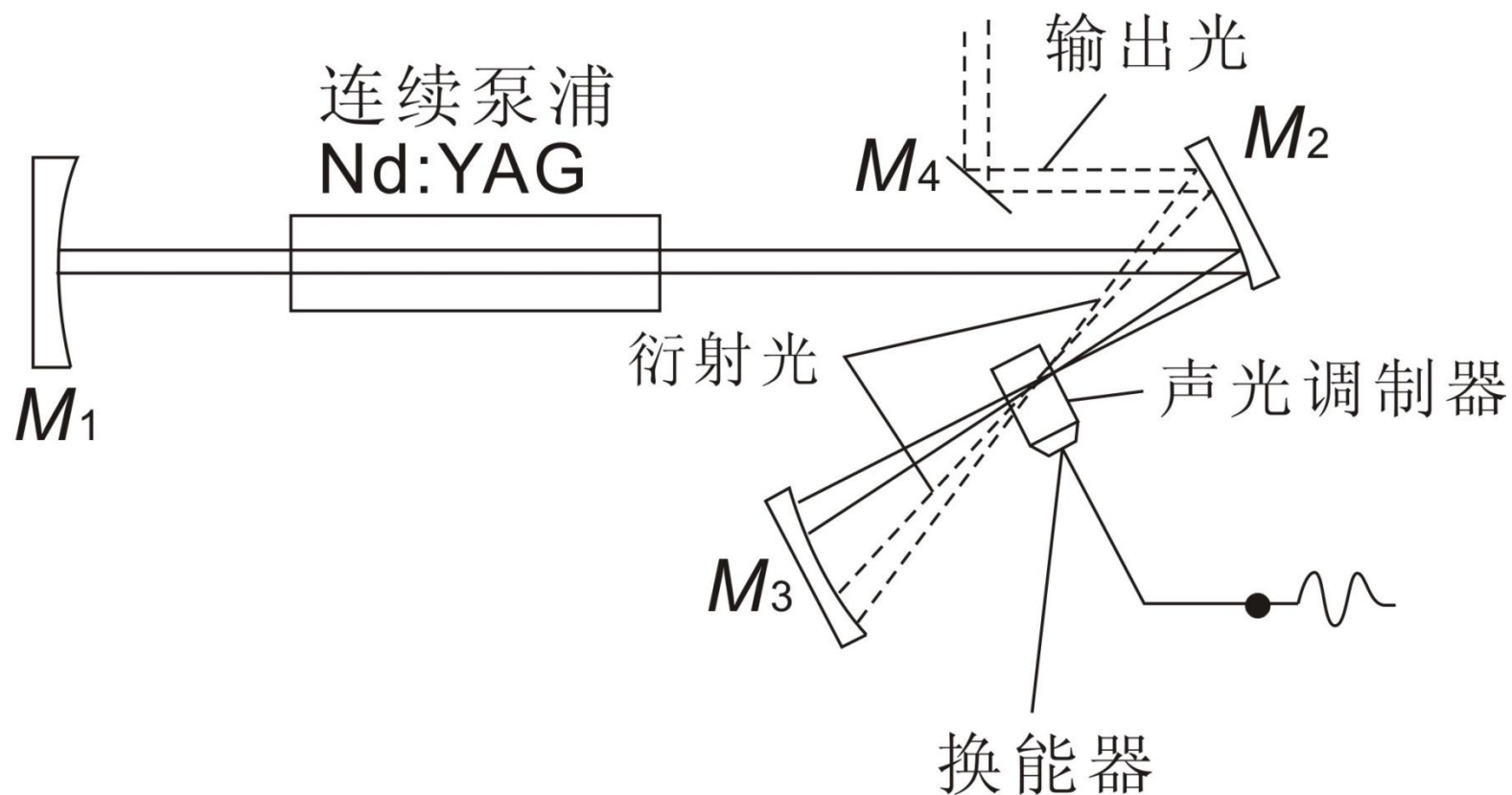
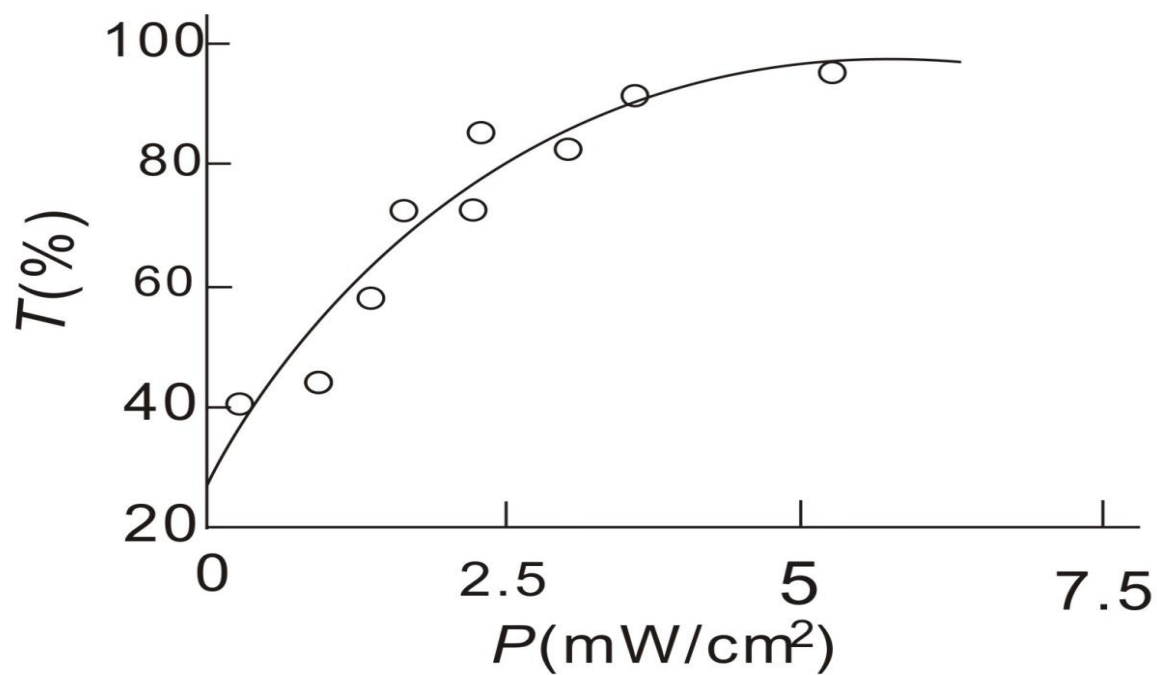


图2.5-14 声光腔倒空激光器

### 3. 被动式饱和吸收调Q

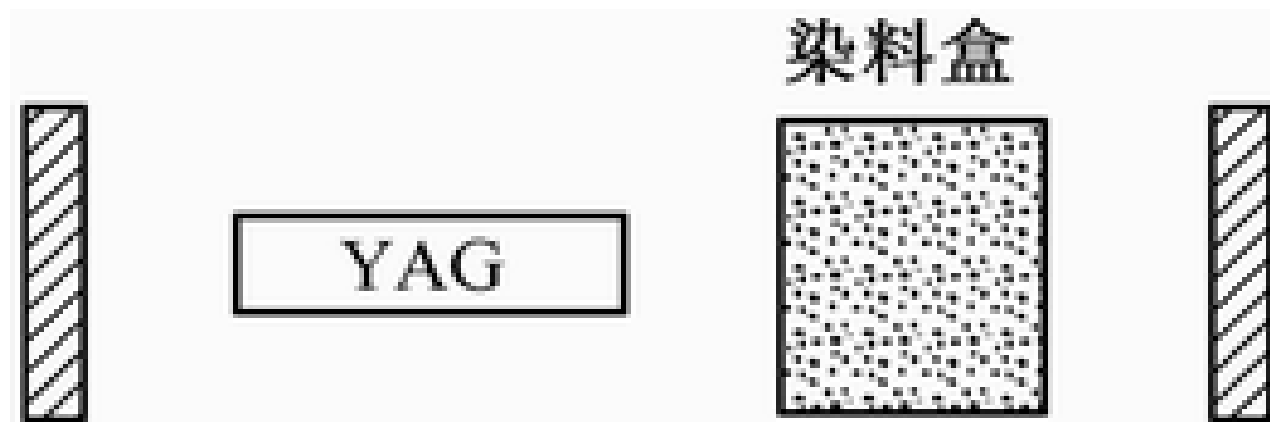
#### (1) 可饱和吸收体的调Q原理和机制

##### (a) 调Q原理和机制



饱和吸收体透过率与光功率密度的关系

# 染料饱和吸收体调Q装置示意图



可饱和染料对该激光器发出的光有强烈吸收作用，而且随入射光的增强吸收系数减小。其吸收系数可以由下式表示：

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



## ( 1 ) 可饱和吸收体的调Q原理和机制

- ◆ Q开关染料是一种非线性吸收介质.
- ◆ 在激励的初始阶段,染料吸收造成腔内高损耗。此时腔呈“关闭”态；
- ◆ 随着激励的增加，工作物质粒子数反转密度上升，形成超辐射的强荧光，使染料吸收趋于饱和，突然变透明。腔呈“接通”态，激光振荡产生一个巨脉冲。

## ( 1 ) 可饱和吸收体的调Q原理和机制

优点：

- ◆ 染料的开关时间约为  $10^{-9}$  秒。产生的巨脉冲宽度约为 **10ns**；
- ◆ 染料开关获得的脉冲光谱宽度  $\Delta\nu$  也比较窄，从而提高输出脉冲光的光子简并度。

## ( 1 ) 可饱和吸收体的调Q原理和机制

◆**Q开关染料的工作机制**：基于对待定激光波长产生共振吸收的二能级模型作解析基础。染料分子对激光频率的**共振吸收截面**为：

$$\sigma(\nu) = \frac{h\nu}{n_0 c} [B_{12}(\nu)n_1 - B_{21}(\nu)n_2] \dots\dots(27)$$

## ( 1 ) 可饱和吸收体的调Q原理和机制

◆初始阶段：  $n_2 = 0, n_1 = n_0$  (27)式变成

$$\sigma_0(\nu) = \frac{h\nu}{c} B_{12}(\nu) \dots\dots(28)$$

◆ 设染料厚度为  $l$  , 则初始透过率为

$$T_0 = e^{-n_0\sigma_0(\nu)l} \dots(29)$$

## ( 1 ) 可饱和吸收体的调Q原理和机制

- ◆ 随着光泵浦增加，染料分子更多地从基态跃迁为激发态，吸收截面  $\sigma$  不断减少。
- ◆ 工作物质的粒子数反转密度进一步提高并渐渐形成超辐射，从而令染料的吸收截面进一步减少，最后达到动态平衡，即  $B_{12}(\nu)n_1 \approx B_{21}(\nu)n_2$  。  
这时，吸收截面  $\sigma(\nu) \Rightarrow 0$  ，染料变成全透明。

## ( 1 ) 可饱和吸收体的调Q原理和机制

- ◆ 腔的Q值达最高 → 产生一巨脉冲输出。
- ◆ 巨脉冲输出后，大大消耗了粒子数反转。腔内光子也急剧下降。染料上能级粒子也大量回到基态。从而使吸收截面再次增大，腔又处于“关闭”态。

这就形成染料Q开关的一个动作周期。

## ( 2 ) 染料开关的动力学方程

◆从染料分子能级跃迁的速率方程，可导出吸收截面随时间变化的规律。由二能级的共振吸收截面式（27），可写成：

$$\begin{aligned}\sigma(\nu) &= \frac{h\nu}{c} \left[ \frac{B_{12}(\nu)(n_0 - n_2)}{n_0} - \frac{B_{21}(\nu)n_2}{n_0} \right] \\ &= \frac{h\nu}{c} \left\{ B_{12}(\nu) - [B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)] \frac{n_2}{n_0} \right\} \dots\dots(30)\end{aligned}$$

## ( 2 ) 染料开关的动力学方程

◆染料分子高能态粒子变化的数量方程为：

$$\begin{aligned}\frac{dn_2}{dt} &= B_{12}(\nu)\rho n_1 - B_{21}(\nu)\rho n_2 - A_{21}n_2 \\ &= B_{12}(\nu)\rho n_0 - \left\{ [B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21} \right\} n_2 \quad \dots(31)\end{aligned}$$

◆解此一阶常系数方程，得：

$$n_2 = \frac{B_{12}(\nu)\rho n_0}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21}} \left\{ 1 - e^{-\{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21}\}t} \right\} \dots(32)$$



## ( 2 ) 染料开关的动力学方程

◆把  $n_2$  表达式代入 ( 30 ) 式 , 得 :

$$\sigma(\nu) = \frac{h\nu}{c} B_{12}(\nu) \left\{ \frac{A_{21} + [B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho \exp\left\{-[(B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu))\rho + A_{21}]t\right\}}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21}} \right\}$$

◆由初始截面 ( 28 ) 式 , 得染料开关吸收截面随时间和入射激光辐射密度的变化方程 :

$$\sigma(\nu) = \sigma_0(\nu) \left\{ \frac{A_{21} + [B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho \exp\left\{-[(B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu))\rho + A_{21}]t\right\}}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21}} \right\}$$

.....(33)

### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

#### ◆ 定义：

Q开关的效率

$$= \frac{\text{动态器件（Q突变）单脉冲输出能量}}{\text{静态器件（无Q突变的同一激光器）输出能量}}$$

◆ 通常：转镜Q开关效率约为1:2到1:3

染料Q开关效率约为1:4到1:5

(最理想是1:1)

### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

◆从染料开关效率由其能级特性决定，以及由饱和时的最大透过率  $T_{\max}$  决定，从(33)式看出：经一段时间 $t$ 后，

$$\exp \left\{ - \left[ (B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)) \rho + A_{21} \right] t \right\} \rightarrow 0$$

◆ 从而达到最小的吸收截面（最大透过）：

$$\sigma_{\min}(\nu) = \sigma_0(\nu) \frac{A_{21}}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21}} \quad (34)$$

### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

◆此时得最大透过率：

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \exp[-n_0 \sigma_{\min}(\nu)l] \\ &= \exp[-n_0 \sigma_0(\nu)l] \cdot \frac{A_{21}}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21}} \\ &= (T_0)^{\frac{A_{21}}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21}}} \dots\dots(35) \end{aligned}$$

$$T_0 = e^{-n_0 \sigma_0(\nu)l} \dots(29)$$

### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

◆显然，据 ( 35 ) 式，为了使染料开关在饱和时的最大透过率  $T_{\max} \rightarrow 1$  要求 ( 35 ) 式指数，

$$\frac{A_{21}}{[B_{12}(v) + B_{21}(v)]\rho + A_{21}} \rightarrow 0$$

即

$$\frac{1}{\frac{[B_{12}(v) + B_{21}(v)]\rho}{A_{21}} + 1} \rightarrow 0$$

### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

◆也就是要求 , 
$$\frac{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho}{A_{21}} \gg 1$$

即 
$$\rho \gg \frac{A_{21}}{B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)} \dots\dots\dots(36)$$

染料达到全透明时（吸收饱和）所需的激光辐射密度 $\rho$ 的量值

### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

◆例子 , Nd : 玻璃的Q开关染料常用硫代五碳化钕。

其参量 :

$$B_{12}(\nu) = B_{21}(\nu) = 1.6 \times 10^5 \text{ 厘米}^3 \cdot \text{尔格}^{-1} \cdot \text{秒}^{-1}$$

$$A_{21} = 1.6 \times 10^9 \text{ 秒}^{-1}$$

◆ 令其达到吸收饱和 ( 全透明 ) 所需的最小激光能密度

$$\rho \gg 0.5 \times 10^4 \text{ 尔格} \cdot \text{厘米}^{-3}$$

### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

◆ 对作为Q开关的染料和溶剂的要求：

◆ 从 ( 36 ) 式可以看到：在固定光泵及工作物质增益的情况下，应该令因子

$$\frac{A_{21}}{B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)} \quad \text{尽可能的小。}$$

亦即令  $\frac{B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)}{A_{21}}$  尽可能的大。这样才能获得最大透过率。



### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

◆据爱因斯坦系数B、A间的关系，有

$$\frac{B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)}{A_{21}} = \frac{c^3}{8\pi h\nu^3} \cdot \frac{\delta}{\Delta\nu} \left[ 1 + \frac{g_1}{g_2} \cdot \frac{B_{12}(\nu)}{B_{21}(\nu)} \right] \dots (37)$$

式中

$$\delta = \frac{B_{12}(\nu_0)}{B_{12}(\nu_{\max})} \text{---}$$

$\frac{\text{染料分子在}\nu_0\text{在}1.06\mu\text{m}\text{处的共振吸收跃迁系数}}{\text{染料吸收带峰值位置}\nu_{\max}\text{的吸收跃迁系数}}$

$g_1$ 、 $g_2$ ——相应能级的统计权重。

$\Delta\nu$ ——吸收带宽度。

### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

- ◆从 ( 37 ) 可见：要提高开关效率，就需要选择具有大的  $\delta$  值和小的  $\Delta\nu$  的染料。
- ◆ 对于同一染料选用不同的溶剂或对于同一溶剂选用不同的染料，其峰值吸收波长位置将会不同，其开关效率也不一样。

### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

例如：

- ◆ 三碳花氰溶于喹啉溶剂吸收峰  $\nu_{\max} \approx 9700 \text{ } \overset{0}{\text{Å}}$
- ◆ 四碳花氰溶于喹啉溶剂吸收峰  $\nu_{\max} \approx 11000 \text{ } \overset{0}{\text{Å}}$
- ◆  $\delta$  更趋近于1，故效率更高些。
- ◆ 多甲川染料在不同溶剂中，随溶剂的折射率增大，其吸收峰位置将红移。在  $\delta = 1$  处时为最佳；但与此同时吸收带宽  $\Delta\nu$  却随折射率的增大而变小。

### ( 3 ) 染料调Q的开关效率

表二：硫代五碳花氰染料的开关效率  
随溶剂折射率变化

溶剂	折射率	吸收峰波 长(um)	吸收峰 半宽度	最大透 过率	开关效率 ( 相对 值 )
甲醇	1.328	0.985	900	49.00%	1
吡啶	1.51	1.015	760	65.20%	1.5
硝基苯	1.553	1.023	740	68.00%	1.7
喹啉	1.627	1.032	720	70.30%	1.8

## ( 4 ) 染料的开关时间

◆染料开关时间  $t_T$  被定义为：共振吸收截面由初始值降到  $e^{-1}$  处所需的时间。把 ( 33 ) 式改变并取对数，求出  $t$  的表达式：

$$t = \frac{1}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21}} \ln \left[ \frac{\sigma_0(\nu)}{\sigma(\nu)} \cdot \frac{\frac{B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)}{A_{21}} \rho}{1 + \frac{B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)}{A_{21}} \rho - \frac{\sigma_0(\nu)}{\sigma(\nu)}} \right]$$

## (4) 染料的开关时间

◆把  $\frac{\sigma_0(\nu)}{\sigma(\nu)} = \frac{1}{e}$  代入上式，即可求得染料

开关时间：

$$t_T = \frac{1}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21}} \left\{ 1 + \ln \left[ \frac{1}{1 + \frac{A_{21}}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho} (1 - e)} \right] \right\} \dots\dots(38)$$

$t_T$  与函数  $B_{12}$ 、 $B_{21}$ 、 $A_{21}$  及  $\rho$  密切相关。

## ( 4 ) 染料的开关时间

◆从对数函数性质的要求，上式对数项的分母应满足

$$1 + \frac{A_{21}}{[B_{12}(v) + B_{21}(v)]\rho} (1 - e) > 0$$

.....(39) **时才有意义。**

◆即满足下列不等式的染料才能起到开关作用

$$\frac{B_{12}(v) + B_{21}(v)}{A_{21}} \rho > (e - 1) \dots\dots(40)$$

## ( 5 ) 单脉冲产生的条件

◆染料Q开关产生单脉冲的条件和染料、激光工作物质的能级特性有关。要产生单个巨脉冲，要求染料的开关时间  $t_T$  必须小于激光的振荡弛豫时间  $t_p$ ，即满足

$$t_T < t_p \dots\dots(41)$$



## ( 5 ) 单脉冲产生的条件

产生单脉冲所需满足的条件：

$$\frac{1}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho + A_{21}} \left\{ 1 + \ln \left[ \frac{1}{1 + \frac{A_{21}}{[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho} (1 - e)} \right] \right\} \\ < \left[ A_{\xi} \left( \frac{p}{p_0} - 1 \right) \right]^{-1/2} \dots\dots(42)$$

## ( 5 ) 单脉冲产生的条件

◆据(24)式，在光泵功率P显著的高于阈值功率  $P_0$  时，近似有：

激光振荡弛豫时间（即单脉冲建立时间）

$$t_p = \left[ A_{21} \xi \left( \frac{P}{P_0} \right) \right]^{-1/2} \approx \left[ A_{21} \xi \left( \frac{W}{W_0} \right) \right]^{-1/2}$$

## ( 5 ) 单脉冲产生的条件

◆对振荡弛豫时间的详细分析，可以获得

$$t_p \approx [\bar{\alpha} n W]^{-1/2} \approx \left[ \frac{A_{21}}{g} n W \right]^{-1/2} \quad (43)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{21}}{g}$$

## ( 5 ) 单脉冲产生的条件

◆按 ( 36 ) 式不等式条件 , 以及 ( 38 ) 式 ,  $t_T$   
可近似简化为 :

$$t_T \approx \left\{ \left[ B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu) \right] \rho \right\}^{-1} \dots (44)$$

## ( 5 ) 单脉冲产生的条件

- ◆由 ( 43 )、( 44 )，代入 ( 41 ) 式，可得：  
要产生单脉冲对染料能级特性的要求：

$$[B_{12}(\nu) + B_{21}(\nu)]\rho > \sqrt{\frac{A_{21}}{g}} nW \quad 45$$

- ◆这只是个**必要条件**，单脉冲的产生还和染料的初始浓度有关，如果**初始透过率太低**，也容易产生**多脉冲振荡**。

## **( 6 ) Q开关染料的选择条件**

**用作Q开关的染料需要具备一定的物理、化学特性：**

- 1 . 染料吸收峰位置在激光工作物质发射激光的波长处 ( 如1.06um ) 。**
- 2 . 染料的吸收带宽要尽量窄。**
- 3 . 染料在激光波长的感应跃迁系数要有足够大的数值。**
- 4 . 染料配成溶液后 , 要具有一定的光化学稳定性。**

## (7) 染料调Q激光器

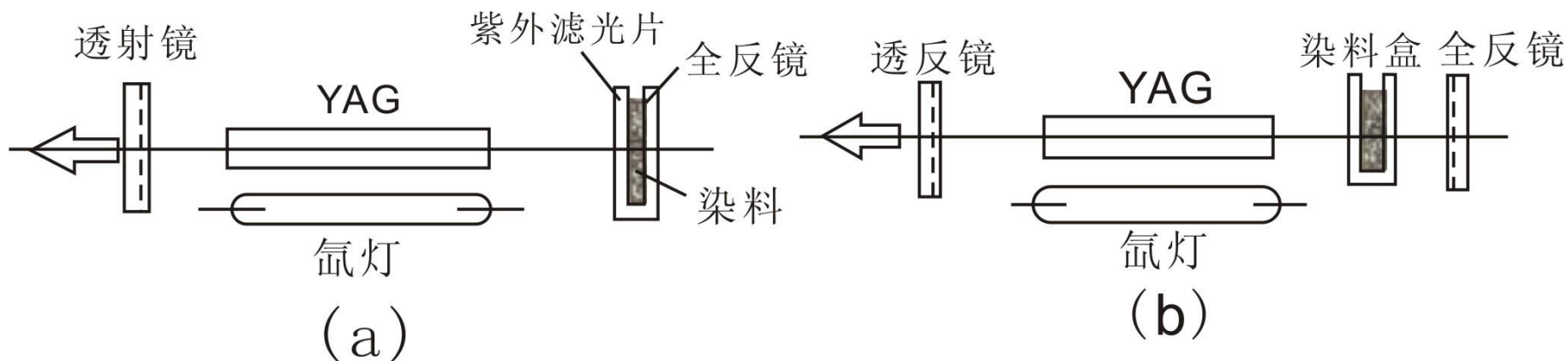


图2. 6-2 染料调Q激光器

饱和吸收体: **染料(调Q 或者锁模?)**  
**色心晶体 (调Q)**  
**半导体饱和吸收体 (应用于锁模?)**  
**石墨烯、碳纳米管 (应用于锁模?)。**