

第五章 激光调Q原理与技术

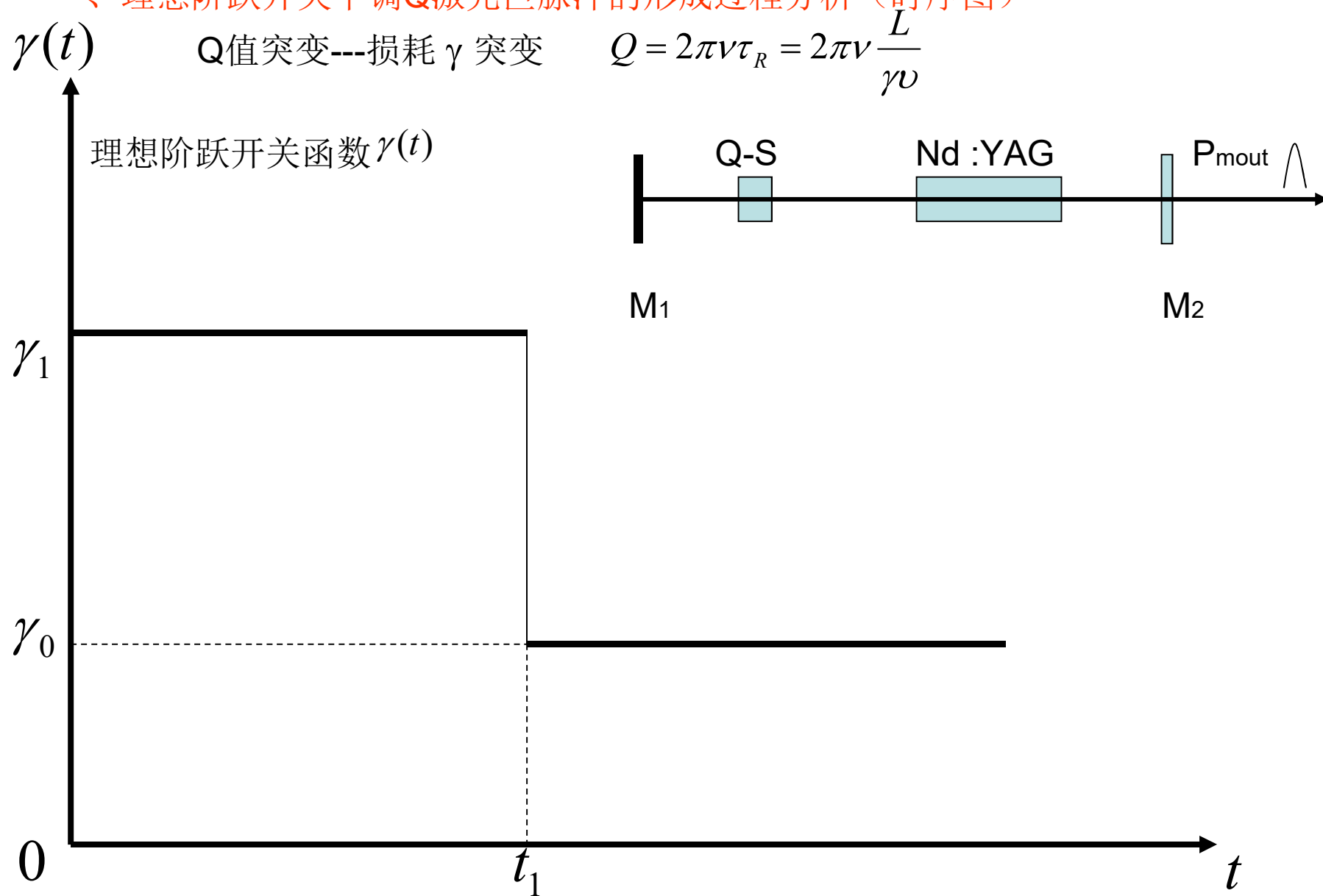
第一节 理想阶跃开关下调Q激光巨脉冲的形成过程及其特性

第二节 电光晶体开关激光调Q技术

第三节 其他激光调Q技术(声光调Q技术、被动可饱和吸收体调Q技术、转镜调Q技术等)

第一节 理想阶跃开关下调Q激光巨脉冲的形成过程及其特性

一、理想阶跃开关下调Q激光巨脉冲的形成过程分析（时序图）



- 调Q激光巨脉冲脉宽在纳秒量级,在脉冲形成、输出过程中激光下能级粒子通常难以完全排空.一般采用三能级系统速率方程分析.

$$\frac{d\Delta n}{dt} = (n - \Delta n)W_p\eta_1 - (1 + \frac{g_2}{g_1})B_R\phi\Delta n - (\frac{g_2}{g_1}n + \Delta n)\frac{A_{21}}{\eta_2}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = B_R n_2 V_a + (B_R V_a \Delta n - \frac{1}{\tau_R(t)})\phi$$

$$\tau_R(t) = \frac{L}{\gamma(t)v}$$

- 通常考虑的是开关打开以后($t > t_1$)的情况, 并且假设在 $t > t_1$ 后泵浦就停止.

- 1、 $0 < t < t_1$ 时, $\gamma(t) = \gamma_1$, 腔损耗很大, Q 开关关闭. 对应粒子反转数积累阶段.

泵浦开始后, 上能级 $n_2 \approx 0, \varphi \approx 0$,

$\frac{d\Delta n}{dt} > 0$, Δn 值以较快速率增长,

$\frac{d\varphi}{dt} \approx 0$, φ 增长的速率几乎为零。

继续抽运, φ 由自发辐射 $B_R n_2 V_a$ 相而增加,

但随 $(B_R \Delta n V_a - \frac{1}{\tau_R})\varphi < 1$ 项而减小, $\tau_R = \frac{L}{\gamma_1 v}$.

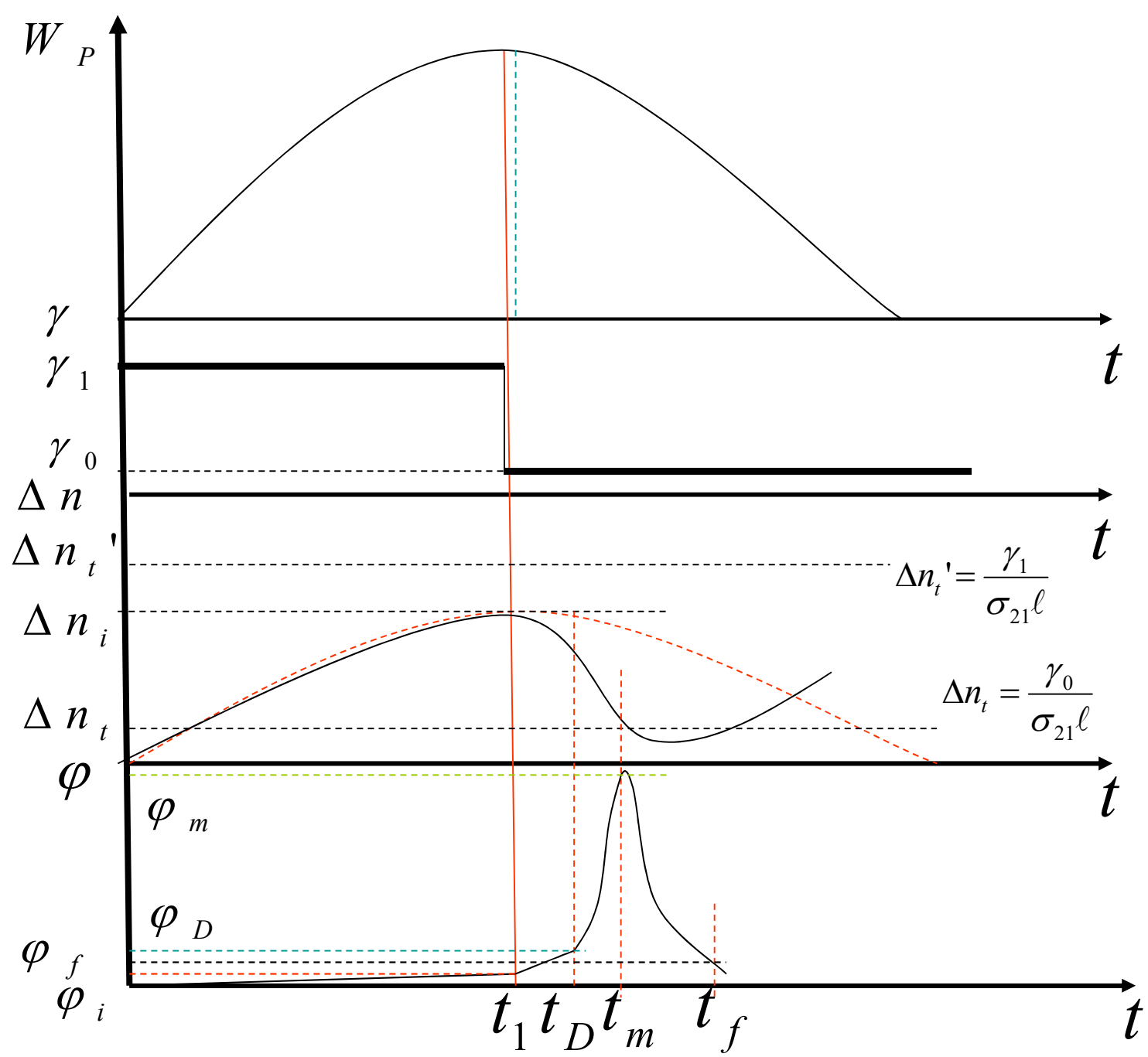
当抽运使得 Δn 足够大时,

$\Delta n = \Delta n_i, t = t_1$, 将 Q 开关打开,

初始粒子反转数密度 $\Delta n_i = \beta_s \Delta n_t$,

β_s — 泵浦超阈值, $\Delta n_t = \frac{\gamma_0}{\sigma_{21} \ell}$.

•



- 2、 $t_1 < t < t_D$ 时, $\gamma(t) = \gamma_0$, 腔损耗突然降低, Q开关打开。
- 假设在 $t > t_1$ 后泵浦就停止（瞬时泵浦），并且忽略Q开关打开后自发辐射的影响。
- 可得简化的速率方程：

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\left(1 + \frac{g_2}{g_1}\right) B_R \varphi \Delta n$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \left(B_R V_a \Delta n - \frac{1}{\tau_R}\right) \varphi$$

$$\tau_R = \frac{L}{\gamma_0 v}$$

- 激光振荡立即建立， φ 单调增长，开始一段，

$$\varphi_i \approx 0, \Rightarrow \frac{d\varphi}{dt} \approx 0, \frac{d\Delta n}{dt} \approx 0,$$

几乎维持 $\Delta n \approx \Delta n_i$

- 3、经历一段时间后到 t_D , $t_D < t < t_m$ 时,

$$\varphi = \varphi_D, \text{ 足够大, } \Rightarrow \frac{d\Delta n}{dt} \text{ 足够大,}$$

$$\Rightarrow \text{雪崩式跃迁} \Rightarrow \varphi \text{ 迅速增大, } \frac{d\varphi}{dt} \succ 0,$$

Δn 迅速减小, 当 Δn 减小到使得:

$$V_a B_R \Delta n = \frac{1}{\tau_R}, \frac{d\varphi}{dt} = 0, \varphi \text{ 达到极大值 } \varphi_m.$$

$$\Delta n = \Delta n_t = \frac{1}{B_R \tau_R V_a} = \frac{\gamma_0}{\sigma_{21} \ell}$$

- 4、当 $t_m < t < t_f$ 时,

$$\frac{d\varphi}{dt} < 0, \varphi \text{ 开始减少, } (\Delta n < \Delta n_t),$$

$$\varphi \text{ 很大, } \frac{d\Delta n}{dt} \text{ 也很大,}$$

即 Δn 仍以较快的速度减少,

直至: $\Delta n = \Delta n_f, \varphi = \varphi_f$ 。

- 结论:

1、 $\varphi_i \rightarrow \varphi_D$ 要经历一定的时间过程, $t_i \rightarrow t_D$,

$T_D = t_D - t_i$, -- 巨脉冲生成延迟时间, 取决于 $\Delta n_i, L, \gamma_0$.

2、 在 φ_m 之前, 巨脉冲前沿时间:

$T_m = t_m - t_D$, 取决于 $\Delta n_i, L$ 。

-

3、 后沿时间 $T_f = t_f - t_m$, 取决于 γ_0, L .

4、 调Q巨脉冲前后沿不对称, 前沿比后沿陡。

- 二、理想阶跃开关下调Q激光巨脉冲的峰值功率 P_m 、
脉冲能量 E 和脉冲宽度 Δt

$$\frac{d \Delta n}{dt} = -2 * B_R \varphi \Delta n ,$$

$$\frac{d \varphi}{dt} = (B_R V_a \Delta n - \frac{1}{\tau_R}) \varphi$$

$$2 * \equiv 1 + \frac{g_2}{g_1}$$

$$\frac{d \Delta n}{dt} = -2 * \frac{\Delta n}{\Delta n_t} \frac{\varphi}{\tau_R} \frac{1}{V_a} - - - (1)$$

$$\frac{d \varphi}{dt} = (\frac{\Delta n}{\Delta n_t} - 1) \frac{\varphi}{\tau_R} - - - - - (2)$$

$$(\Delta n_t = \frac{\gamma_0}{\sigma_{21} \ell} = \frac{1}{B_R V_a \tau_R}, \tau_R = \frac{L}{\gamma_0 v})$$

- $$(2)/(1) \Rightarrow \frac{d\varphi}{d\Delta n} = \frac{1}{2^*} \left(\frac{\Delta n_t}{\Delta n} - 1 \right) V_a,$$

$$\Rightarrow \varphi - \varphi_i = \frac{V_a}{2^*} \left(\Delta n_t \ln \frac{\Delta n}{\Delta n_i} - (\Delta n - \Delta n_i) \right), \varphi_i \approx 0$$

1, 当 $\Delta n = \Delta n_t$, $\varphi = \varphi_m$, 峰值光子数,

$$\Rightarrow \varphi_m = \frac{V_a}{2^*} \left(\Delta n_t \ln \frac{\Delta n_t}{\Delta n_i} - (\Delta n_t - \Delta n_i) \right)$$

$$= \frac{V_a}{2^*} \Delta n_t (\beta_s - 1 - \ln \beta_s),$$

$$\beta_s = \frac{\Delta n_i}{\Delta n_t}.$$

峰值功率： $P_m = \frac{h\nu\varphi_m}{\tau_t} = h\nu\varphi_m\gamma_t\nu/L,$

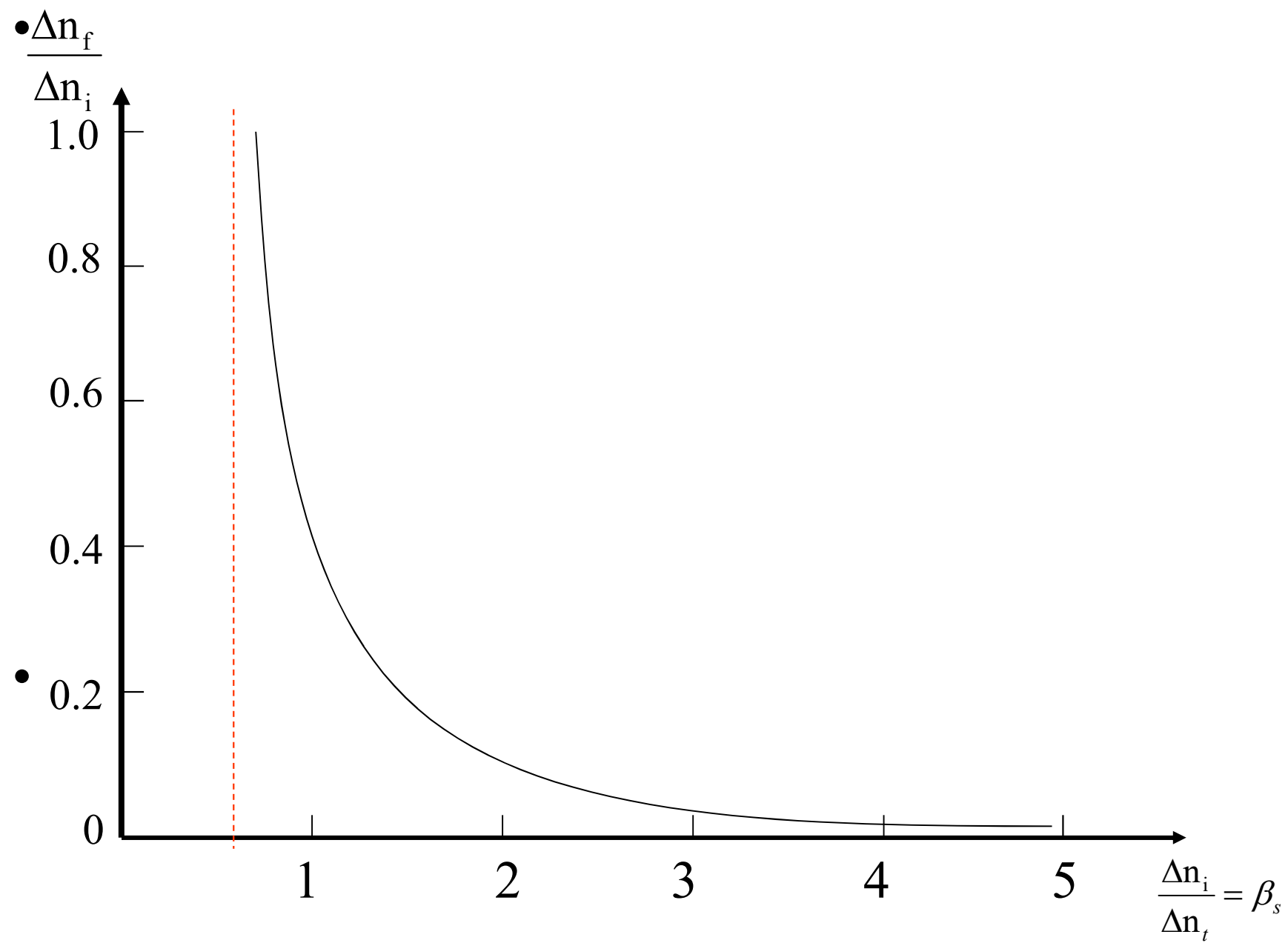
$$(\gamma_t = -\frac{1}{2}\ln(1-T_1)(1-T_2))$$

• $\Rightarrow P_m = \frac{h\nu\nu V_a\gamma_t}{2 * L} \Delta n_t (\beta_s - 1 - \ln \beta_s)$

$$2, \Delta n = \Delta n_f, \varphi = \varphi_f \approx 0,$$

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

$$\frac{\Delta n_f}{\Delta n_i} - 1 = \frac{\Delta n_t}{\Delta n_i} \ln \frac{\Delta n_f}{\Delta n_i} \text{ --- 超越方程, 图示如下:}$$



$\frac{\Delta n_f}{\Delta n_i}$ 参量，标志着存储在工 作物质中但没有能
被利用到巨脉冲激光中 去的剩余的部分能量。

在单位体积工作物质中存储的能量为： $E_i = \frac{1}{2^*} h \nu \Delta n_i$,

- 在单位体积工作物质中 剩余的能量为： $E_f = \frac{1}{2^*} h \nu \Delta n_f$,

巨脉冲激光所利用到那 部分能量（腔内）为：

$$E_{\text{腔内}} = E_i - E_f = \frac{1}{2^*} h \nu (\Delta n_i - \Delta n_f) V_a,$$

巨脉冲激光总能量（腔 外）为：

$$E_{\text{out}} = \frac{1}{2^*} (\Delta n_i - \Delta n_f) h \nu V_a \eta_{\text{out}}, (\eta_{\text{out}} \equiv \frac{\gamma_t}{\gamma_0})$$

• 知道 $\beta_s = \frac{\Delta n_i}{\Delta n_t}$, 可由上述超越方程 (图示) 得到 $\Delta n_f \Rightarrow E_{out}$,

两种极端情况:

(1)、近阈值泵浦, $\beta_s \geq 1, \Rightarrow \Delta n_f \approx \Delta n_i \approx \Delta n_t$,

巨脉冲激光总能量 (腔 外) 为:

$$E_{out} \approx \frac{1}{2^*} (\Delta n_i - \Delta n_t) h \nu V_a \eta_{out},$$

(2)、强泵浦, $\beta_s \gg 4, \Rightarrow \Delta n_f / \Delta n_i \approx 0, \Delta n_f \approx 0$,

巨脉冲激光总能量 (腔 外) 为:

$$E_{out} \approx \frac{1}{2^*} \Delta n_i h \nu V_a \eta_{out},$$

(能量利用率 $\mu \equiv \frac{1}{2^*} (1 - \frac{\Delta n_f}{\Delta n_i}) \approx \frac{1}{2^*}$, 达最高值)

- 3、巨脉冲宽度 Δt ,

- (A)

$$P_m = \frac{h\nu V_a \gamma_t}{2 * L} \Delta n_t (\beta_s - 1 - \ln \beta_s)$$

$$E_{out} = \frac{1}{2 * } (\Delta n_i - \Delta n_f) h \nu V_a \eta_{out}, (\eta_{out} \equiv \frac{\gamma_t}{\gamma_0})$$

$$\Delta t = \frac{E_{out}}{P_m} = \frac{\frac{1}{2 * } (\Delta n_i - \Delta n_f) h \nu V_a \frac{\gamma_t}{\gamma_0}}{\frac{h \nu V_a \gamma_t}{2 * L} (\beta_s - 1 - \ln \beta_s)}$$

$$= \frac{(\Delta n_i - \Delta n_f) L}{\gamma_0 \nu \Delta n_t} (\beta_s - 1 - \ln \beta_s)^{-1}$$

•

$$= (\Delta n_i - \Delta n_f) \tau_R \Delta n_i^{-1} \beta_s (\beta_s - 1 - \ln \beta_s)^{-1}$$

$$= (1 - \frac{\Delta n_f}{\Delta n_i}) \tau_R \beta_s (\beta_s - 1 - \ln \beta_s)^{-1}$$

$$= 2 * \mu \tau_R \beta_s (\beta_s - 1 - \ln \beta_s)^{-1}$$

- (B) 巨脉冲宽度 Δt 的近似表示.
- 前沿时间: $T_m = t_m - t_D$, 强泵浦 $\beta_s \gg 1$, 可由速率方程近似得:

$$T_m \approx \frac{1}{\beta_s} \tau_R \ln(\beta_s \frac{\varphi_m}{\varphi_D}),$$

后沿时间: $T_f = t_f - t_m$, 强泵浦 $\beta_s \gg 1$, 可由速率方程近似得:

$$T_f \approx \tau_R \ln(\frac{\varphi_m}{\varphi_D}),$$

$$\frac{T_m}{T_f} = \frac{1}{\beta_s} (1 + \frac{\ln \beta_s}{\ln \frac{\varphi_m}{\varphi_D}}) < 1, \text{ 脉冲前沿比后沿陡。}$$

巨脉冲宽度:

$$\Delta t \approx \frac{1}{2} (T_m + T_f) = \frac{1}{2\beta_s} \tau_R ((1 + \beta_s) \ln \frac{\varphi_m}{\varphi_D} + \ln \beta_s)$$

三、调Q激光巨脉冲的延迟时间以及调Q激光器的阈值问题

- 1、 $T_D = t_D - t_1, \Delta n \approx \Delta n_i$, 在这段时间内 Δn 几乎不变,

$$\frac{d\varphi}{dt} = \left(\frac{\Delta n_i}{\Delta n_t} - 1 \right) \frac{\varphi}{\tau_R},$$

$$\int_{t_1}^{t_D} dt = \int_{\varphi_i}^{\varphi_D} \frac{\tau_R}{\left(\frac{\Delta n_i}{\Delta n_t} - 1 \right) \varphi} d\varphi$$

$$\Rightarrow T_D = t_D - t_1 = \frac{\tau_R}{\frac{\Delta n_i}{\Delta n_t} - 1} \ln \frac{\varphi_D}{\varphi_i}$$

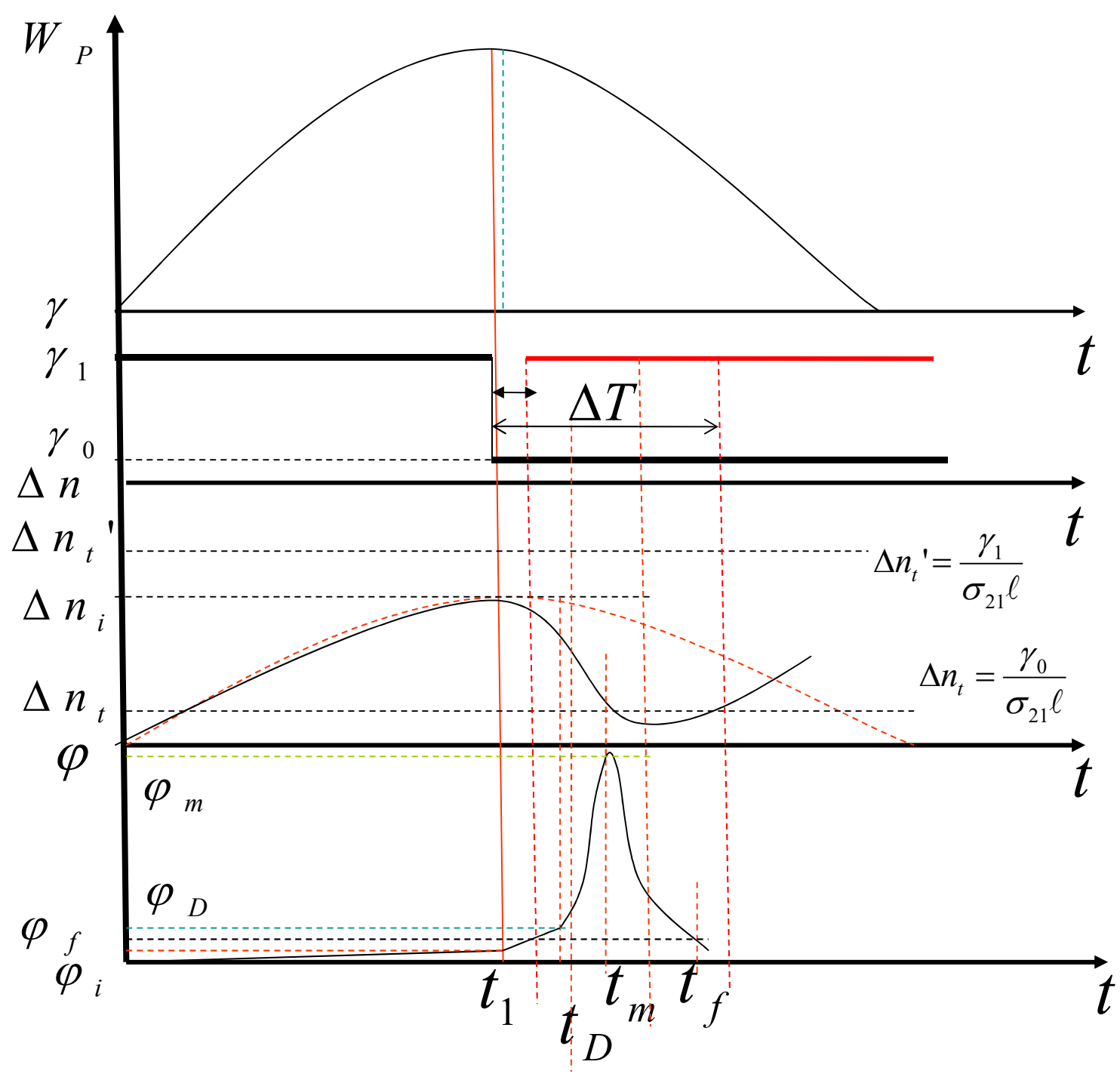
$$= \frac{\tau_R}{\beta_s - 1} \ln \frac{\varphi_D}{\varphi_i}$$

对于一定激光器而言, $\frac{\varphi_D}{\varphi_i}$ 一定,

如对红宝石激光器的一些典型参数计算有:

$$\frac{\varphi_D}{\varphi_i} \approx 10^{10}, \frac{\varphi_m}{\varphi_D} \approx 10.$$

•



2、阈值问题

若用的开关函数如图所示的方波情况， ΔT 为开关持续时间
(也是开关打开后允许激光振荡的时间)

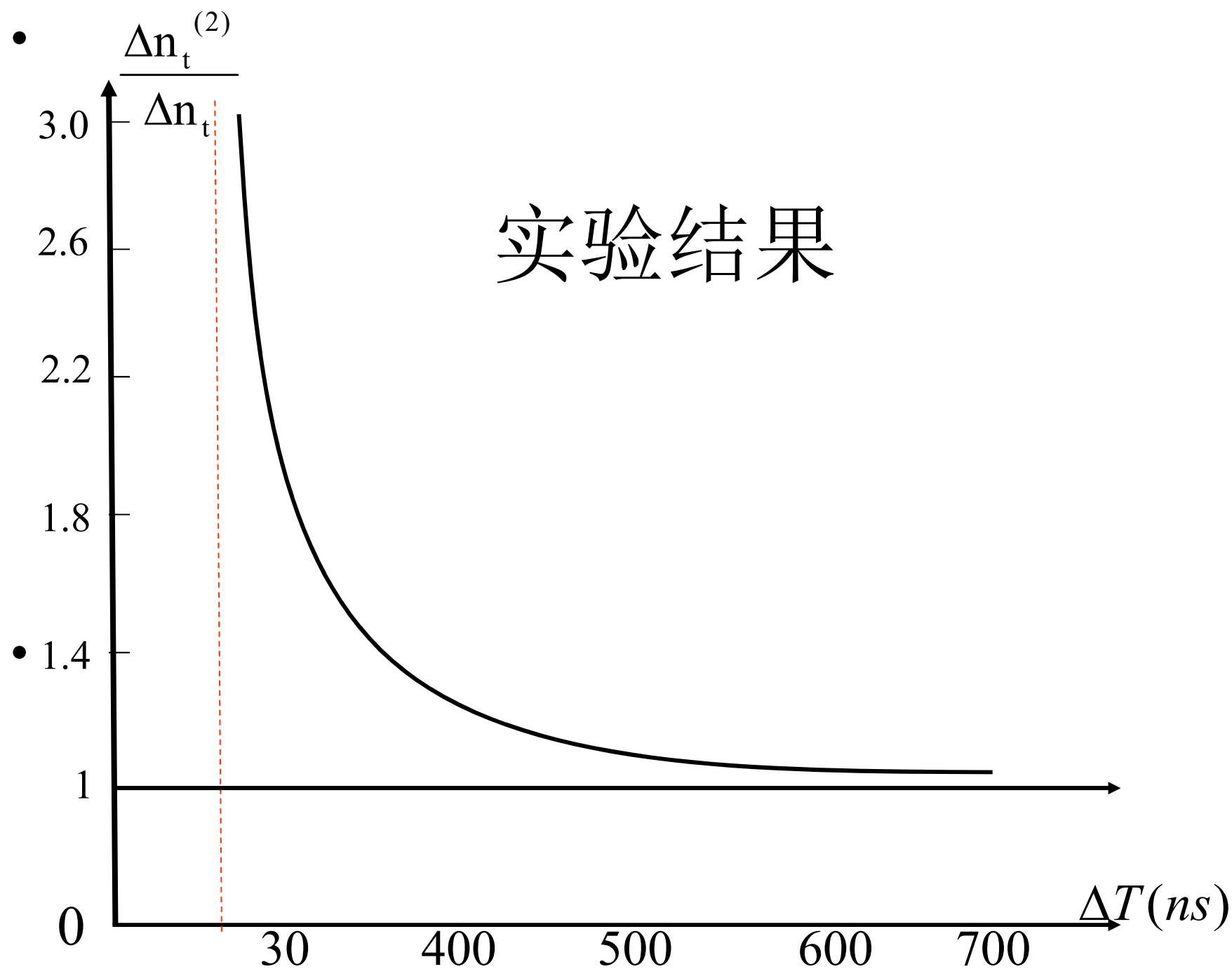
要产生激光必须要求 $\Delta T \geq T_D$, 必须使 $\Delta n_i \geq \Delta n_t^{(2)} = \Delta n_i(\Delta T)$

$$\text{利用 } T_D = \frac{\tau_R}{\frac{\Delta n_i}{\Delta n_t} - 1} \ln \frac{\varphi_D}{\varphi_i},$$

$$\Rightarrow \Delta n_t^{(2)} = \Delta n_t \left(1 + \frac{\tau_R}{\Delta T} \ln \frac{\varphi_D}{\varphi_i} \right),$$

调Q激光器的阈值 $\Delta n_t^{(2)}$ 受Q开关打开后
允许激光振荡的持续时间 ΔT 的限制。

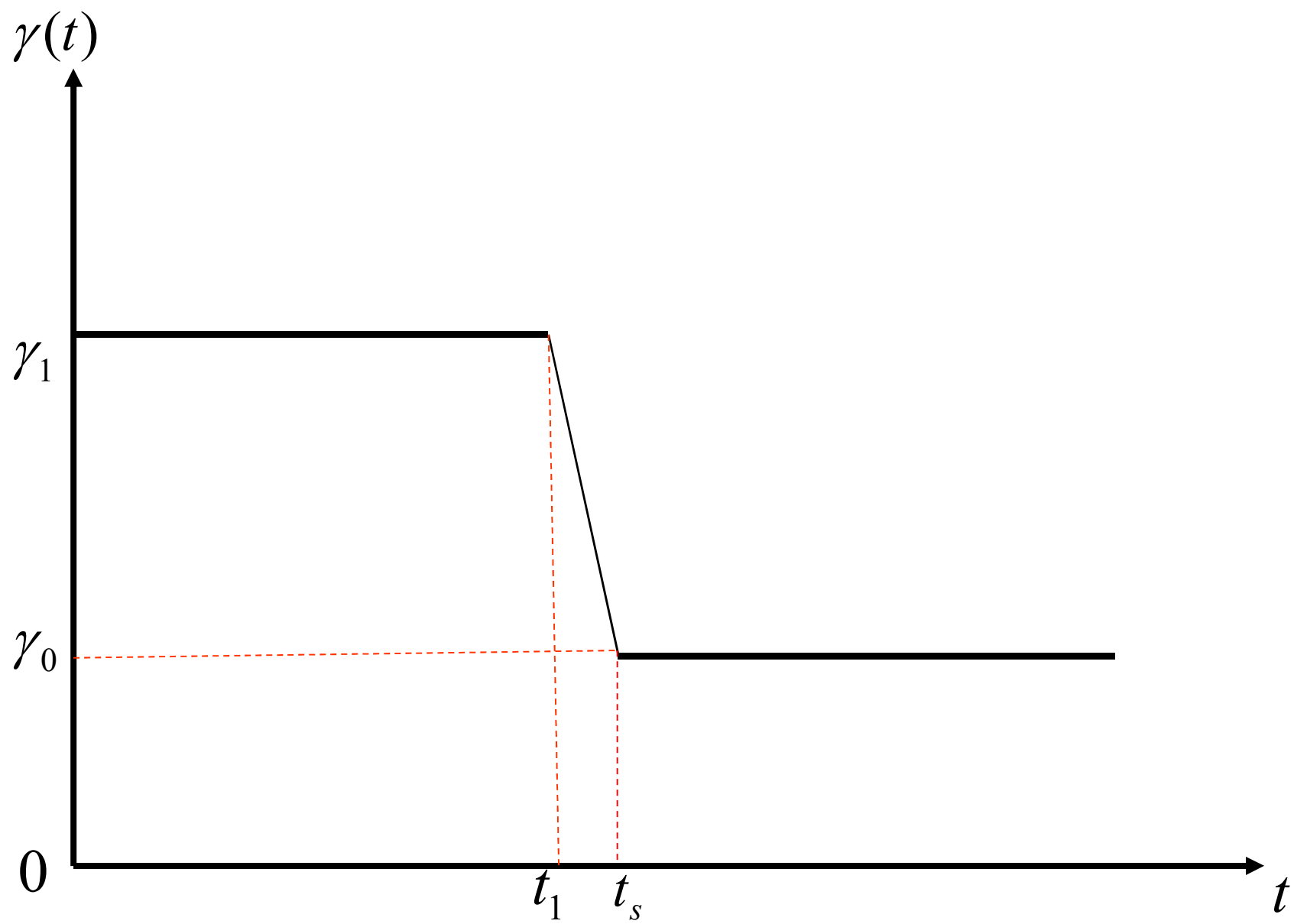
当 $\Delta T \rightarrow \infty$, $\Delta n_t^{(2)} = \Delta n_t$, 连续波或自由振荡时激光器的阈值,
 ΔT 为有限值时, $\Delta n_t^{(2)} > \Delta n_t$.

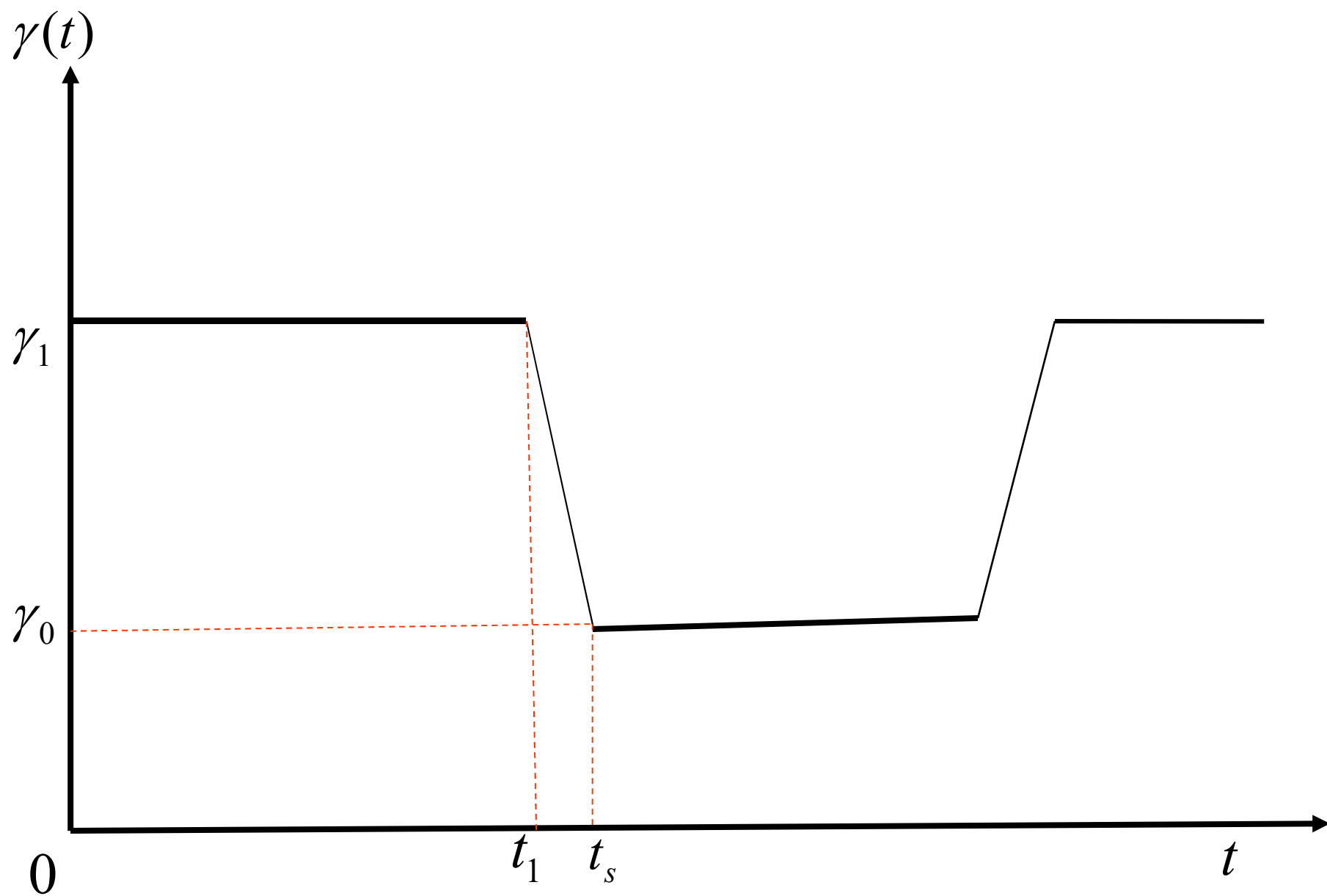


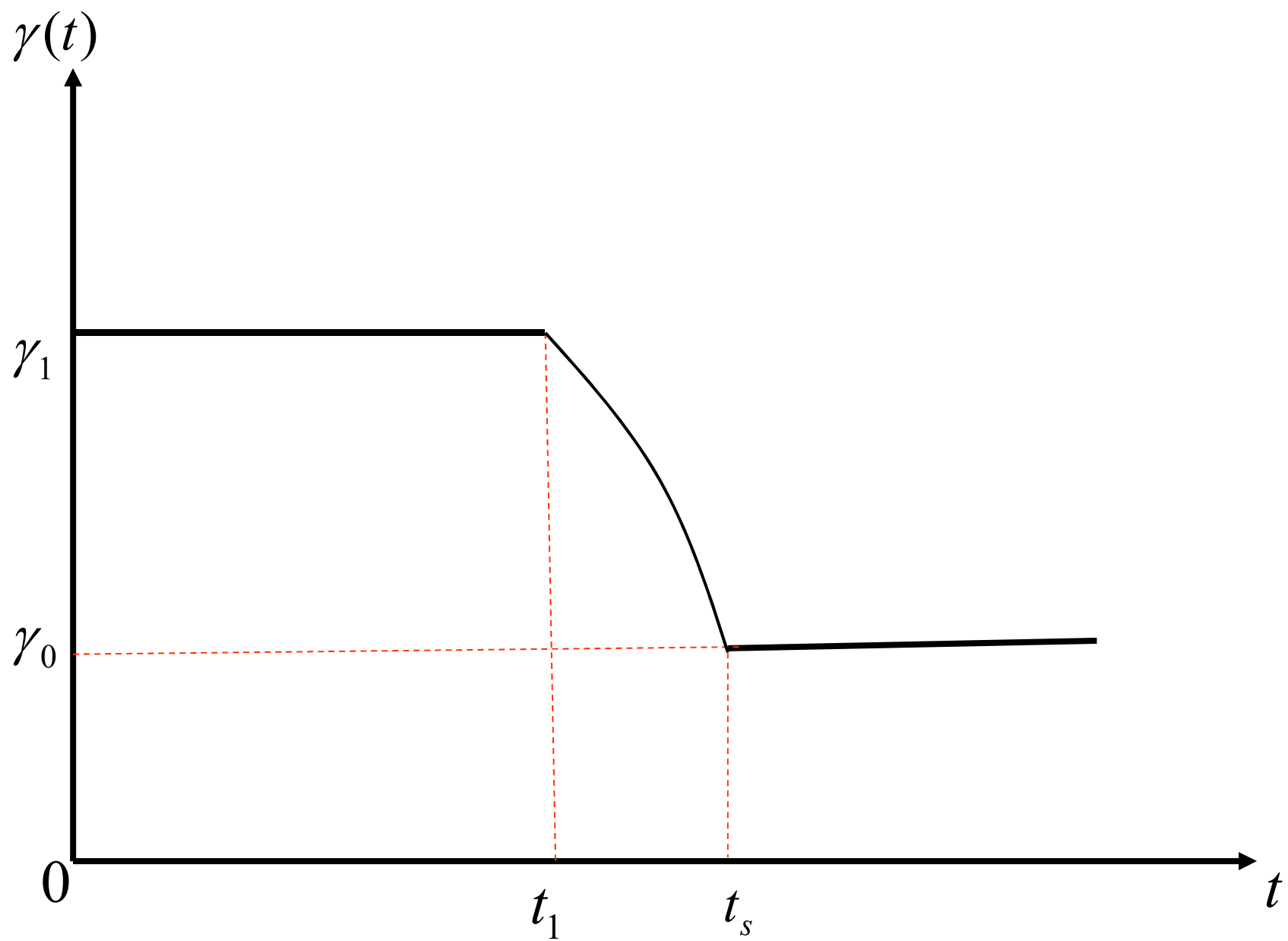
四、实际开关函数调Q激光问题

- 1、实际Q开关函数
- 实际Q开关函数难以获得理想阶跃型或理想方波型。调Q激光巨脉冲特性需用速率方程数值求解。

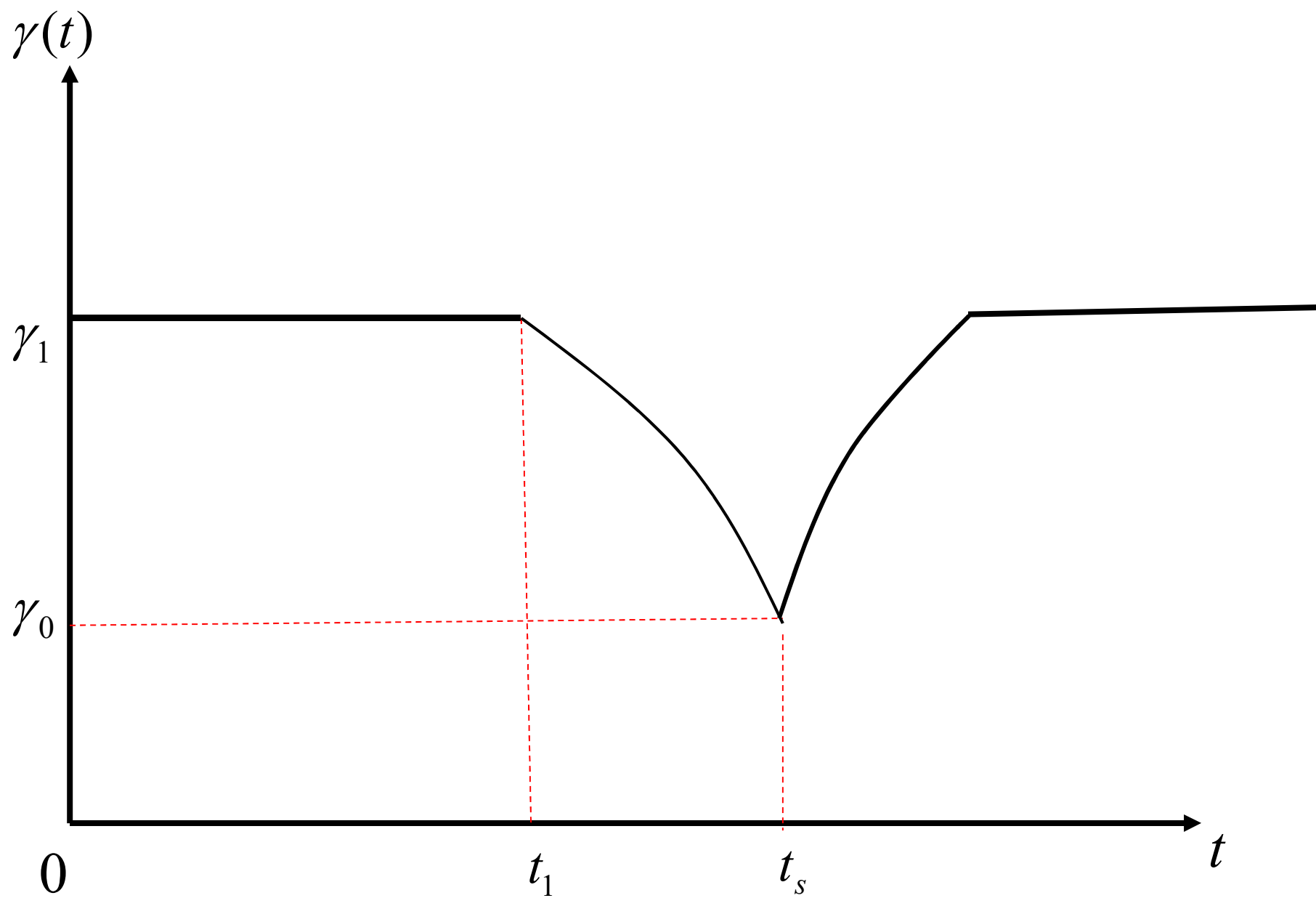
A、稳变开关函数：开关开启后，腔的低损耗（ $\gamma = \gamma_0$ ）能够维持一段时间；

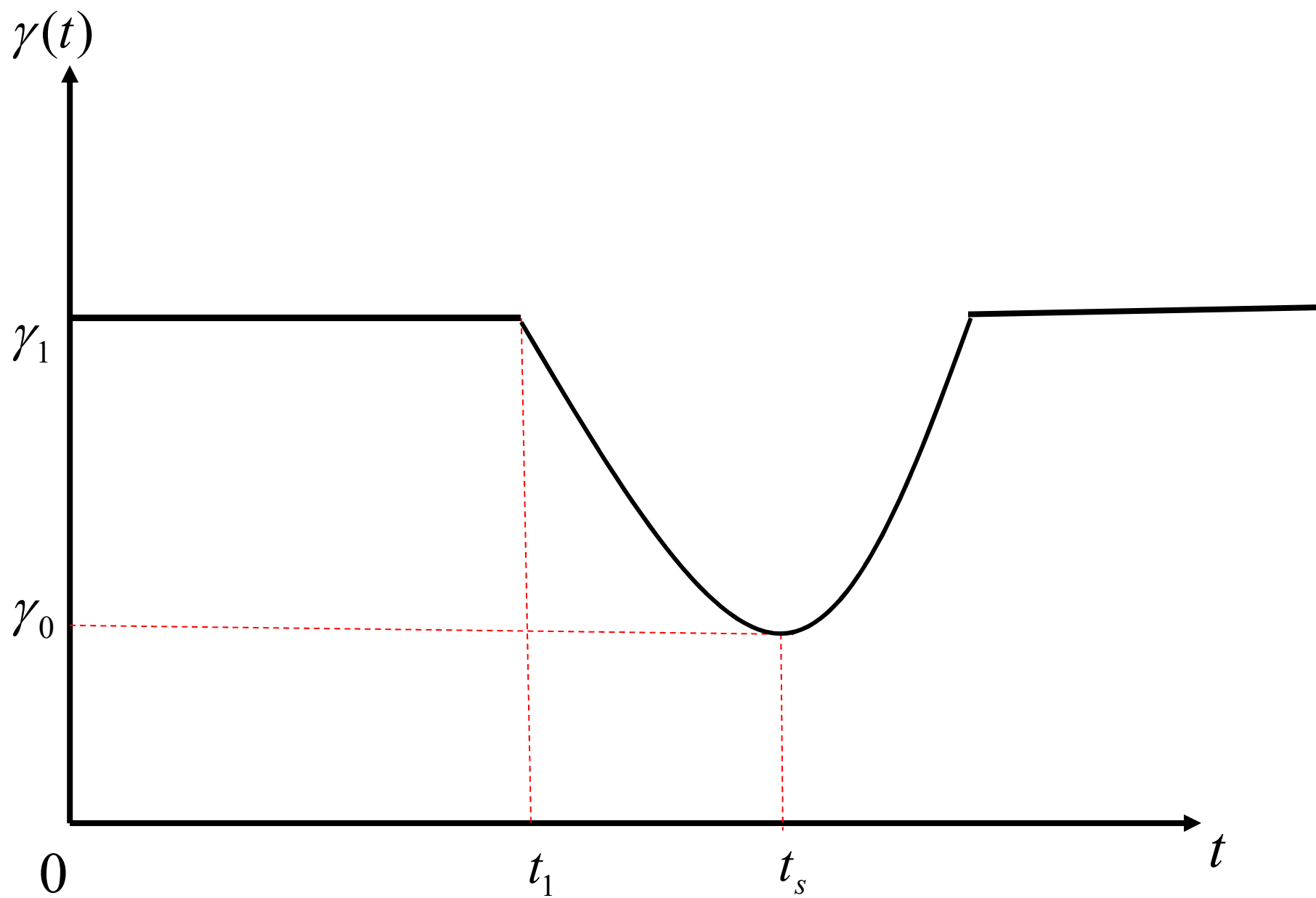






- **B、瞬变开关函数：** 开关过程中，腔的损耗始终在变化。



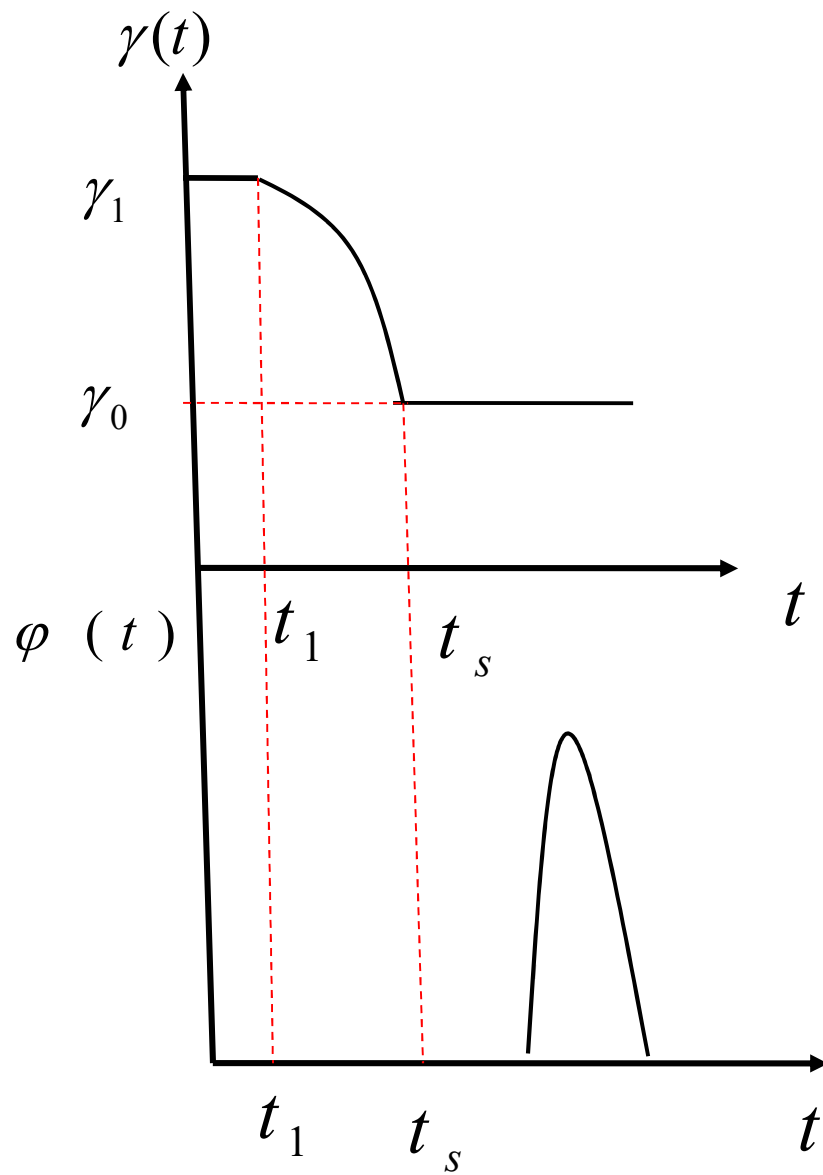
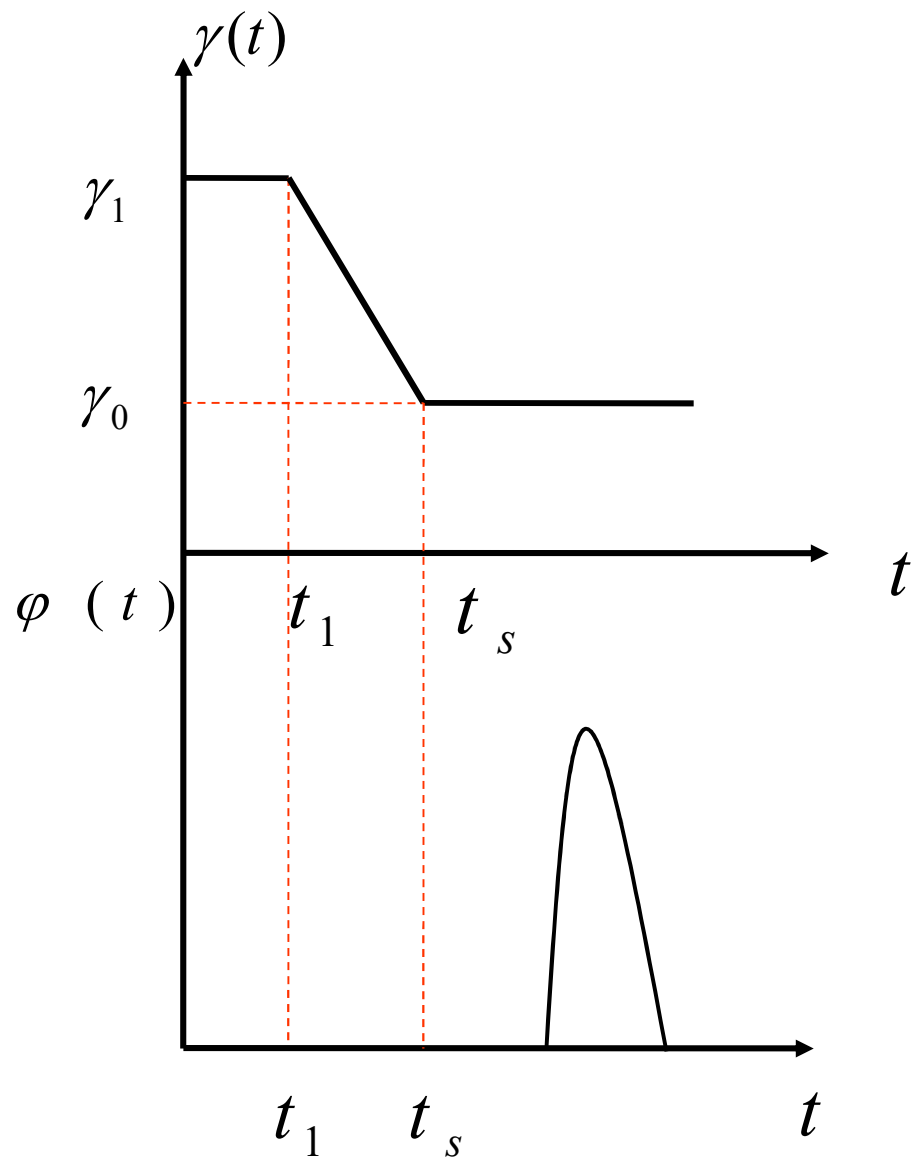


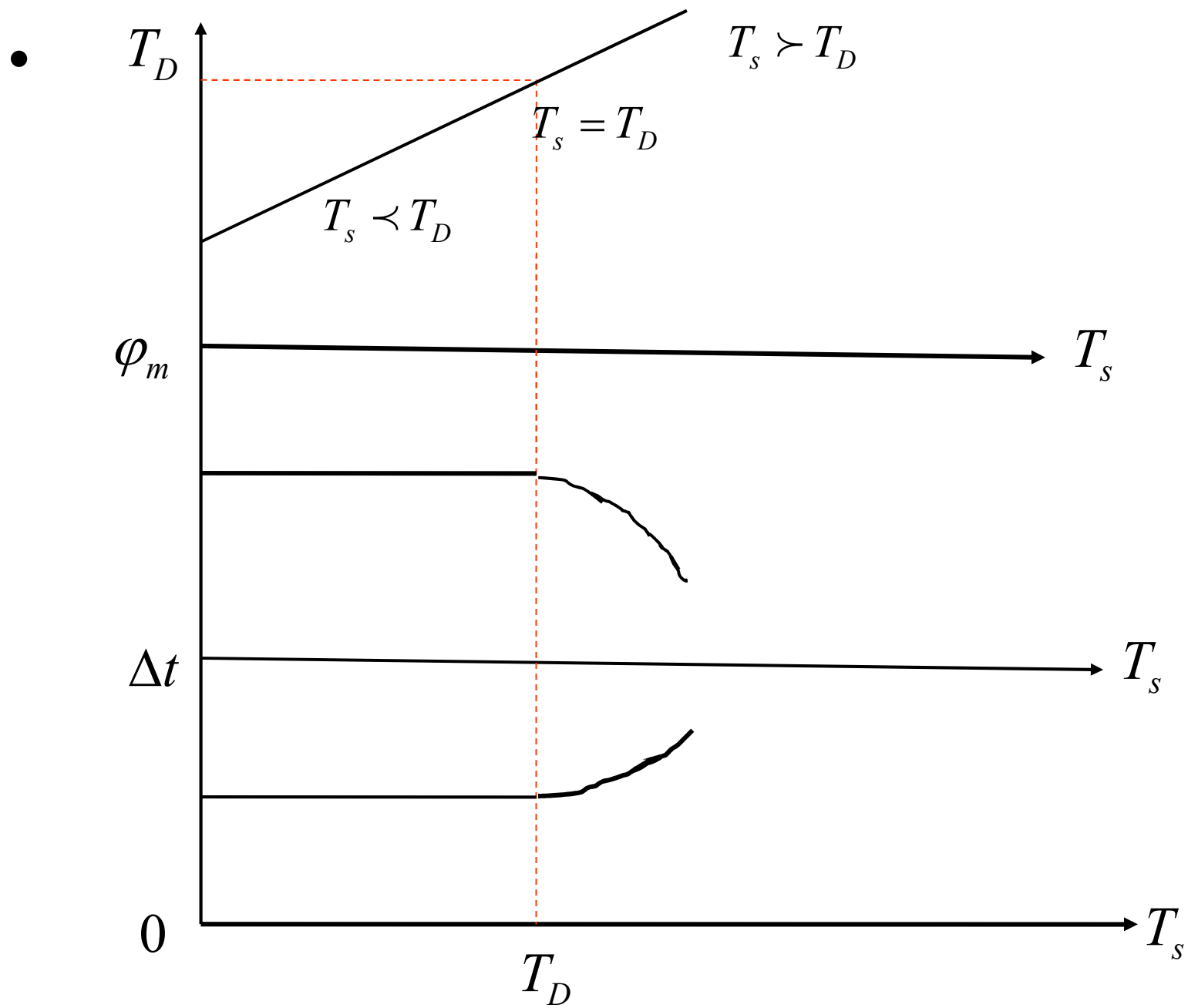
- 2、快Q开关函数调Q,

$T_s = t_s - t_1 \leq T_D$, 称为快Q开关;

$T_s = t_s - t_1 \succ T_D$, 称为慢 Q 开关;

相对而言, 不同泵浦, T_D 不同。





数值计算，研究 T_s 对巨脉冲性能的影响。结果表明：

1、调Q巨脉冲半高全宽 (FWHM) Δt 以及峰值光子数 φ_m 随开关开启时间 T_s 的变化，存在一个特征时间 T_D ;

2、当 $T_s \leq T_D$ 时, $\varphi_m, \Delta t$,与 T_s 的大小几乎无关,
 $\varphi_m, \Delta t$,与 $T_s = 0$ 情况(理想阶跃开关)下相同。

3、 $T_s \succ T_D$, φ_m 随 T_s 增大而减小, Δt 随 T_s 增大而增大。

$\Rightarrow T_s \leq T_D$, $\varphi_m, \Delta t$ 不但与 T_s 大小无关，而且与Q开关函数具体形式无关。

$\varphi_m, \Delta t$ 都与理想阶跃开关函数 ($T_s = 0$) 结果相同。

第二节 电光晶体开关激光调Q技术

- 一、电光调制
- 电光调制的物理基础是电光效应。
- 某些晶体材料在外加电场的作用下，其折射率将发生变化，当光波通过此介质时，传输特性会受到影响而改变。

可用来对光波的相位、偏振、强度等特性进行控制。

电光晶体开关激光调Q技术是其应用之一。

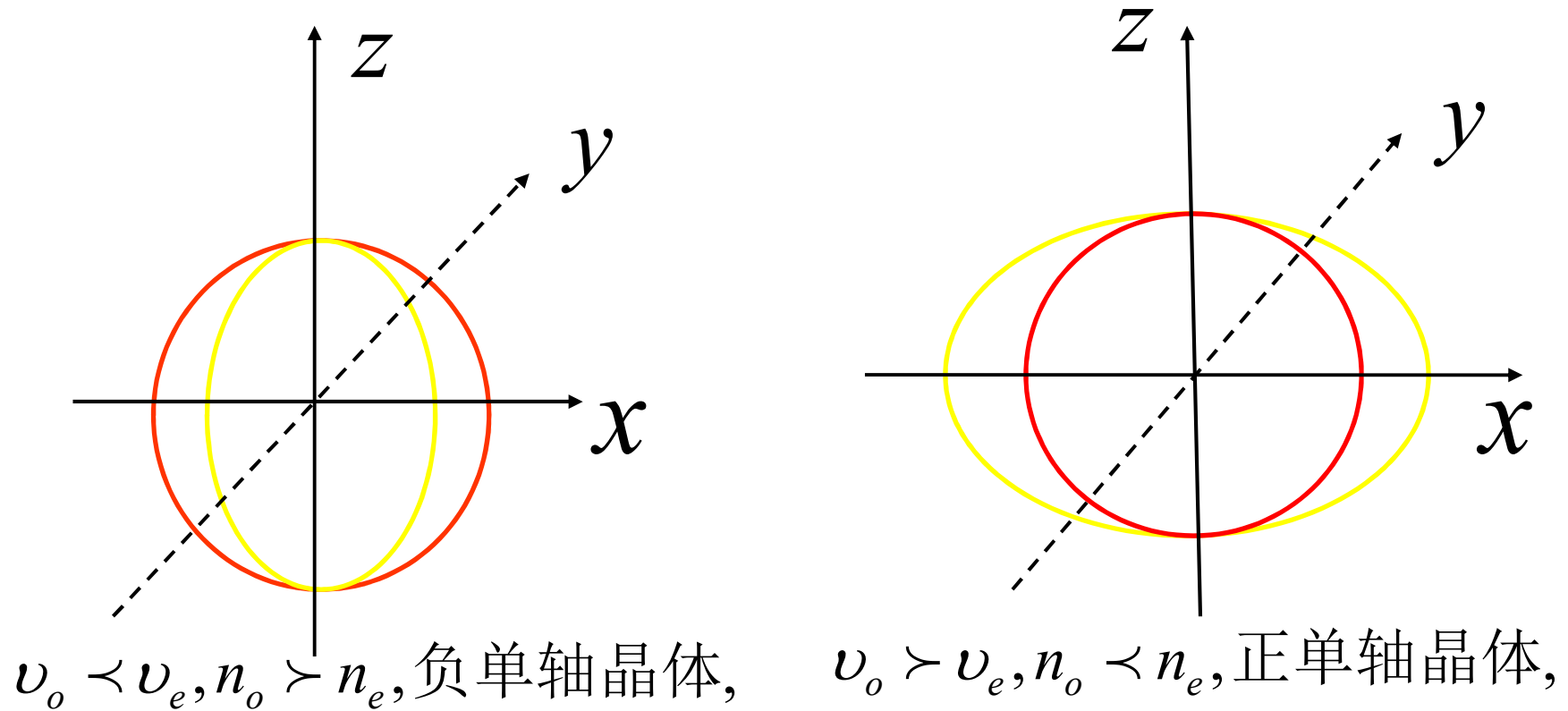
$$n = n_0 + \gamma^{\Lambda \rightarrow} \vec{E} + h^{\Lambda \rightarrow \rightarrow} \vec{E} \vec{E}, \quad \Delta n = \gamma^{\Lambda \rightarrow} \vec{E} + h^{\Lambda \rightarrow \rightarrow} \vec{E} \vec{E}, \vec{E} \text{ 外加电场强度矢量}$$

$\gamma^{\Lambda \rightarrow} \vec{E}$ -- 线性电光效应 - 泡克尔斯效应(Pockles) ;

$h^{\Lambda \rightarrow \rightarrow} \vec{E} \vec{E}$ -- 二次电光效应 - 克尔效应 (Kerr).

•

- 以具有线性电光效应的两大类晶体材料为例来说明：
- KDP类磷酸二氢钾(KH_2PO_4)和LN类铌酸锂(LiNbO_3)。
- 双折射晶体，负单轴晶体。
- 以折射率椭球体（光率体）来描述。 Z 为光轴。



- 晶体上未加外电场时，主轴坐标系中，有：

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

x, y, z 晶体介质的主轴方向，晶体内沿这些方向的电位移矢量 \vec{D} 和电场强度矢量 \vec{E} 是相互平行的。

- n_x, n_y, n_z 晶体介质的主折射率。

- 晶体上加外电场后，主轴坐标系中，有：

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{n^2}\right)_1 x^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_2 y^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_3 z^2 + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 yz + \\ & + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 xz + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 xy = 1 \end{aligned}$$

•

$$\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 = \frac{1}{n_x^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1, \quad \left(\frac{1}{n^2}\right)_2 = \frac{1}{n_y^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2,$$

$$\left(\frac{1}{n^2}\right)_3 = \frac{1}{n_z^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3, \quad \left(\frac{1}{n^2}\right)_4 = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4,$$

$$\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5, \quad \left(\frac{1}{n^2}\right)_6 = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6,$$

• $\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^3 \gamma_{ij} E_j, \gamma_{ij} - \text{线性电光系数张量元}$

$$\begin{aligned}
&(\Delta(\frac{1}{n^2})_1 + \frac{1}{n_x^2})x^2 + (\Delta(\frac{1}{n^2})_2 + \frac{1}{n_y^2})y^2 + (\Delta(\frac{1}{n^2})_3 + \frac{1}{n_z^2})z^2 \\
&+ 2(\frac{1}{n^2})_4 yz + 2(\frac{1}{n^2})_5 xz + 2(\frac{1}{n^2})_6 xy = 1
\end{aligned}$$

•

$$\begin{bmatrix} \Delta(\frac{1}{n^2})_1 \\ \Delta(\frac{1}{n^2})_2 \\ \Delta(\frac{1}{n^2})_3 \\ \Delta(\frac{1}{n^2})_4 \\ \Delta(\frac{1}{n^2})_5 \\ \Delta(\frac{1}{n^2})_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \\ \gamma_{41} & \gamma_{42} & \gamma_{43} \\ \gamma_{51} & \gamma_{52} & \gamma_{53} \\ \gamma_{61} & \gamma_{62} & \gamma_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}$$

- LN类铌酸锂(LiNbO_3)。
- 双折射晶体, $n_x = n_y = n_o$, $n_z = n_e$,
- 并且 $n_o > n_e$, 负单轴晶体。

$${}^{\Lambda}\gamma = \begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{42} & 0 \\ \gamma_{51} & 0 & 0 \\ \gamma_{61} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \gamma_{12} = \gamma_{61} = -\gamma_{22}, \gamma_{23} = \gamma_{13}, \gamma_{42} = \gamma_{51}$$

$$\gamma_{22} = 3.4 \times 10^{-10} \text{ cm/V}, \gamma_{23} = 8.6 \times 10^{-10} \text{ cm/V},$$

$$\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-10} \text{ cm/V}, \gamma_{42} = 28 \times 10^{-10} \text{ cm/V}.$$

- KDP类磷酸二氢钾(KH_2PO_4)
- 双折射晶体, $n_x = n_y = n_o, n_z = n_e$,
- 并且 $n_o > n_e$, 负单轴晶体。

$$\Lambda \gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{52} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{63} \end{bmatrix}, \gamma_{41} = \gamma_{52}, \gamma_{63} \succ \gamma_{41}.$$

$$\gamma_{63} = 10.6 \times 10^{-10} \text{ cm/V}, (\text{KDP}), \gamma_{41} = 8.8 \times 10^{-10} \text{ cm/V},$$

$$\gamma_{63} = 20.8 \times 10^{-10} \text{ cm/V}. (\text{DKDP}).$$

- KDP类磷酸二氢钾(KH_2PO_4)双折射晶体,
- $n_x = n_y = n_o$, $n_z = n_e$, 并且 $n_o > n_e$, 负单轴晶体:

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_1 = \Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_2 = \Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_3 = 0$$

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_4 = \gamma_{41} E_x, \quad \Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_5 = \gamma_{41} E_y$$

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_6 = \gamma_{63} E_z$$

$$\bullet \Rightarrow \frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\gamma_{41} E_x yz + 2\gamma_{41} E_y xz + 2\gamma_{63} E_z xy = 1$$

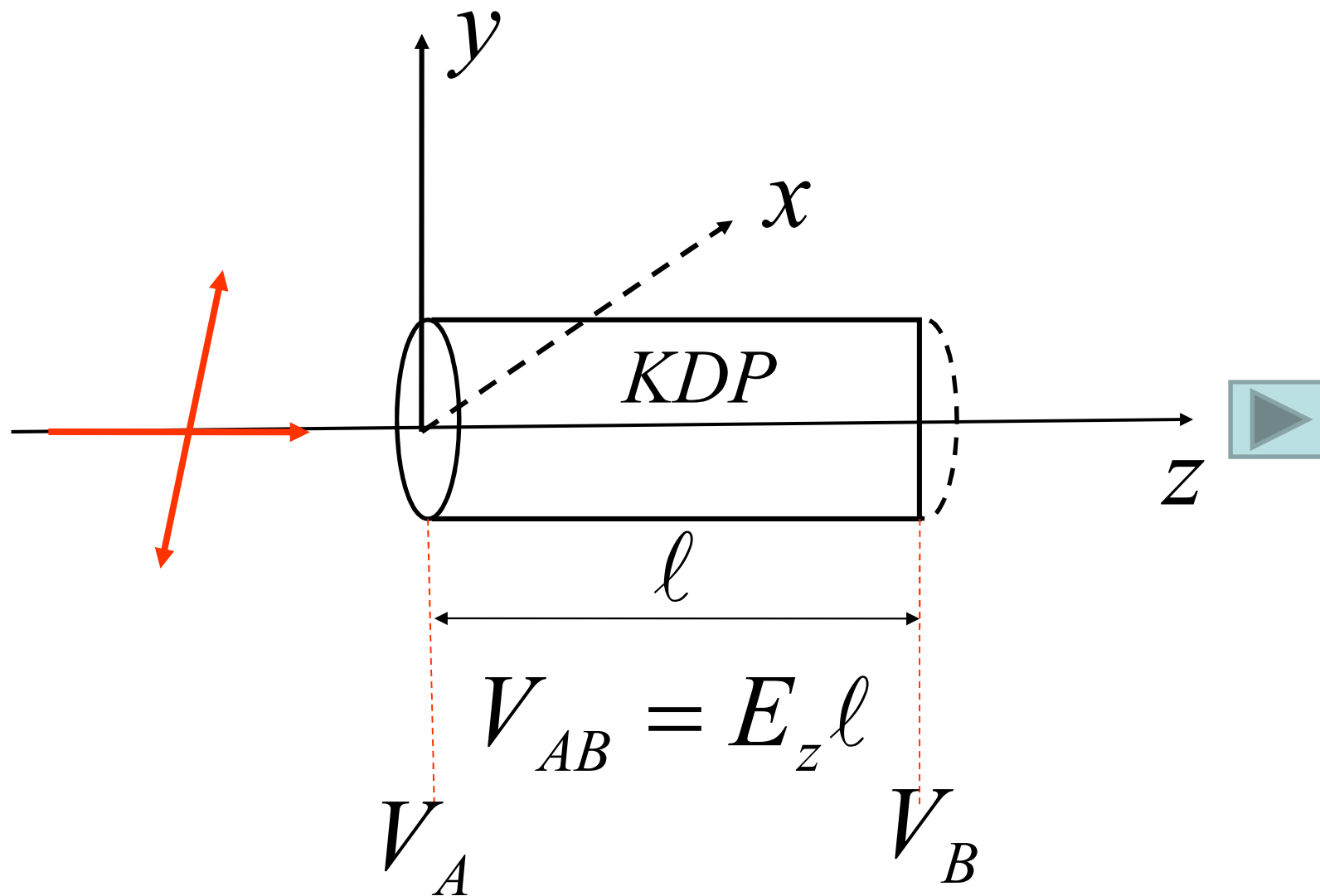
- **KDP**类晶体的纵向运用---外加电场的方向平行于光轴 z ，即 $E_z=E, E_x=E_y=0$.

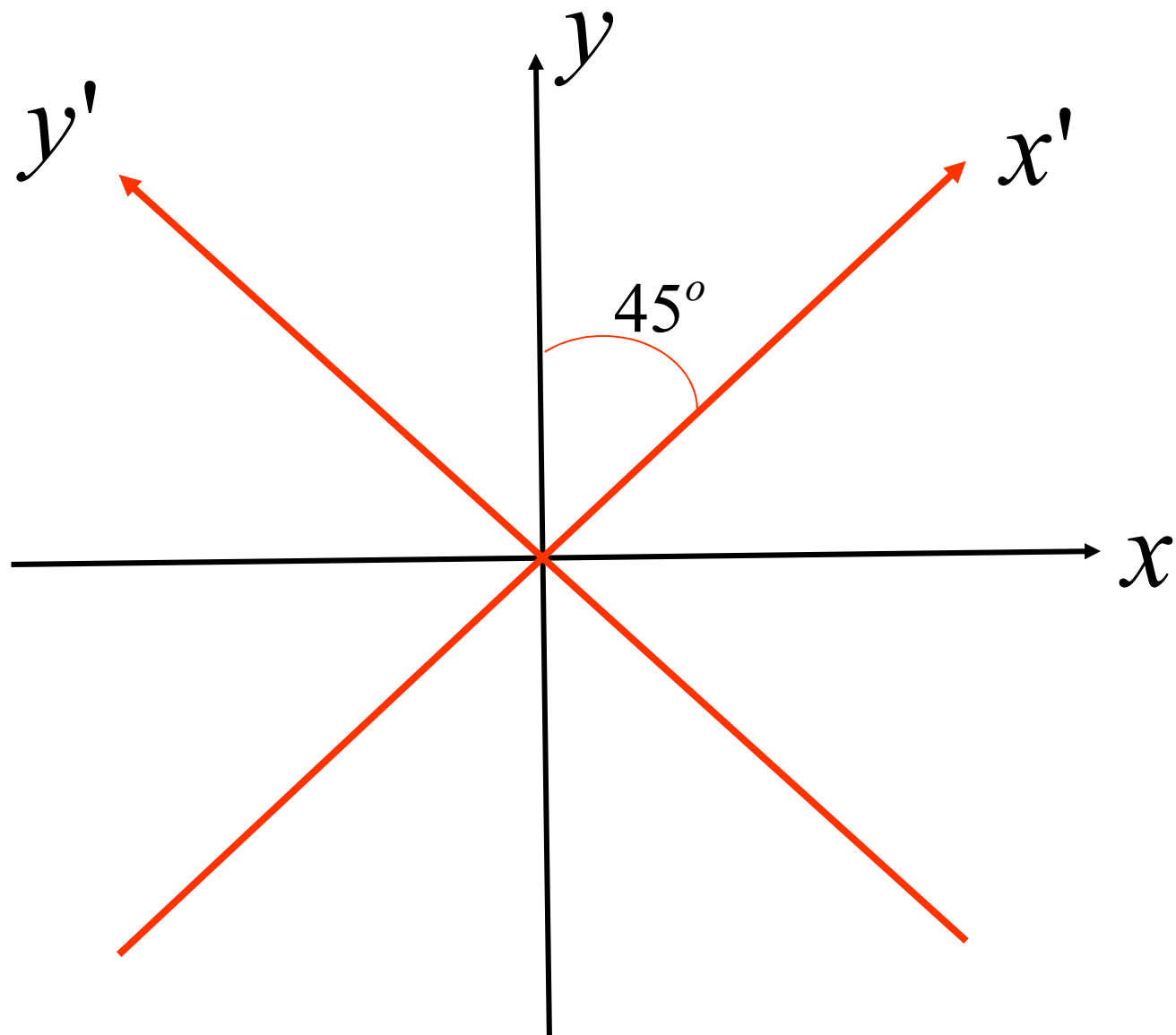
$$\Rightarrow \frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\gamma_{63}E_zxy = 1$$

- 主轴化：寻求新的坐标系 x',y',z' ，（称为感应主轴的方向），使得：

•

$$\frac{x'^2}{n_x'^2} + \frac{y'^2}{n_y'^2} + \frac{z'^2}{n_z'^2} = 1$$





$$x = x' \cos \alpha - y' \sin \alpha,$$

$$y = x' \sin \alpha + y' \cos \alpha$$

$$z = z'$$

$$\Rightarrow \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{63} E_z \sin 2\alpha \right) x'^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{63} E_z \sin 2\alpha \right) y'^2 + \frac{1}{n_e^2} z'^2 + (2\gamma_{63} E_z \cos 2\alpha) x' y' = 1$$

令交叉项为 0, 即 $\cos 2\alpha = 1, \alpha = 45^\circ$,

则方程式变为:

$$\Rightarrow \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{63}E_z\right)x'^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{63}E_z\right)y'^2 + \frac{1}{n_e^2}z'^2 = 1$$

*KDP*类晶体沿z轴加电场后的新的折射率椭球方程。

其椭球主轴的半长度:

$$\frac{1}{n_x'^2} = \frac{1}{n_o^2} + \gamma_{63}E_z$$

$$\frac{1}{n_y'^2} = \frac{1}{n_o^2} - \gamma_{63}E_z$$

- $$\frac{1}{n_z'^2} = \frac{1}{n_e^2}$$

$$\bullet \quad \gamma_{63} \sim 10^{-10} m / V, \rightarrow \gamma_{63} E_z \ll \frac{1}{n_o^2},$$

$$\text{利用 } d\left(\frac{1}{n^2}\right) = -\frac{2}{n^3} dn \rightarrow \Delta n = -\frac{n^3}{2} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right),$$

$$\Rightarrow \Delta n_x = -\frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z, \quad \Delta n_y = \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z,$$

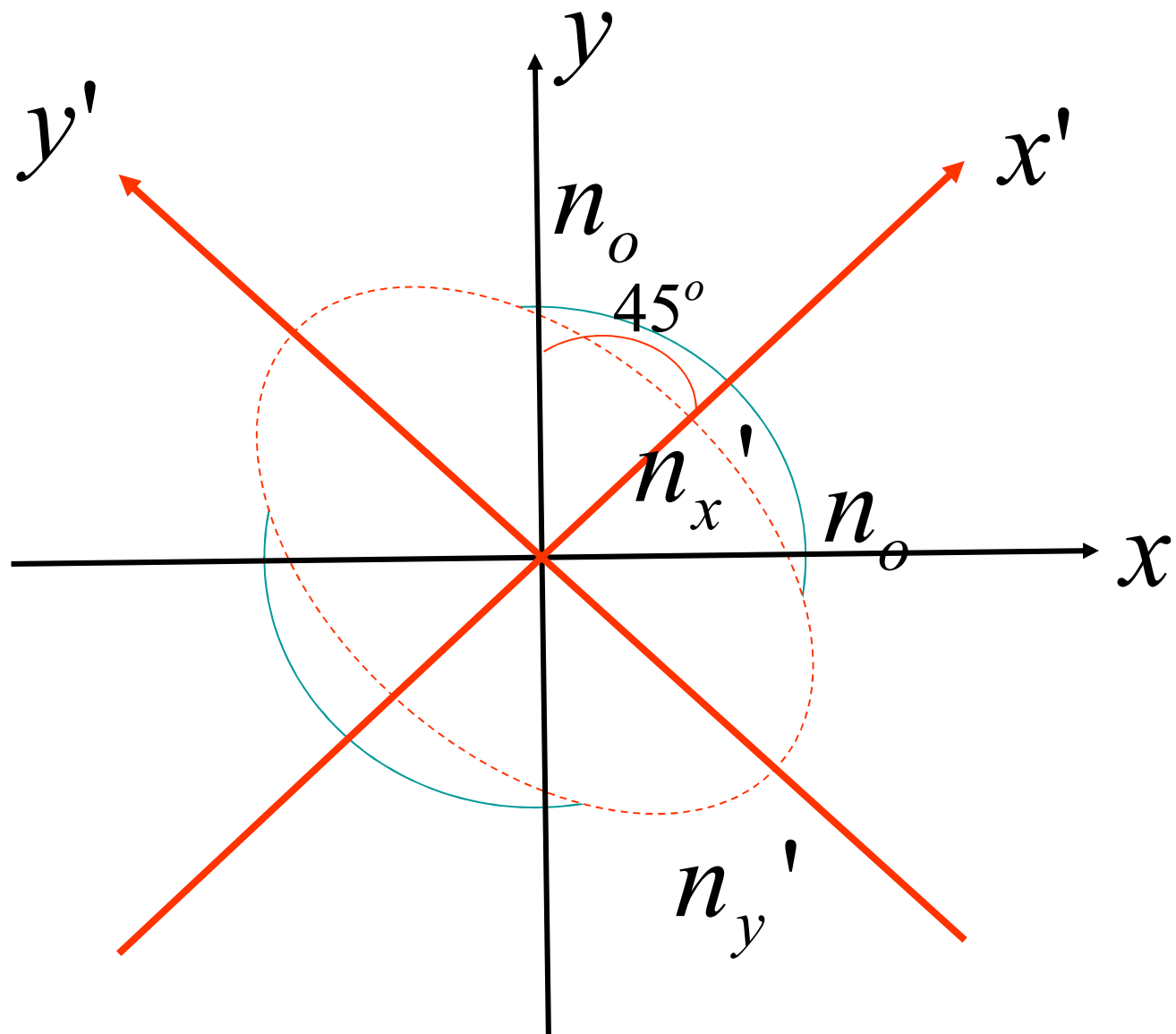
$$\Delta n_z = 0$$

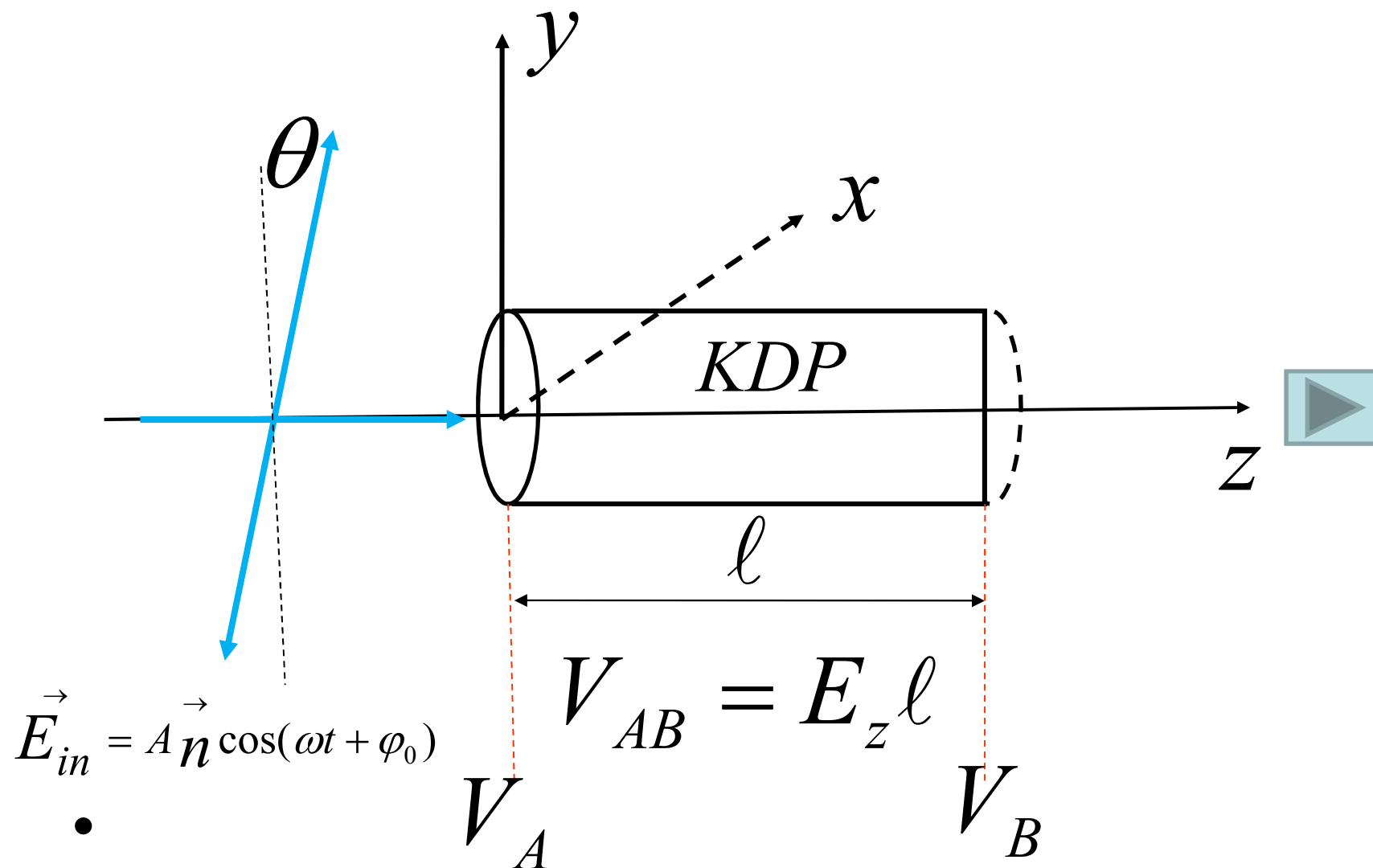
$$\Rightarrow n_x' = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z,$$

$$n_y' = n_o + \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z,$$

$$n_z' = n_z$$

KDP类晶体沿**z**轴加电场时，
由单轴晶体变成了双轴晶体，
折射率椭球的主轴绕**z**轴旋转了**45**度角，
此转角与外加电场的大小无关。
其折射率变化与外加电场成正比。

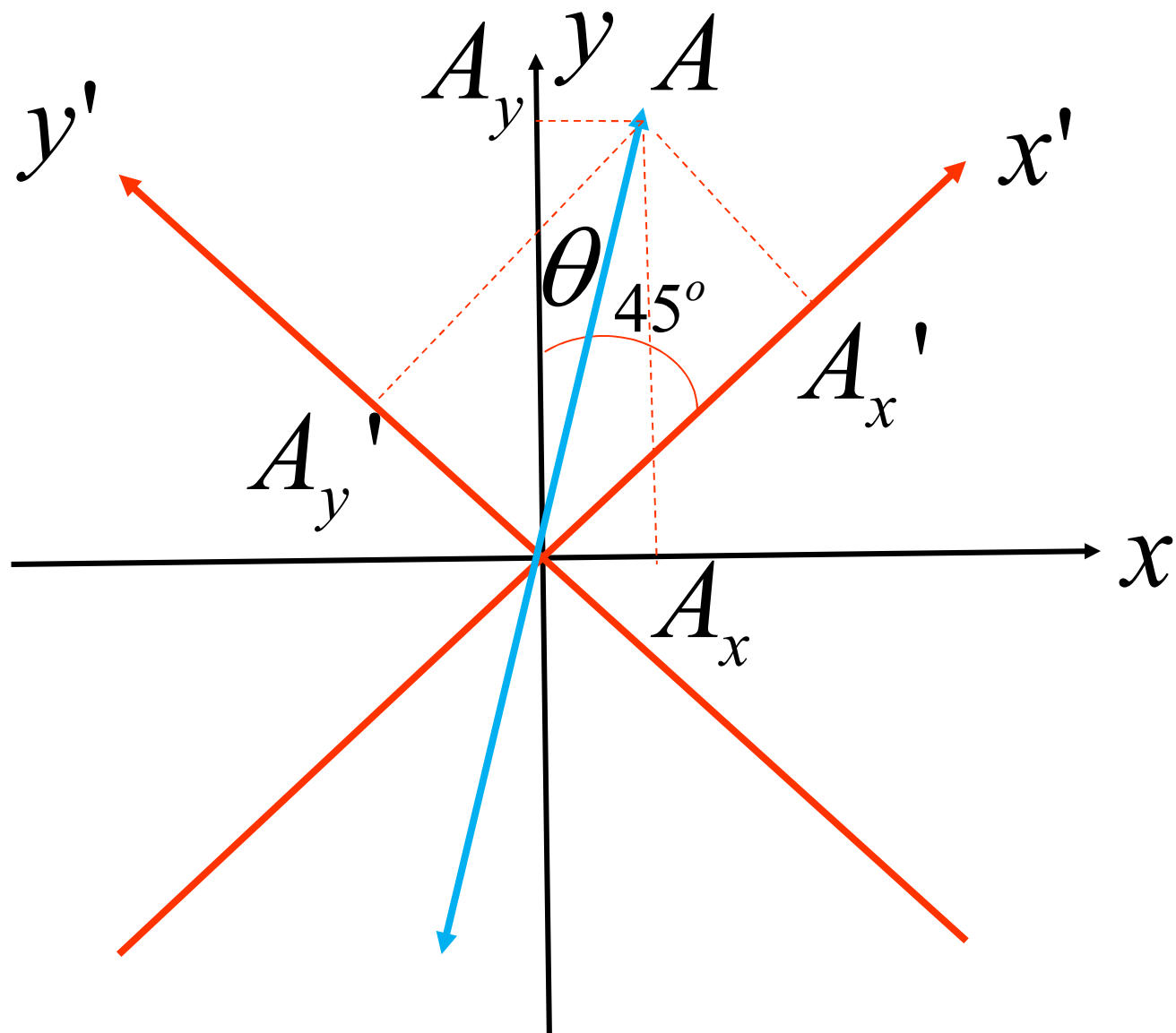




- 二、电光相位延迟。

- 纵向运用：电场方向与通光方向一致；
- 横向运用：电场方向与通光方向垂直；
- 以平面波光波为例来说明 *KDP* 类晶体纵向运用：

$$\vec{E}_{in} = A \vec{n} \cos(\omega t + \varphi_0)$$



1、当晶体上不加外电场时,入射线偏振光(沿 \vec{n} 方向振动, 与y 夹角为 θ)进入晶体后会分解为沿x, y两个相互垂直的主轴方向振动的线偏振光, 可表示为:

$$\begin{aligned}\vec{E}_{in} &= A \vec{n} \cos(\omega t + \varphi_0) = A_x \vec{x} \cos(\omega t + \varphi_0) + A_y \vec{y} \cos(\omega t + \varphi_0) \\ &= A \sin \theta \vec{x} \cos(\omega t + \varphi_0) + A \cos \theta \vec{y} \cos(\omega t + \varphi_0)\end{aligned}$$

从晶体中出射的光场为:

$$\vec{E}_{out} = A \sin \theta \vec{x} \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_x) + A \cos \theta \vec{y} \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_y)$$

$$\varphi_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_x \ell = \frac{2\pi}{\lambda} n_o \ell, \quad \varphi_y = \frac{2\pi}{\lambda} n_y \ell = \frac{2\pi}{\lambda} n_o \ell, \rightarrow \varphi_x = \varphi_y = \varphi_1$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow \vec{E}_{out} &= A \sin \theta \vec{x} \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_1) + A \cos \theta \vec{y} \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_1) \\ &= A \vec{n} \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_1), \text{ 仍为沿 } \vec{n} \text{ 方向振动的线偏振光。}\end{aligned}$$

2、当晶体上加外电场 E_z 时,入射线偏振光(沿 \vec{n} 方向振动,与 y 夹角为 θ)进入晶体后会分解为沿 x' , y' 两个相互垂直的感应主轴方向振动的线偏振光,可表示为:

$$\begin{aligned}\vec{E}_{in} &= A \vec{n} \cos(\omega t + \varphi_0) = A_{x'} \vec{x}' \cos(\omega t + \varphi_0) + A_{y'} \vec{y}' \cos(\omega t + \varphi_0) \\ &= A \cos(45^\circ - \theta) \vec{x}' \cos(\omega t + \varphi_0) + A \sin(45^\circ - \theta) \vec{y}' \cos(\omega t + \varphi_0)\end{aligned}$$

从晶体中出射的光场为:

$$\vec{E}_{out} = A \cos(45^\circ - \theta) \vec{x}' \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_{x'}) + A \sin(45^\circ - \theta) \vec{y}' \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_{y'})$$

$$\varphi_{x'} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{x'} \ell = \frac{2\pi}{\lambda} \ell \left(n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z \right)$$

$$\varphi_{y'} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{y'} \ell = \frac{2\pi}{\lambda} \ell \left(n_o + \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z \right), \varphi_{x'} \neq \varphi_{y'}.$$

出射光的性质取决于 x' , y' 两个相互垂直的感应主轴方向的振动分量之间的位相差 $\Delta\varphi = \varphi_{y'} - \varphi_{x'}$ 以及振幅 $A_{y'}$, $A_{x'}$ 关系.

一般情况下,出射光是椭圆偏振光。

特殊条件下,可以是圆偏振光或线偏振光。

$$\Delta\varphi = \varphi_{y'} - \varphi_{x'} = \frac{2\pi}{\lambda} \ell \cdot n_o^3 \gamma_{63} E_z$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{63} V_{AB}, V_{AB} \text{---晶体上所加的纵向电压.}$$

可以通过改变 V_{AB} 来对 x', y' 两振动分量的位相进行调制,
 ---电光位相调制。

当所加的 V_{AB} 使得 $\Delta\varphi = \pi$ 时, 称为半波电压, 记 为 $V_{\frac{\lambda}{2}}$.

$$V_{\frac{\lambda}{2}} = \frac{\lambda}{2n_o^3 \gamma_{63}}$$

当所加的 V_{AB} 使得 $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ 时, 称为四分之一波电压, 记为 $V_{\frac{\lambda}{4}}$.

$$\bullet V_{\frac{\lambda}{4}} = \frac{\lambda}{4n_o^3 \gamma_{63}} = \frac{1}{2} V_{\frac{\lambda}{2}}$$

1、当 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{2}}$ 时,出射光为线偏振光,振动方向与入射光的振动方向夹一角度,

$2\theta' = 2(45^\circ + \theta)$,如果 $\theta = 0$, 即入射光振动方向与y主轴方向平行,

则 $2\theta' = 90^\circ$,出射光的振动方向与x主轴方向平行,

即与y主轴方向垂直——即出射光的振动方向与入射光的振动方向垂直。。

2、当 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{4}}$ 时,出射光为正椭圆偏振光 ,只有当 $\theta = 0$ 时,

即入射光振动方向与 y 主轴方向平行,

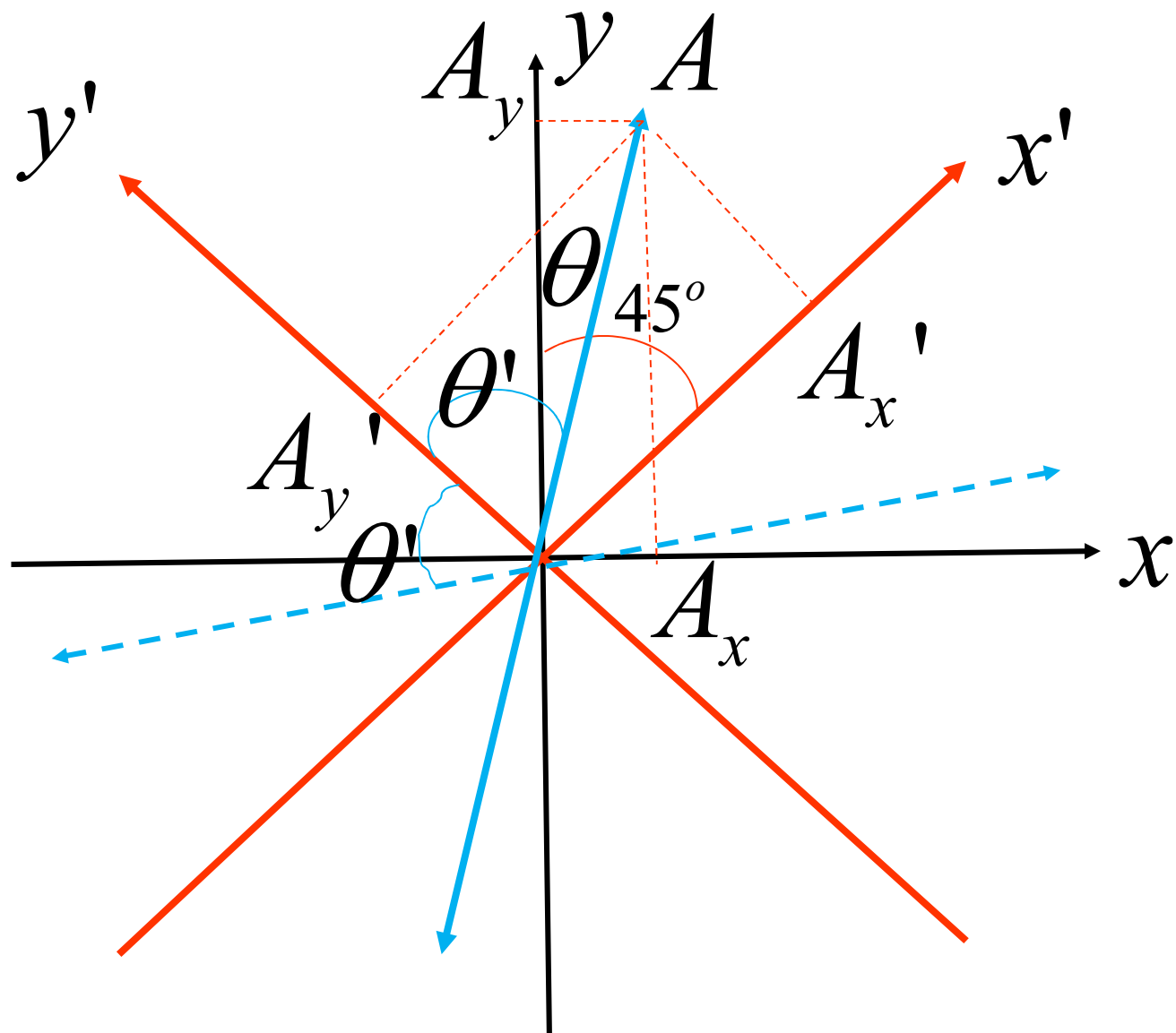
会使得 $A_{x'} = A_{y'} = A \sin 45^\circ = A \cos 45^\circ$,出射光为圆偏振光。

3、其它 V_{AB} ,出射光为椭圆偏振光,椭圆的长、短轴比例取决于 θ ,

即取决于两振动分量的振幅比例 $A \cos(45^\circ - \theta)$ 与 $A \sin(45^\circ - \theta)$ 之比。

利用上述特性, 将电光晶体与偏振器组合, 可以作为电光调制器或电光调Q开关。

*通常要求调整入射线偏振光的振动方向和晶体的相对方位,使得入射光振动方向落到晶体主轴y方向或x方向。



•

• 三、KDP类晶体电光调QNd: YAG激光器实例分析

• KDP类晶体:

KDP, KH_2PO_4 , 磷酸二氢钾, $n_o = 1.512$,

$\gamma_{63} = 10.6 \times 10^{-10} \text{ cm/V}$, 对于波长 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 的光, 有 $V_{\frac{\lambda}{2}} = 7.45 \text{ KV}$.

$DKDP$ 或 KD^*P, KD_2PO_4 , 磷酸二氘钾, $n_o = 1.508$,

$\gamma_{63} = 20.8 \times 10^{-10} \text{ cm/V}$, 对于波长 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 的光, 有 $V_{\frac{\lambda}{2}} = 3.85 \text{ KV}$.

$ADP, NH_4H_2PO_4$, 磷酸二氢氨;

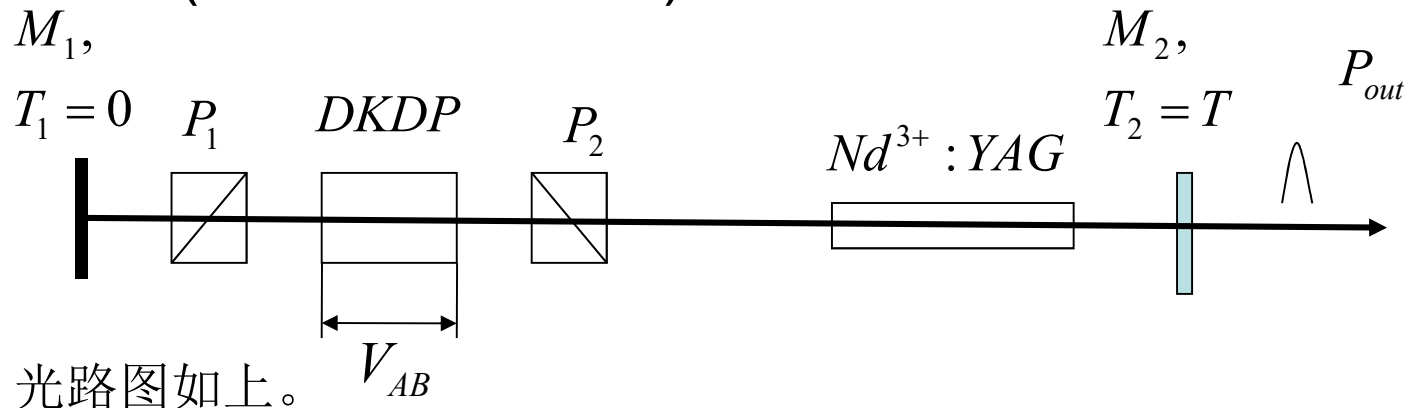
$DADP, NH_4D_2PO_4$, 磷酸二氘氨;

$RbDP, RbD_2PO_4$, 磷酸二氘铷.

现在常用 $DKDP$ 或 KD^*P, KD_2PO_4 , 磷酸二氘钾,

对于 $Nd:YAG$ 激光波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 的光, 有 $V_{\frac{\lambda}{2}} \approx 6 \sim 7 \text{ KV}$.

1、 加压式KDP类晶体电光调Q Nd: YAG激光器 (脉冲反射式PRM)



要求:1、偏振器 $P_1 \perp P_2$,

偏振器种类: 二向色性片, 偏振棱镜, 玻璃堆, 偏振膜片;

2、沿 $DKDP$ 晶体光轴方向 z 上加电压 V_{AB} , 用方波高压。

3、 P_1 或 P_2 的起偏方向 (透振方向) 与 $DKDP$ 晶体的主轴 x 或 y 一致;

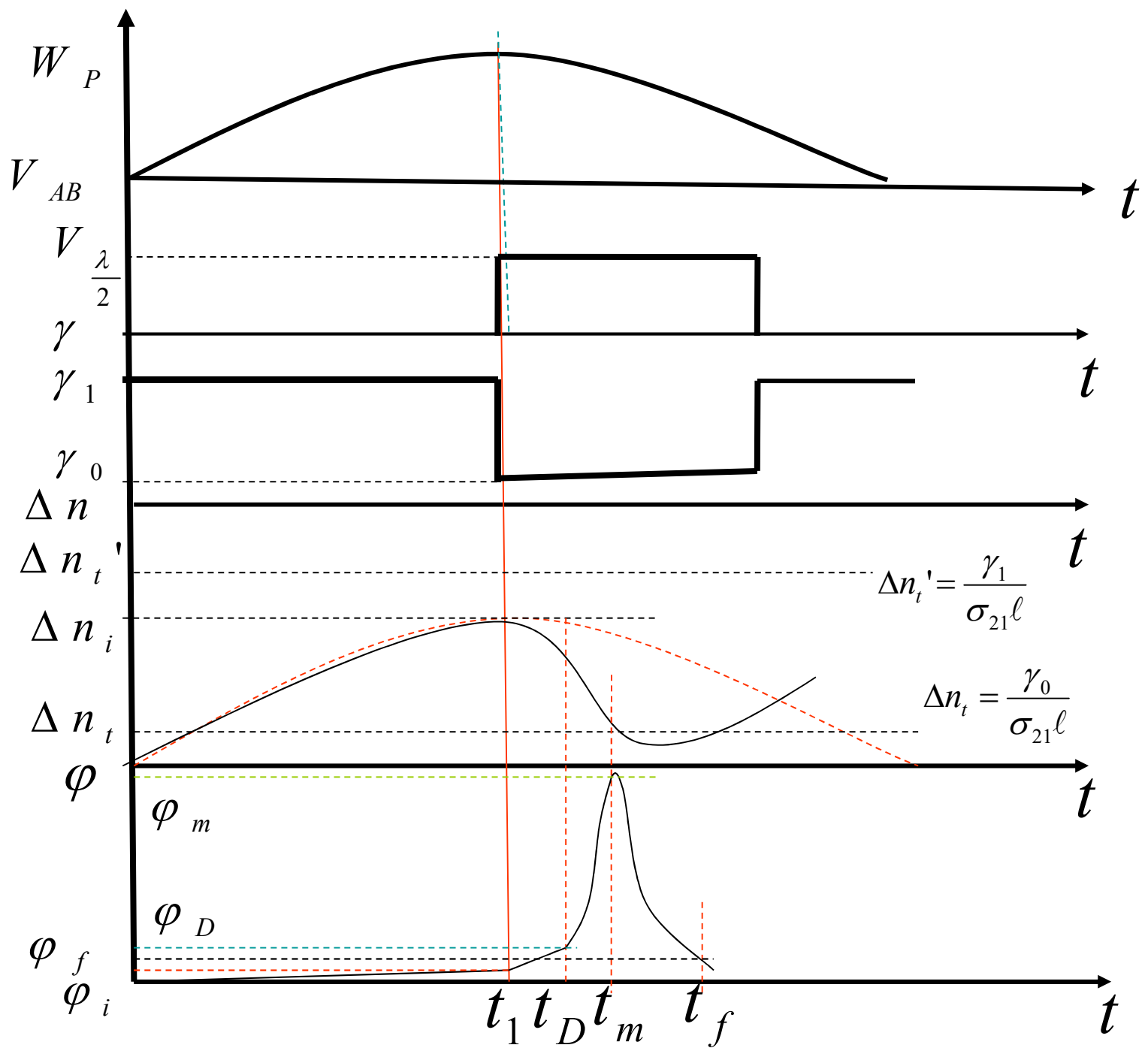
4、光路调整: a、用锥光干涉图调整光轴;

b、常加电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{2}}$, 转动 $DKDP$ 晶体到透光最强的位置;

5、延时控制打开开关 (加上电压) 的时刻 t_1 .

调Q激光产生过程的时序图 如下:

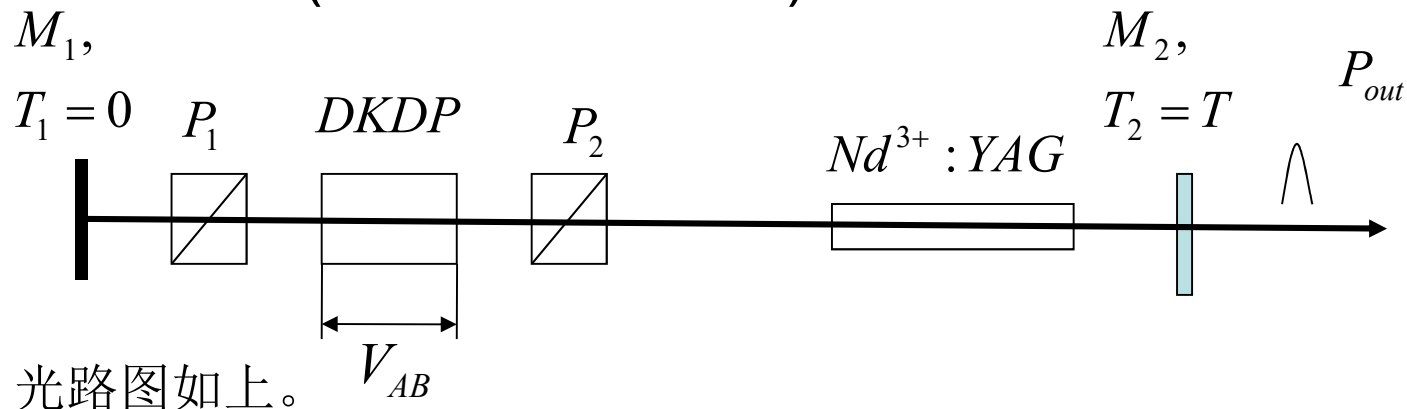
•



- 文字描述:

- 1、泵浦开始后到 t_1 时刻之前, DKDP晶体上的电压 $V_{AB} = 0$, 工作物质发出沿轴向的自发辐射光经 P_2 后起偏成线偏振光, 其振动方向与 P_2 的透振方向一致, 并且与DKDP晶体的主轴y或x平行, 由于 $V_{AB} = 0$, 光透过DKDP晶体后偏振方向不变, 而且 $P_1 \perp P_2$, 所以光会从 P_1 侧面逸出, 不能透过 P_1 , 无法到达全反射镜 M_1 , 激光器不能振荡, 腔内损耗极大 $\gamma_1 \rightarrow \infty$, Q开关处于关闭状态;
- 2、在 t_1 时刻, 工作物质中的粒子反转数密度积累到最大值 Δn_i 时, 在DKDP晶体上加上半波电压的 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{2}}$, 工作物质发出沿轴向的自发辐射光经 P_2 后起偏成线偏振光, 其振动方向与 P_2 的透振方向一致, 并且与DKDP晶体的主轴y或x平行, 经过DKDP晶体后振动方向与 P_2 透振方向垂直, 与 P_1 平行, 光可透过 P_1 而到达全反射镜 M_1 , 在腔内往返振荡, 腔内损耗降到很小 γ_0 , Q开关处于开启状态, 激光器开始快速振荡, 进而产生调Q巨脉冲激光。

2(A)、退压式KDP类晶体电光调QNd: YAG激光器 (脉冲反射式PRM)



要求:1、偏振器 P_1 平行 P_2 ,

偏振器种类: 二向色性片, 偏振棱镜, 玻璃堆, 偏振膜片;

2、沿 $DKDP$ 晶体光轴方向 z 上加电压 V_{AB} , 用方波高压。

3、 P_1 或 P_2 的起偏方向 (透振方向) 与 $DKDP$ 晶体的主轴 x 或 y 一致;

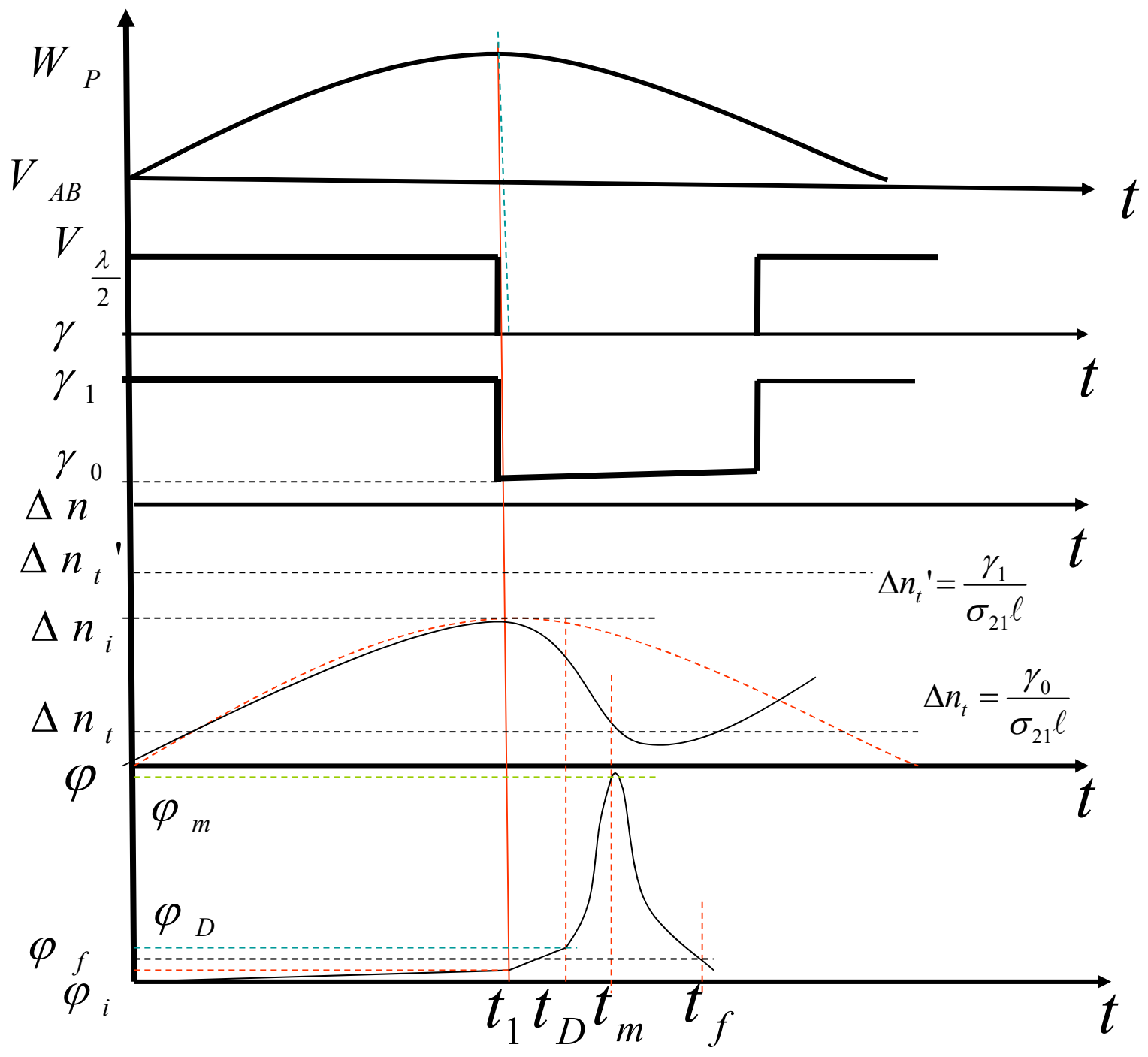
4、光路调整: a、用锥光干涉图调整光轴;

b、常加电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{2}}$, 转动 $DKDP$ 晶体到透光最弱的位置;

5、延时控制打开开关 (退掉电压) 的时刻 t_1 .

调Q激光产生过程的时序图 如下:

•



- 文字描述:

- 1、泵浦开始后到 t_1 时刻之前, DKDP 晶体上的电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{2}}$,

工作物质发出沿轴向的自发辐射光经 P_2 后起偏成线偏振光, 其振动方向与 P_2 的透振方向一致, 并且与 DKDP 晶体的主轴 y 或 x 平行, 由于 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{2}}$, 光透过 DKDP 晶体后偏振方向变成与 P_2 的透振方向垂直,

而且由于 P_1 平行 P_2 , 所以光会从 P_1 侧面逸出, 不能透过 P_1 , 无法到达全反射镜 M_1 , 激光器不能振荡, 腔内损耗极大 $\gamma_1 \rightarrow \infty$, Q 开关处于关闭状态;

- 2、在 t_1 时刻, 工作物质中的粒子反转数密度积累到最大值 Δn_1 时, 将 DKDP 晶体上的半波电压退掉, $V_{AB} = 0$,

工作物质发出沿轴向的自发辐射光经 P_2 后起偏成线偏振光, 其振动方向与 P_2 的透振方向一致, 并且与 DKDP 晶体的主轴 y 或 x 平行, 经过 DKDP 晶体后振动方向与 P_2 透振方向平行, 并且与 P_1 平行, 光可透过 P_1 而到达全反射镜 M_1 , 在腔内往返振荡, 腔内损耗降到很小 γ_0 , Q 开关处于开启状态, 激光器开始快速振荡, 进而产生调 Q 巨脉冲激光。

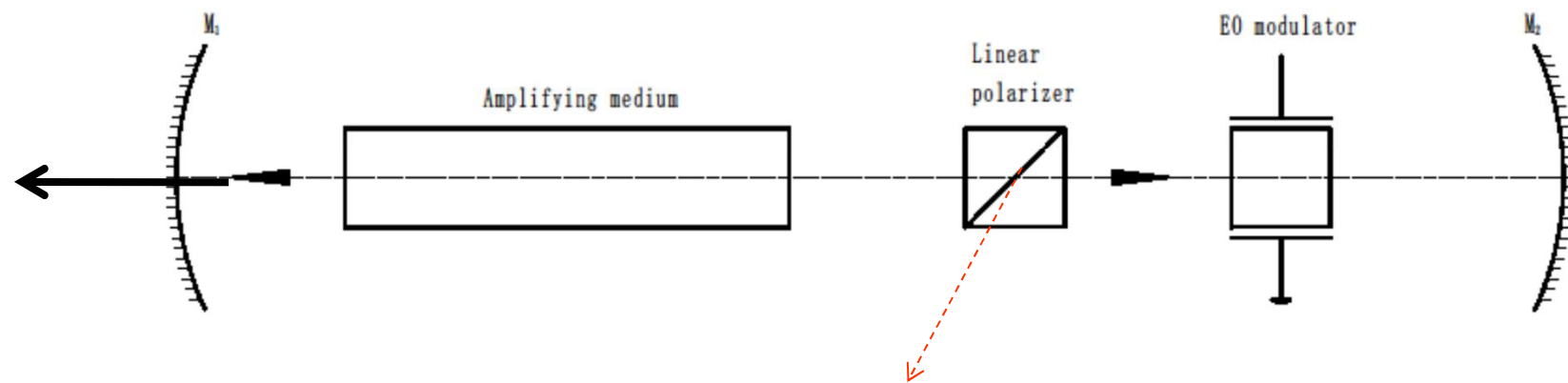
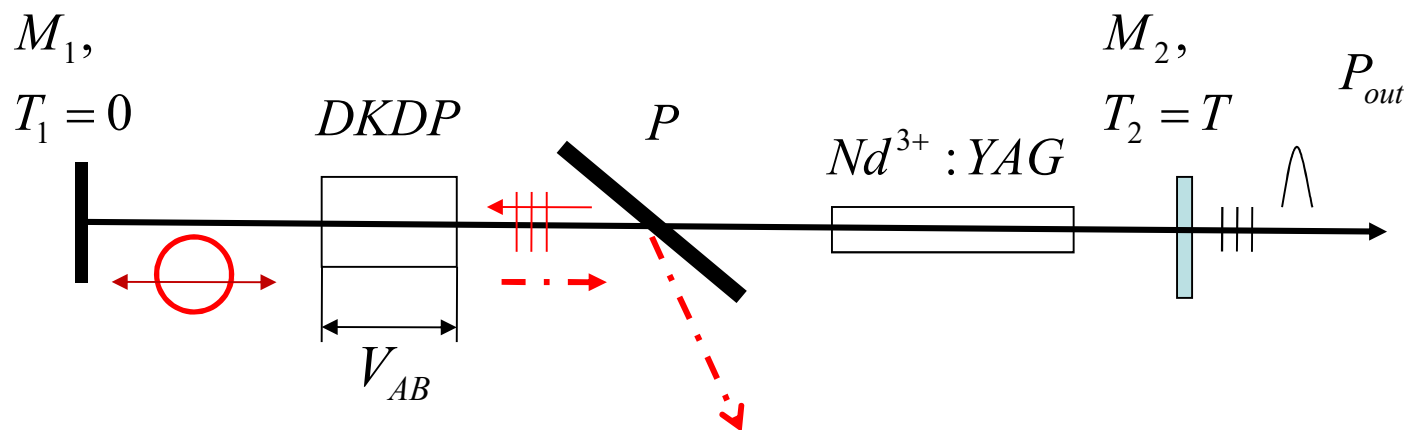


Fig.8.29. Arrangement for Q-switching with an electrooptic crystal.

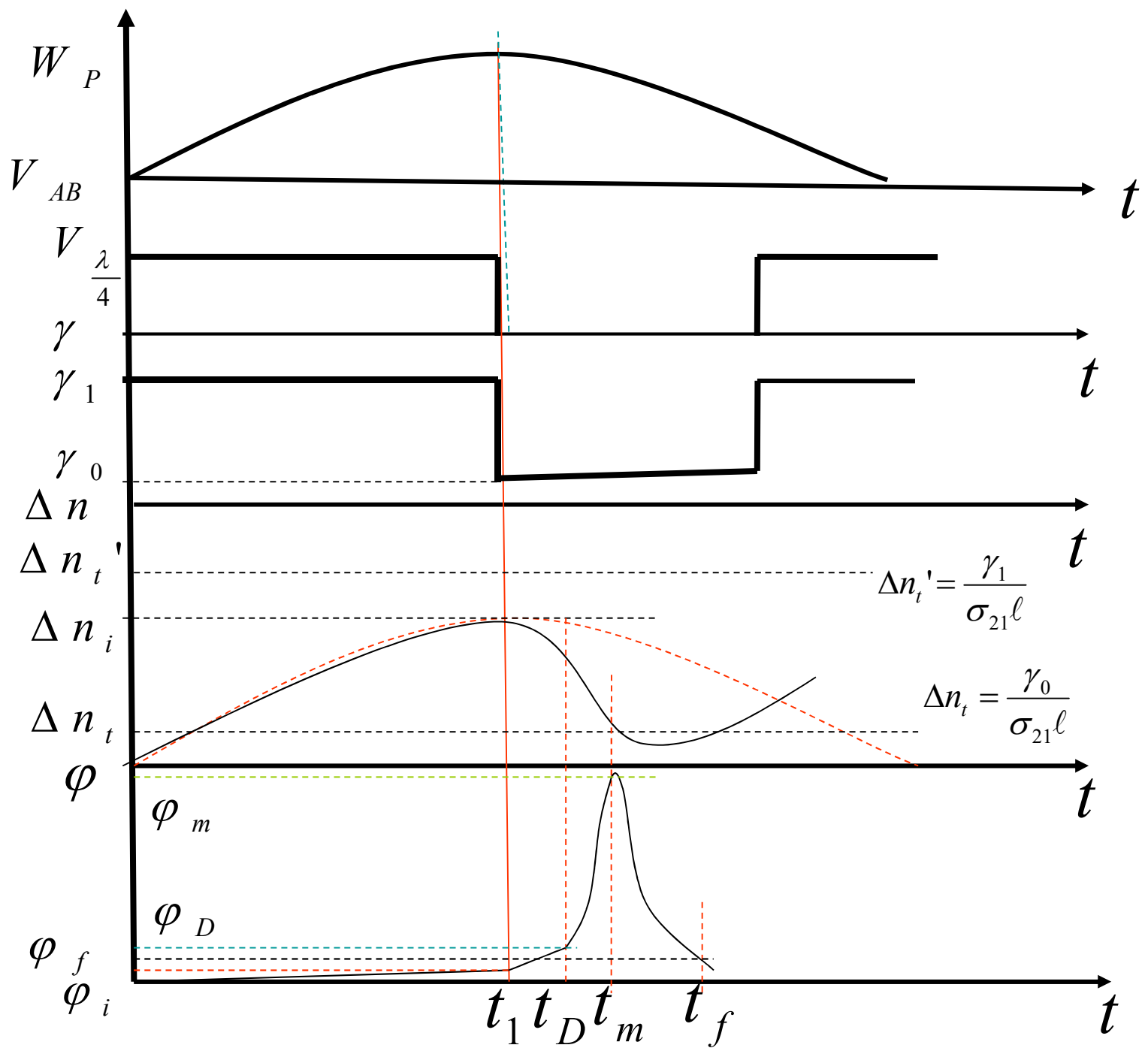
2(B)、 退压式KDP类晶体电光调QNd: YAG激光器 (脉冲反射式PRM)



- 光路图如上。 要求 :1、单一偏振器 P ，
偏振器种类：二向色性片，偏振棱镜，玻璃堆，偏振膜片；
2、沿 $DKDP$ 晶体光轴方向 z 上加电压 V_{AB} ，用方波高压。
3、 P 的起偏方向（透振方向）与 $DKDP$ 晶体的主轴 x 或 y 一致；
4、光路调整：需加另一个偏转器 P' 辅助调整，将 $P \perp P'$ ，
a、用锥光干涉图调整光轴；
b、常加电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{2}}$ ，转动 $DKDP$ 晶体到透光最弱的位置；
5、延时控制打开开关（退掉电压）的时刻 t_1 。

调Q激光产生过程的时序图如下：

•



- 文字描述:

-

1、泵浦开始后到 t_1 时刻之前, DKDP 晶体上的电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{4}}$,

工作物质发出沿轴向的自发辐射光经 P 后起偏成线偏振光, 其振动方向与 P 的透振方向一致, 并且与 DKDP 晶体的主轴 y 或 x 平行,

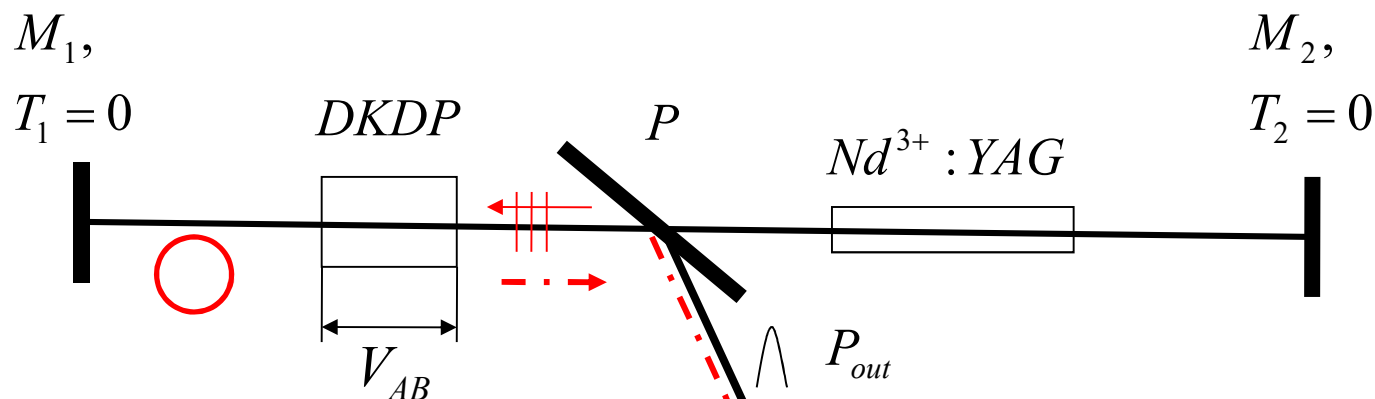
由于 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{4}}$, 光透过 DKDP 晶体沿 x', y' 两个垂直振动分量位相差 $\frac{\pi}{2}$,

变成圆偏振光, 再次通过 DKDP 晶体后又加上 $\frac{\pi}{2}$ 的位相差,

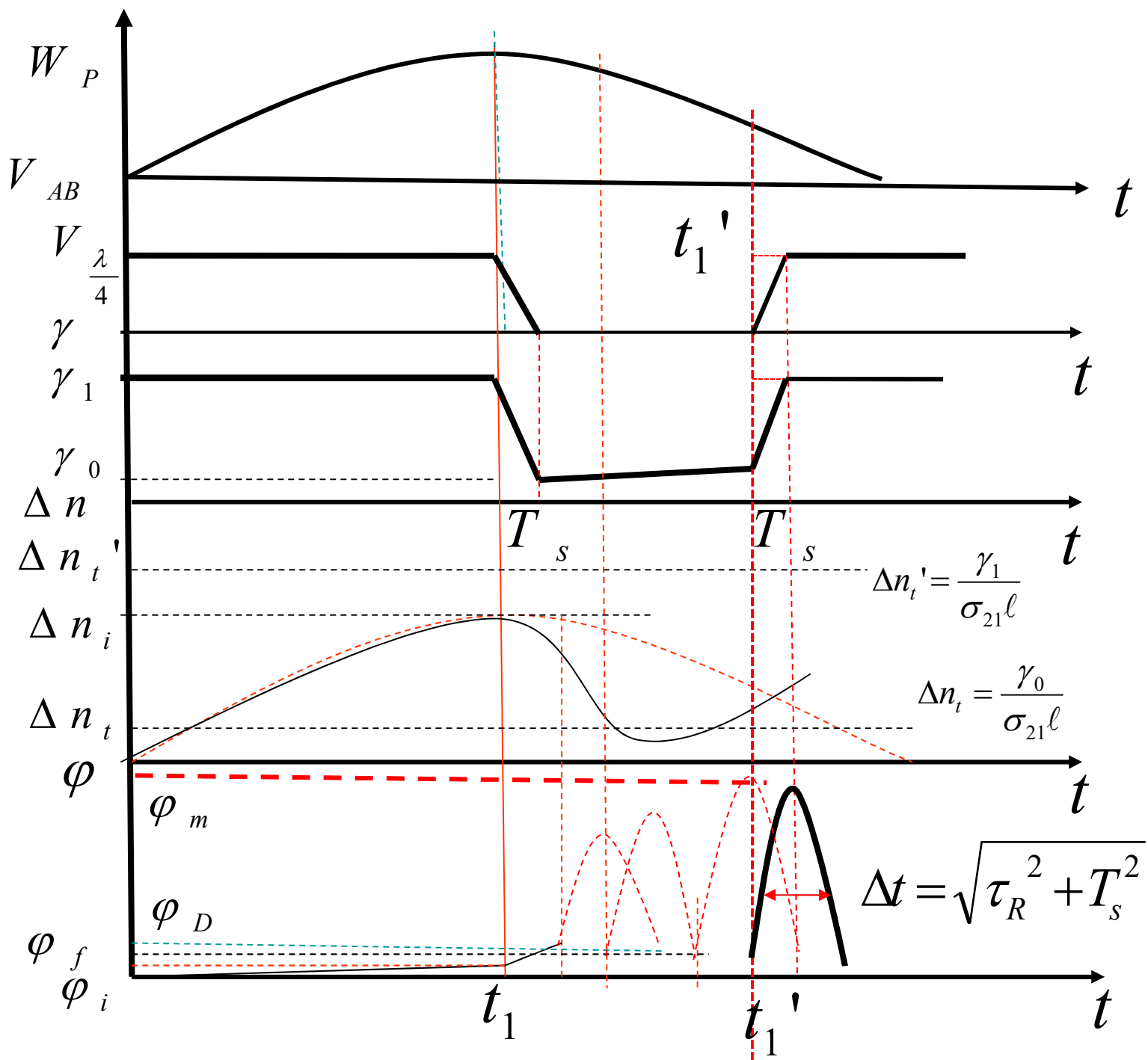
变为与 P 透振方向垂直的线偏振光, 从 P 的侧面逸出, 不能透过 P, 无法返回到工作物质构成激光振荡, 腔内损耗极大 $\gamma_1 \rightarrow \infty$, Q 开关处于关闭状态;

2、在 t_1 时刻，工作物质中的粒子反转数密度积累到最大值 Δn_i 时，将DKDP晶体上的四分之一波电压退掉， $V_{AB} = 0$ ，工作物质发出沿轴向的自发辐射光经P后起偏成线偏振光，其振动方向与P的透振方向一致，并且与DKDP晶体的主轴y或x平行，经过DKDP晶体后振动方向仍与P透振方向平行，光可由全反射镜 M_1 反射透过DKDP晶体和P，返回到工作物质，在腔内往返振荡，腔内损耗降到很小 γ_0 ，Q开关处于开启状态，激光器开始快速振荡，进而产生调Q巨脉冲激光。

3、腔倒空KDP类晶体电光调QNd: YAG激光器 (脉冲透射式PTM)



- 光路图如上。两腔镜都是全反射镜，要求：
- 1、单一偏振器 P ，偏振器种类：二向色性片，偏振棱镜，玻璃堆，偏振膜片；
 - 2、沿 $DKDP$ 晶体光轴方向 z 上加电压 V_{AB} ，用方波高压。
 - 3、 P 的起偏方向（透振方向）与 $DKDP$ 晶体的主轴 x 或 y 一致；
 - 4、光路调整：需加另一个偏转器 P' 辅助调整，将 $P \perp P'$ ，
 - a、用锥光干涉图调整光轴；
 - b、常加电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{2}}$ ，转动 $DKDP$ 晶体到透光最弱的位置；
 - 5、延时控制打开开关（退掉电压）的时刻 t_1 。同时控制激光开关持续时间 ΔT ，调Q激光产生过程的时序图如下：



- 文字描述:

-

1、泵浦开始后到 t_1 时刻之前, DKDP 晶体上的电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{4}}$,

工作物质发出沿轴向的自发辐射光经 P 后起偏成线偏振光, 其振动方向与 P 的透振方向一致, 并且与 DKDP 晶体的主轴 y 或 x 平行,

由于 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{4}}$, 光透过 DKDP 晶体沿 x', y' 两个垂直振动分量位相差 $\frac{\pi}{2}$,

变成圆偏振光, 再次通过 DKDP 晶体后又加上 $\frac{\pi}{2}$ 的位相差,

变为与 P 透振方向垂直的线偏振光, 从 P 的侧面逸出, 不能透过 P, 无法返回到工作物质构成激光振荡, 腔内损耗极大 $\gamma_1 \rightarrow \infty$, Q 开关处于关闭状态;

2、在 t_1 时刻，工作物质中的粒子反转数密度积累到最大值 Δn_i 时，将DKDP晶体上的四分之一波电压退掉， $V_{AB} = 0$ ，工作物质发出沿轴向的自发辐射光经P后起偏成线偏振光，其振动方向与P的透振方向一致，并且与DKDP晶体的主轴y或x平行，经过DKDP晶体后振动方向仍与P透振方向平行，光可由全反射镜 M_1 反射透过DKDP晶体和P，返回到工作物质，再由全反射镜 M_2 反射，在腔内往返振荡腔内损耗降到很小 γ_0 ，Q开关处于开启状态，激光器开始快速振荡，腔内光子迅速增加，但是因为 M_1 和 M_2 都是全反射镜，光子局限在腔内而无法输出腔外。

3、当腔内光子达到最大值 φ_m 时, t_1' 时刻, 将 DKDP 晶体上再加上四分之一波电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{4}}$, 腔内光透过 DKDP 晶体向 M_1 全反射镜传播,

沿 x', y' 两个垂直振动分量位相差 $\frac{\pi}{2}$, 变成圆偏振光,

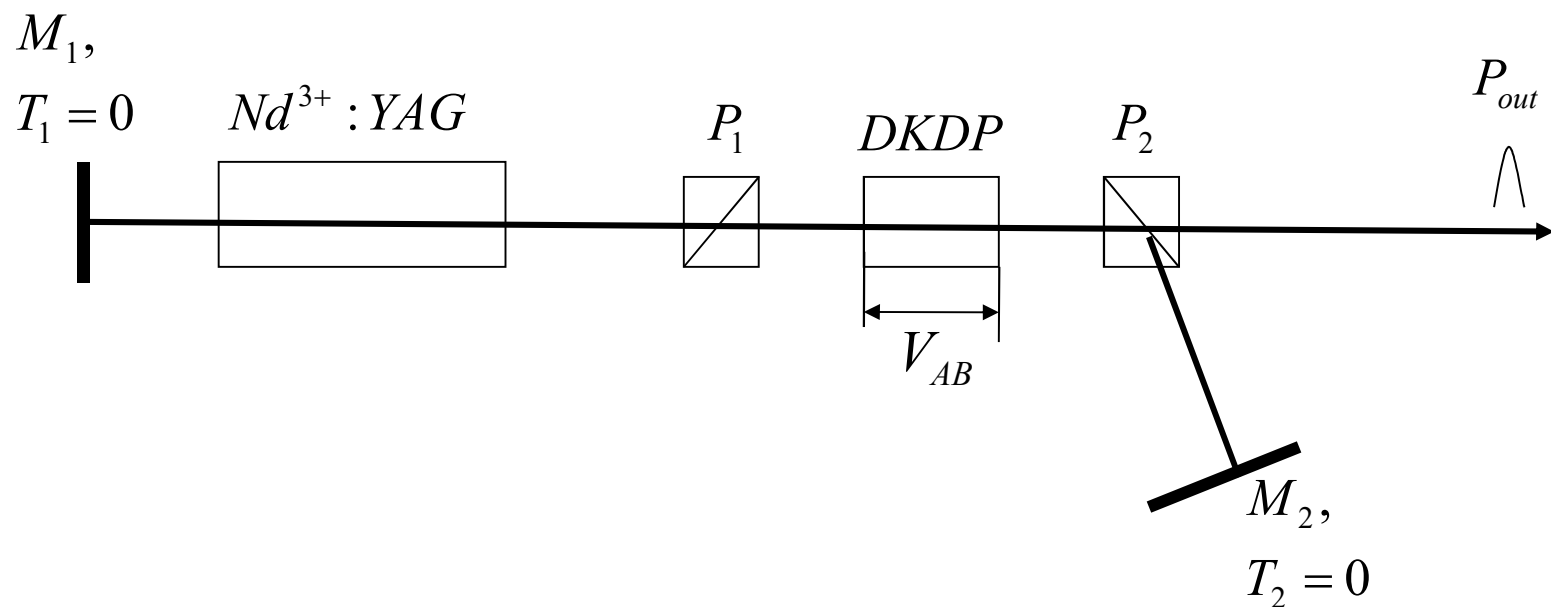
再次通过 DKDP 晶体后又加上 $\frac{\pi}{2}$ 的位相差, 变为与 P 透振方向垂直的

线偏振光, 不能透过 P , 只能从偏振器 P 的侧面逸出,

也是耦合输出, - 倒出 - 直到倒空为止。故称为 “腔倒空” 调 Q。

其脉冲宽度取决于开关 后沿关闭时间 T_s 和腔寿命 τ_R ,

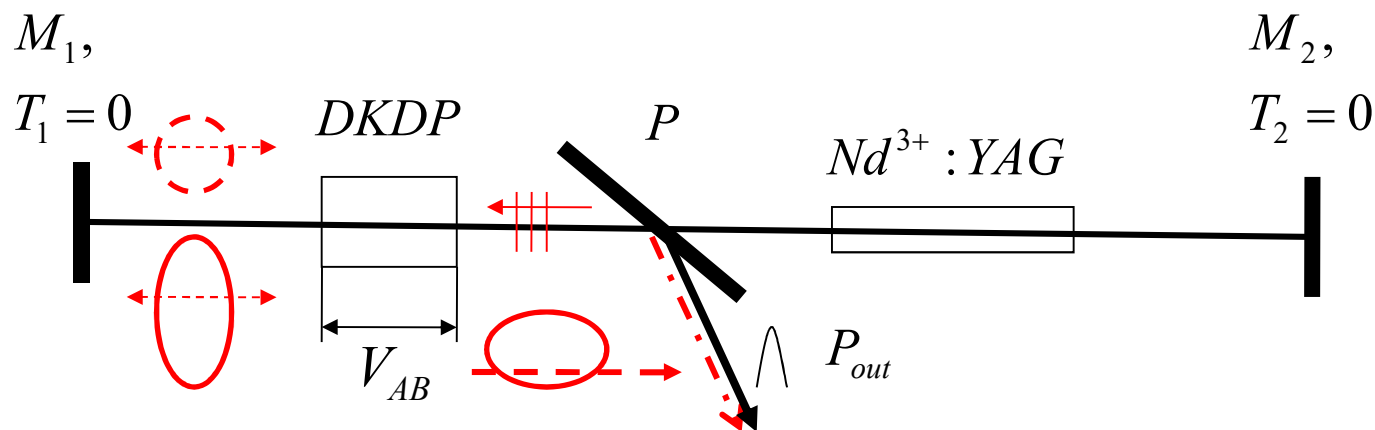
可近似表示为: $\Delta t = \sqrt{T_s^2 + \tau_R^2}$ 。



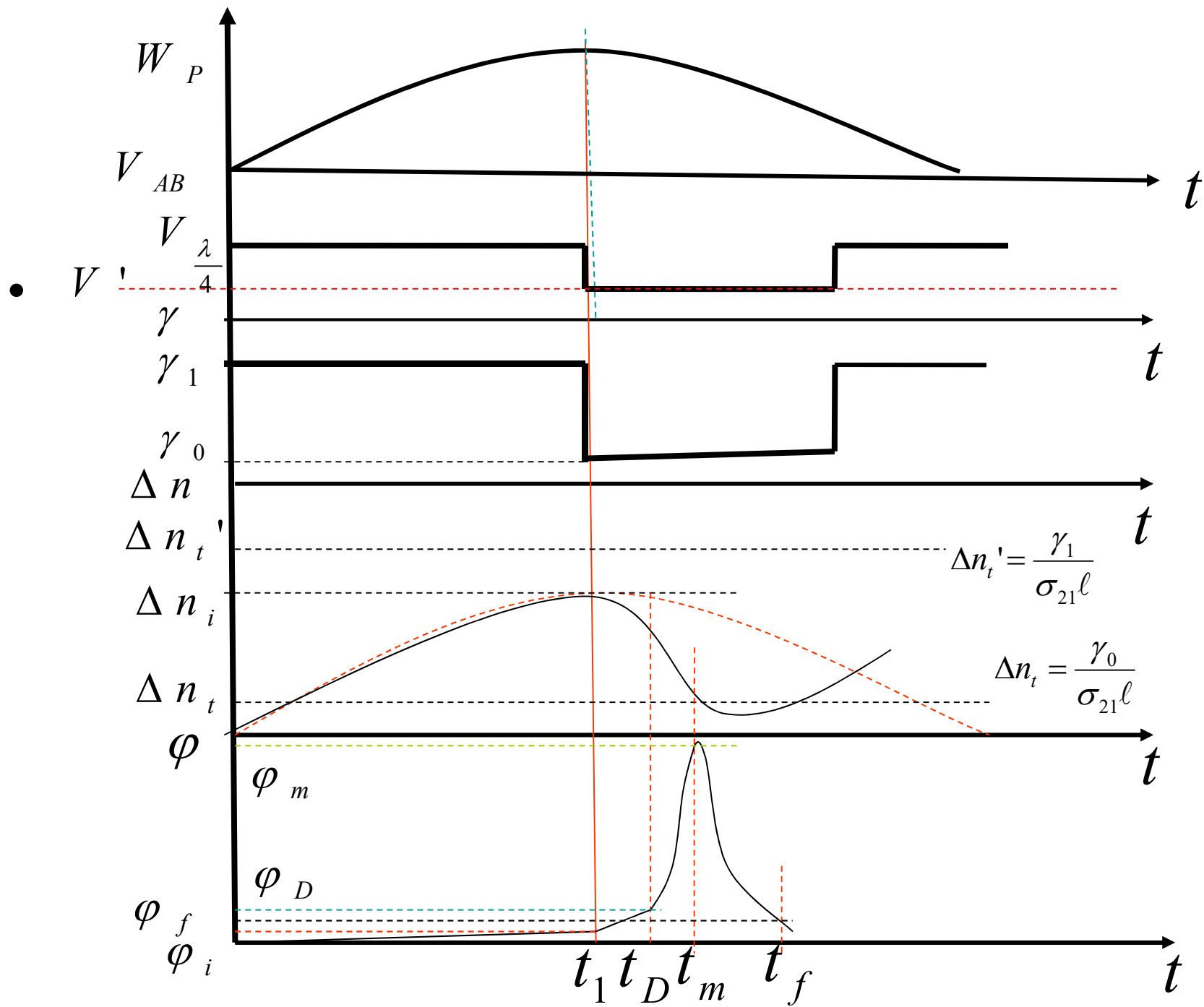
腔倒空KDP类晶体电光调QNd: YAG激光器 (脉冲透射式PTM)

这是另一种典型光路,其时序图和工作原理的文字说明见参考书.

4、退压式KDP类晶体电光调Q Nd: YAG激光器 (脉冲反射式PRM的另一种形式)



- 光路图如上。两腔镜都是全反射镜，要求：
- 1、单一偏振器 P ，偏振器种类：二向色性片，偏振棱镜，玻璃堆，偏振膜片；
 - 2、沿 $DKDP$ 晶体光轴方向 z 上加电压 V_{AB} ，用方波高压。
 - 3、 P 的起偏方向（透振方向）与 $DKDP$ 晶体的主轴 x 或 y 一致；
 - 4、光路调整：需加另一个偏转器 P' 辅助调整，将 $P \perp P'$ ，
 - a、用锥光干涉图调整光轴；
 - b、常加电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{2}}$ ，转动 $DKDP$ 晶体到透光最弱的位置；
 - 5、延时控制打开开关（退掉电压）的时刻 t_1 。
- 调Q激光产生过程的时序图如下：



- 文字描述:

-

1、泵浦开始后到 t_1 时刻之前, DKDP 晶体上的电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{4}}$,

工作物质发出沿轴向的自发辐射光经 P 后起偏成线偏振光, 其振动方向与 P 的透振方向一致, 并且与 DKDP 晶体的主轴 y 或 x 平行,

由于 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{4}}$, 光透过 DKDP 晶体沿 x', y' 两个垂直振动分量位相差 $\frac{\pi}{2}$,

变成圆偏振光, 再次通过 DKDP 晶体后又加上 $\frac{\pi}{2}$ 的位相差,

变为与 P 透振方向垂直的线偏振光, 从 P 的侧面逸出, 不能透过 P, 无法返回到工作物质构成激光振荡, 腔内损耗极大 $\gamma_1 \rightarrow \infty$, Q 开关处于关闭状态;

2、在 t_1 时刻，工作物质中的粒子反转数密度积累到最大值 Δn_i 时，将 DKDP 晶体上的四分之一波电压退掉，但是不退到 0，而是一个低于 $V_{\frac{\lambda}{4}}$ 的有限值 $V_{AB} = V'$ ，

工作物质发出沿轴向的自发辐射光经 P 后起偏成线偏振光，其振动方向与 P 的透振方向一致，并且与 DKDP 晶体的主轴 y 或 x 平行，经过 DKDP 晶体后，沿感应主轴方向 x' ， y' 的

振动分量之间有一位相差 $\Delta\varphi \neq \frac{\pi}{2}$ ，所以光束为椭圆偏振光，

由全反射镜 M_1 反射后仍为椭圆偏振光，再次透过 DKDP 晶体后，又增加 $\Delta\varphi$ 的位相差，总的位相差为 $2\Delta\varphi \neq \pi$ ，

所以返回 P 时，仍为椭圆偏振光，

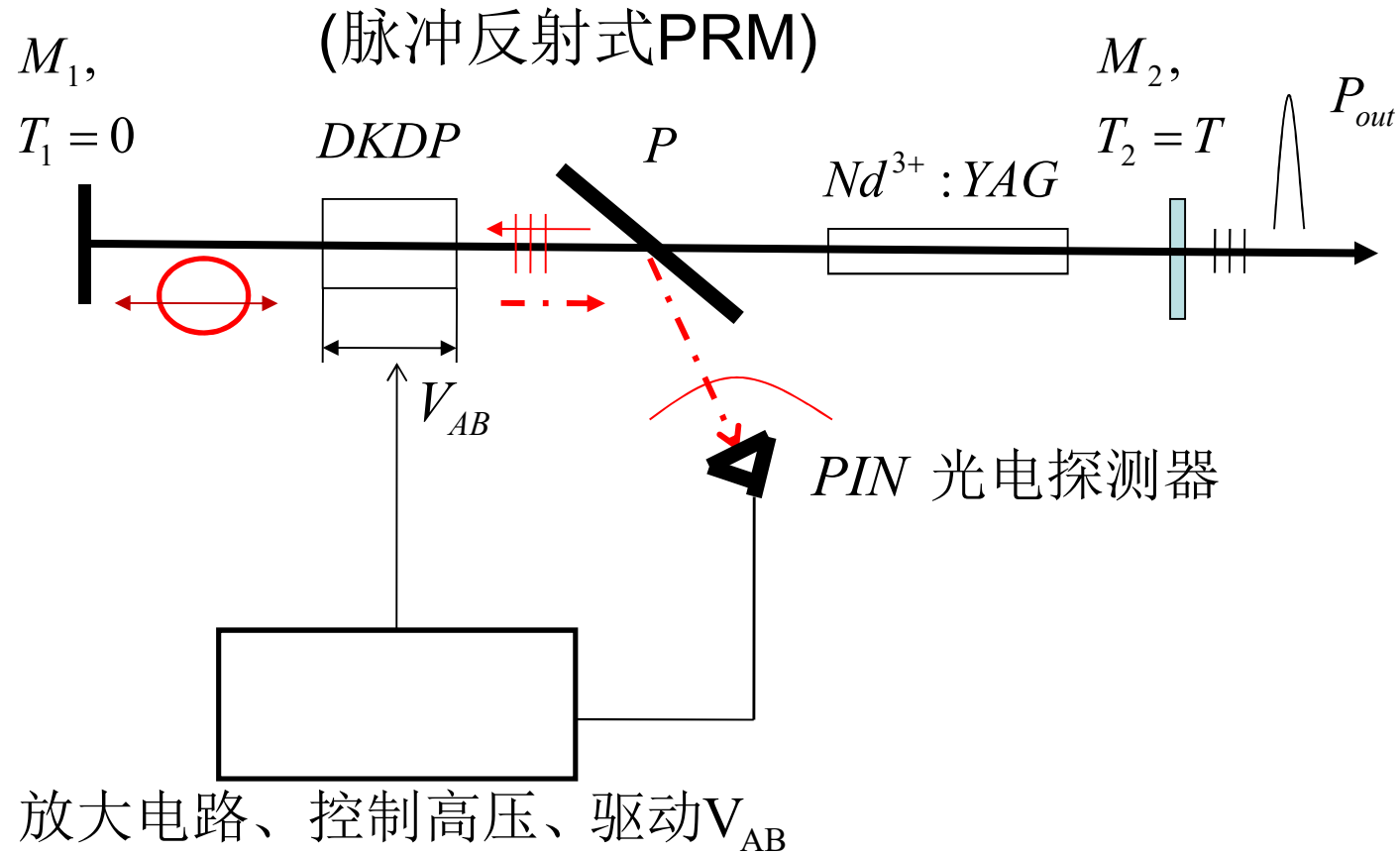
其结果是：一种振动分量的光返回到工作物质，

参与腔内往返振荡，而另一种分量的光由偏振器侧面逸出激光器外，也是作为激光器的输出光束。此种情况，腔内损耗也降到很小 γ_0 ，

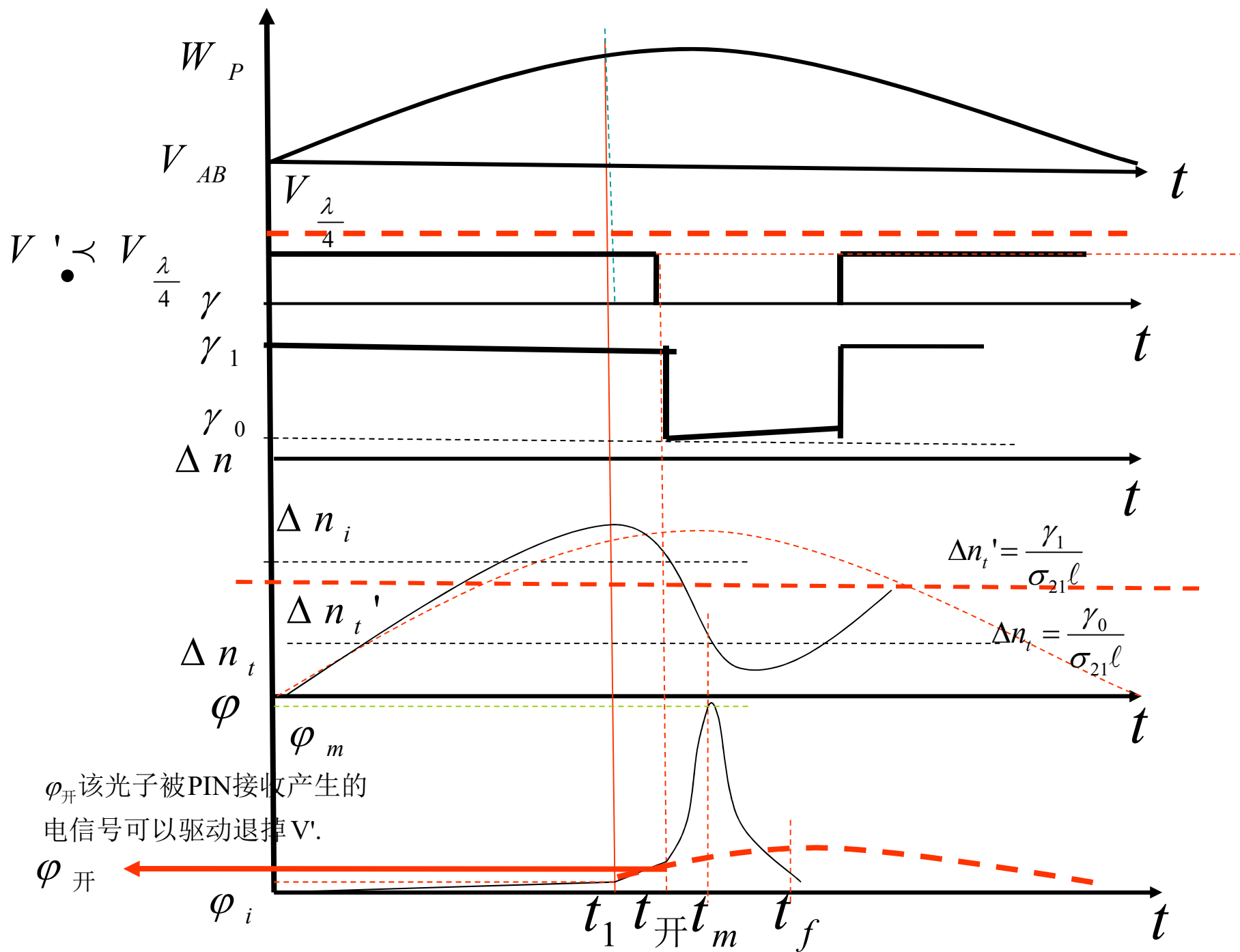
开关开启，产生的调 Q 巨脉冲激光从偏振器 P 耦合输出。

在这样激光器中，偏振器 P 有三重作用：起偏器、检偏器、耦合输出镜。

5、退压式KDP类电光晶体预激光调Q Nd: YAG激光器



光路图如上。 要求:1、单一偏振器 P ,
偏振器种类: 二向色性片, 偏振棱镜, 玻璃堆, 偏振膜片;
2、沿 $DKDP$ 晶体光轴方向 z 上加电压 V_{AB} ,用方波高压。
3、 P 的起偏方向(透振方向)与 $DKDP$ 晶体的主轴 x 或 y 一致;
4、光路调整: 需加另一个偏转器 P' 辅助调整,将 $P \perp P'$,
a、用锥光干涉图调整光轴;
b、常加电压 $V_{AB} = V_{\frac{\lambda}{2}}$,转动 $DKDP$ 晶体到透光最弱的位置;
5、由预激光信号来控制打开开关(退掉电压)的时刻 t_1 .
调Q激光产生过程的时序图如下:



文字描述:

泵浦开始后,在DKDP晶体上加上低于四分之一波电压的电压 $V_{AB} = V' < V_{\frac{\lambda}{4}}$,

工作物质发出沿轴向的自发辐射光经P后起偏成线偏振光,其振动方向与P的透振方向一致,并且与DKDP晶体的主轴y或x平行,经过DKDP晶体后,

沿感应主轴方向 x' , y' 的振动分量之间有一位相差 $\Delta\varphi \neq \frac{\pi}{2}$,光束为椭圆偏振光,

由全反射镜 M_1 反射后仍为椭圆偏振光,再次透过DKDP晶体后,又增加 $\Delta\varphi$ 的位相差,总的位相差为 $2\Delta\varphi \neq \pi$,返回P时,仍为椭圆偏振光。其结果是:

一种振动分量(p 分量)的光返回到工作物质 参与腔内往返振荡

而另一种分量 (s 分量)的光则由偏振器P侧面逸出激光器外,被PIN光电探测器所接收。如果激光器满足阈值条件,就会有自由振荡的尖峰脉冲激光出现。

在一定的泵浦下,控制 V' 的大小, $\Rightarrow \Delta n_i \geq \Delta n_i'$,使得只能产生一个尖峰

该尖峰脉冲称为预激光种子脉冲。在其前沿(对应 $\varphi_{\text{开}}$)由PIN接收到的信号

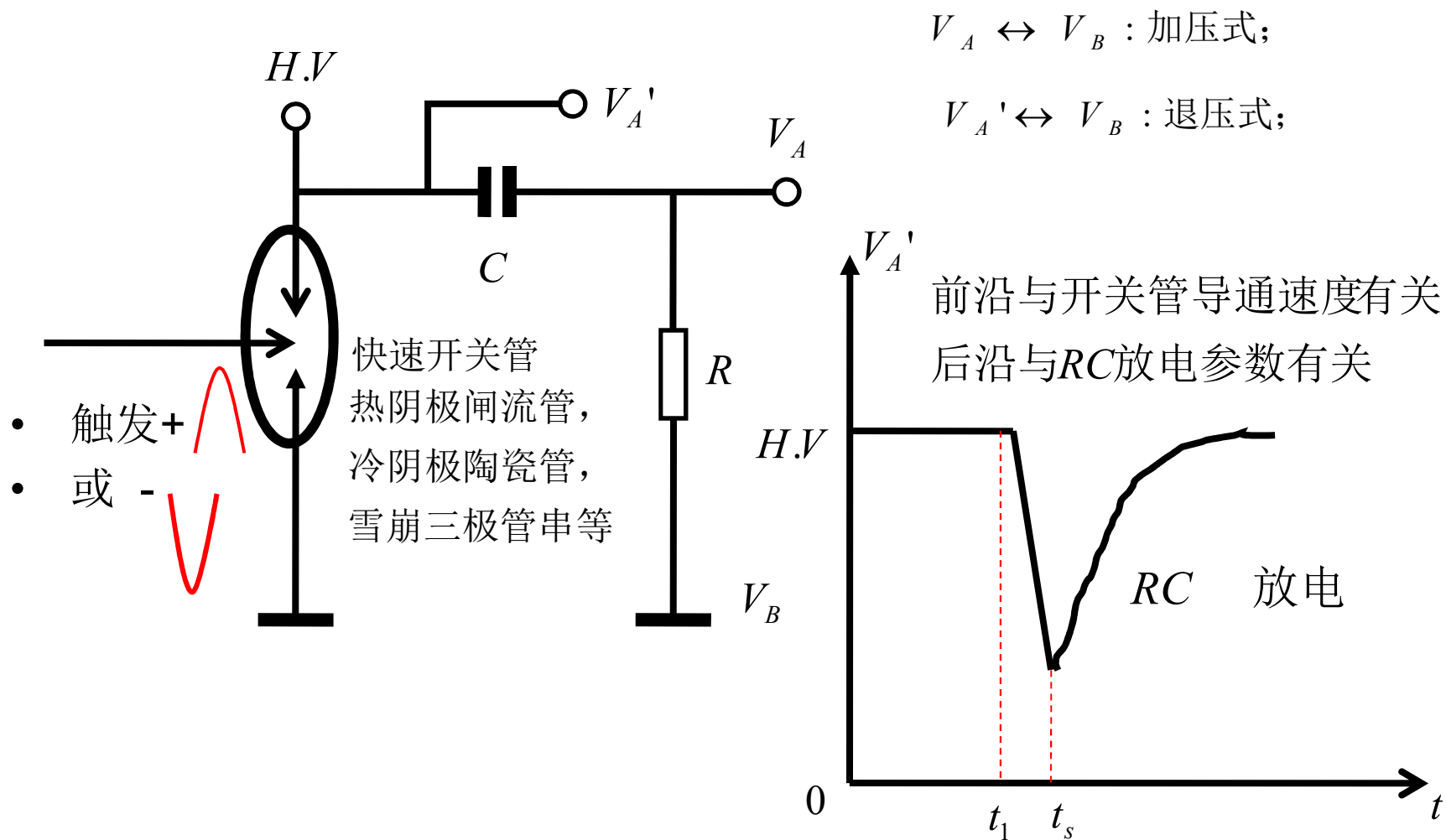
驱动退掉 $V'=0$,将开关打开,就会在原有的预激光基础上快速放大,

产生调Q巨脉冲激光。

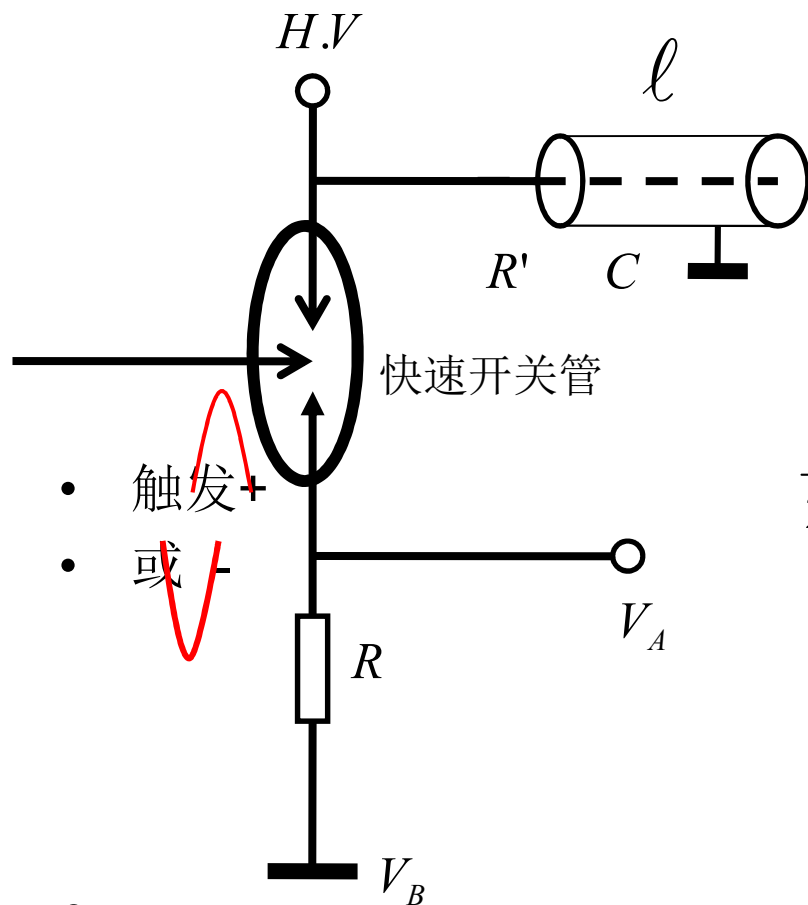
- 预激光调Q技术的特点：
- 1、由于在固定的泵浦水平下，Q开关的打开是依赖于V'的控制($\Delta n_i > \Delta n_t'$)所产生的第一个尖峰脉冲前沿的固定电平，对应于某一固定的 $\Delta n_i'$ ，（由泵浦决定 Δn ，由V'控制 $\Delta n_t'$ ），对应于稳定的输出能量。
- 2、由于在固定的泵浦水平下，Q开关的打开时，调Q激光脉冲是在依赖于V'的控制($\Delta n_i > \Delta n_t'$)所产生的第一个尖峰脉冲的基础上快速振荡、放大而形成的，其模式特征取决于第一个尖峰脉冲的模式特征。而第一个尖峰脉冲是在阈值点附近产生的，所含的模式很少，所以预激光调Q脉冲所含的模式也很少。实验上可以直接通过预激光调Q技术选出单一横模并加入F-P标准具一起选出单纵模。

- 6、常用电光开关高压脉冲驱动器

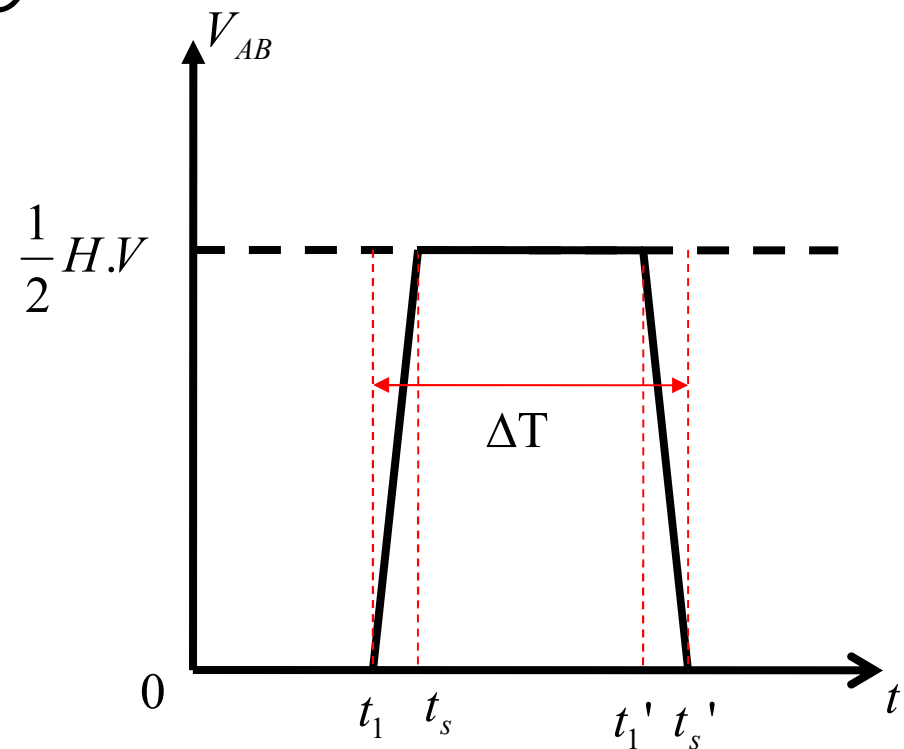
- A、



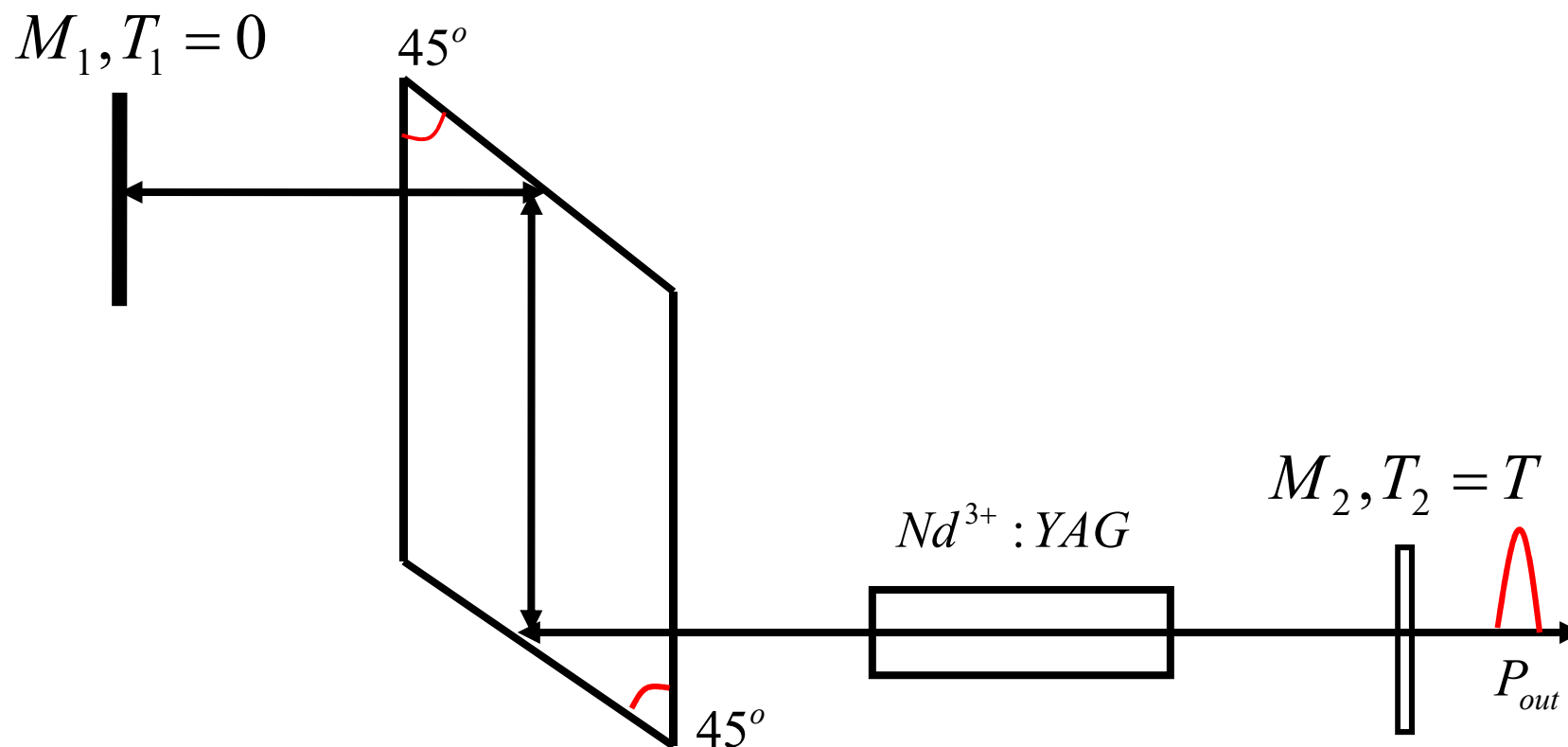
- B、 R 与 R' 阻抗匹配,
 $R = R'$;



前沿 $T_s = t_s - t_1$ 与开关管导通速度有关
 后沿 $T_s' = t_s' - t_1'$ 与开关管关闭时间有关
 持续时间 $\Delta T = t_s' - t_1$ 与成形电缆长度 l 有关
 $\Delta T \approx 10 \times l (ns)$ (l 取米单位)
 光子在成形电缆中往返一次所需的时间



- 7、单块双45度LN(LiNbO3)晶体调Q技术
- 可省去偏振器，但开关速度比KD*P慢，消光比低，抗损伤阈值也比KD*P低。



- 单45°LN晶体退压式调QNd³⁺:YAG激光器

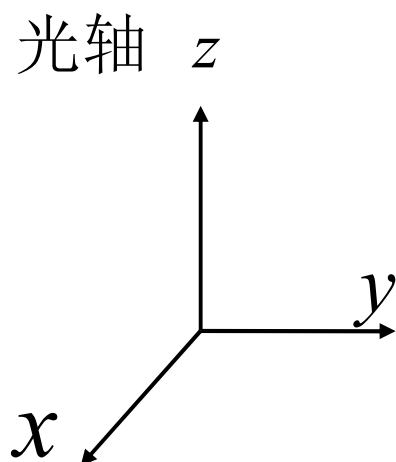
- LN类铌酸锂(LiNbO_3)。
- 双折射晶体, $n_x = n_y = n_o$, $n_z = n_e$,
- 并且 $n_o > n_e$, 负单轴晶体。

$$\Lambda \gamma = \begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{42} & 0 \\ \gamma_{51} & 0 & 0 \\ \gamma_{61} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \gamma_{12} = \gamma_{61} = -\gamma_{22}, \gamma_{23} = \gamma_{13}, \gamma_{42} = \gamma_{51}$$

$$\gamma_{22} = 3.4 \times 10^{-10} \text{ cm/V}, \gamma_{23} = 8.6 \times 10^{-10} \text{ cm/V},$$

$$\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-10} \text{ cm/V}, \gamma_{42} = 28 \times 10^{-10} \text{ cm/V}.$$

1、横向运用 $V_x = 0$ 时,



o光振动垂直于主截面, 晶体长度 ℓ , 厚度 d ,
e光振动平行于主截面。

负单轴晶体, $n_o > n_e$, $\lambda = 1064nm$,

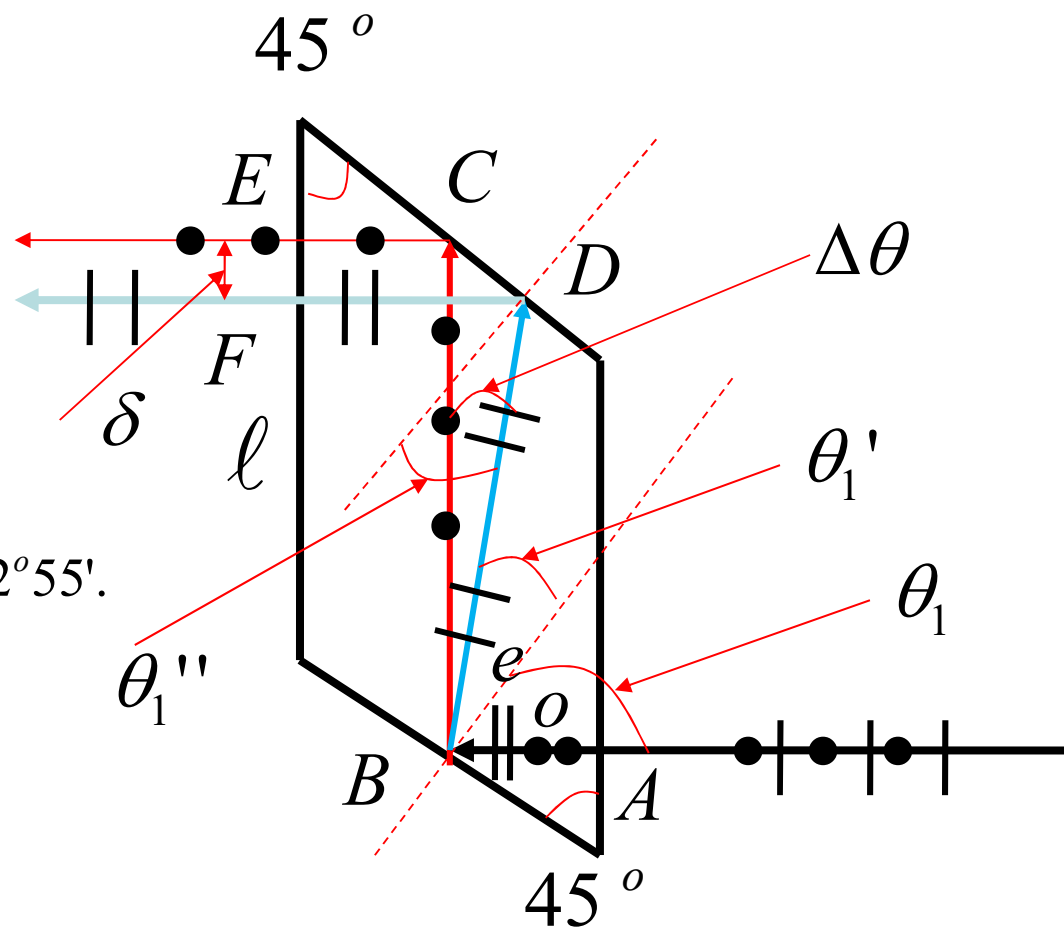
$n_o = 2.233, n_e = 2.154$,

$\theta_1 = 45^\circ, \rightarrow \theta_1' = ?$

由各向异性介质反射公式,

$$n_o \sin 45^\circ = n_e \sin \theta_1' \Rightarrow \theta_1' = 42^\circ 55'.$$

$$\Rightarrow \Delta\theta = 2^\circ 6', \delta \approx \ell \cdot \tan \Delta\theta.$$

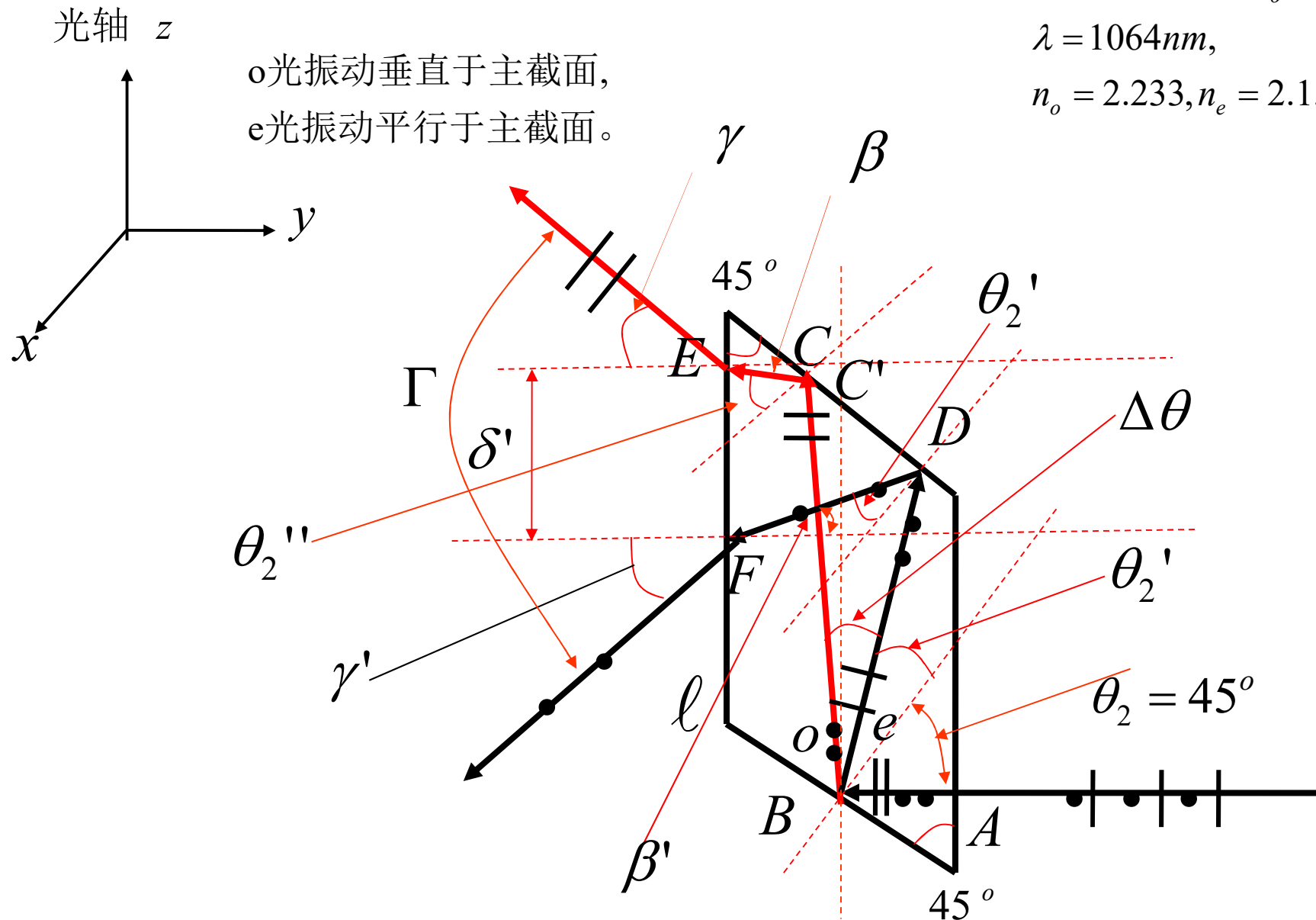


2、横向运用 $V_x = V_{\frac{\lambda}{2}}$ 时，晶体长度 ℓ ，厚度 d , BC 段相当于一个半波片，
从 $B \rightarrow C$ 偏振面旋转 90° 。

负单轴晶体， $n_o > n_e$ ，

$\lambda = 1064 \text{ nm}$ ，

$n_o = 2.233, n_e = 2.154$ ，



- $(V_{\frac{\lambda}{2}})_{\text{横}} = \frac{\lambda}{2n_o^3 \gamma_{22}} \frac{d}{\ell} = (V_{\frac{\lambda}{2}})_{\text{纵}} \frac{d}{\ell}, 1064nm, 9250 \frac{d}{\ell},$

$$\beta = \theta_2'' - 45^\circ = 2^\circ 12',$$

由各向异性介质反射公式,

$$\sin \gamma = n_e \sin \beta,$$

$$n_e' \sin 45^\circ = n_e \sin \theta_2'' \Rightarrow \theta_2'' = 47^\circ 12'.$$

$$\Rightarrow \gamma = 4^\circ 28'$$

由各向异性介质反射公式,

$$\beta' = 45^\circ - \theta_2' = 2^\circ 5',$$

$$n_o \sin 45^\circ = n_e \sin \theta_2' \Rightarrow \theta_2' = 42^\circ 55'.$$

$$\sin \gamma' = n_o \sin \beta',$$

$$\Rightarrow \gamma' = 4^\circ 39'$$

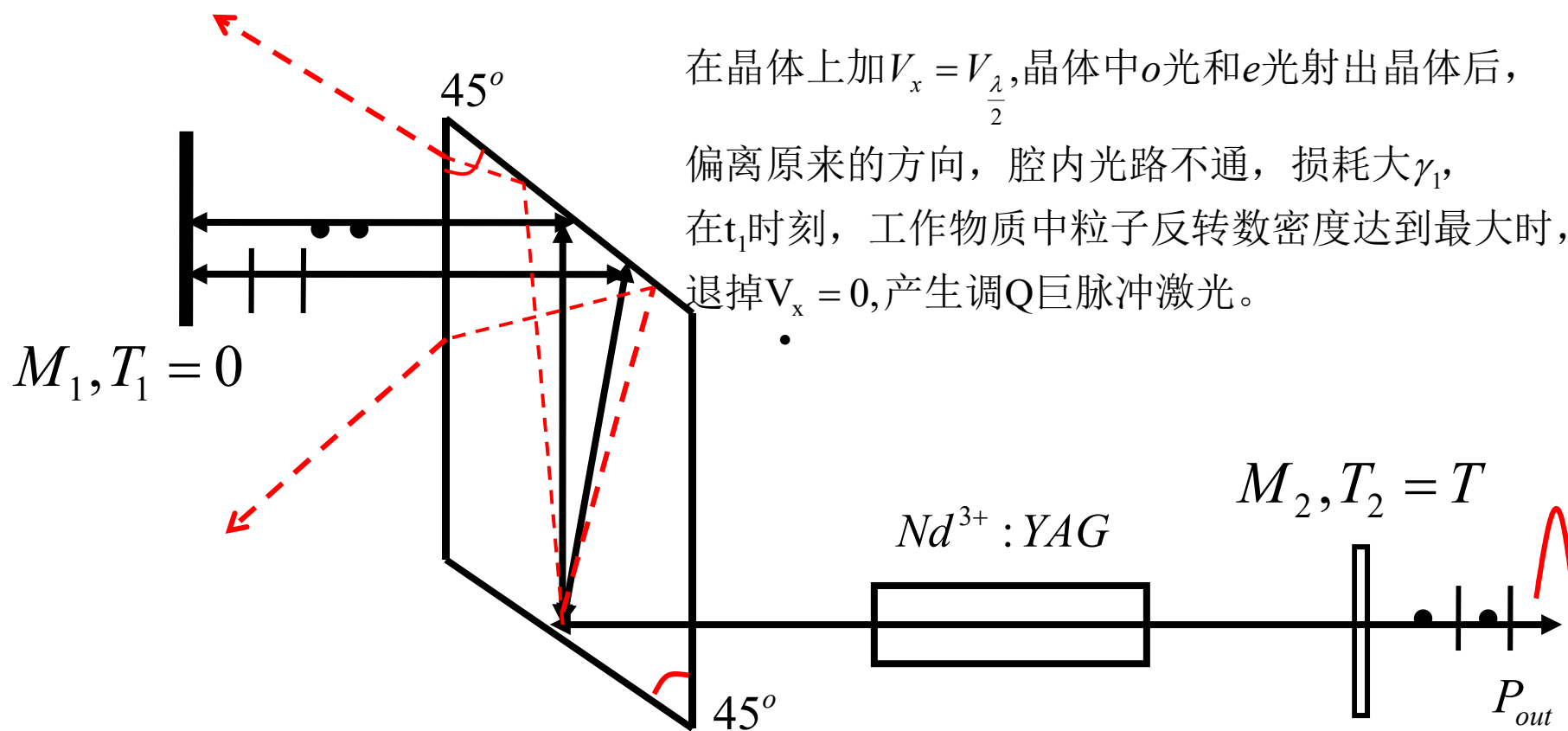
$$\lambda = 1064nm,$$

$$\text{偏向角 } \Gamma = \gamma + \gamma' = 9^\circ 7',$$

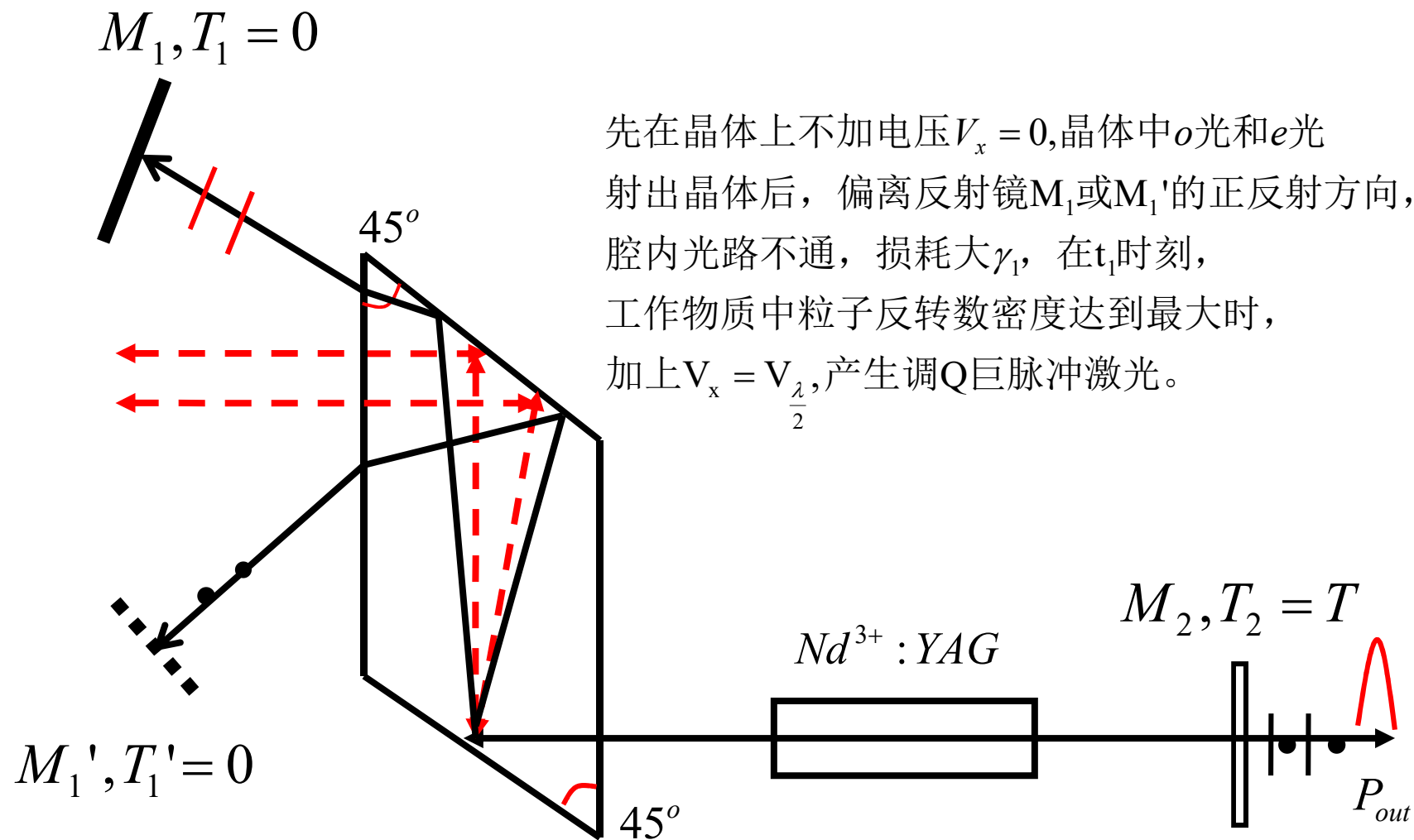
$$\text{出射点间距: } \delta' = \ell \cdot \tan \Delta \theta + (\tan \beta + \tan \beta') d / 2,$$

$$\ell = 30mm, d = 10mm, \Rightarrow \delta' = 1.48mm$$

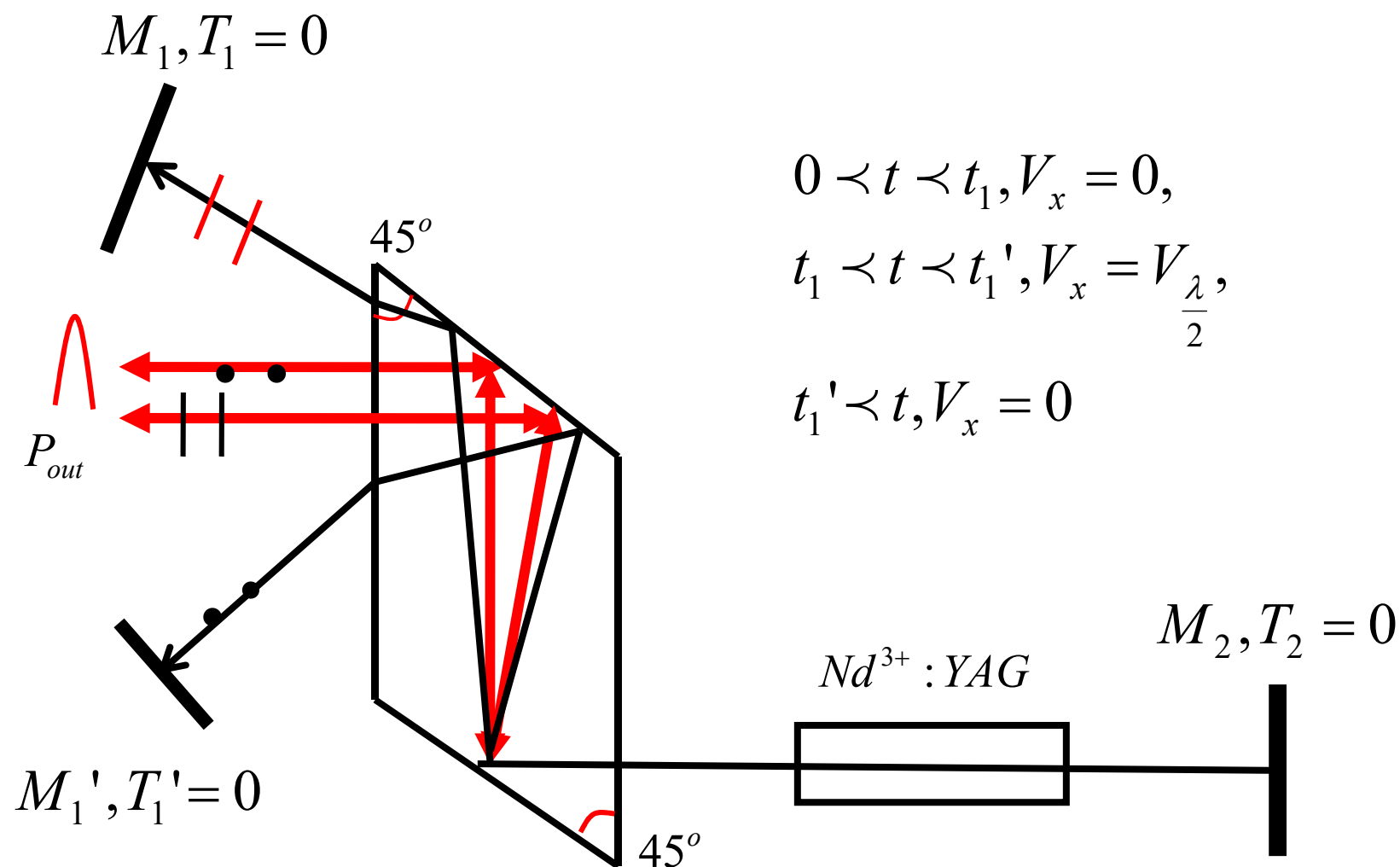
单块双45°LN晶体退压式调QNd³⁺:YAG激光器



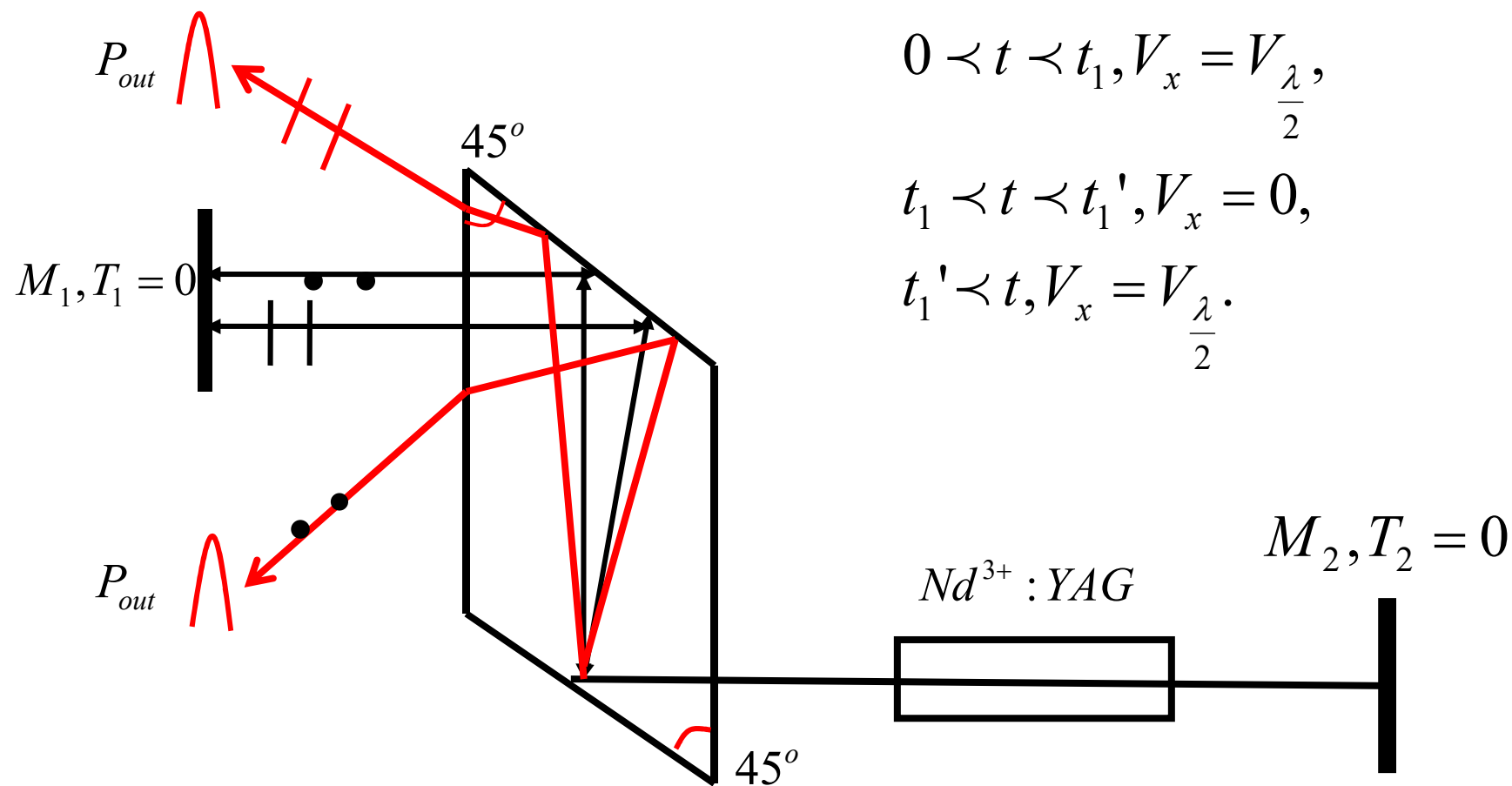
单块双45°LN晶体加压式调QNd³⁺:YAG激光器



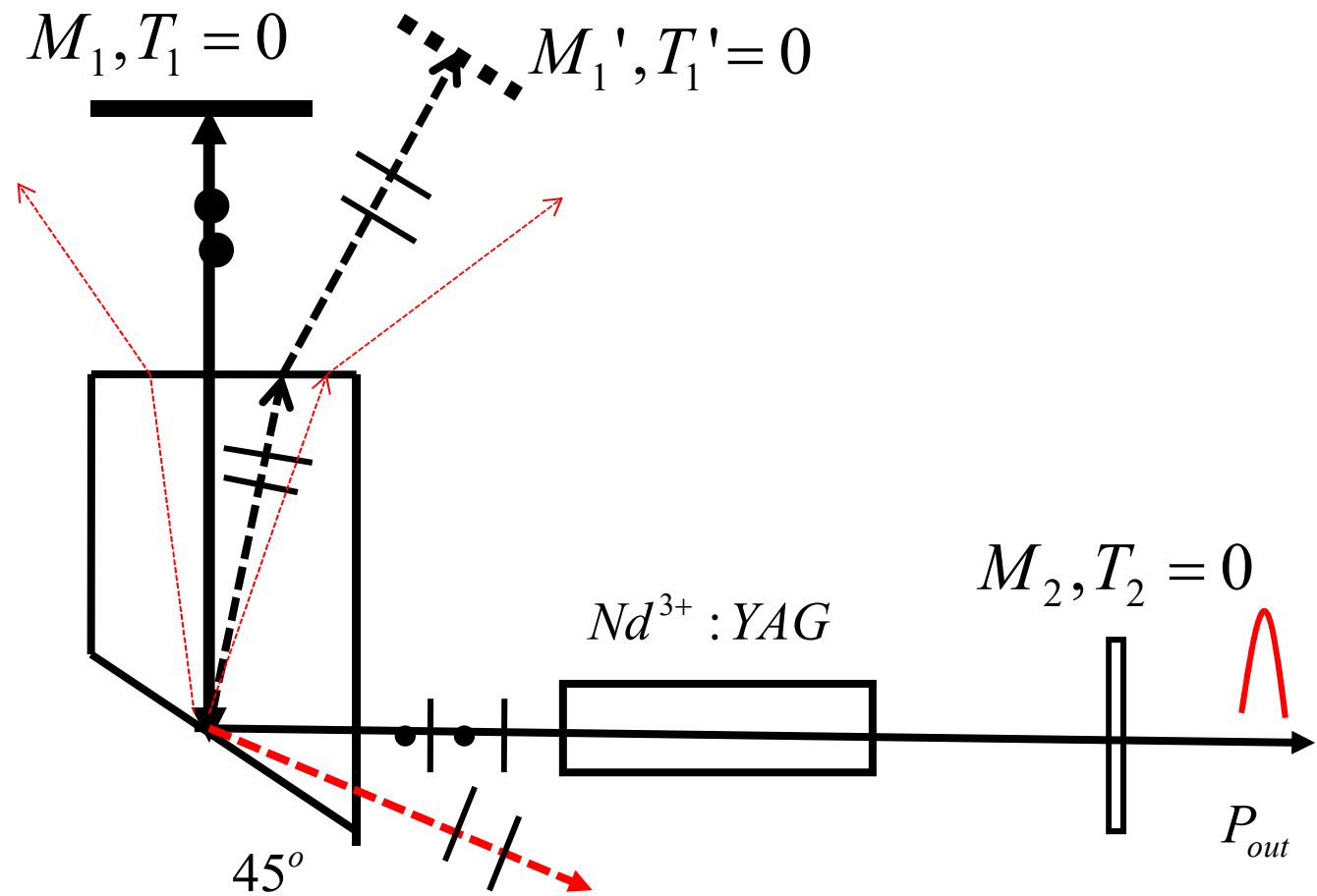
单块双45°LN晶体腔倒空调QNd³⁺:YAG激光器



单块双45°LN晶体腔倒空调QNd³⁺:YAG激光器



单块单 45° LN晶体腔倒空调QNd³⁺:YAG激光器



- 设计电光调Q激光器应考虑的问题:

- 1、调制晶体:

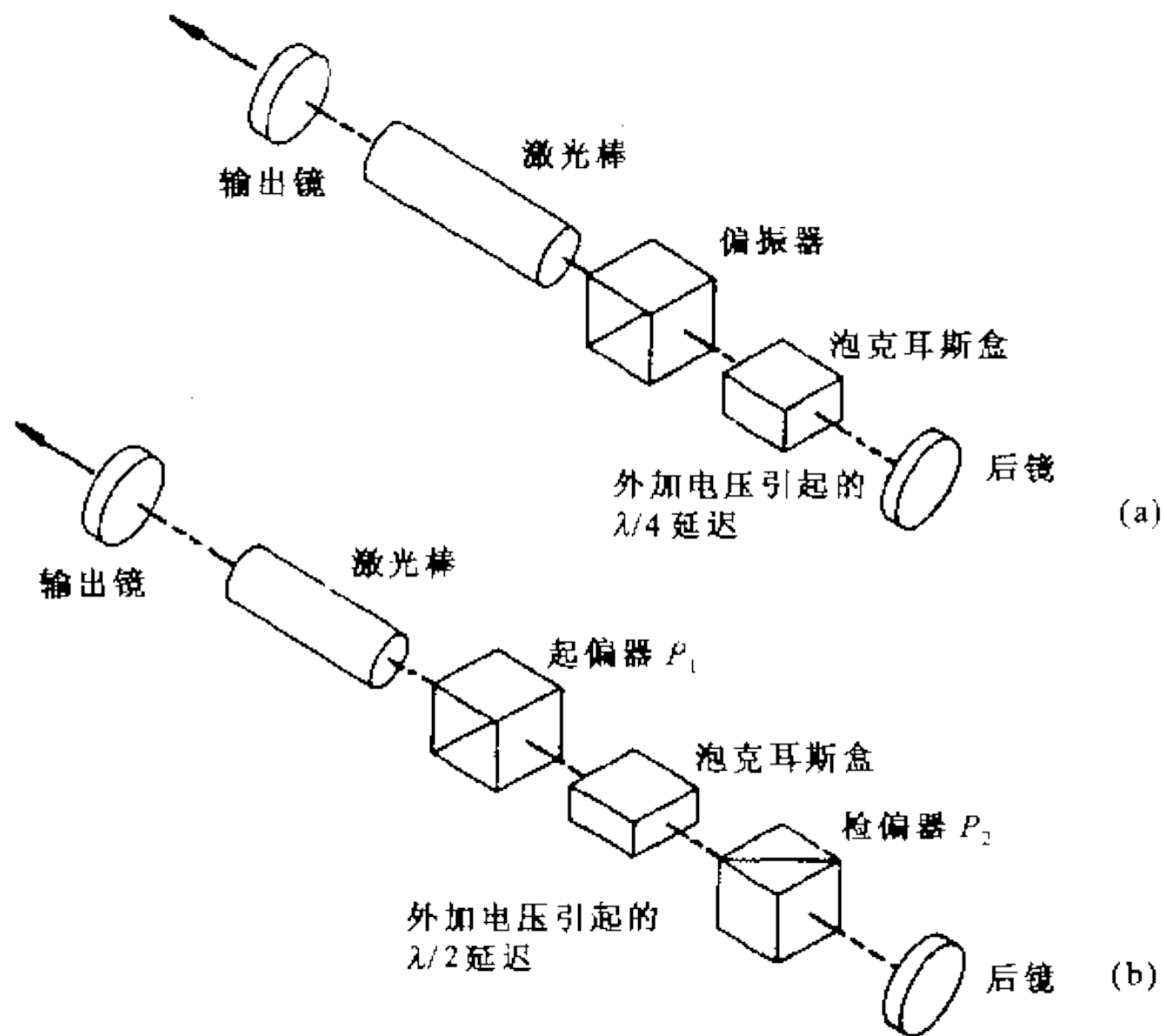
- A、消光比---要高, KDP类 >10000 , LN类 <1000 ;
- B、透过率---要高,KDP类 $(0.2\sim2.0\mu\text{m})\leq 85\%$,
- LN $(0.4\sim5.0\mu\text{m})\leq 98\%$;
- C、半波电压—要低, 对 $\lambda=1064\mu\text{m}$,DKDP $\sim 6\text{-}7\text{KV}$,
- LN $\sim 9000\times d/l\text{ V}$;
- D、抗破坏阈值—要高, KDP类 $\leq 0.5\text{GW}/\text{cm}^2$, LN类 $\leq 0.1\text{GW}/\text{cm}^2$;
- E、防潮解: DKDP易潮解(匹配液封装和真空封装), LN不易潮解.

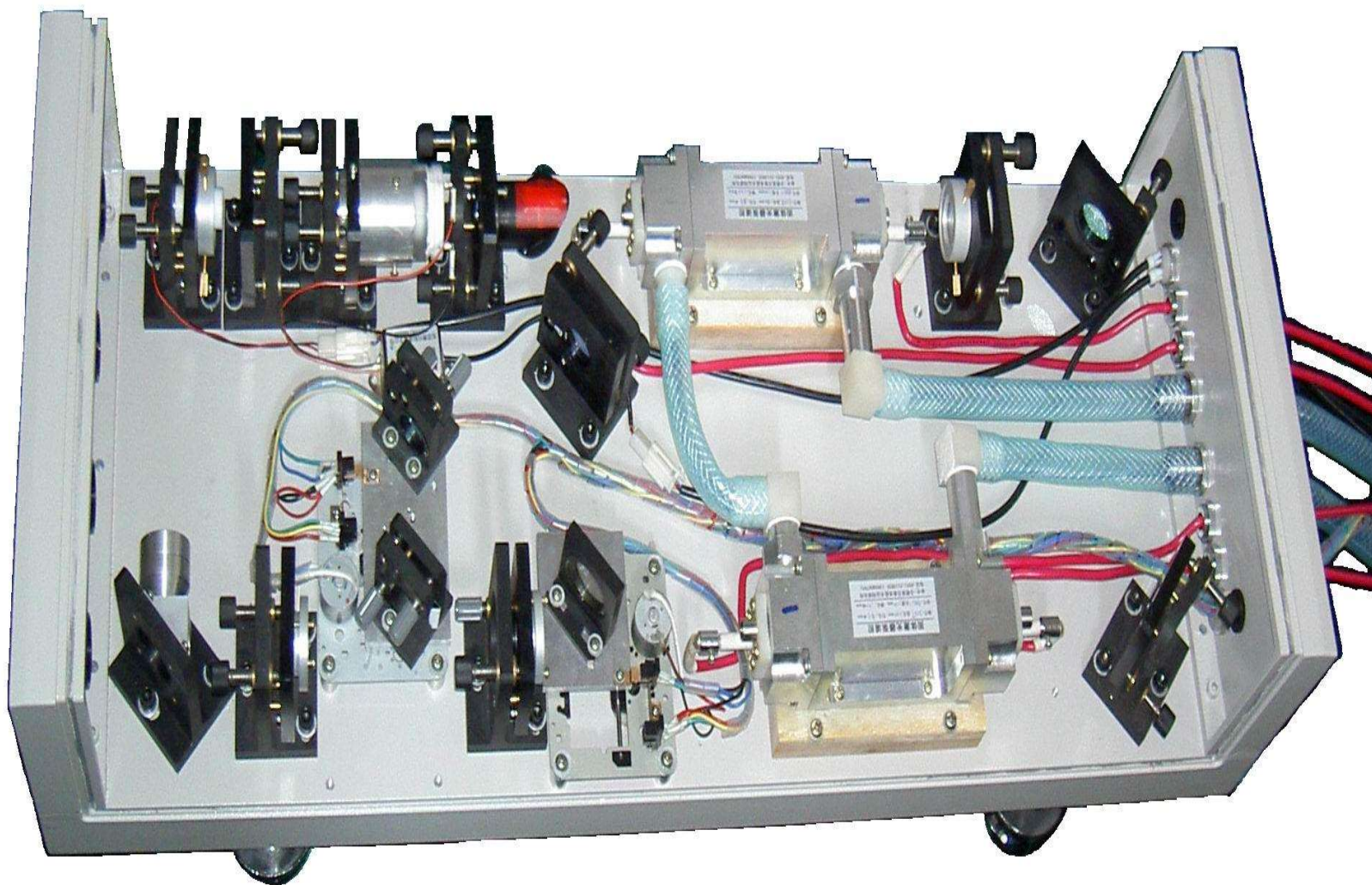
- 2、电极结构的设计和晶体接触的好坏影响加在晶体上电场的均匀性。

- 3、工作物质激光上能级寿命要高, 易于积累更多的粒子反转数。

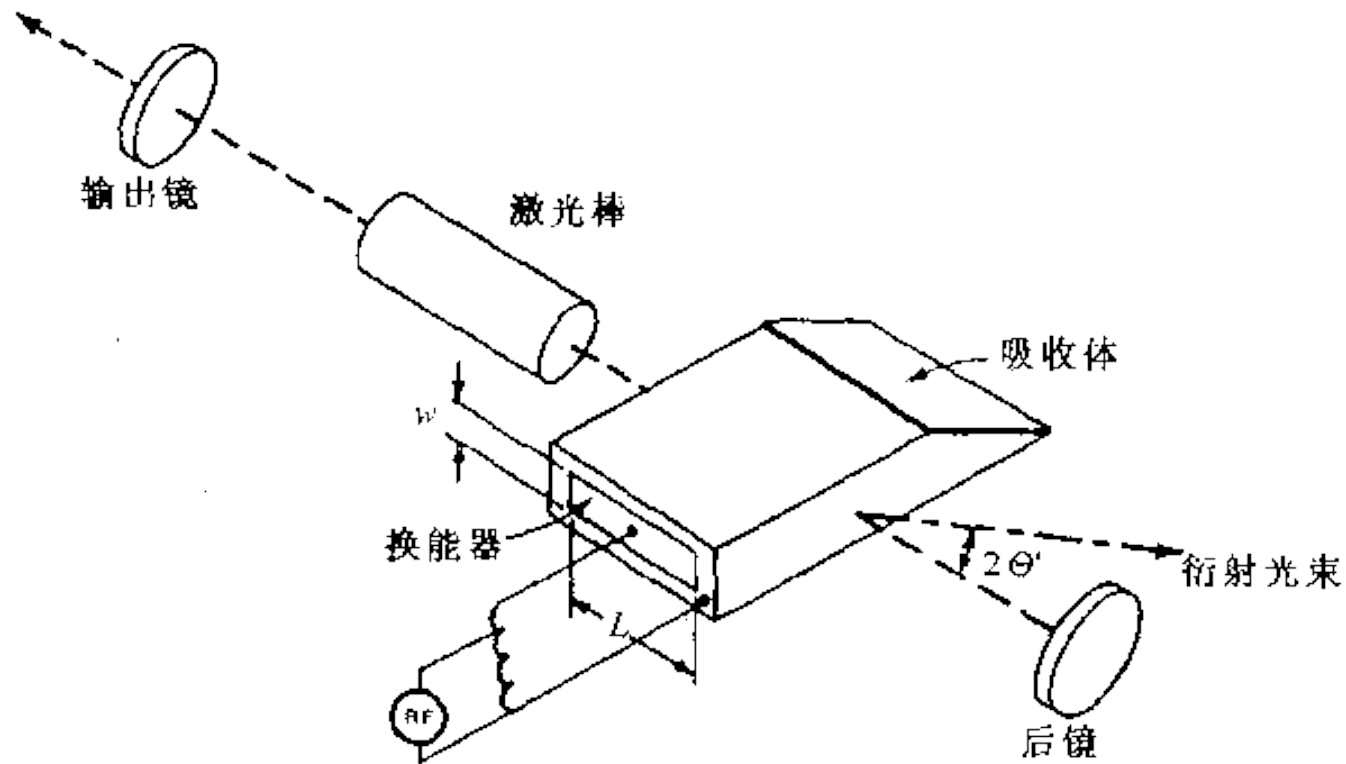
- 4、泵浦速率尽可能高。

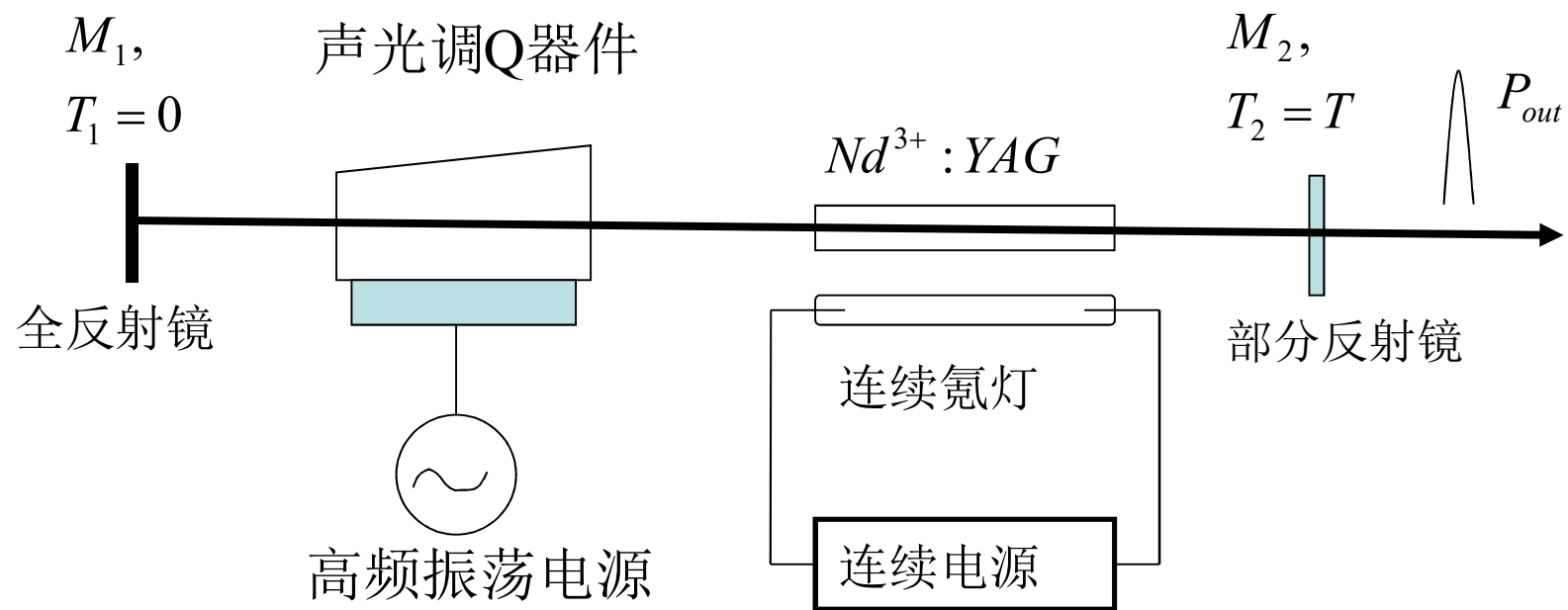
- 5、高压脉冲驱动电路以及控制触发延时电路要精密设计。

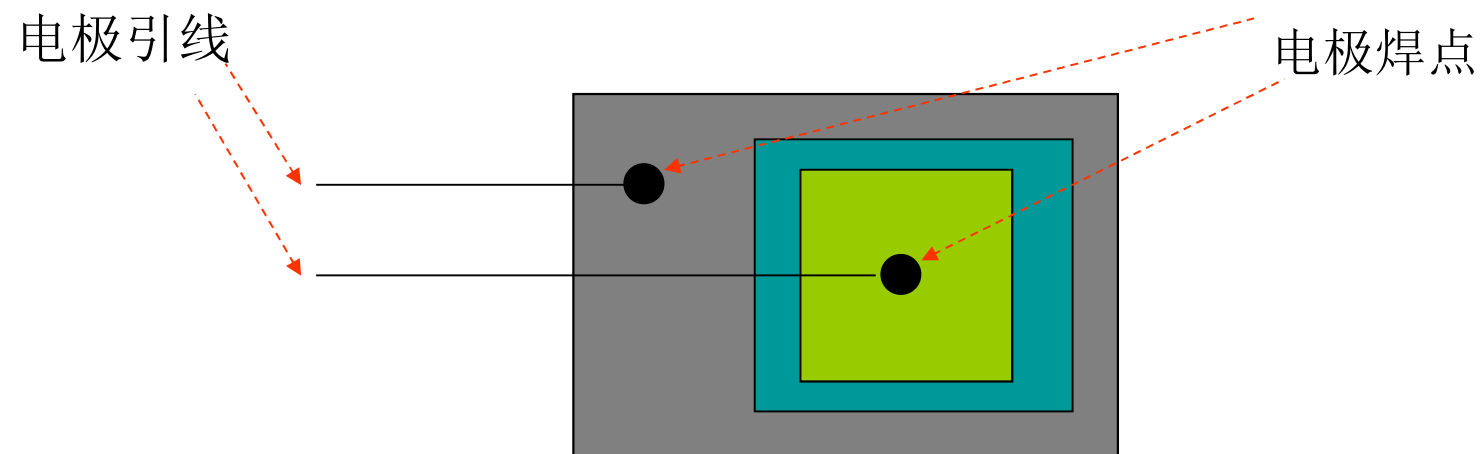
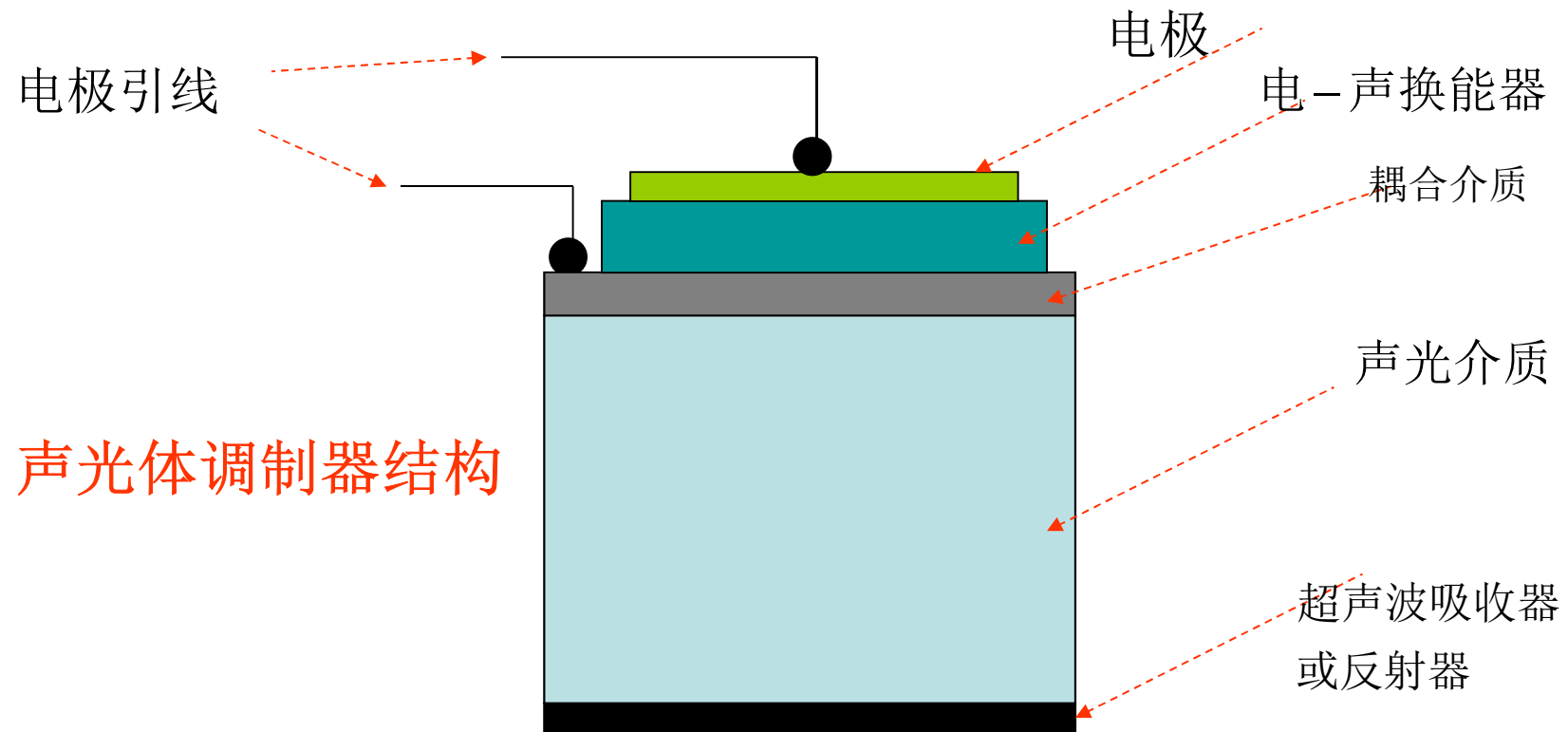




- 第三节其他激光调Q技术(声光调Q技术、被动可饱和吸收体调Q技术、转镜调Q技术)
- 一、声光调Q技术



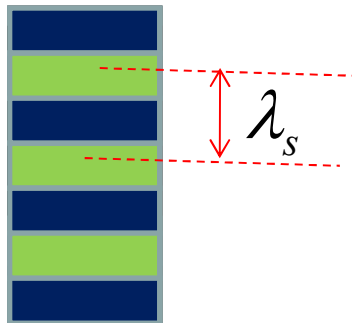




- 声光调制器组成

- 1、声光介质：氧化碲(TeO_2)、钼酸铅($PbMoO_4$)、熔融石英。当一束光通过其中的变化的超声场时，光与超声场的作用使得出射光具有随时间变化的各级衍射光，利用衍射光的强度随超声波强度而变的性质，可以制成光强度调制器。
- 2、电-声换能器（超声发生器）：利用压电晶体（石英、 $LiNbO_3$)或压电半导体（ CdS, ZnO)的反压电效应，在外加电场作用下产生机械振动而形成超声波。将调制的电功率转换成声功率。
- 3、吸收或反射超声波器件：吸收超声波---用行波，反射超声波—用驻波。
- 4、驱动电源：用于产生电信号（超声电信号和调制电信号）驱动换能器工作。

- 1、声光调制
- A、声光衍射效应
- 介质中声波是纵向应力波,弹性波,它会使介质产生相应的弹性性变,激起介质中各质点沿声波的传播方向振动,引起介质的密度呈疏密相间的交替变化,导致介质的折射率发生相应的周期性变化,如同一个光学“相位光栅”,该光栅常数等于声波波长 λ_s 。当光波通过此介质时,就会产生光的衍射。其衍射光的强度、频率、方向等都随超声场而变化。
- 有行波和驻波两种形式。



- **B、超声行波场**

- 在行波声场下,介质折射率的增大或减小交替变化,并以声速 $v_s (10^3 m/s)$ 向前推进, 由于声速 $v_s (10^3 m/s) \ll$ 光速 $c (10^8 m/s)$, 光束穿过声光介质时,“声光栅” 可以看作静止的。

超声行波场方程可表示为:

$a(x,t) = A \sin(\omega_s t - k_s x)$, a 为介质质点的瞬时位移, A 为振幅.

介质折射率的变化:

$$\Delta n(x,t) \propto \frac{da}{dt} = -k_s A \cos(\omega_s t - k_s x) \text{ 或 } \Delta n(x,t) = \Delta n \cos(\omega_s t - k_s x)$$

行波时的介质折射率:

$$n(x,t) = n_0 + \Delta n \cos(\omega_s t - k_s x) = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 P S \cos(\omega_s t - k_s x)$$

S 为超声波引起介质产生应变, P 为材料的弹光系数.

若超声频率 f_s , 那么,“声光栅” 出现和消失的次数也为 f_s .

- C、超声驻波场

声驻波由波长、振幅、相位相同，传播方向相反的两束声波叠加而成。
超声驻波场方程可表示为：

$$a(x,t) = 2A \cos(2\pi \frac{x}{\lambda_s}) \sin(2\pi \frac{t}{T_s})$$

声驻波的波腹和波节在介质中位置固定，“声光栅”在空间是不变的。

介质折射率的变化： $\Delta n(x,t) = 2\Delta n \sin(\omega_s t) \sin(k_s x)$

驻波时介质折射率：

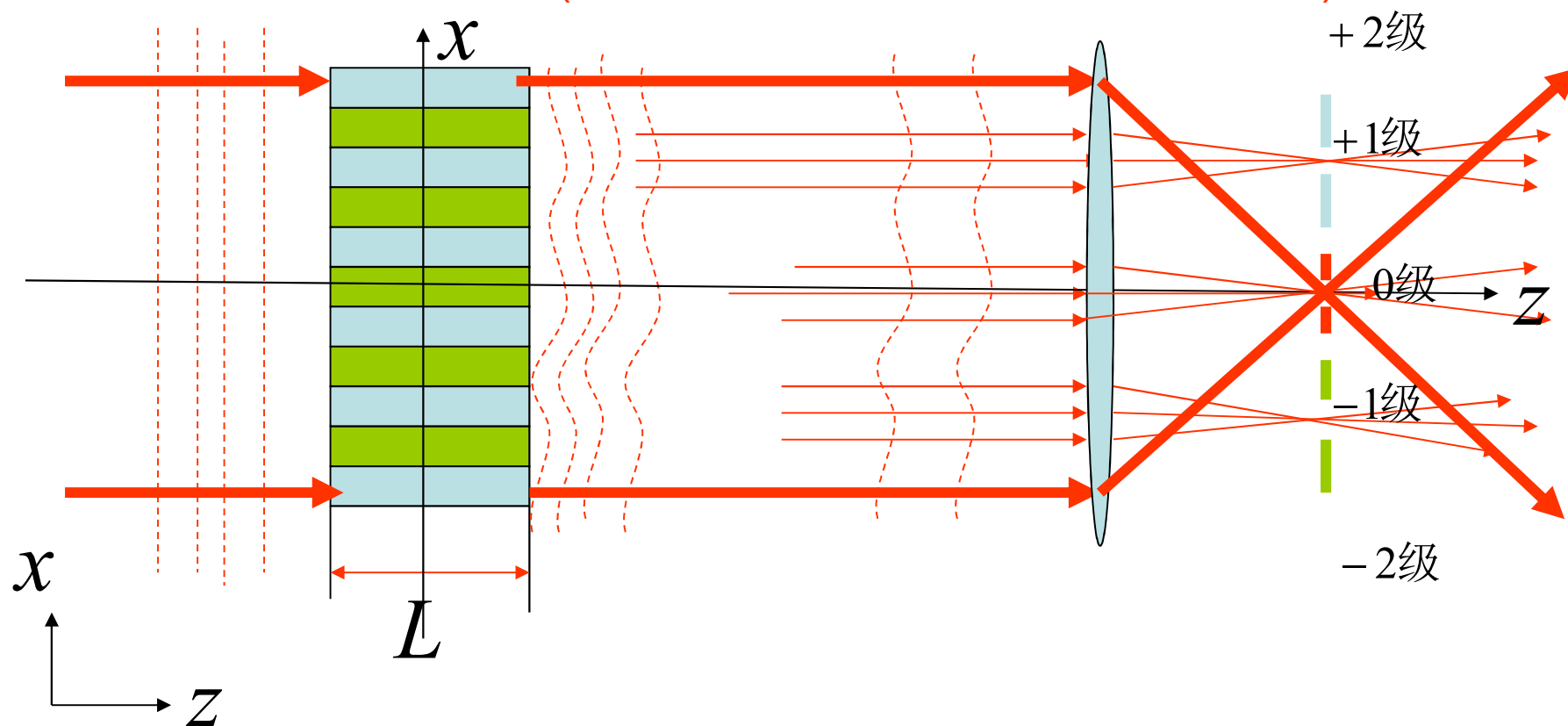
$$n(x,t) = n_0 + 2\Delta n \sin(\omega_s t) \sin(k_s x) = n_0 - n_0^3 P S \sin(\omega_s t) \sin(k_s x)$$

若超声频率 f_s ，那么，“声光栅”出现和消失的次数则为 $2f_s$ 。

- **D、拉曼-奈斯(Raman-Nath)衍射**

当超声频率较低,光波平行于声波面(垂直于声波传播方向)入射,声光相互作用长度 L 较短时,产生拉曼-奈斯(Raman-Nath)衍射.

若入射光为平面光波, 穿过声光介质后, 出射光波波阵面从平面变成弯曲面, 其上各次波波源发出的次波将发生相干叠加, 形成与入射光方向对称分布的多级衍射光。(介质可视为一个静止的平面相位光栅).



第j 级衍射光的振幅:

$$E_m = E_0 J_m(\nu), \nu = \Delta n k_i L = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L.$$

E_0 入射光振幅, $J_m(\nu)$ – 第一类第m阶贝塞尔函数。

各级衍射光的强度: $I_m = I_0 J_m^2(\nu)$

各级衍射极值的方位角: $\sin \theta = \pm m \frac{k_s}{k_i} = \pm m \frac{\lambda}{\lambda_s} (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$

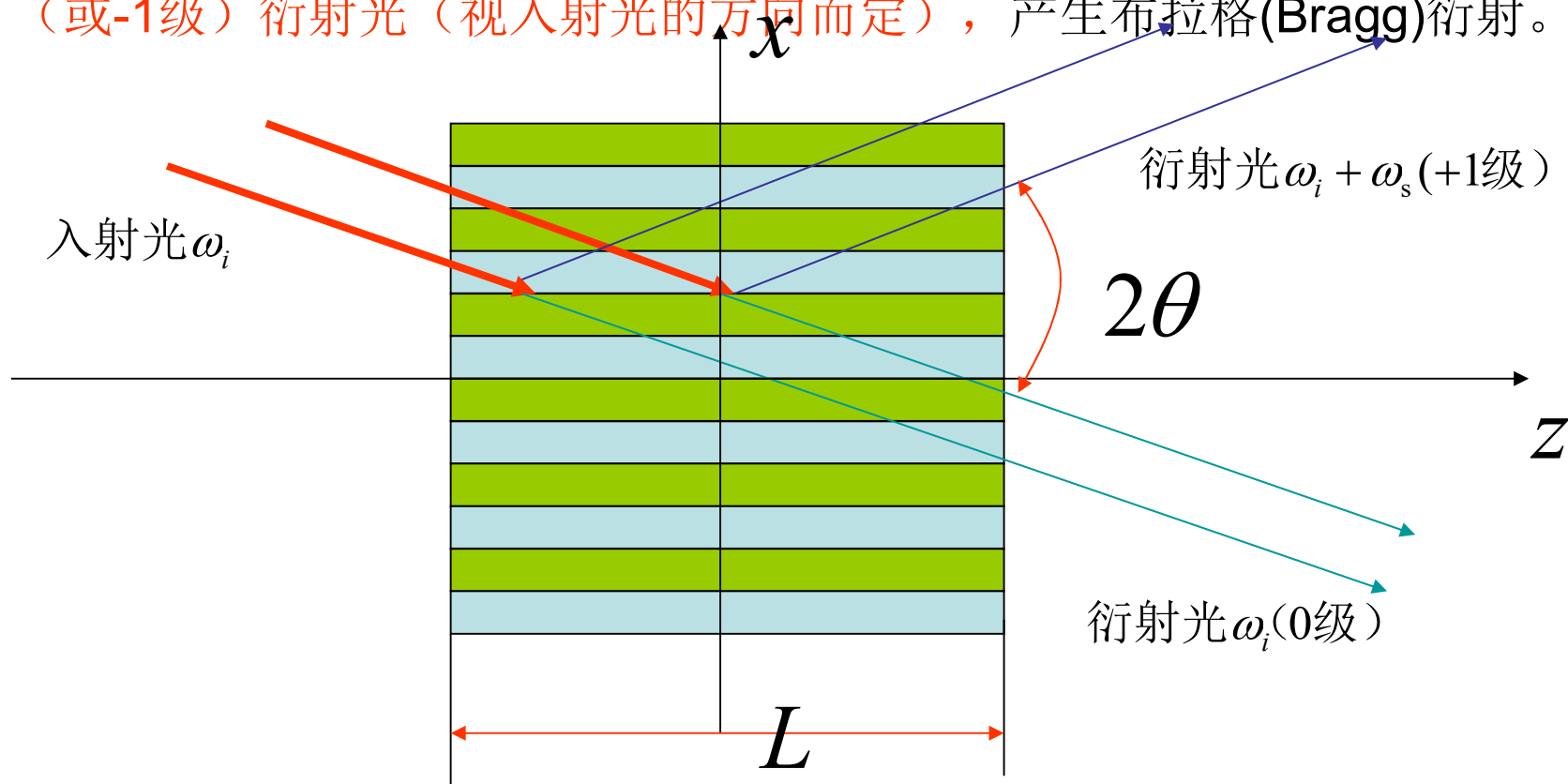
各级衍射光波产生多普勒频移: $\omega = \omega_i \pm m \omega_s$;

但是由于超声频率 $\omega_s \sim 10^8 \text{ Hz} \ll$ 光波 $\omega_i \sim 10^{14} \text{ Hz}$,
所以频移量可略去不计.

- D、布拉格(Bragg)衍射

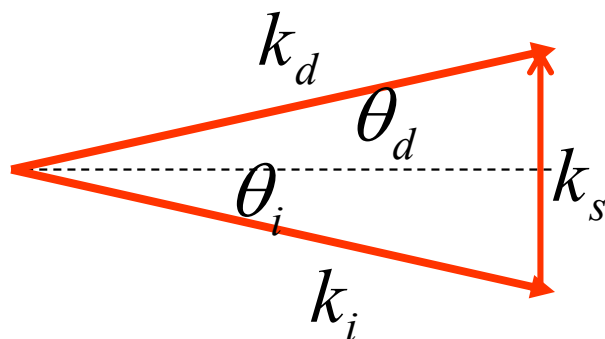
当超声频率较高,光束与声波面(垂直于声波传播方向)以一定的夹角斜入射时,并且声光互作用长度 L 较长时,光波要穿过多个声波面,故介质具有“体光栅”的作用,当入射光与声波面夹角满足一定条件时,介质内各级衍

射光会互相干涉,各高级次衍射光将互相抵消,只出现0级和+1级(或-1级)衍射光(视入射光的方向而定),产生布拉格(Bragg)衍射。



1、各向同性介质中正常布拉格衍射

入射光和衍射光的波矢相等，



声光互作用可以看成光子和声子的碰撞，每一次碰撞都导致一个入射光子 (ω_i) 和一个声子 (ω_s) 的湮灭，同时产生一个频率为 $\omega_d = \omega_i + \omega_s$ 的新光子。

衍射光波产生多普勒频移: $\omega_d = \omega_i \pm \omega_s$; 但是由于超声频率

$\omega_s \sim 10^8 \text{ Hz} \ll \text{光波 } \omega_i \sim 10^{14} \text{ Hz}$, 所以频移量可略去不计

$$\Rightarrow \omega_d \approx \omega_i, \Rightarrow k_i \sin \theta_i + k_d \sin \theta_d = 2k_i \sin \theta_B = k_s,$$

$$\Rightarrow \sin \theta_B = \frac{k_s}{2k_i} = \frac{\lambda}{2n\lambda_s}, \theta_i = \theta_d = \theta_B$$

当入射光强为 I_i 时，布拉格声光衍射的0级和1级衍射光强可表示为：

$$I_0 = I_i \cos^2\left(\frac{\nu}{2}\right), I_1 = I_i \sin^2\left(\frac{\nu}{2}\right), \nu = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L$$

$$\text{衍射效率 } \eta_s = \frac{I_1}{I_i} = \sin^2\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L\right)\right) = \sin^2\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\frac{L}{H} \cdot M_2 P_s}\right)$$

其中： P_s 超声驱动功率， $M_2 = n^6 P^2 / (\rho \nu_s^3)$ 声光材料的品质因素， H 换能器宽度， L 换能器长度， ν_s 声速， ρ 介质密度。

$$(1)、M_2 \uparrow, L \uparrow, H \downarrow, \Rightarrow \eta_s \uparrow,$$

$$(2)、P_s \uparrow \rightarrow \frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\left(\frac{L}{H}\right) M_2 P_s} = \frac{\pi}{2}, \Rightarrow \eta_s = 100\%.$$

(3)、可以通过改变加在电声换能器上的电功率改变 P_s ，
 \Rightarrow 控制衍射光强 \Rightarrow 实现声光调制。

当入射光强为 I_i 时，布拉格声光衍射的0级和1级衍射光强可表示为：

$$I_0 = I_i \cos^2\left(\frac{\nu}{2}\right), I_1 = I_i \sin^2\left(\frac{\nu}{2}\right), \nu = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L, \nu = \pi \Rightarrow I_1 = I_i, I_0 = 0.$$

$$\text{调制效率(也为声光衍射效率)} \eta_s = \frac{I_1}{I_i} = \sin^2\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L\right)\right) = \sin^2\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\frac{L}{H}} \cdot M_2 P_s\right)$$

其中： P_s 超声驱动功率， $M_2 = n^6 P^2 / (\rho \nu_s^3)$ 声光材料的品质因素， H 换能器宽度， L 换能器长度， ν_s 声速， ρ 介质密度。

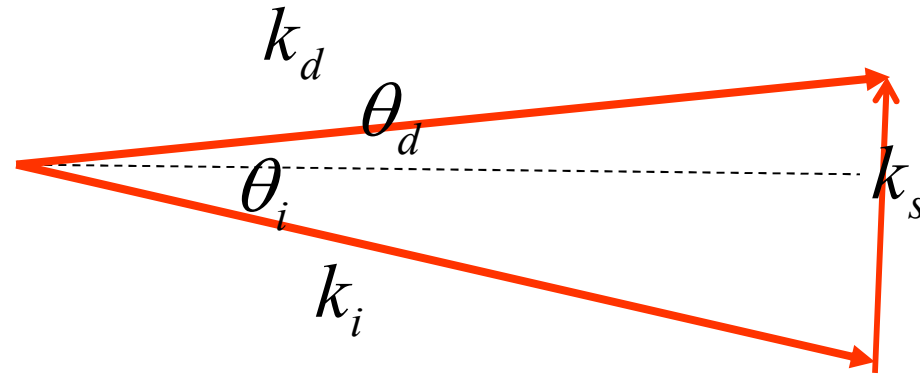
$$(1)、M_2 \uparrow, L \uparrow, H \downarrow, \Rightarrow \eta_s \uparrow,$$

$$(2)、P_s \uparrow \rightarrow \frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\left(\frac{L}{H}\right) M_2 P_s} = \frac{\pi}{2}, \Rightarrow \eta_s = 100\%.$$

(3)、可以通过改变加在电声换能器上的电功率改变 P_s ，
 \Rightarrow 控制衍射光强 \Rightarrow 实现声光调制。

2、各向异性介质中反常布拉格衍射

声光介质为各向异性晶体，入射光和衍射光的偏振状态不同，



$\Rightarrow n_i \neq n_d, \Rightarrow |k_i| \neq |k_d|, \Rightarrow$ 异常布拉格衍射

$$k_i = 2\pi n_i(\theta_i) / \lambda$$

$$k_d = 2\pi n_d(\theta_d) / \lambda$$

$$k_s = 2\pi / \lambda_s = 2\pi f_s(\theta)$$

$$\Rightarrow k_d^2 = k_s^2 + k_i^2 - 2k_s k_i \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_i\right)$$

$$= k_s^2 + k_d^2 - 2k_s k_d \sin \theta_d,$$

迪克逊 方程 (R .W .Dixon):

$$\sin \theta_i = \frac{\lambda}{2 n_i(\theta_i) v_s} \left\{ f_s + \frac{v_s^2}{\lambda^2 f_s} \left[n_i^2(\theta_i) - n_d^2(\theta_d) \right] \right\}$$

$$\sin \theta_d = \frac{\lambda}{2 n_d(\theta_d) v_s} \left\{ f_s - \frac{v_s^2}{\lambda^2 f_s} \left[n_i^2(\theta_i) - n_d^2(\theta_d) \right] \right\}$$

(1)、当 $f_s \geq f_0$ 时, ($f_0 = \frac{v_s}{\lambda} \sqrt{n_{i0}^2 - n_{d0}^2}$), $\sin \theta_i = \sin \theta_d = \frac{\lambda}{2 n v_s} f_s$,

$\alpha = \theta_i + \theta_d \approx \frac{\lambda}{n v_s} f_s$, 正常布拉格衍射 .

(2)、 $\sin \theta_i + \sin \theta_d \approx \frac{\lambda}{2 n v_s} f_s$, θ_i, θ_d, \sim 很小 ,

$\Rightarrow \alpha = \theta_i + \theta_d \approx \frac{\lambda}{n v_s} f_s$, $\theta_i \sim f_s$ 虽不同 , $\alpha \sim f_s$ 相同 .

(3)、 $\lambda = \pm v_s (n_d - n_i) / f_s$, 当白光 (或具有复杂 光谱成分的光) 入射时 , 对于某确定的声频 f_s , 只有满足上式的波长 λ 才能被衍射。如果改变 f_s , 则对应的衍射光波长也 要改变 --- 声光可调谐滤波器。

区分拉曼-奈斯(Raman-Nath)衍射和布拉格(Bragg)衍射条件

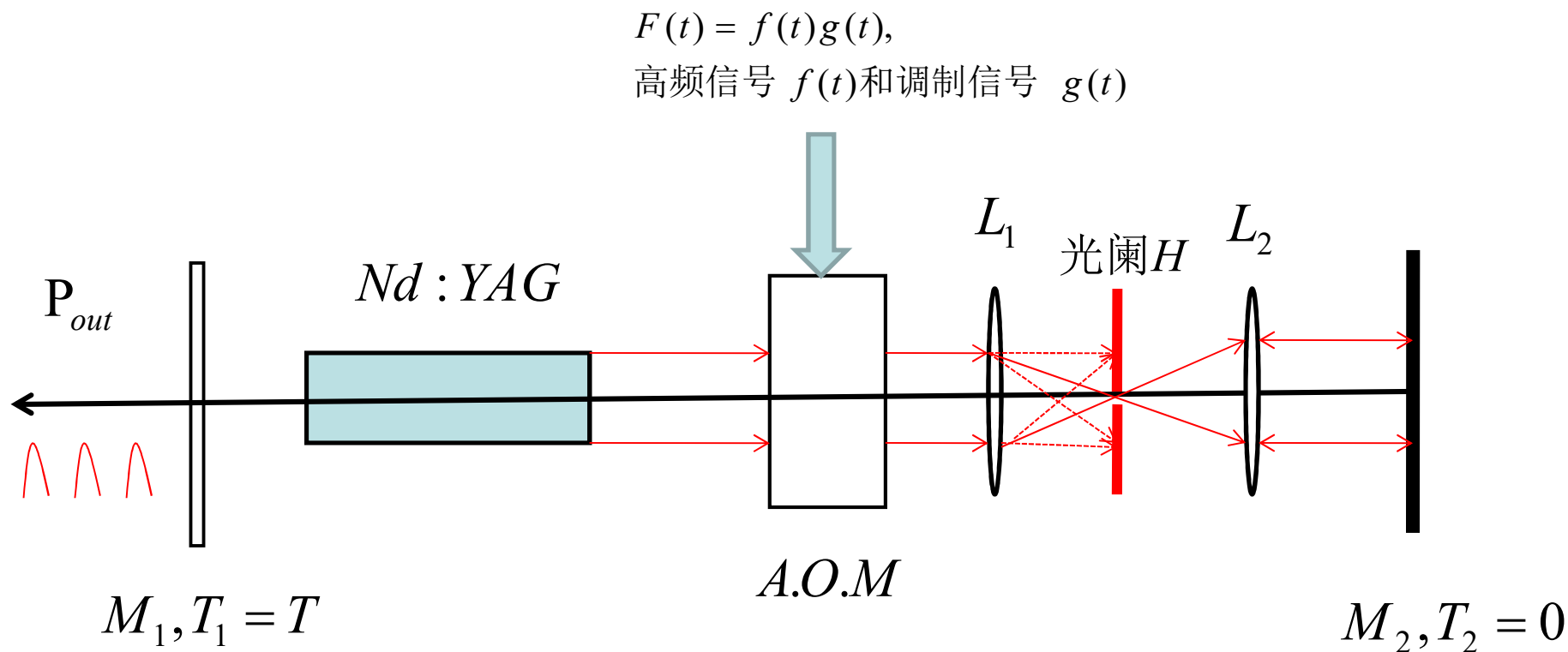
$$G \text{ 参量} : G = \frac{k_s^2 L}{k_i \cos \theta_i} = \frac{2\pi\lambda L}{\lambda_s^2 \cos \theta_i} = \frac{2\pi L}{L_0},$$

$$L_0 = \lambda_s^2 \cos \theta_i / \lambda \approx \frac{\lambda_s^2}{\lambda}, \text{ 声光器件 的特征长度 }。$$

$$G \geq 4\pi (\text{布拉格衍射区}) \quad L \geq 2L_0 (\text{布拉格衍射区})$$

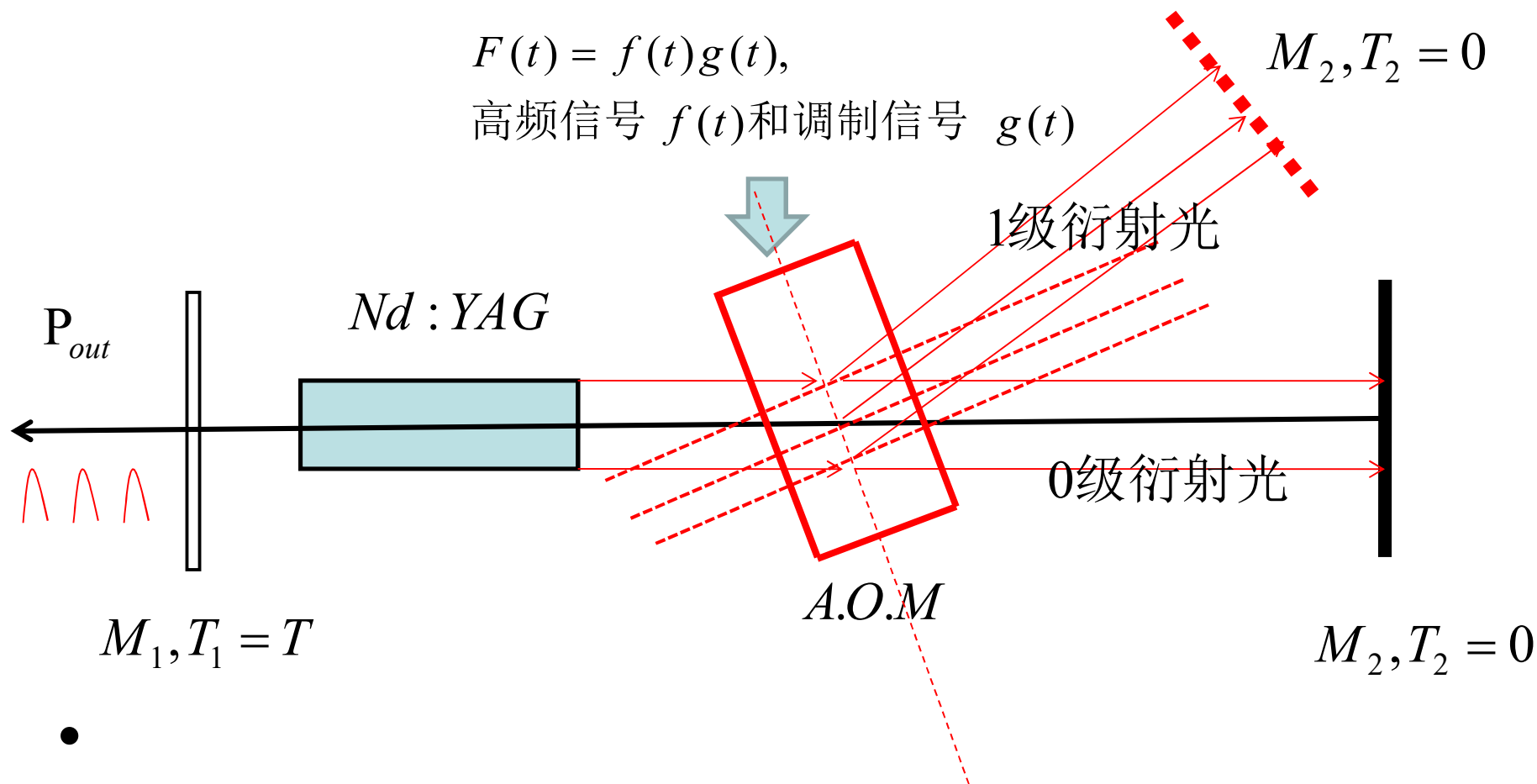
$$G \prec \pi (\text{拉曼 - 奈斯衍射区}) \quad L \prec \frac{1}{2}L_0 (\text{拉曼 - 奈斯衍射区})$$

布拉格衍射可以用耦合波方程来进行理论分析.(略)



•

利用拉曼 - 奈斯衍射的声光调 $QNd:YAG$ 激光器



利用布拉格衍射的声光 调 $QNd:YAG$ 激光器

- 1、由于可以通过选择合适的调制器参数使得布拉格衍射调制效率（或衍射效率）达到100%，而拉曼-奈斯衍射效率较低，
- 2、而且，为了获得大的调制带宽，调制器需要工作在高频声波波段，而通常拉曼-奈斯衍射限于低频工作(声频小于10MHz);

所以通常采用布拉格声光衍射机制来进行激光调Q.

*调制带宽:

对于一个给定入射角和波长的光波, 只有一个确定频率和波矢的声波才能满足布拉格条件, 当采用有限的发散光束和声波场时, 波束的有限角 将会扩展, 只允许在一个有限的声频范围内才能产生布拉格衍射。允许的声频带宽 Δf_s 。

$$\text{声光调制器的调制带宽 } \Delta f_m = \frac{1}{2} \Delta f_s = \frac{2n v_s}{\pi w_0} \cos \theta_B$$

声光调制器的调制带宽与声波穿过光束的渡越时间(w_0 / v_s)成反比。
即与光束直径成反比, 宽度小的光束可以得到大的调制带宽。

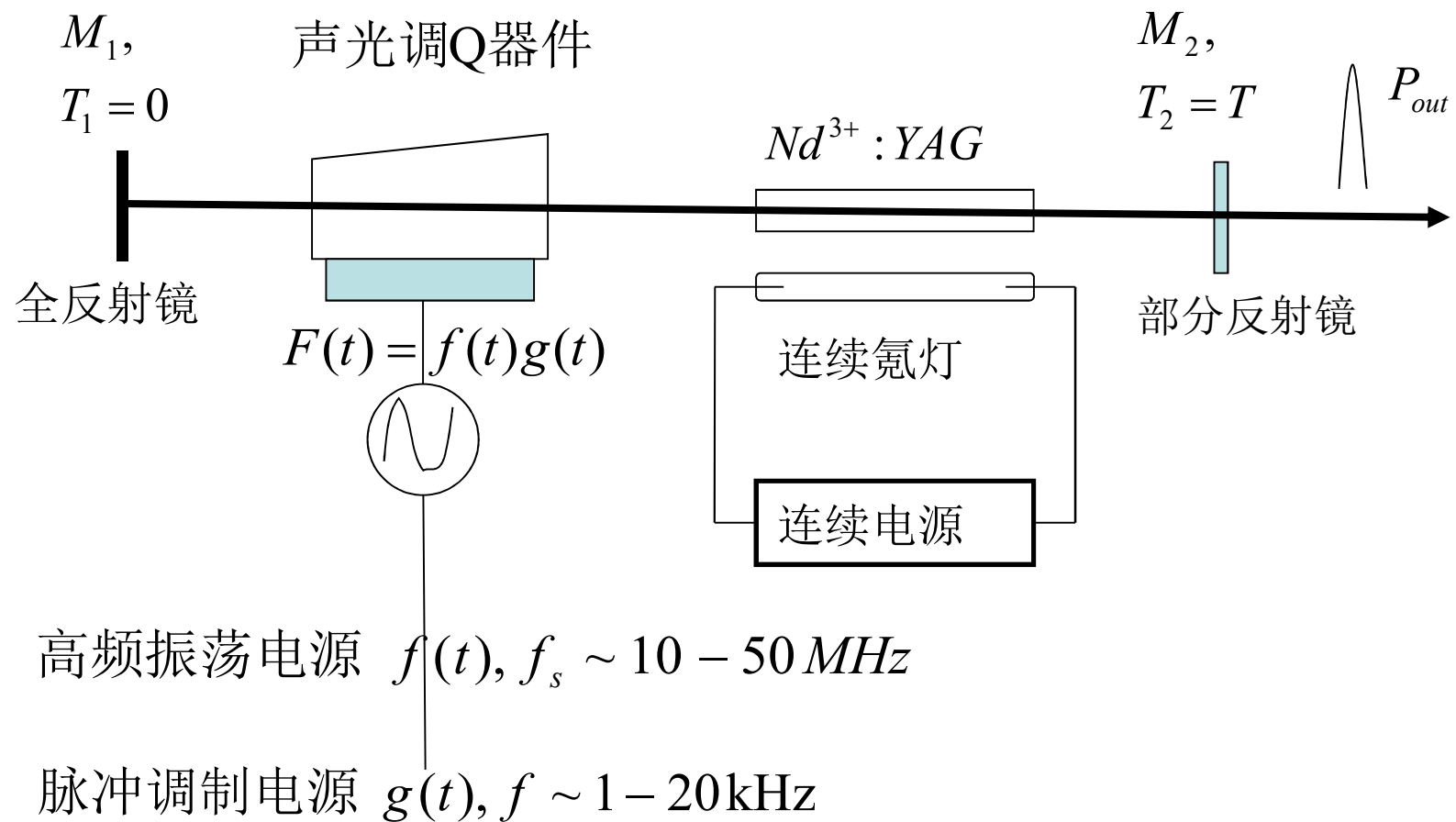
光束发散角不能太大 , 否则 0级和1级衍射光束将有部分重叠, 降低调制效果 。

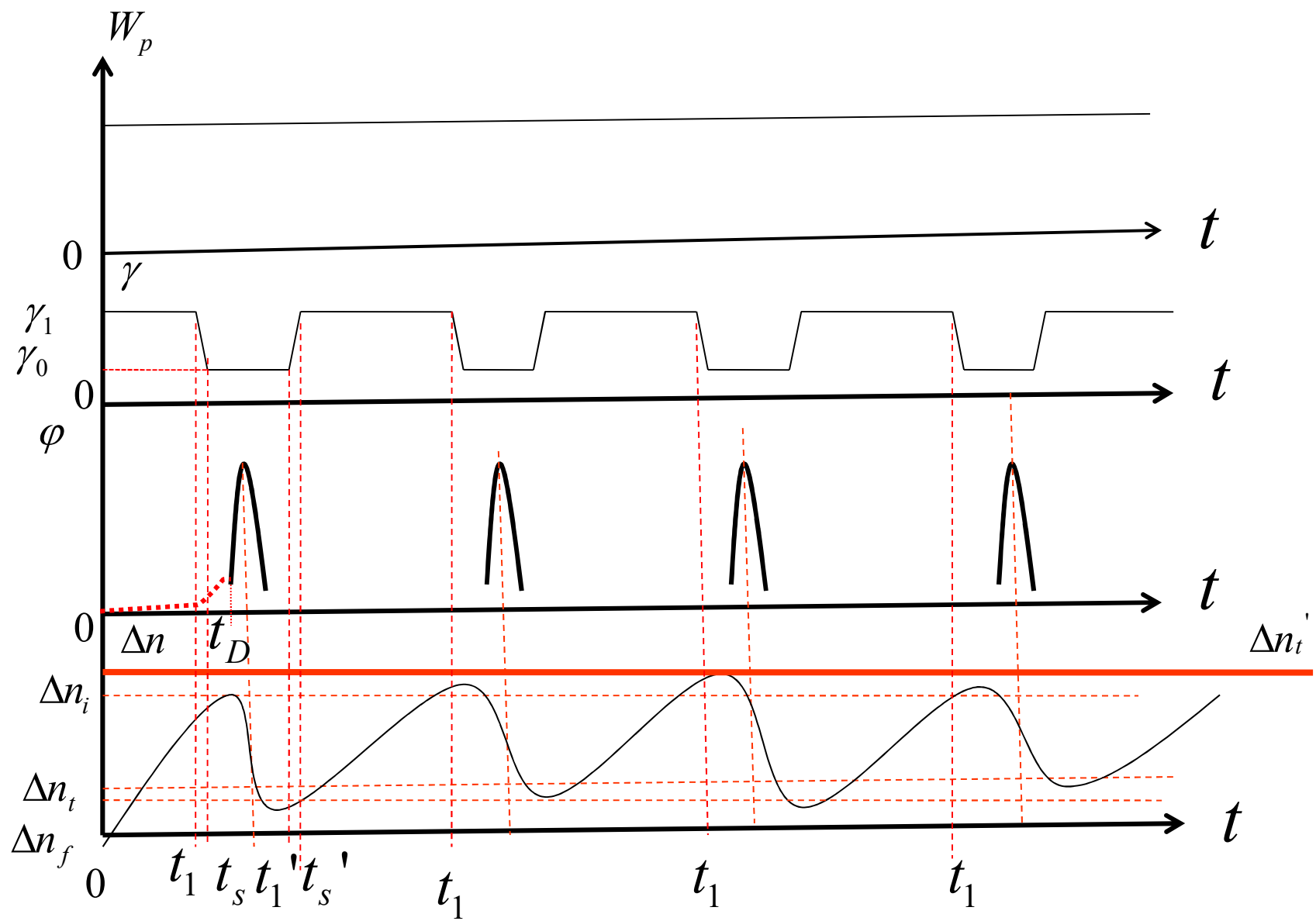
$$\text{要求 } \delta\theta_i < \theta_B, \sin \theta_B = \frac{\lambda}{2n v_s} f_s, \delta\theta_i = \frac{\lambda}{\pi n w_0}, \Rightarrow \frac{\Delta f_m}{f_s} \approx \frac{1}{2} \Delta f_s \frac{1}{f_s} < \frac{1}{2},$$

最大的调制带宽 Δf_m 近似等于声波频率的一半。

\Rightarrow 大的调制带宽要采用高频布拉格衍射才能得到 。

E、声光调Q激光技术实例分析





声光调Q器件一般采用行波工作方式。因为行波场消除快，开关时间短，而驻波超声场在声光介质中不易迅速消除，开关时间长。

$t_D \sim 1-8\mu s$ (电光调Q, $t_D \sim$ 几十-几百 ns), $T_s = t_s - t_1$, 要求 $T_s < t_D$.
否则, 慢开关--峰值功率下降, 脉宽增宽, 输出不稳定, 产生多脉冲.

对于声光开关, 断开的~~时间~~主要由声波通过光束的渡越时间来决定(电子开关时间不是主要的). 熔融石英中声速5毫米/微秒

⇒ 声光Q开关一般用于增益较低的连续激光器。

而且，声光Q开关所需要的调制驱动电压很低（小于200V）.

⇒ 可获得高重复频率的脉冲输出（ $f \sim 1-20kHz$ ）.

使Nd:YAG 激光器连续运转,输出激光,加入高频电信号~20MHz, 增加高频电压（即Ps增加）至激光被关断为止；再加入f=KHz量级的脉冲调制信号,使注入的高频信号受到调制，从而使超声场时有时无，Q值呈高、低交替变化，获得高重复率f调Q激光脉冲输出。

- 脉冲能量：几 μJ ,脉冲宽度：几十--几百ns,

声光介质中超声场出现的频率为脉冲调制信号的频率 f ,也使激光器输出重复率为 f 的调Q脉冲序列;

*重复率较高时, 脉冲之间没有足够的时间使激光上能级的粒子反转数达到最大值, 即 Δn_i 较低, 导致激光脉冲峰值功率下降, 而且由于增益减小, 脉冲宽度与脉冲形成时间都会增加;

如果重复率较过低, 则由于自发辐射跃迁, 部分反转粒子数损耗掉, 导致器件效率降低。

所以, 相邻两个激光脉冲的时间间隔为 $1/f$, 要大致等于激光工作物质的上能级寿命。 $Nd:YAG, \tau_{32} \approx 230\mu s, \Rightarrow f = 4 \sim 5kHz$

*对于布拉格衍射而言, 衍射角很小.

当超声频率 $f_s = 20 \sim 50MHz$, 石英对于波长为

$\lambda = 1064nm$ 的光波的衍射角 $\theta_B = 0.3^\circ \sim 0.5^\circ$.

- 作为调Q用的声光调制器

用行波超声场布拉格衍射型声光调制器,

- 1、调制器上所加的电信号 $F(t) = f(t)g(t)$

其中, $f(t)$ 为产生超声的高频信号

$$\Rightarrow a(x,t) = A \sin(\omega_s t - k_s x), \omega_s = 2\pi f_s, f_s \sim 10 - 50 \text{MHz}$$

- 2、

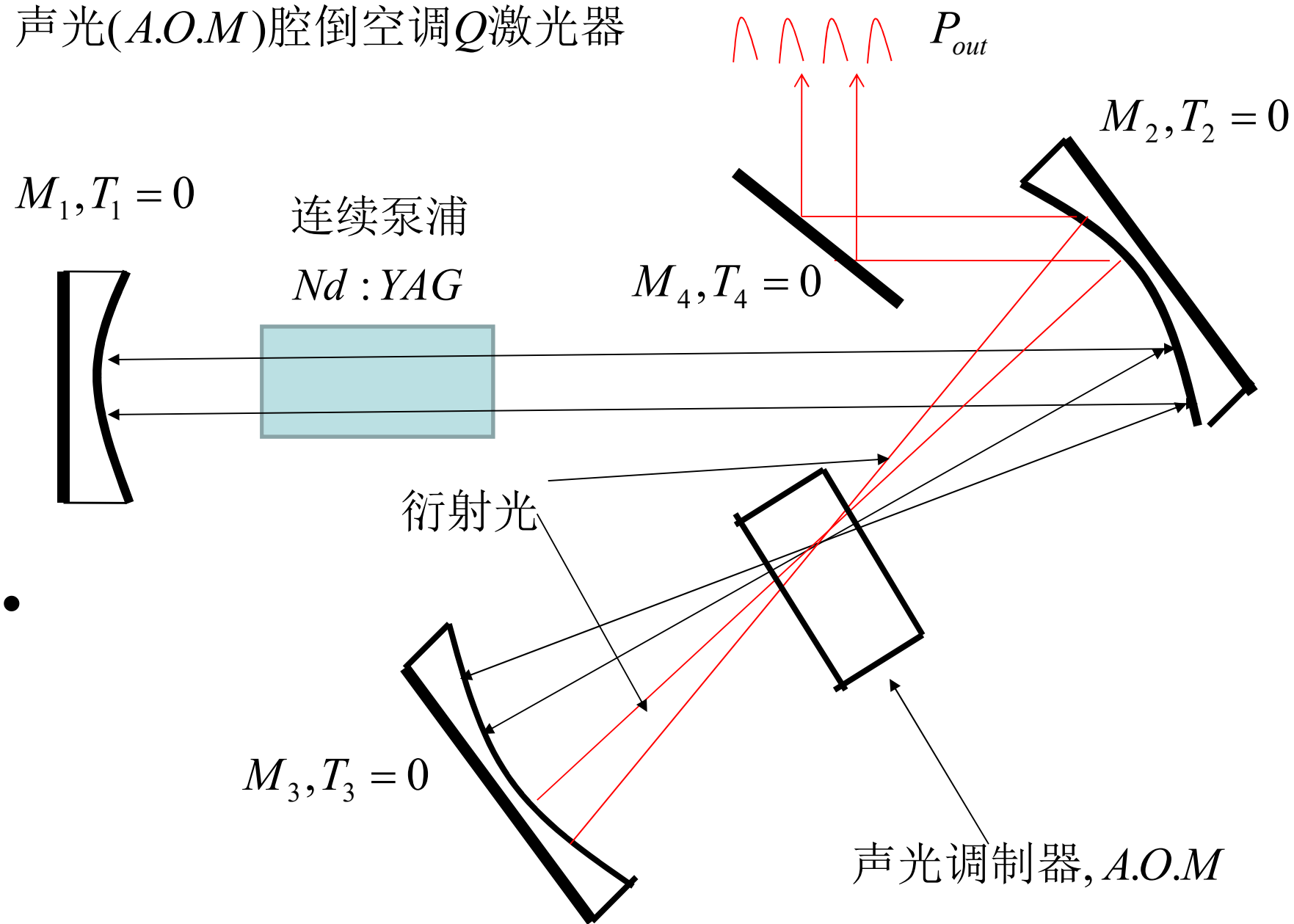
$g(t)$ 为脉冲调制信号, 通常用 (1,0) 方波数字信号;

其重复频率 f 决定了输出激光脉冲的重复率, 一般为 KHz 量级, 可根据激光工作物质的上能级寿命作适当调整。

- 3、

- 调制器可放置在腔内任意位置

声光(A.O.M)腔倒空调Q激光器



- 二、可饱和吸收体被动调Q 技术

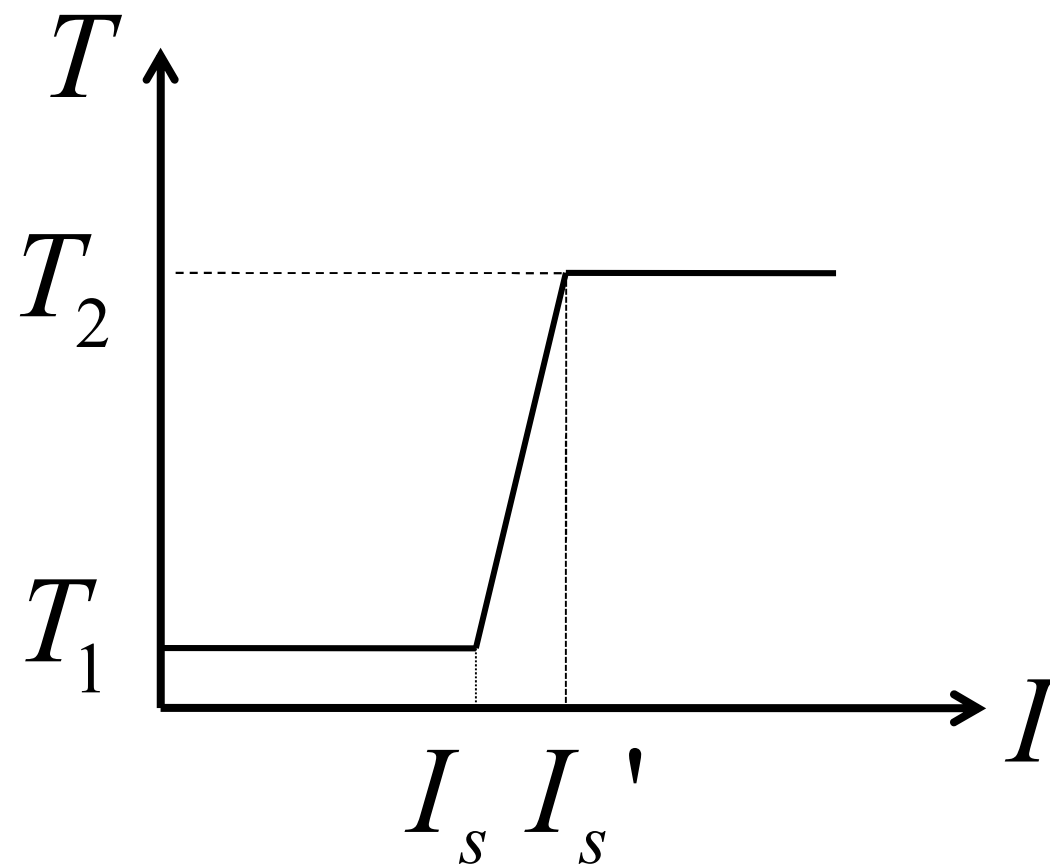
- 1、介质的可饱和吸收特性

某些介质具有非线性吸收的特性:其吸收系数并不是常数,在较强光的作用下,其吸收系数随光强的增加而减小直至饱和,对光呈现几乎透明的特性---可饱和吸收体.

吸收系数可表示为:
$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_s}}, I_s \text{ --- 饱和光强,}$$

可饱和吸收体 有染料(BDN、五甲川、十一甲川、隐花青、叶绿素D等染料) (染料盒, 染料片), LiF:F-2色心晶体 Cr4+:YAG晶体, 半导体可饱和吸收镜 (SESAM) .

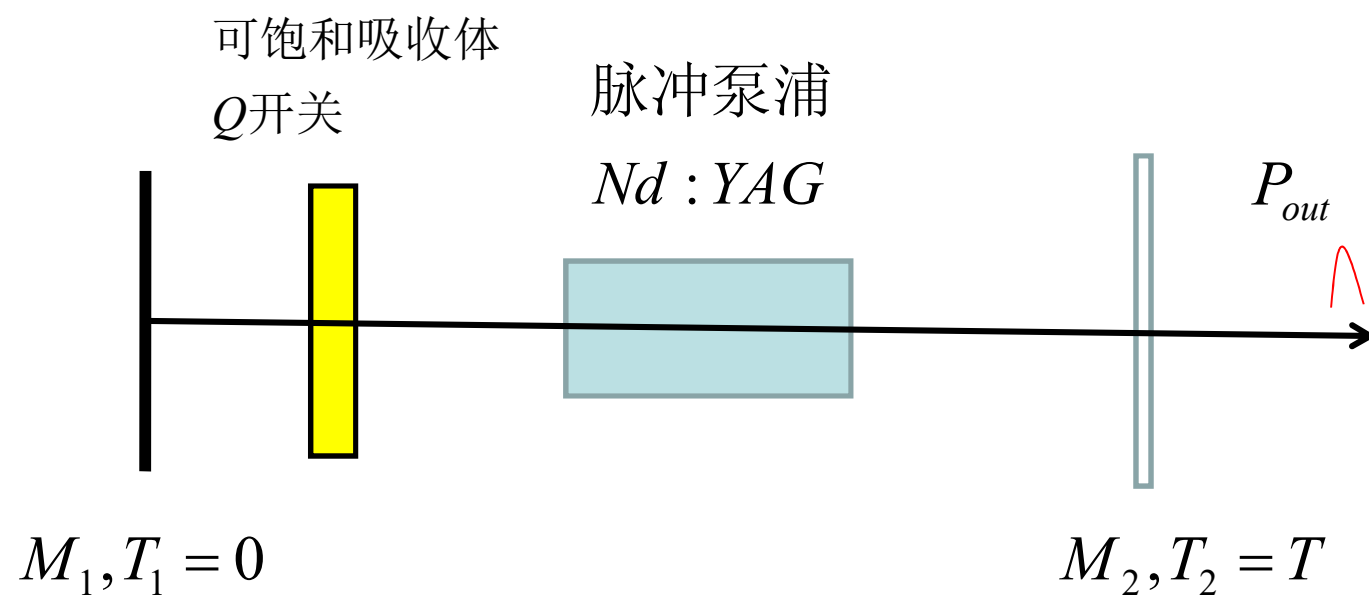
- 利用可饱和吸收体作为Q开关的调Q激光器,具有结构简单的优点。但是输出稳定性比电光调Q和声光调Q要差。



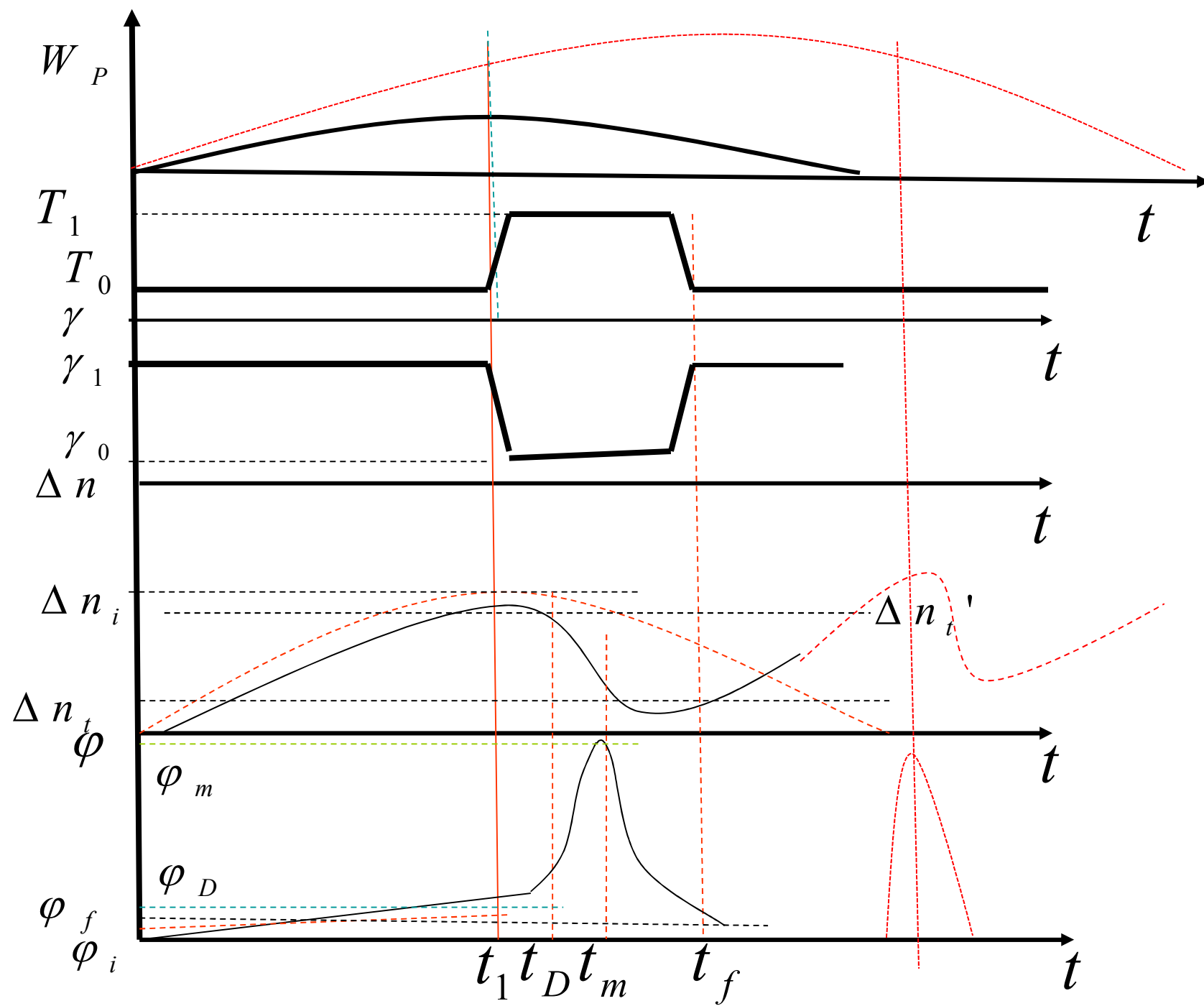
$T_1 \sim 10\% - 20\%$ 可变化和选择

$T_2 \sim 70\% - 90\%$ 由吸收体材料所定

I_s, I_s' 由材料吸收能级 寿命和吸收截面所定



•



由于通常大多数连续激光器腔内光强密度不能使可饱和吸收体饱和“漂白”，所以一般可饱和吸收体调Q激光器用于脉冲泵浦、脉冲调Q。

*将可饱和吸收体置于谐振腔内，

开始阶段，腔内自发荧光很弱，可饱和吸收体吸收系数很大（透过率 T_0 很低），腔内损耗很大，开关关闭，不能形成激光振荡；

光泵增加，荧光增强，当 $I \geq I_s$ ，可饱和吸收体吸收系数变大，（透过率变低），腔内损耗变小，到达一定值后，腔内光强使可饱和吸收体“漂白”，Q开关打开，快速形成激光振荡输出调Q脉冲。

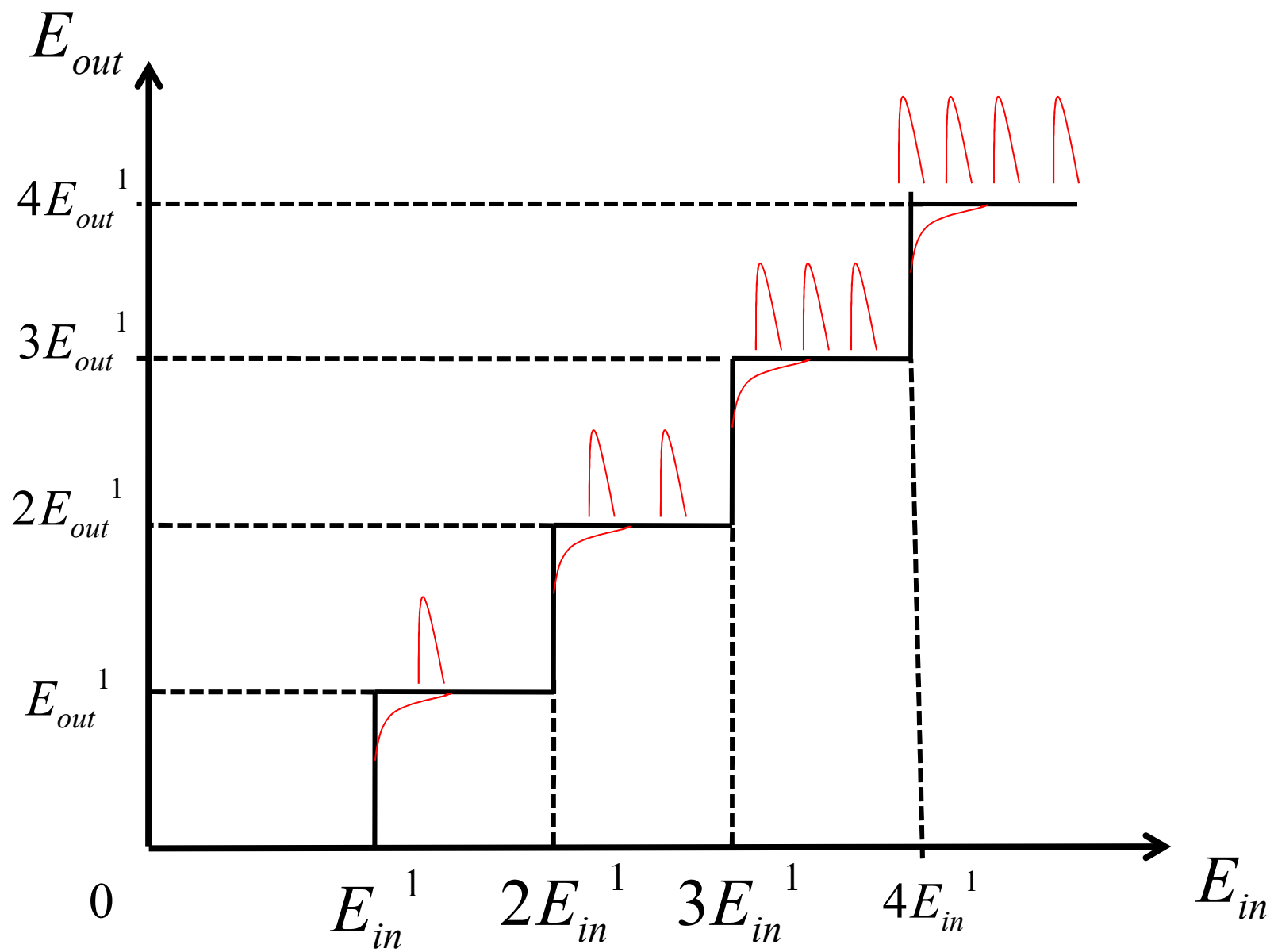
腔内光强迅速减小到低于 I_s ，可饱和吸收体又恢复了高吸收特性，开关关闭。

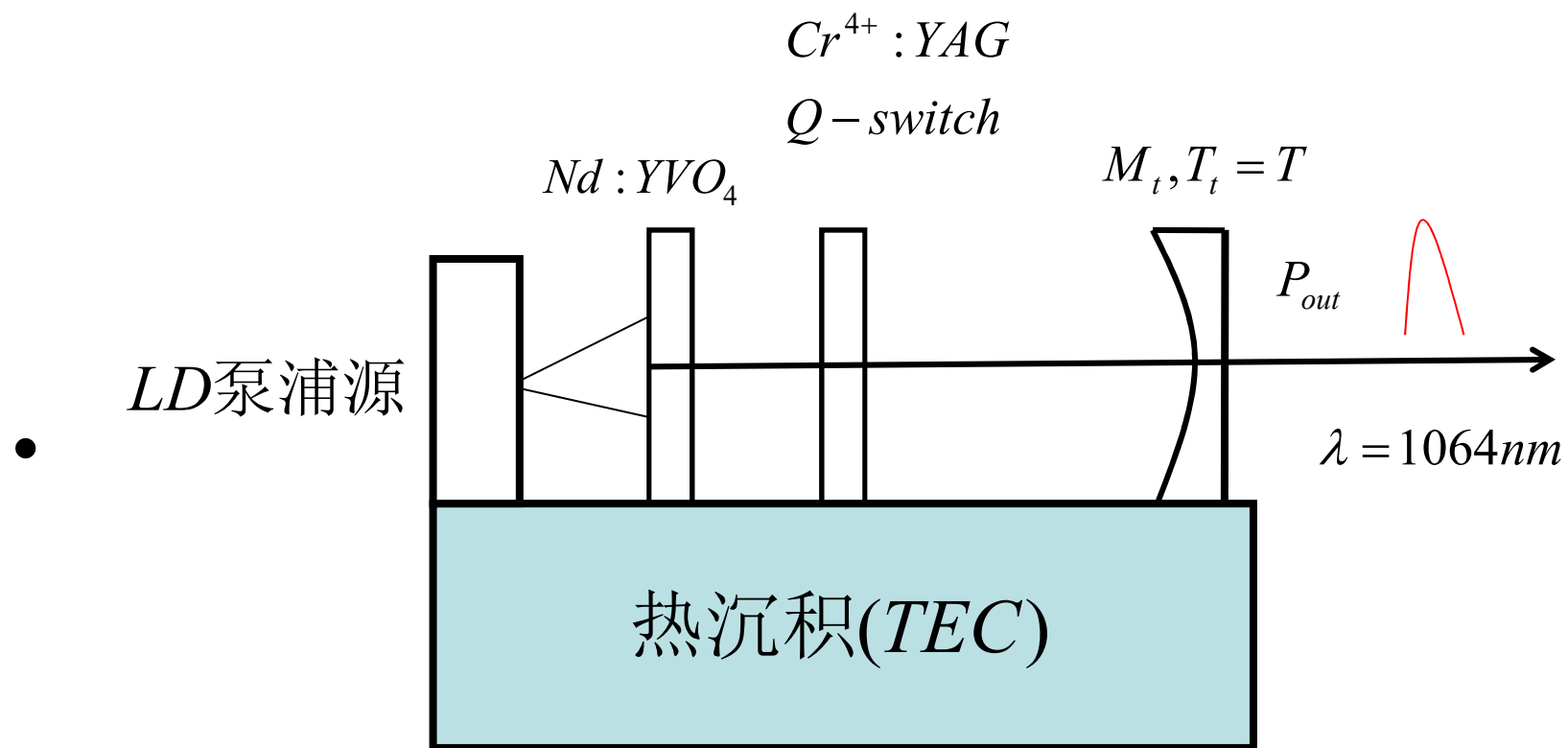
如果此时脉冲泵浦结束，则只有一个调Q脉冲输出。

如果脉冲泵浦继续，只有增大到一定程度才能再次使可饱和吸收体“漂白”，产生第二个脉冲。

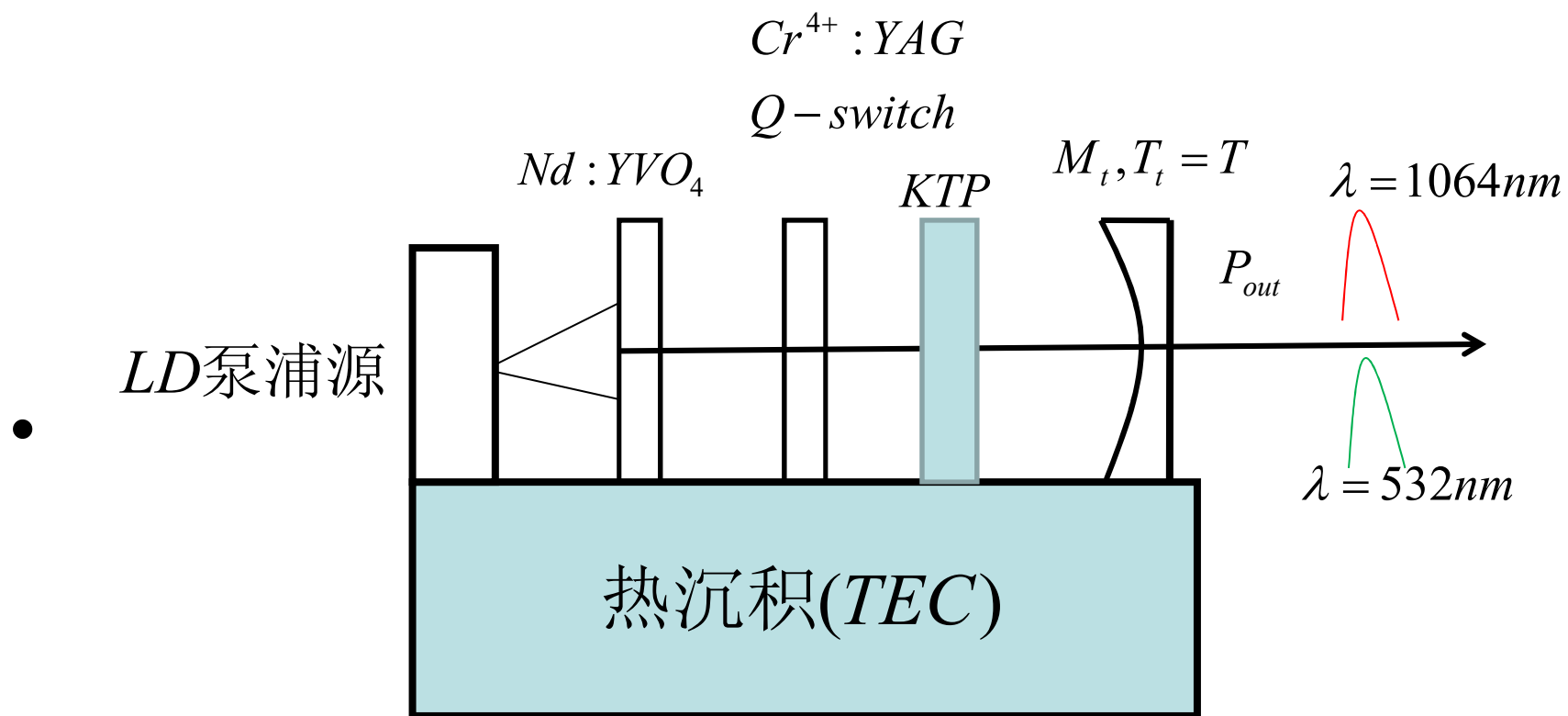
导致可饱和吸收体调Q的输出-输入能量特性曲线呈现台阶特性。

如下图所示。

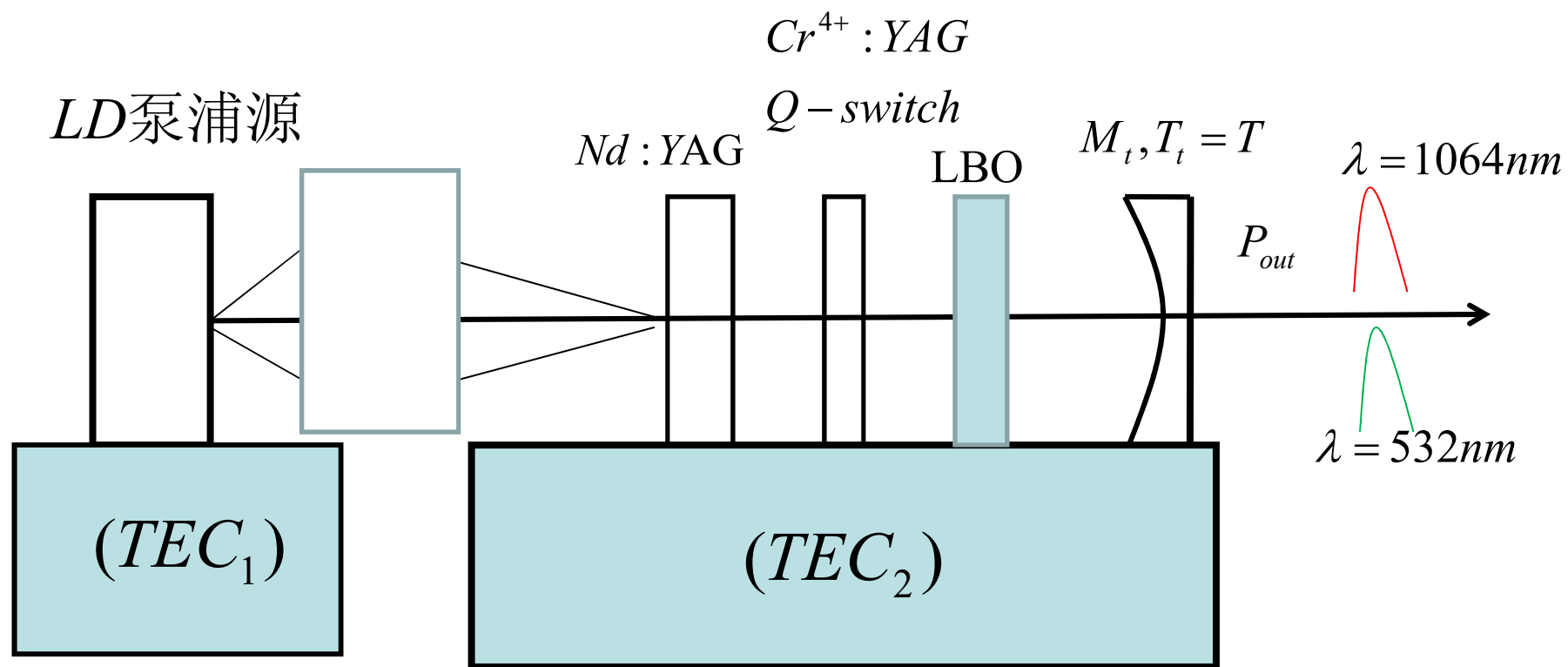




$Nd:YVO_4 / Cr^{4+}:YAG$ 结构被动调Q红外激光器



$Nd:YVO_4 / Cr^{4+}:YAG / KTP$ 结构被动调 Q 绿光激光器



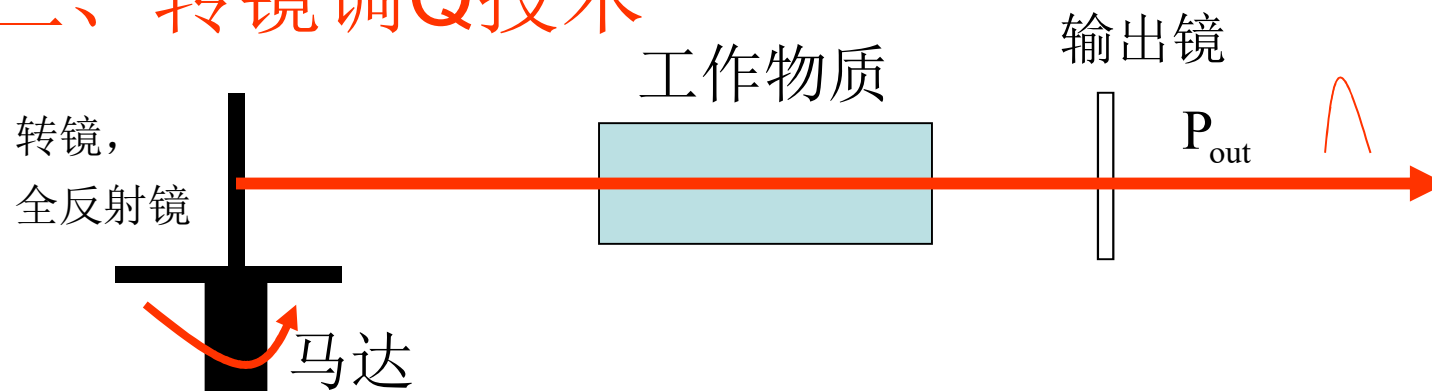
$Nd:YAG / Cr^{4+}:YAG / LBO$ 结构被动调Q绿光激光器

- 关于调Q多脉冲问题
- 关于 T_0 , T_1 .

脉冲能量：几十--几百 mJ ,

脉冲宽度：几--几十 ns ,

三、转镜调Q技术



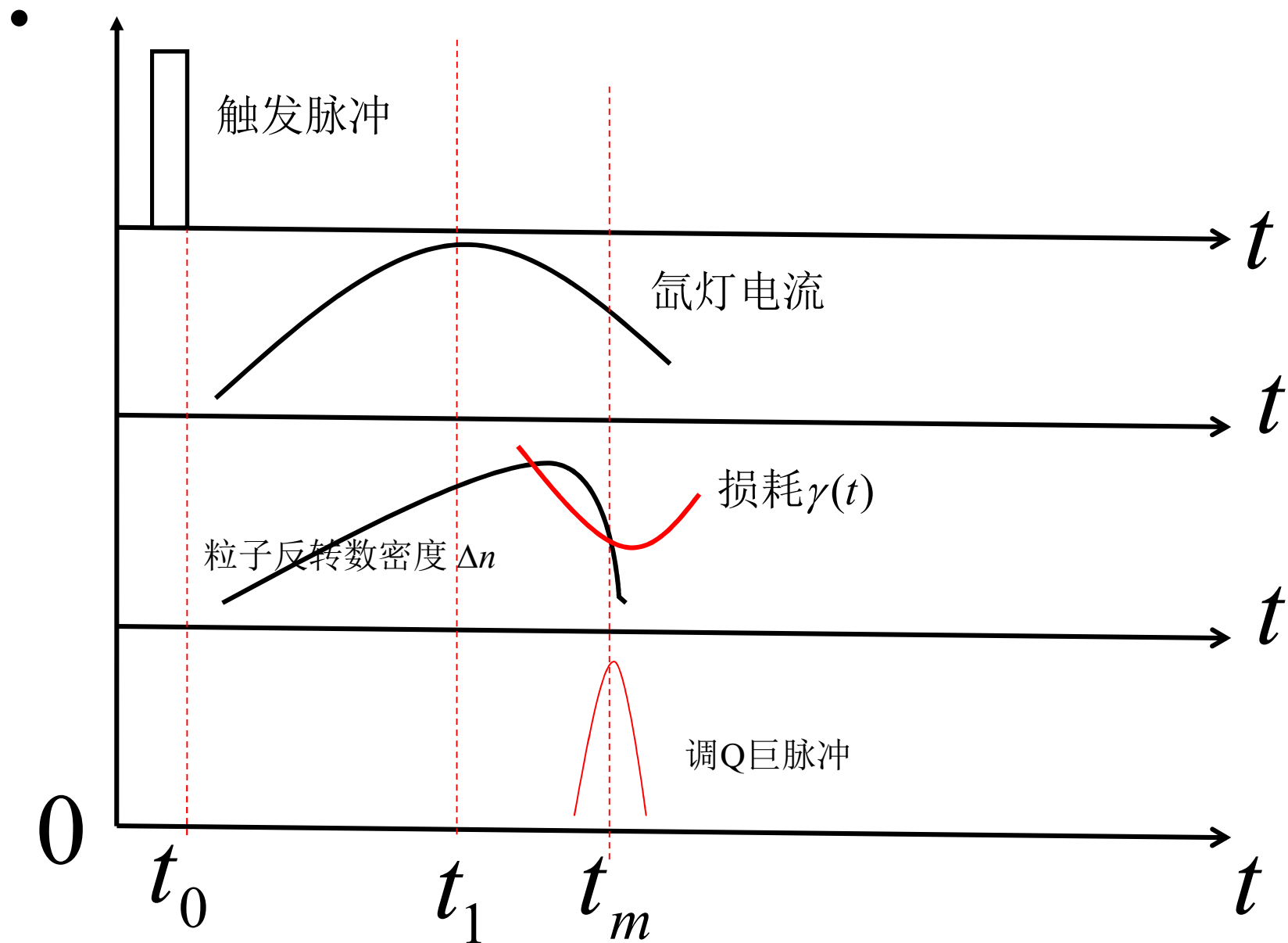
转镜在正常位置时,其法线与谐振腔轴平行,当转镜法线与谐振腔轴线成 θ 角时,谐振腔损耗:

$$\gamma_{\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\theta L}{r} \right)^2, L \text{ 腔长, } r \text{ 工作物质棒的半径。}$$

当 $\theta \leq \theta_s$ 时, 激光器满足阈值条件: $G \geq G_t = \frac{1}{2} \ln(1-T) + \gamma_{\theta} + \gamma_i$,

θ_s 称为开关角; γ_i 为其他损耗;

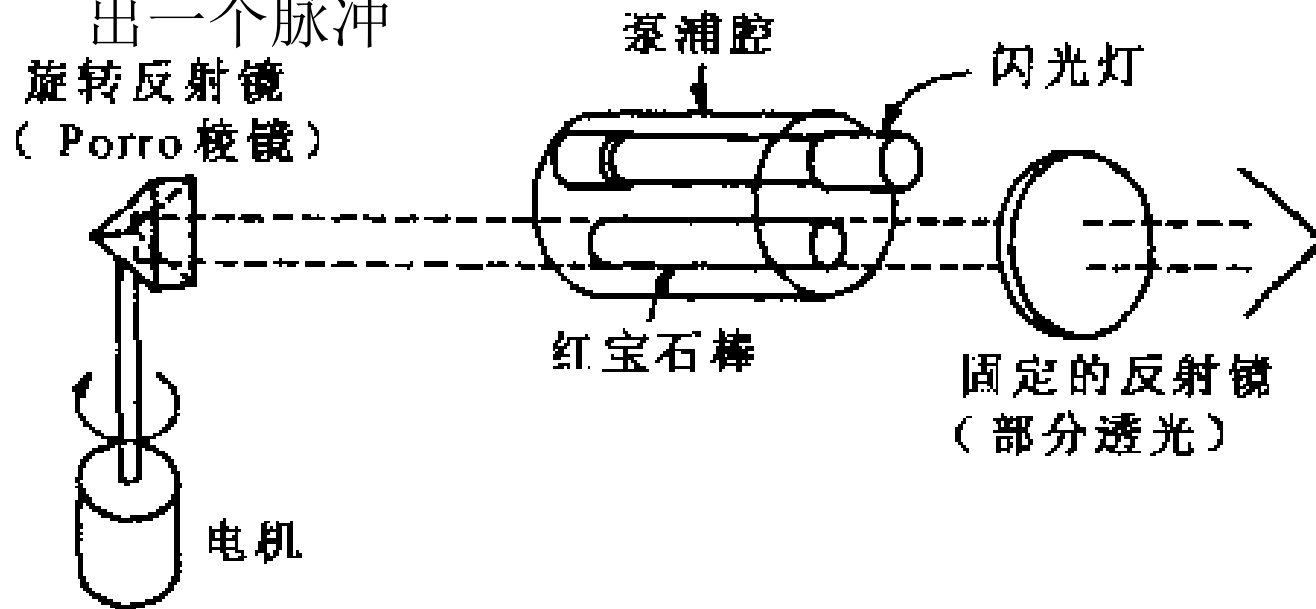
假设转镜的旋转角速度 为 ω , 时间 $t_s = \theta_s / \omega$,称为开关时间,
一般, 常用马达转速: 300 ~ 1000转/秒, 开关时间为微秒量级,
开关角 ~ 几分。



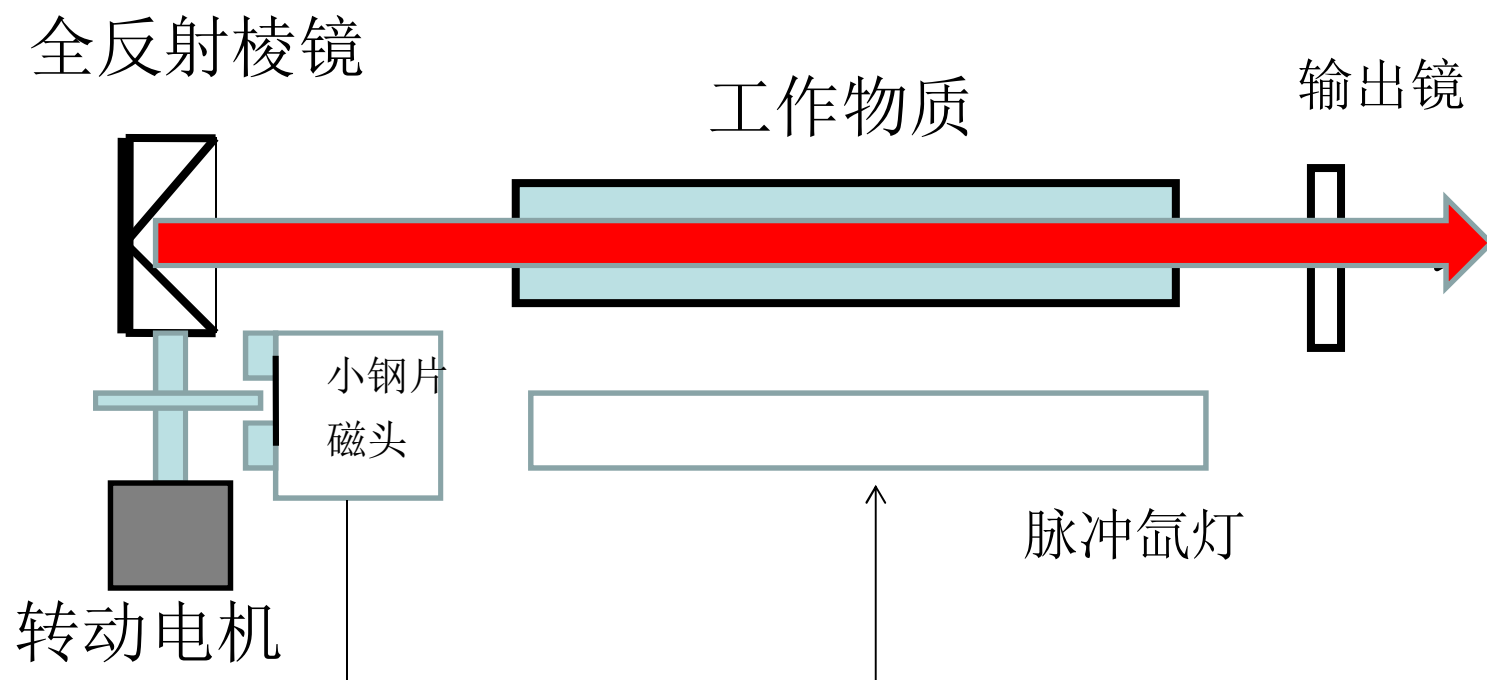
全反射用全反射棱镜，可提高稳定性

机械Q开关的设计基于光学元件的旋转、振动或平移
共同之处是在泵浦期间抑制激光产生，方法是截断光路，或使腔镜不对准，或降低谐振腔一个反射镜的反射率

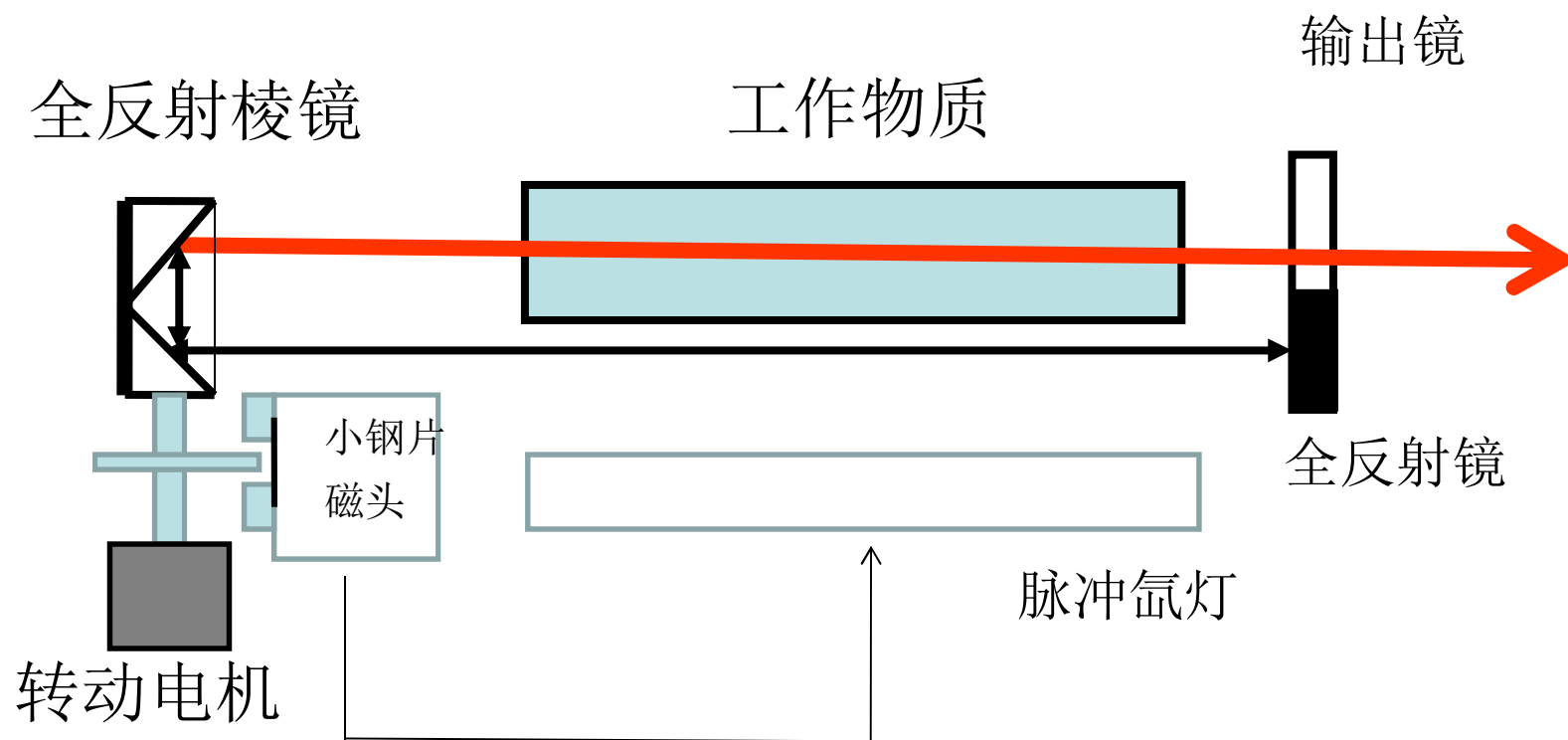
当闪光灯脉冲将结束时，如果激光棒中已储存有最大的能量，就将建立起高Q值条件，使激光器发射出一个脉冲



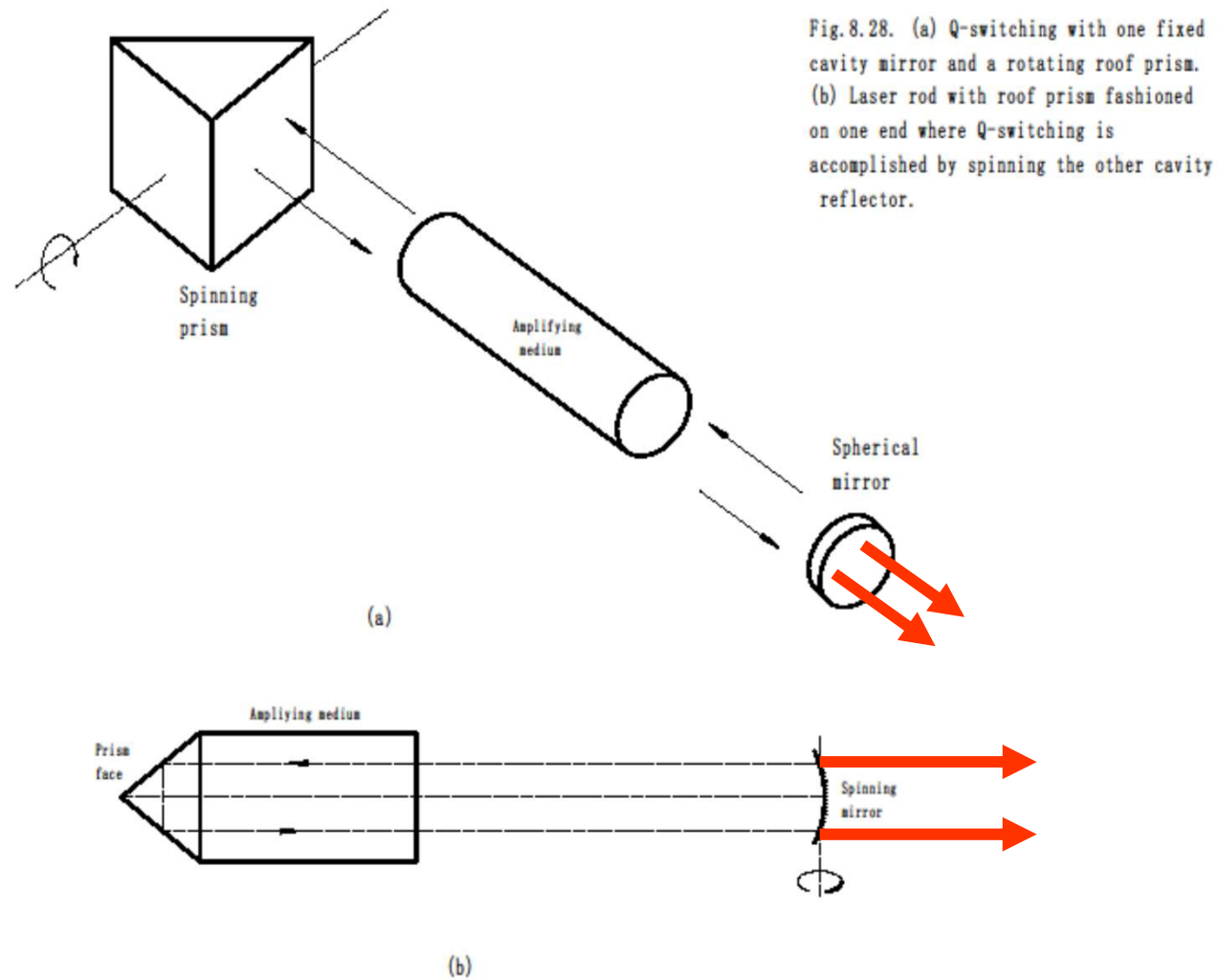
全反射用全反射棱镜，可提高稳定性



加速光路



转镜调Q技术



转孔或转薄膜调Q技术

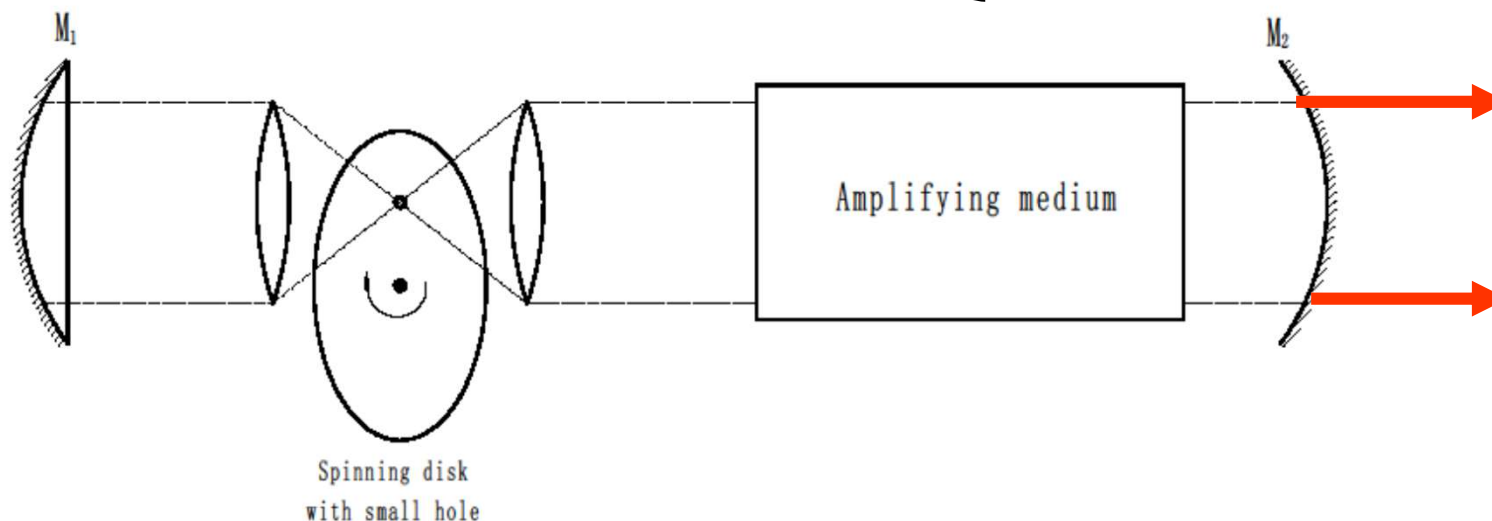


Fig.8.27. Rotating intracavity wheel with a hole for Q-switching.

克尔盒Q开关、受激布里渊散射Q开关、
自聚焦被动Q开关等调Q技术(简述)

