

5.被动锁模激光器

(1)可饱和吸收体的被动锁模

(a)频域理论的描述：（频域内的耦合模方程理论的描述）

◆饱和吸收体的可近似用一个二能级系统描述

◆设： $\rho(\nu)$ 为腔内的光子密度；

◆对于可饱和吸收体，入射光 $\rho(\nu)$ 激发了两个过程：

5.被动锁模激光器

◆ $\psi_1 \rightarrow \psi_2$ 受激吸收引起的减少：

$$\left[\frac{d\rho(\nu, z)}{dt} \right]_{\text{吸收}} = -N_1 \rho(\nu, z) g(\nu) B_{12} h\nu = -N_1 \rho(\nu, z) g(\nu) \frac{g_2}{g_1} B_{21} h\nu \dots\dots (49)$$

◆ $\psi_2 \rightarrow \psi_1$ 受激发射产生的光子密度的增加：

$$\left[\frac{d\rho(\nu, z)}{dt} \right]_{\text{发射}} = N_2 \rho(\nu, z) g(\nu) B_{21} h\nu \dots\dots (50)$$

5.被动锁模激光器

◆ $\rho(\nu, z)$ 按时间的总变率应为

$$\frac{d\rho(\nu, z)}{dt} = \left[\frac{d\rho(\nu, z)}{dt} \right]_{\text{吸}} + \left[\frac{d\rho(\nu, z)}{dt} \right]_{\text{发}} = -\left(\frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) \rho(\nu, z) g(\nu) B_{21} h\nu$$

◆ 在时间 dt 内，经路程 $dz = \frac{c}{\mu} dt \approx cdt$ 。

◆ 所以， $\rho(\nu, z)$ 沿 z 方向的变率：（设上下能级的统计权重相等 $g_1 = g_2$ ）

$$\frac{d\rho(\nu, z)}{dt} = -(N_1 - N_2) \rho(\nu, z) g(\nu) B_{21} \frac{h\nu}{C}$$

5. 被动锁模激光器

◆ 积分，得：

$$\int_{z_0}^z \frac{d\rho(\nu, z)}{\rho(\nu, z)} = - \int_0^z (N_1 - N_2) \rho(\nu, z) g(\nu) B_{21} \frac{h\nu}{C} dz$$
$$\rho(\nu, z) = \rho_0(\nu) e^{-(N_1 - N_2) g(\nu) B_{21} \frac{h\nu}{C} z} \dots\dots (51)$$

◆ 跟介质吸收Beer's law $I(\nu) = I_0 e^{-\alpha(\nu)z}$

比较得到吸收系数的微观参量表述为：

$$\alpha(\nu) = (N_1 - N_2) g(\nu) B_{21} \frac{h\nu}{C} \dots\dots (52)$$

5.被动锁模激光器

- ◆当光强 $\rho(\nu)$ 很大时, N_1 减少而 N_2 增大, 吸收不再呈线性。
- ◆当 $N_1 \approx N_2$ 时, 介质变成全透明-----这就呈现吸收 (跃迁) 的饱和。对于比较容易达到这种状态的介质, 称为 “**可饱和吸收体**”

5.被动锁模激光器

- ◆把可饱和吸收体以适当的浓度放入激光腔中，腔内的光子的分布在时间上存在起伏。光经饱和吸收体吸收一次以及工作物质的放大一次后，强度起伏的极大与极小间的差异获得扩展。
- ◆再吸收、放大一次进一步扩展。显然，这种过程使脉冲变窄，强弱对比加大。最初只有增益区中间的波长起振，随着饱和染料的透明度增加，将两侧的纵模也激励起来。---(为什么?)

5.被动锁模激光器

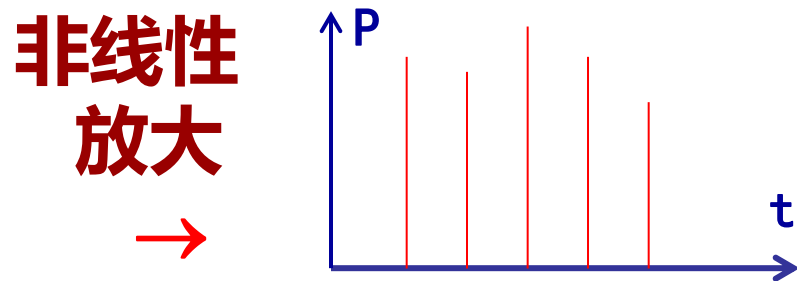
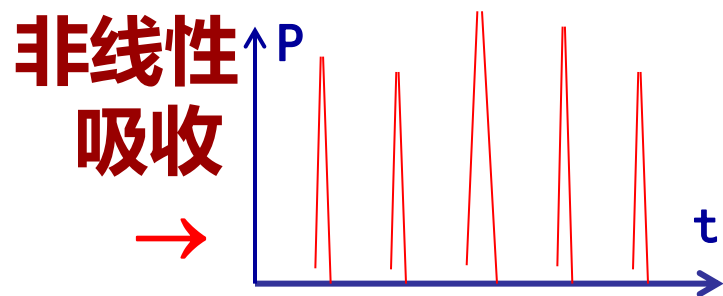
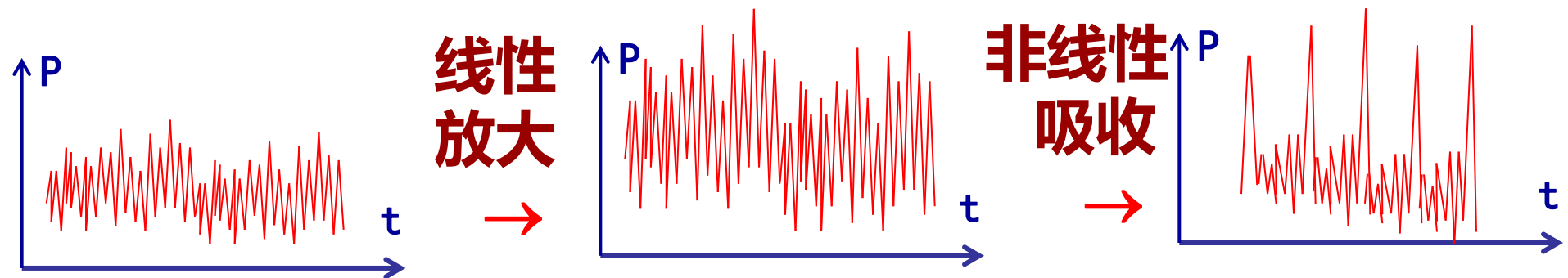
◆被动锁模脉冲形成的三个物理阶段：

(a) 线性放大阶段：自发辐射荧光产生-----超过
阈值时，荧光宽光谱的和随机相位的初始激光脉冲
-----干涉导致光强度起伏-----在周期 $2L/c$ 内，
光脉冲通过饱和吸收体，强的吸收少，弱的吸收多；
在增益介质中得到**线性放大**，使频谱变窄。

5.被动锁模激光器

(b)非线性吸收阶段：增益是线性的，但强脉冲使饱和吸收体呈现非线性吸收，即强脉冲得到快速增长，弱脉冲被抑制，使**发射脉冲变窄，谱线增宽**。

(c) 非线性放大阶段：选择出的强脉冲不但使饱和吸收体饱和，而且使增益介质增益饱和，进入非线性放大阶段，其结果使**脉冲前后沿变陡，脉冲变窄**，小脉冲几乎完全抑制，输出**高强度窄脉冲，谱线增宽**。



被动（饱和吸收体）锁模物理过程

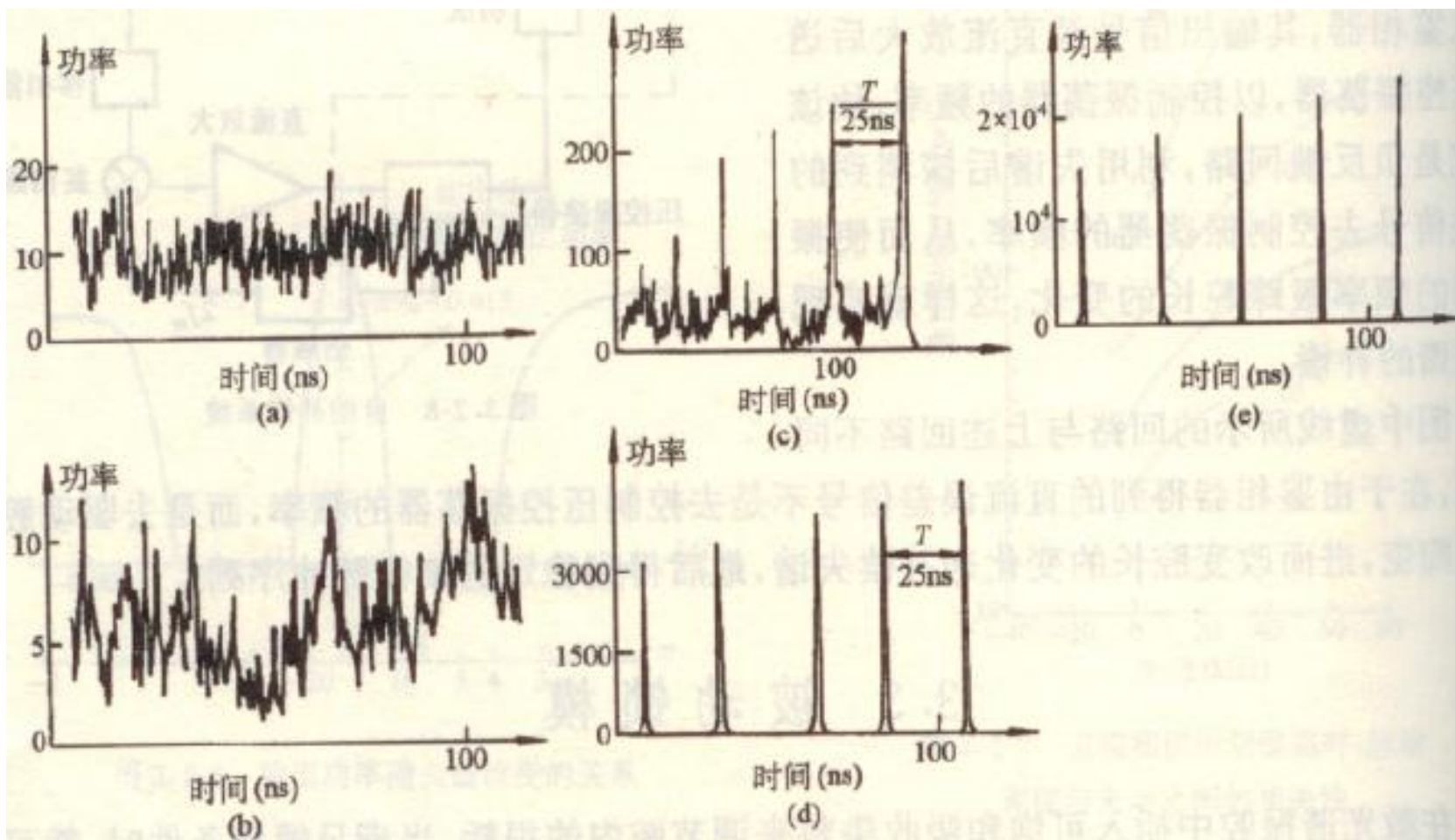


图 3.3-2 可饱和染料锁模物理过程

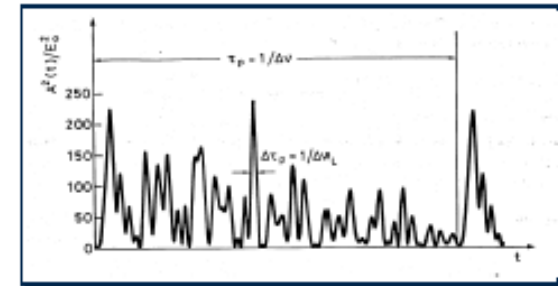
5. 被动锁模激光器

Mode locking

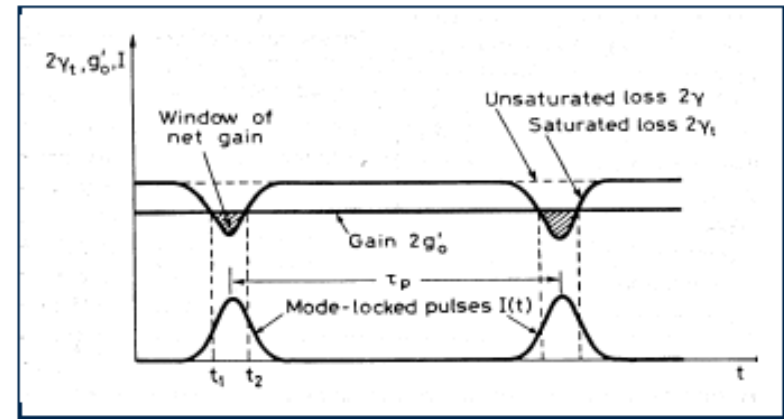
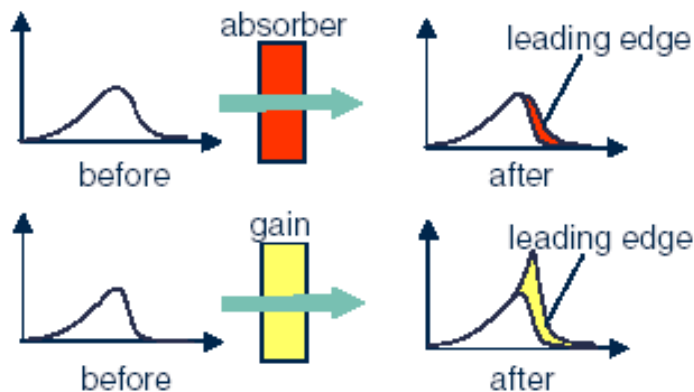
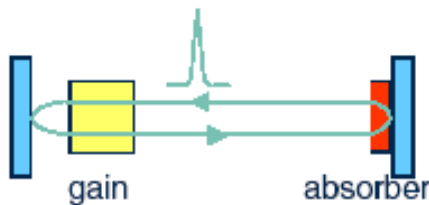
Passive mode locking

Saturable absorber (fast)

- ❖ low saturation intensity
- ❖ fast relaxation (\sim ps)
- ❖ dye molecules or semiconductor materials
- ❖ "survival of the fittest" principle



startin point: *noise*



被动调Q脉冲与被动锁模脉冲比较

◆可饱和吸收体调Q与锁模激光器结构完全一致

◆差别是：饱和吸收体的受激态寿命 τ_{sa} （弛豫时间）

与激光器可能产生的极限脉冲宽度 $\tau_p = 1/\Delta\nu$

（ $\Delta\nu$ 是激光器工作物质的增益线宽）相对大小不同。

被动调Q脉冲与被动锁模脉冲比较

调Q要求： $\tau_{sa} \gg \tau_p$

如：染料BDN的

$$\tau_{sa} = 2 \times 10^{-9} s = 2 ns$$

Nd:YAG的

$$\tau_p = 8 \times 10^{-11} s = 80 ps$$

被动调Q脉冲与被动锁模脉冲比较

Q脉冲形成过程：

某最大尖峰使染料一旦饱和，透明开关打开，所有随机起伏的噪声（在最大尖峰之后的小尖峰）均在腔内畅通无阻，得到放大，随后受激粒子数减少而变弱---这个过程的包络即形成Q脉冲

被动调Q脉冲与被动锁模脉冲比较

锁模要求： $\tau_{sa} \ll \tau_p$

如：染料五甲川、十一甲川、Kodark9740的，

$$\tau_{sa} \approx 8 \times 10^{-12} s = 8 ps$$

Nd:YAG的

$$\tau_p = \frac{1}{\Delta\nu} = 8 \times 10^{-11} s = 80 ps$$

被动调Q脉冲与被动锁模脉冲比较

锁模脉冲的形成过程：

某**最大尖峰**使染料一旦饱和，腔在开状态，该尖峰光穿越染料，腔随机在关状态，直至该尖峰脉冲在腔内往返一周，且经工作物质放大后再次经过染料时，腔再次打开。**腔内损耗周期调制（频率等于纵模间距）**。激发了参与振荡的各纵模相位锁定，因此输出脉冲宽度为

$$\tau_p = 1 / \Delta \nu$$

被动调Q脉冲与被动锁模脉冲比较

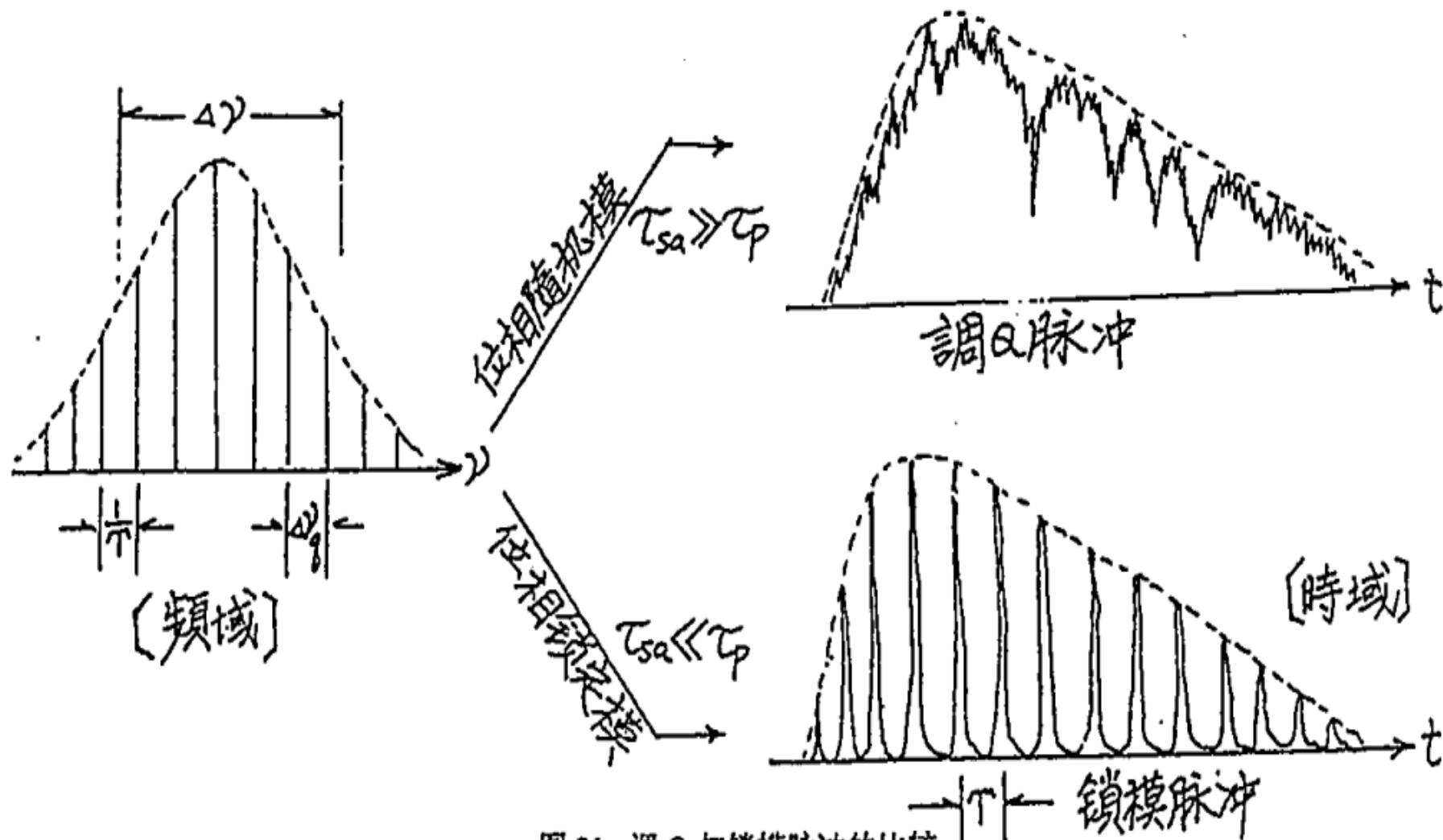


图 21. 调 Q 与锁模脉冲的比较

被动锁模激光脉冲形成过程

时域理论描述

(一) 线性吸收和放大阶段

饱和吸收体达到饱和的光强比腔内开始振荡的光强度高几个量级，开始腔内噪声起伏获得放大，超过阈值后受激发射占优，位相随机的各纵模相继建立振荡，放大大于吸收，中央振荡模增益高，光强增长特别快（区域（I））。

导致激光振荡功率谱变宽（时间谱平滑加宽）

被动锁模激光脉冲形成过程

(二) 非线性吸收阶段：

- **工作物质增益是线性的。**腔内光场达到饱和吸收体饱和光强，最早建立的强尖峰脉冲漂泊了饱和吸收体，其强度迅速增长；相反弱尖峰被压抑。
- **同时，强脉冲通过饱和吸收体时，脉冲前沿受到较多吸收而变陡。**由于饱和恢复时间比脉冲宽度小很多，漂白后瞬即恢复吸收，脉冲后沿被吸收导致压缩(区域(II),(III))。

总效果脉冲变窄（功率谱平滑加宽）

被动锁模激光脉冲形成过程

(三) 非线性放大阶段：

光强增大到一定程度，工作物质放大率也进入非线性阶段。弱背景小脉冲被完全抑制掉。仅输出一个窄脉冲，消耗掉大量的反转粒子数(区域(III))。

总效果脉冲变窄（功率谱平滑加宽）

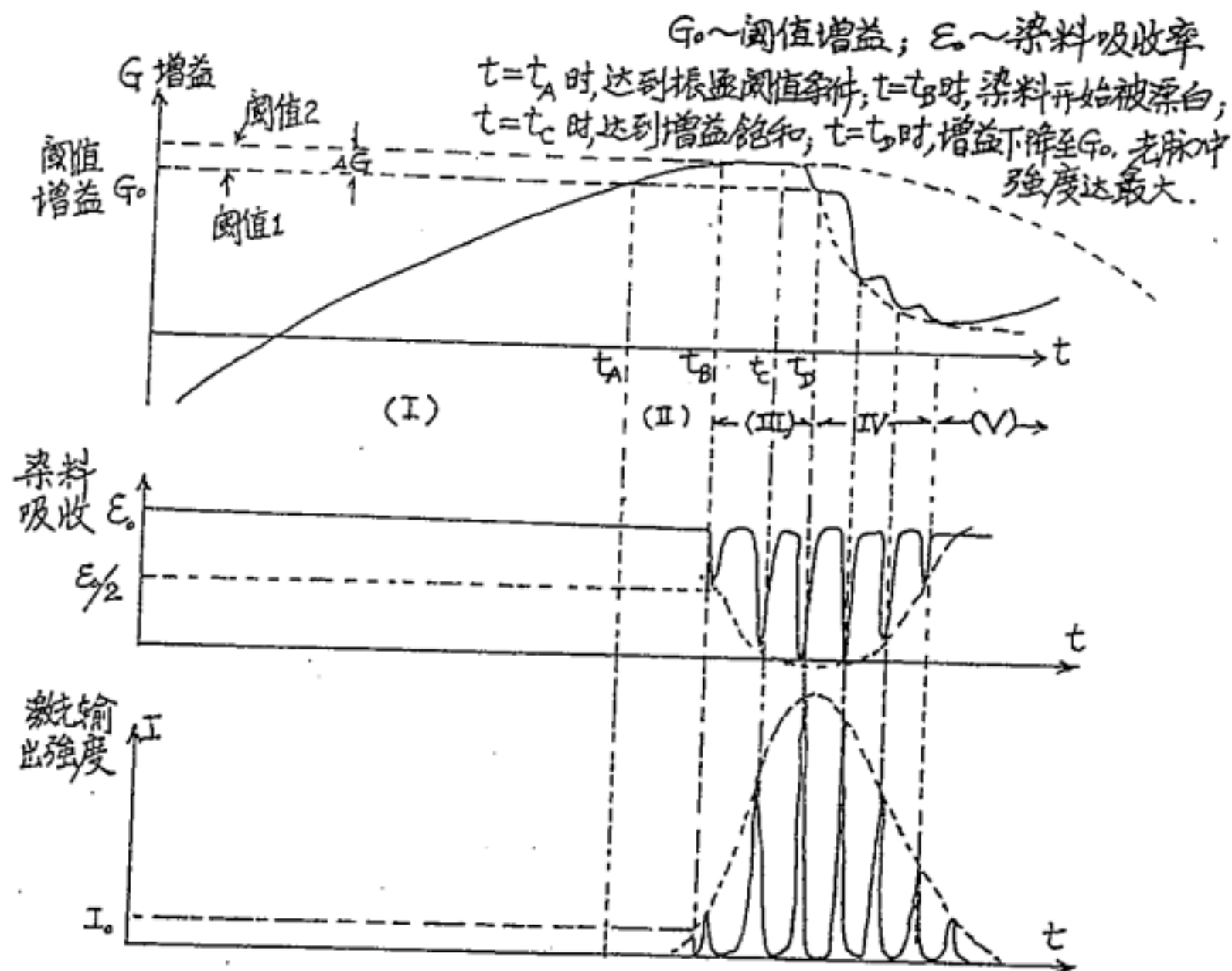


图 22. 被动锁模激光器的增益、吸收和输出的相互关系
 一个锁模过程的完成

5.被动锁模激光器

高稳定性的超短脉冲锁模激光器设计应注意：

- ◆ 饱和吸收谱线与激光增益谱线相匹配，且不小于增益线宽。---与调Q不同在哪里？
- ◆ 饱和吸收体具有适当的饱和光强和静态透过率，以及高的抗光损伤阈值，其上能级寿命要远小于 $2L/c$ （为什么？）

5.被动锁模激光器

(2) 饱和吸收体-----SESAM半导体可饱和吸收镜

其饱和吸收损耗可用于纵模相位锁定：

- 脉冲的前后沿强度低，吸收不饱和，大部分能量被吸收，脉冲中心部分吸收体达到饱和，大部分能量被返回到谐振腔内。
- 由于脉冲前后沿被吸收，脉冲宽度在反射过程中被压缩。

5.被动锁模激光器

(2) 饱和吸收体----SESAM半导体可饱和吸收镜

◆ **调制深度**：指脉冲能量注入半导体可饱和吸收体时，反射率的最大变化量。

一般说来：

- 调制深度越大，锁模自启动越容易，锁模越容易实现，可获得的脉冲越窄。调制深度越大，会使吸收过多，非饱和损耗过大，从而降低 SESAM 的损伤阈值；**为什么？**
- 调制深度过小，会使得调制过程中，脉宽变化比较慢，达到饱和的时间较长，不利于锁模的实现，但是**较小的调制深度意味着较小（较大？）的饱和损耗，也就意味着较高的损耗阈值（为什么？）。**

5.被动锁模激光器

(2) 饱和吸收体----SESAM半导体可饱和吸收镜

◆ **恢复时间**：指吸收体从达到饱和时的漂白状态恢复到可饱和吸收状态所需的时间。其包括三个吸收体的本征时间：

- 带内载流子的相干时间(coherent carrier dynamics)、
 - 带内子带间的热平衡时间(intraband thermalization)、
 - 带间跃迁和复合时间(carrier recombination) ,
- **相干时间、热平衡时间约为10 ~ 100fs**：维持和稳定飞秒脉冲。
 - **带间跃迁和复合时间为皮秒或纳秒量级**：启动飞秒脉冲或直接产生皮秒脉冲。

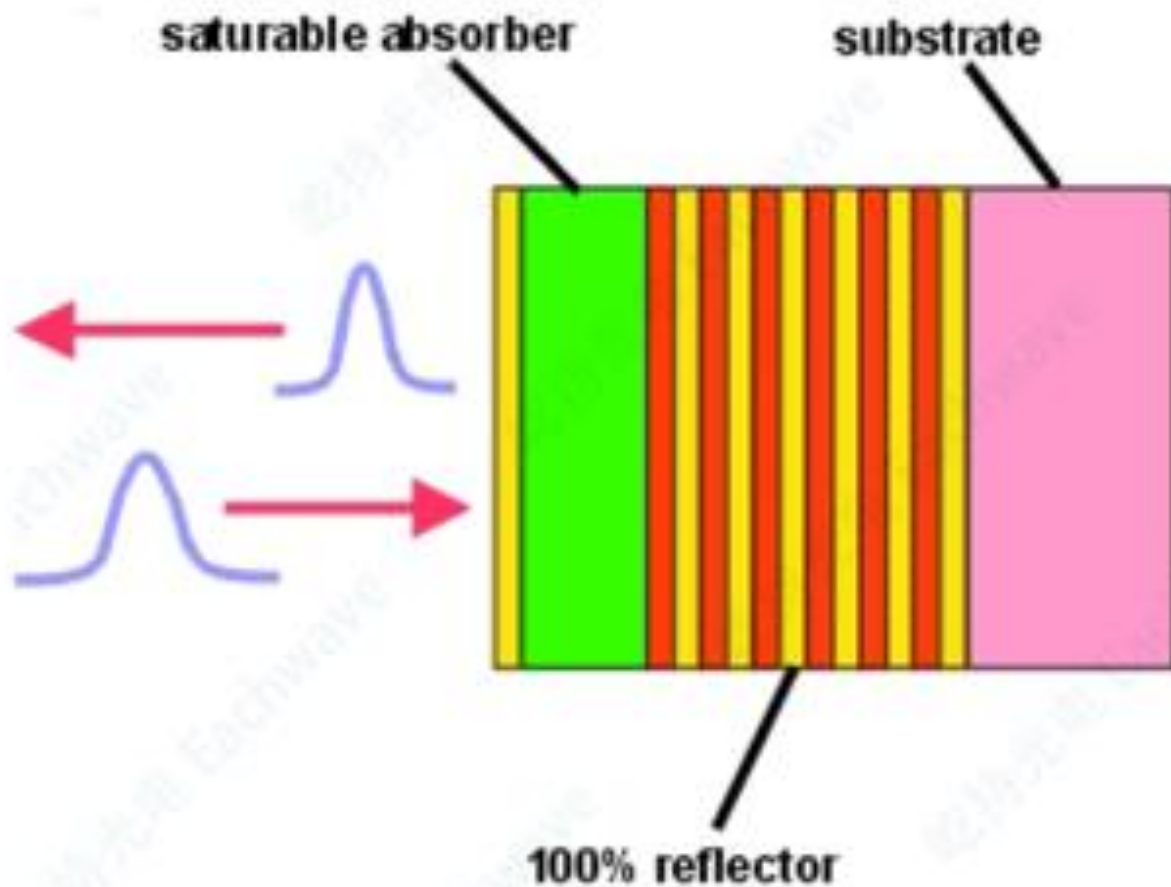
5.被动锁模激光器

(2) 饱和吸收体----SESAM半导体可饱和吸收镜

- ◆ **饱和通量**：饱和通量越低，越容易饱和及锁模。
- ◆ **饱和光强**：是指恢复时间里单位时间内的饱和通量。
- ◆ **损伤阈值**：指能够使SESAM造成永久损伤的入射通量密度。
- ◆ **反射带宽**：指SESAM对入射光具有相对高反射率的带宽。一般反射带宽约为100nm

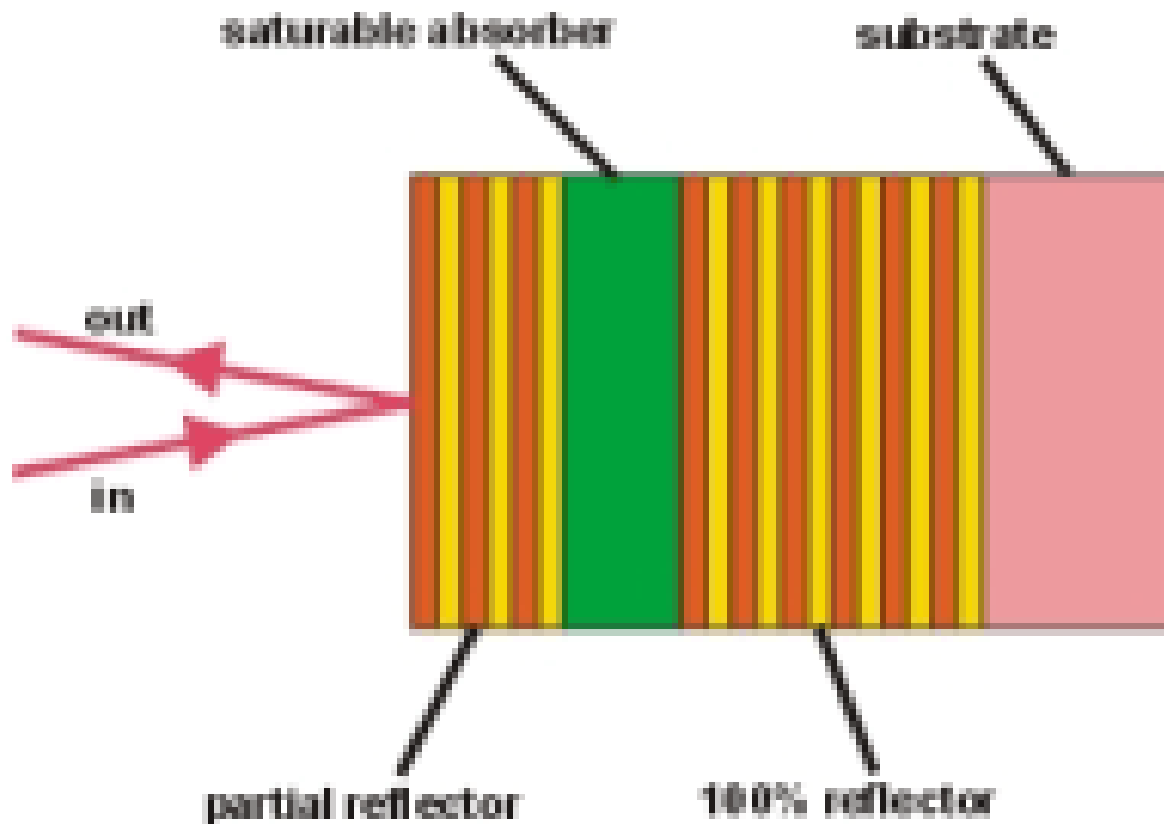
5. 被动锁模激光器

SESAM (半导体可饱和吸收镜)



5. 被动锁模激光器

RSAM (共振可饱和吸收镜)



5.被动锁模激光器

(3) 饱和吸收体----石墨烯

科学家发现二维原子结构表现出优越的可饱和吸收特性，例如石墨烯是高性能可饱和吸收体：

- ◆ 低饱和吸收光强度
- ◆ 宽波段可饱和吸收
- ◆ 可控的调制深度
- ◆ 光纤兼容

石墨烯饱和吸收体：基于石墨烯纳米片、石墨烯聚合物薄膜和石墨烯溶液等形式已被广泛用于产生锁模脉冲。

5. 被动锁模激光器

(4) 固体激光器的被动锁模

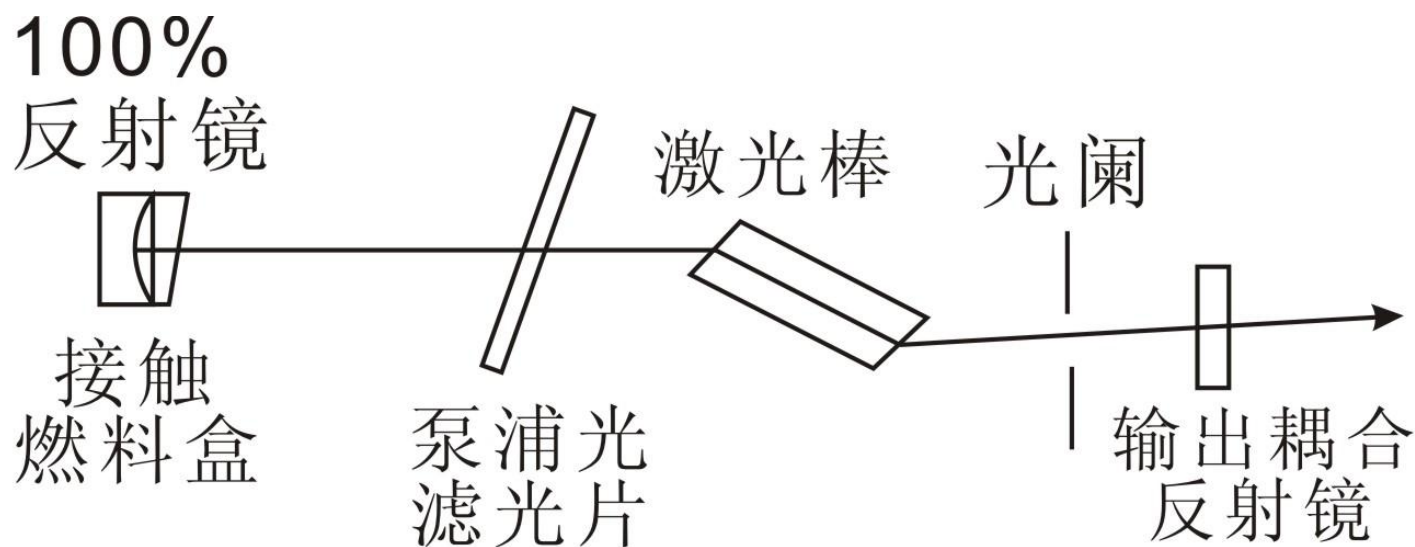
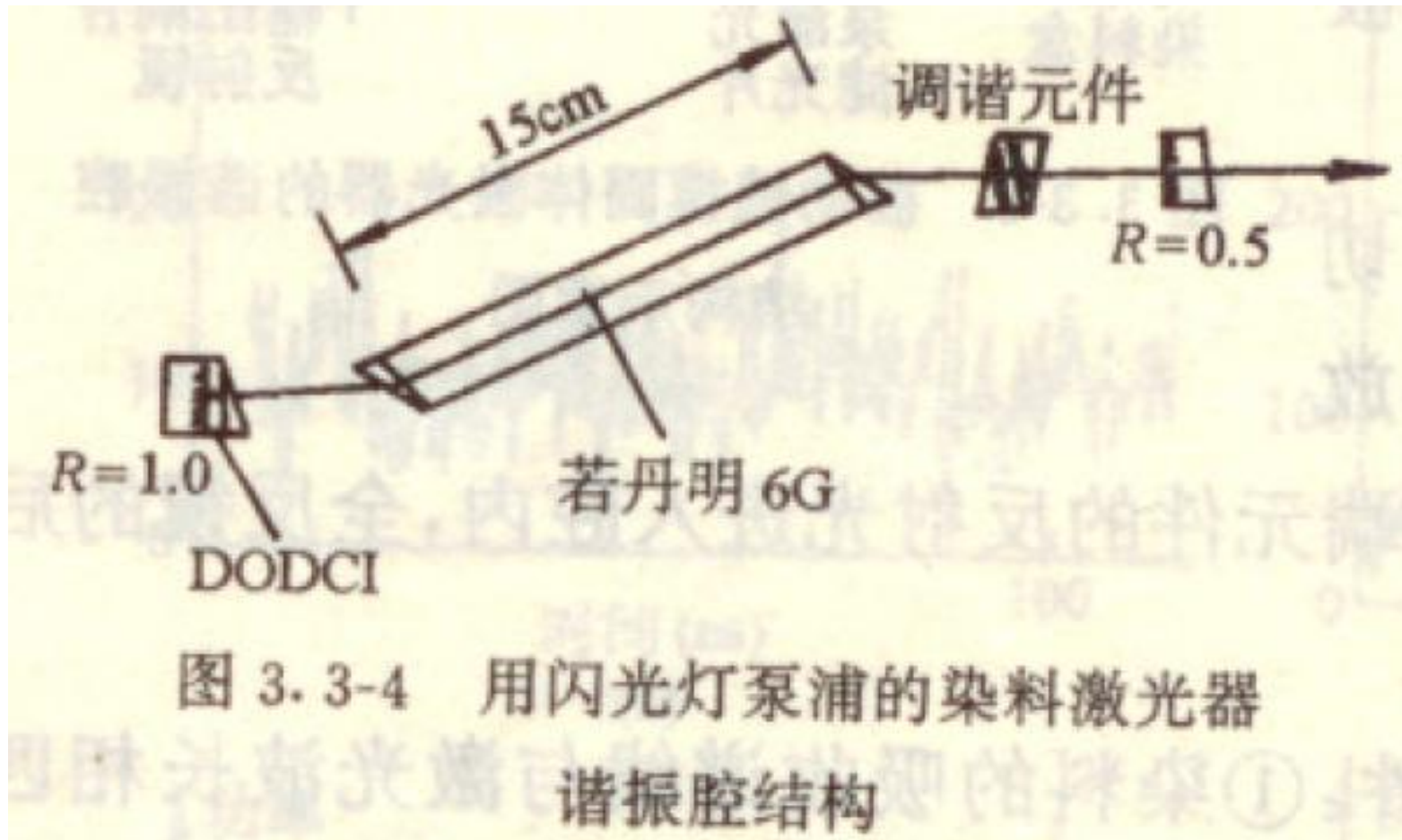


图3. 3-3 被动锁模固体激光器的谐振腔结构示意图

5.被动锁模激光器

(5) 染料激光器的被动锁模(锁模染料DODCI)



5.被动锁模激光器

(6) 对碰锁模激光器谐振腔：有多种形式

(A) 环形腔

(B) 非谐振环形

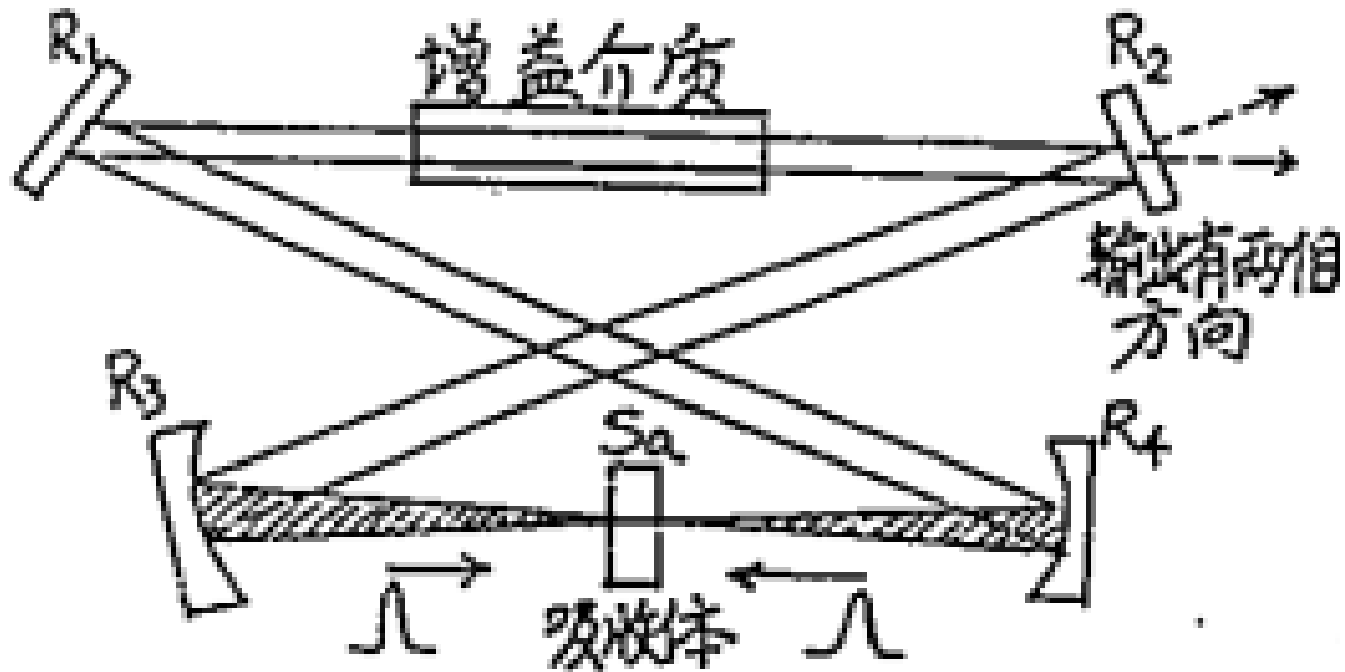
(C) 平面平行 (F-P) 腔

(D) 准线型腔等

工作物质是激光染料池或者薄膜

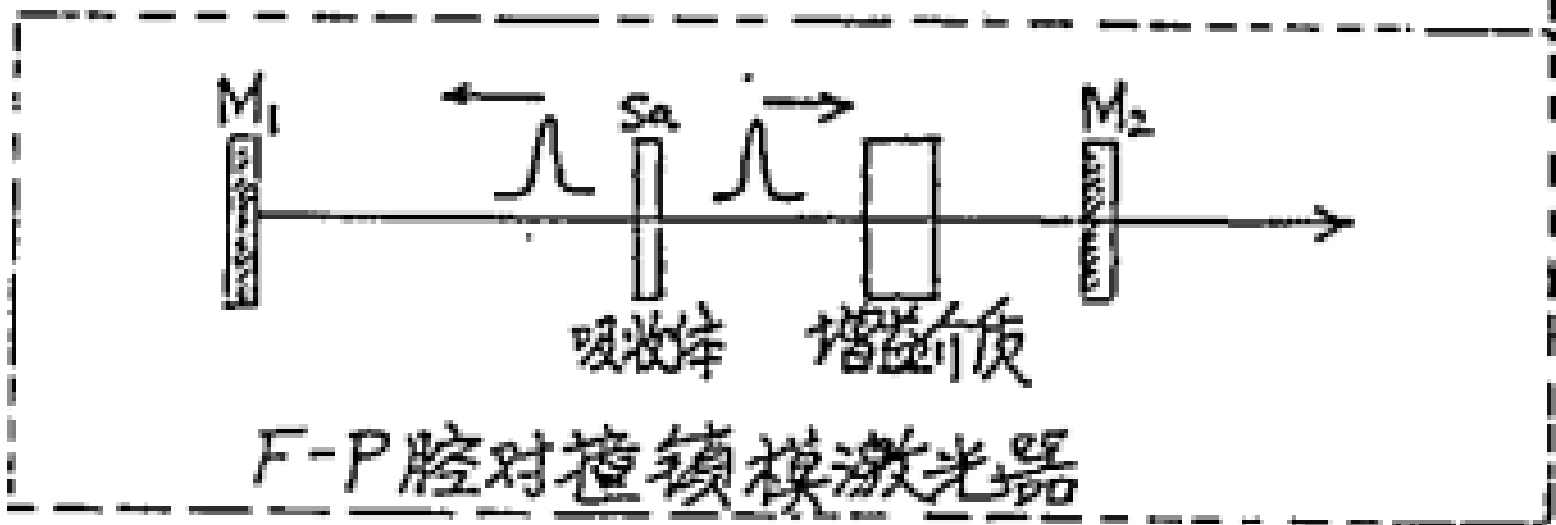
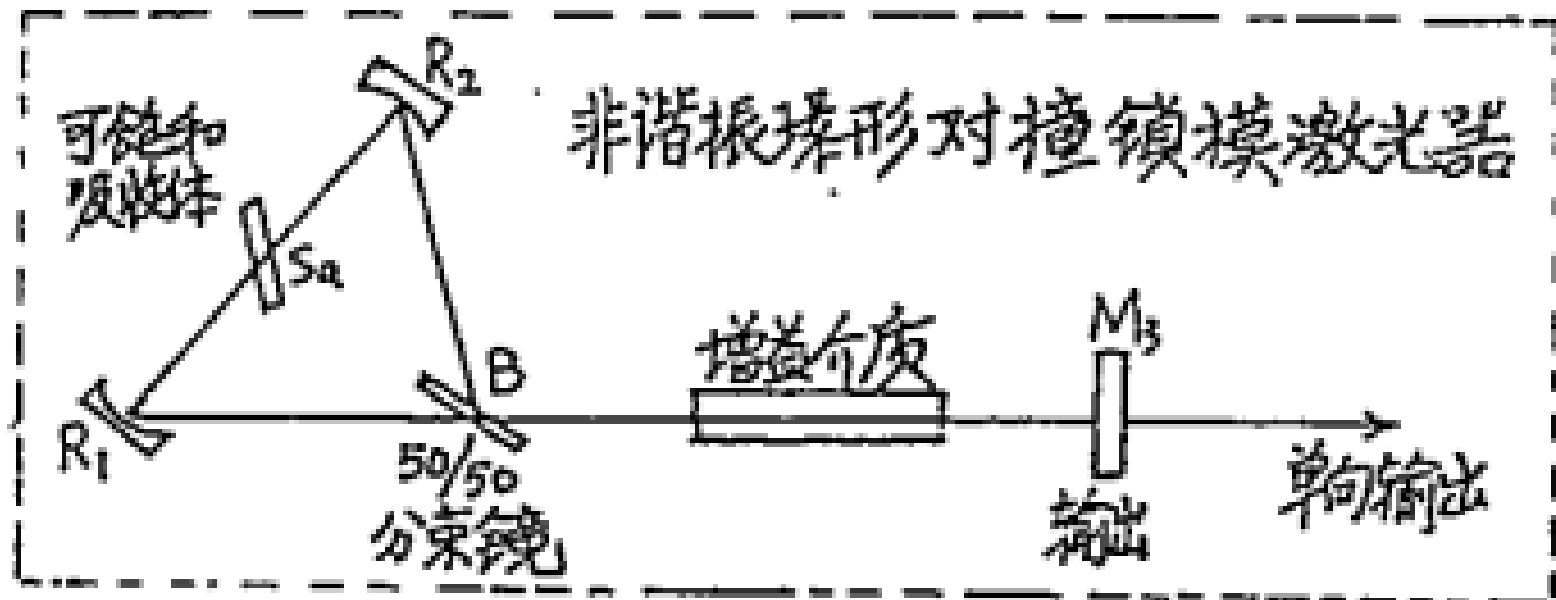
锁模饱和吸收体染料DODCI

(6)对碰锁模激光器（环形腔）

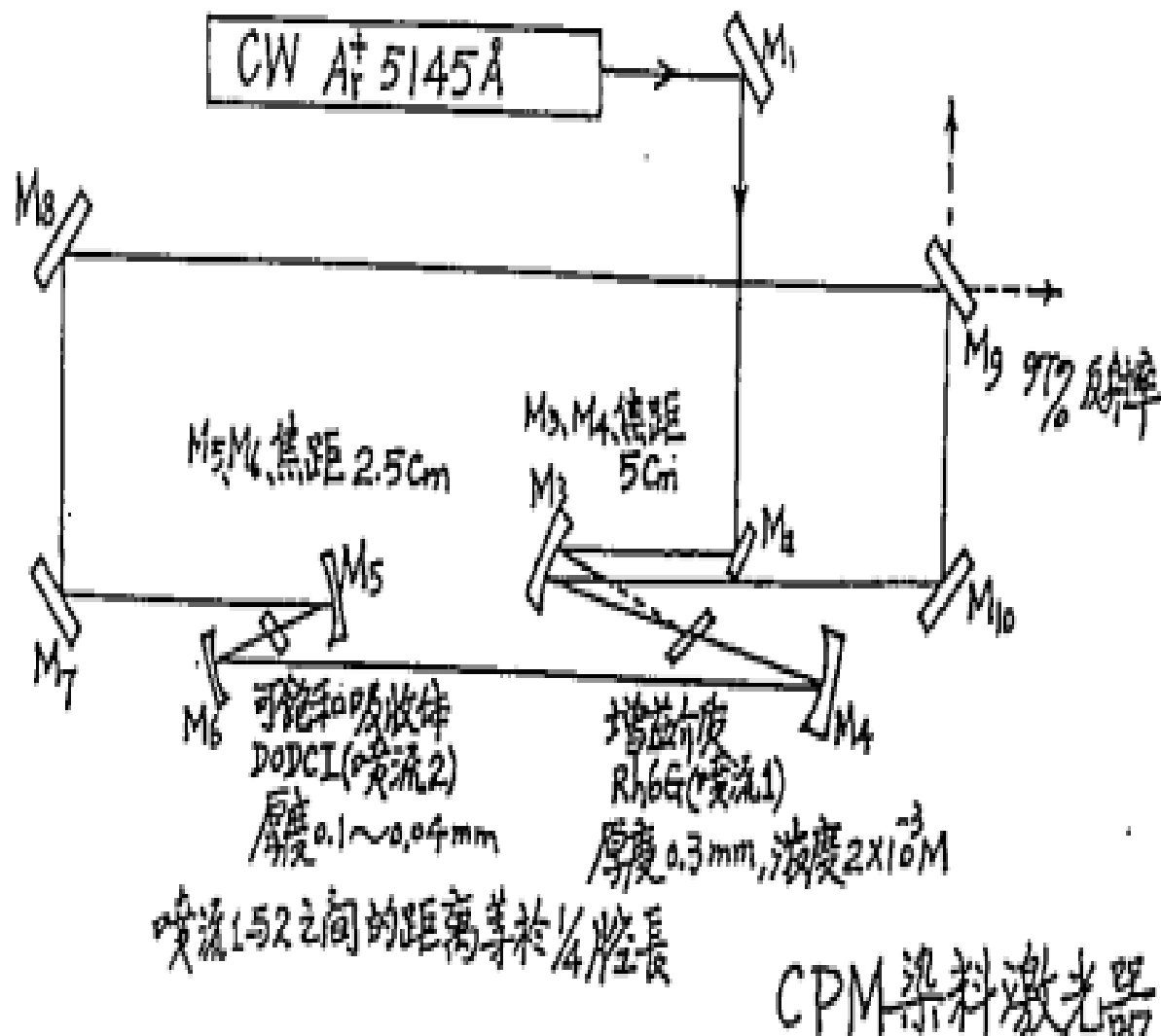


对撞锁模激光器 环形谐振腔
工作原理示意图

(6)对碰锁模激光器（非谐振环形与F-P腔）

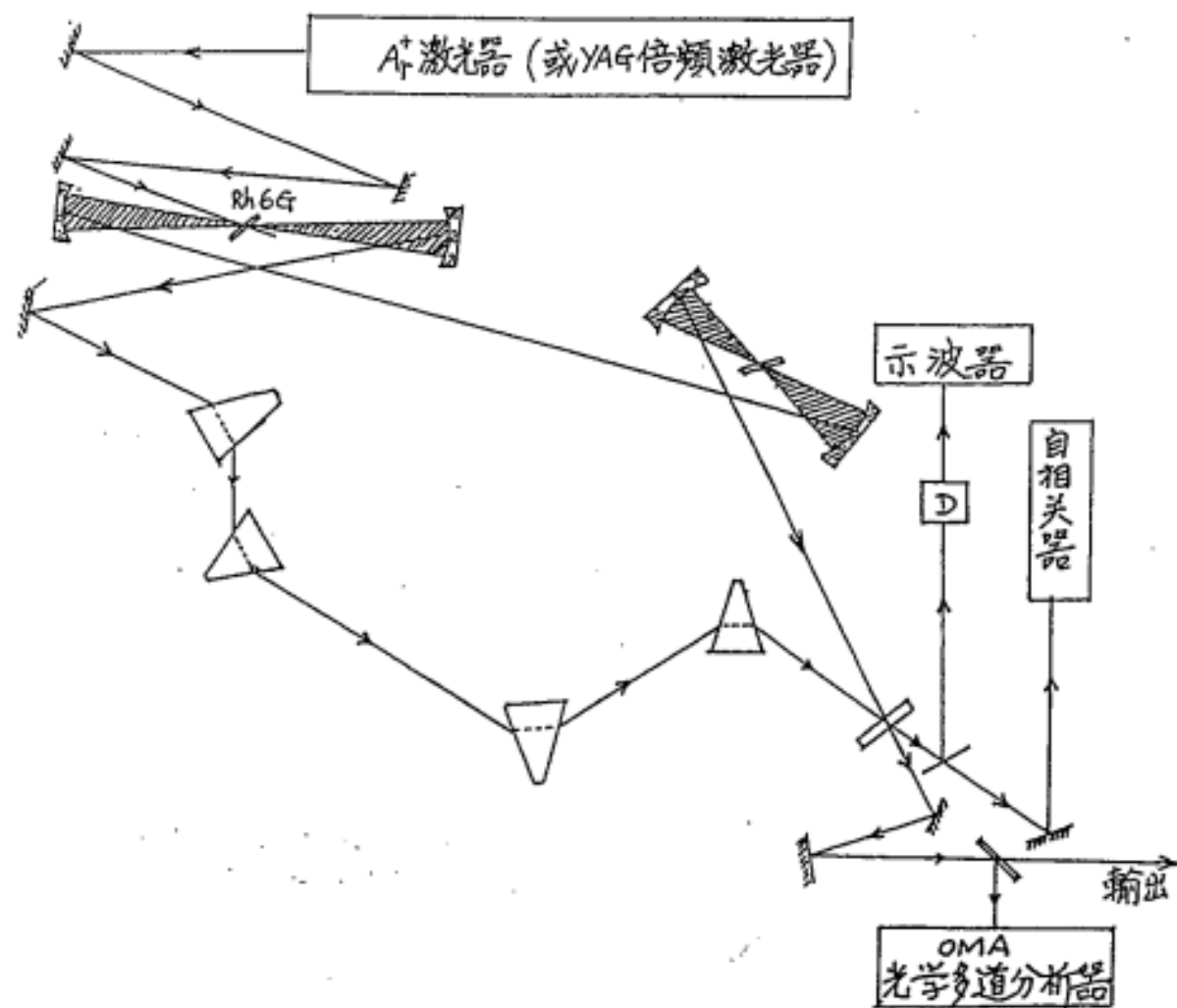


(6)对碰锁模激光器 (CPM染料激光器)



(Reference: IEEE, J. QE,
Vol. 19, No. 4 (1983))

(6)对碰锁模激光器 (CPM染料激光器)



(6)对碰锁模激光器

对碰锁模的工作原理：

- ◆主要依靠在饱和吸收体内形成的“**空间光栅**”的作用实现锁模。
- ◆腔内光增益达到阈值后，形成两束沿顺时针和逆时针方向传播的光脉冲（起伏尖峰）对，并在吸收体处对碰，强度叠加能使吸收体到达一定程度漂白，相互依存和发展产生两个同步等强度的行波脉冲。

(6)对碰锁模激光器

- ◆两个相向传播脉冲的相干性，在吸收体处对碰形成驻波，产生光强的空间调制，饱和吸收体上下能级周期性分布，即形成[粒子数分布光栅]。
- ◆形成光栅过程中脉冲前沿被吸收变陡，因吸收体的弛豫时间大于脉冲的持续时间，未消失的光栅将脉冲后沿散射变陡。
- ◆大大加快了脉宽的压缩过程，比一般被动锁模快1个量级

(6)对碰锁模激光器

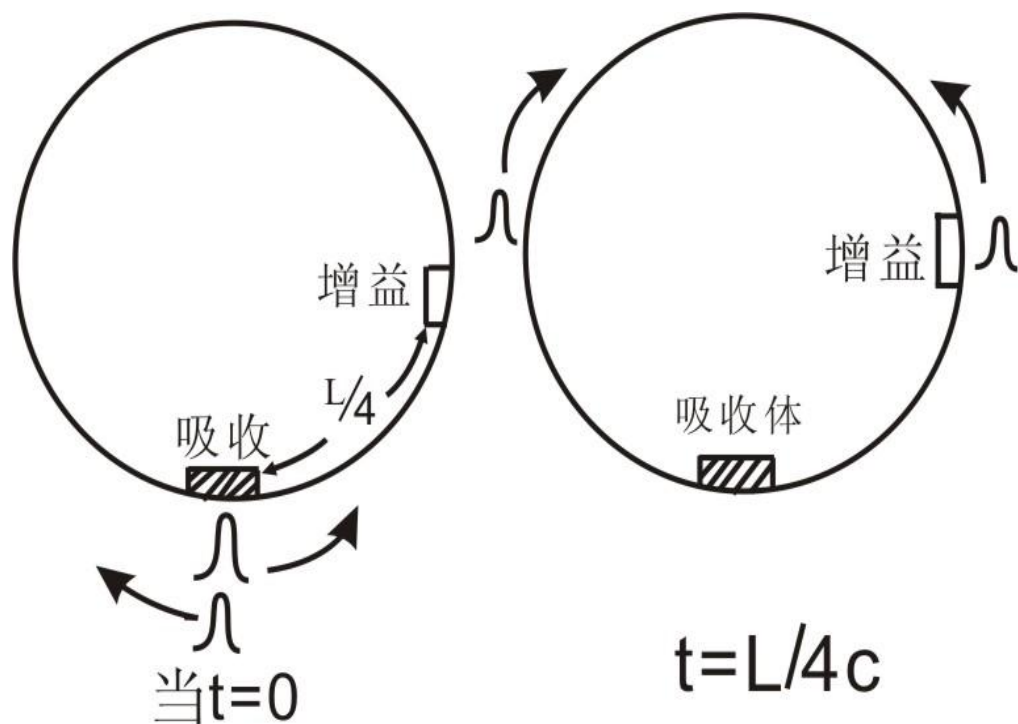


图26. 环形腔对锁模激光腔内
吸收于增益体的排布

**对碰锁模激光腔内
吸收体与增益介质的
排布结构**

**为保证环形腔中相
向传播的两个光脉
冲在饱和吸收体处
对碰时有相等的光
强，必须使吸收体
与增益介质间光程
是腔长的四分之一。**

(6)对碰锁模激光器

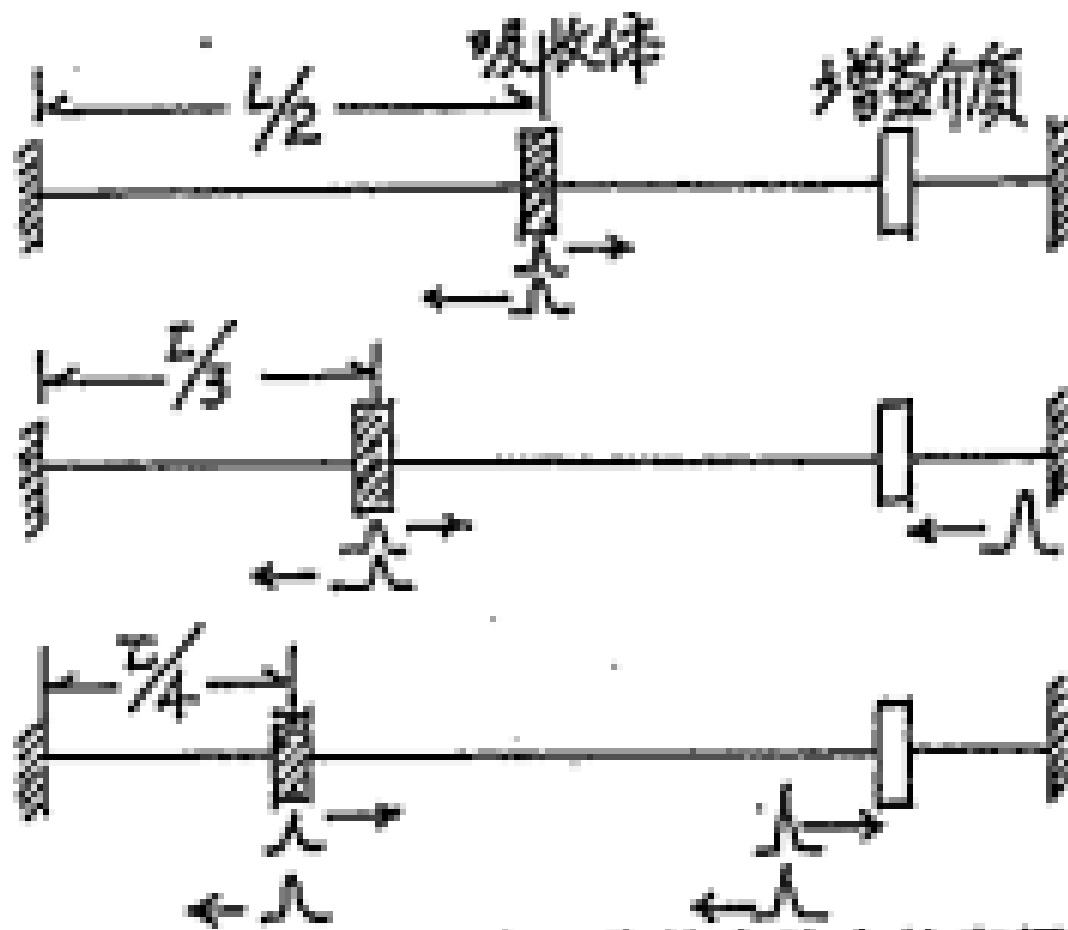


图 25. 对撞锁模激光器中吸收体在腔内的空间配置

6.同步泵浦锁模激光器

- ◆采用一台**任何**锁模激光器产生的脉冲激光列去泵浦另一台激光器，比如染料激光器，只要两台激光器的光学腔长相等（或者倍数），或者纵模间距相同，便可产生激光脉冲列。
- ◆染料激光器通常波长可以**调谐**（**插入色散元件，比如光栅、干涉滤光片等**），脉宽更窄！

6.同步泵浦锁模激光器

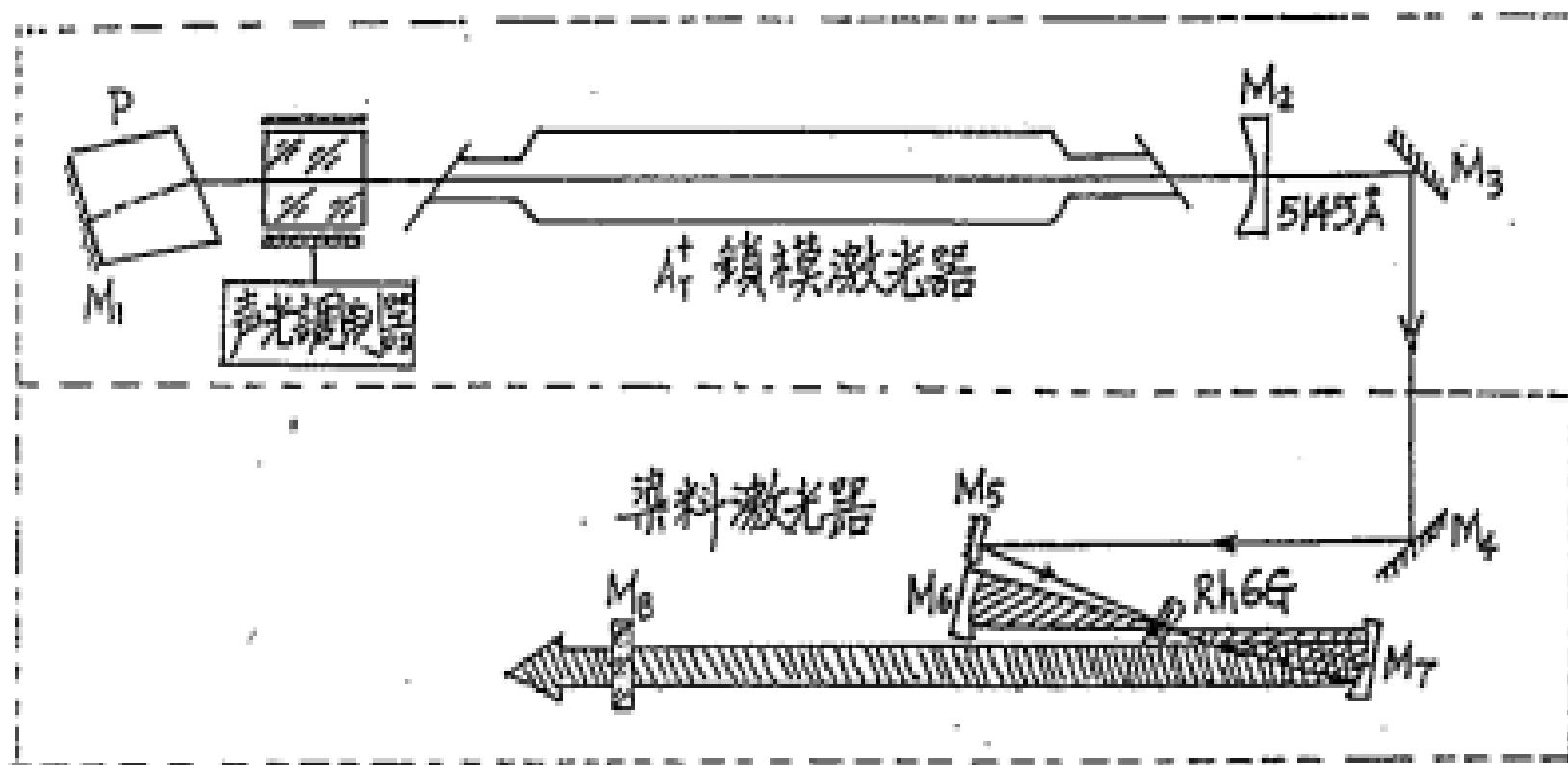


图 23. 采用锁模 Ar^+ 激光脉冲列(5145A)同步抽运染料(Rh6G)激光器

6.同步泵浦锁模激光器

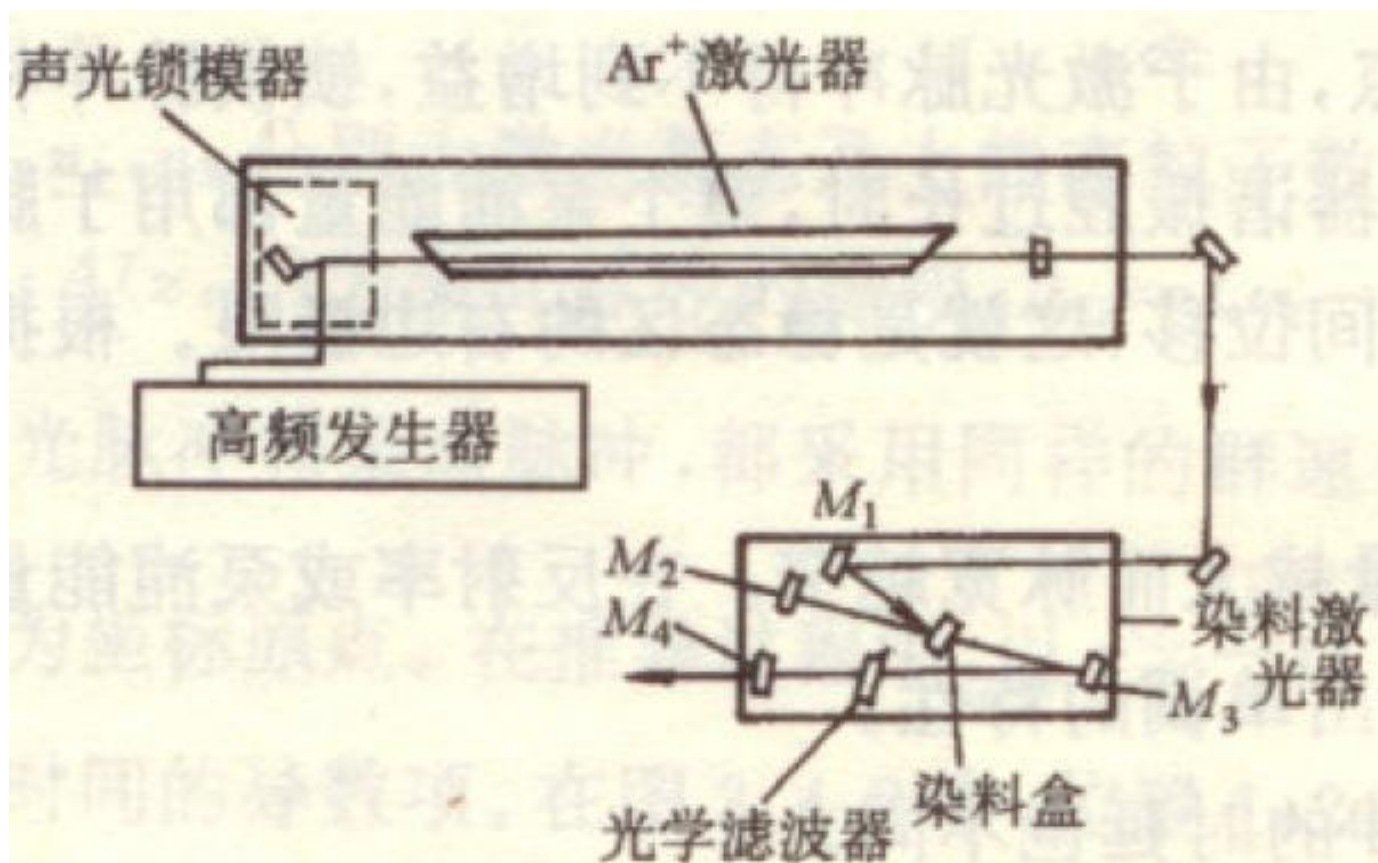
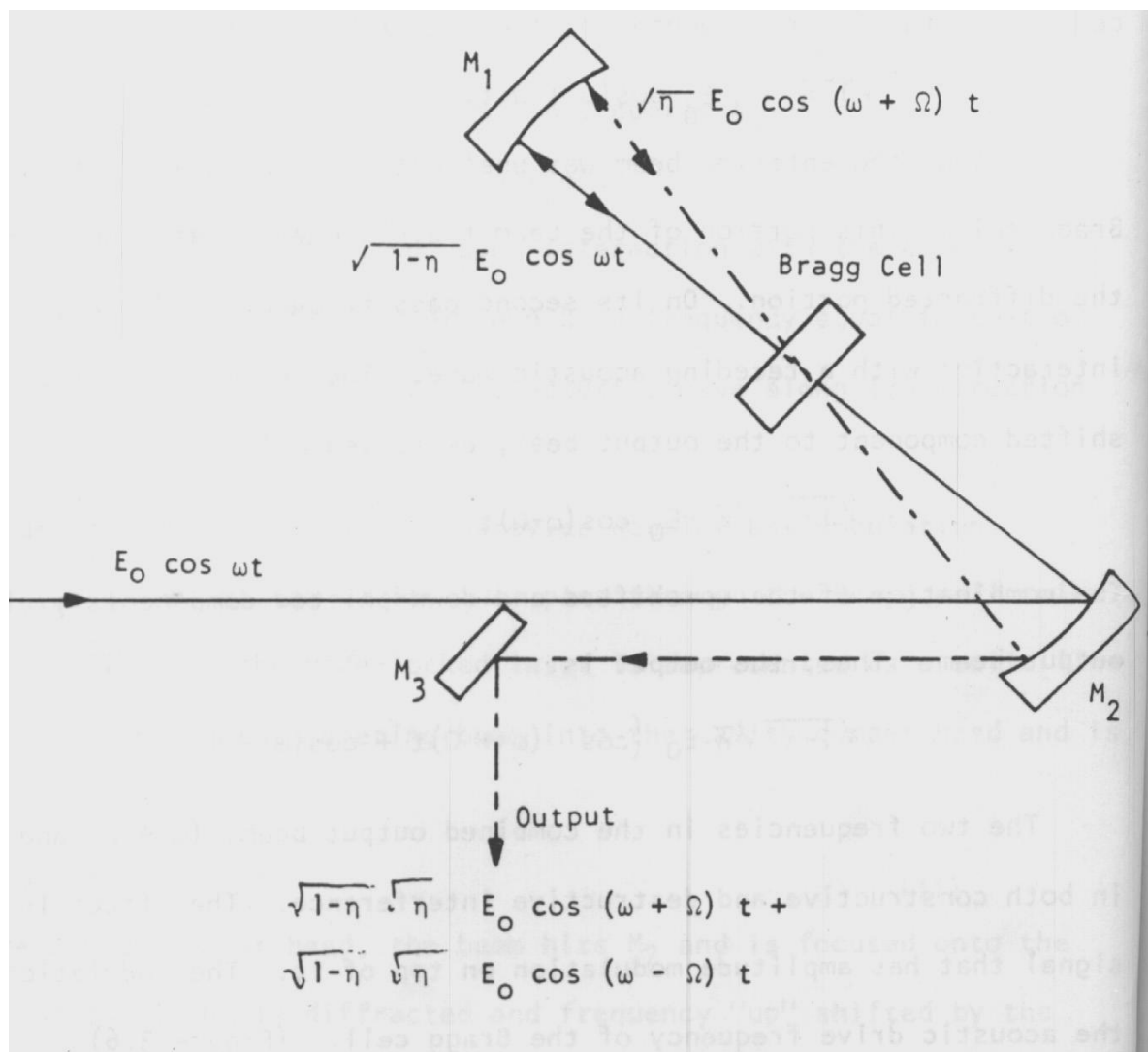


图 3.4-3 同步泵浦染料激光器的示意图

Bragg cell and cavity dumper



6.同步泵浦锁模激光器

同步锁模原理

- ◆在锁模激光泵浦下，腔长严格匹配时，在众多的起伏脉冲中只有与泵浦脉冲光同时到达的增益染料喷膜的光脉冲才得到放大，在腔内往返一周后来到染料喷膜处又得到下一个泵浦脉冲的放大。
- ◆时间上匹配----同步泵浦。

6.同步泵浦锁模激光器

- ◆ **频域分析**：效果如快速的增益开关（调制），起振的纵模相位严格同步。
- ◆ **时域分析**：激光染料的辐射截面很大，光脉冲的前沿得到强烈放大。反转粒子数在皮秒时间范围内迅速耗尽，使脉冲后沿得不到充分放大，甚至损耗，往返结果脉宽进一步压缩。

7.自锁模激光器

(Self-Mode-Locking)

- 美国 MIT的 Hause 于 1992 提出了**克尔透镜锁模** (**KerrLens Mode-Locking, KLM**) 理论，揭示了掺钛蓝宝石激光器中的自锁模机制。
- 当激活介质本身的非线性极化效应，能够补偿色散、频率牵引和纵模“跳变”等无规则随机因素，能维持各纵模的等间隔分布，并且有确定的相位关系，实现满足锁模条件的超短脉序列输出，则该**激光器称为自锁模激光器**

7.自锁模激光器

●观察到自锁模现象的激光器：

◆He-Ne激光器

◆Nd: YAG激光器

◆红宝石激光器

◆半导体激光器

◆钕玻璃激光器

◆CO激光器等

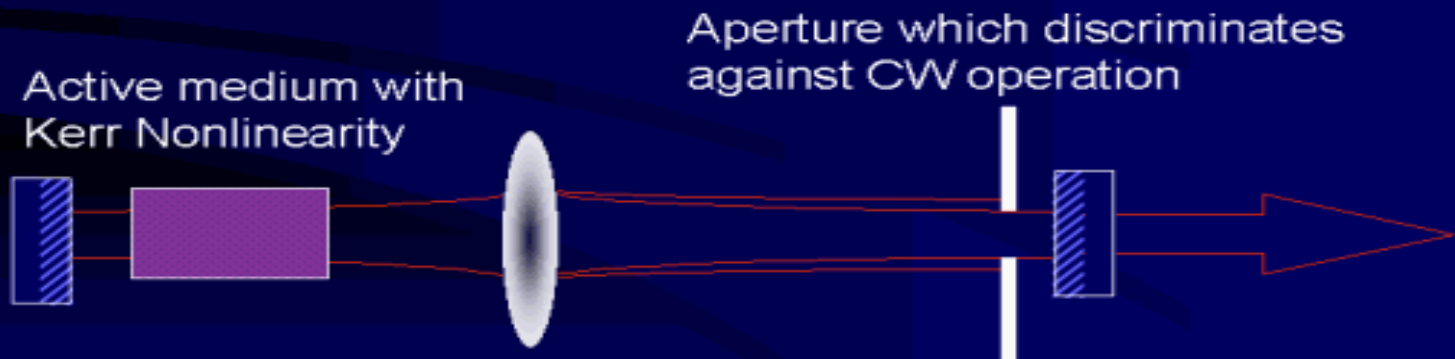
●但**输出极不稳定**，锁模脉冲不能得到持续，无实用价值，有时还要作为影响激光器稳定运转的负面因素设法予以消除。

7.自锁模激光器

(1) 自锁模原理

Kerr lens mode-locking (KLM)

- Self-focussing can be used to suppress CW operation
- It becomes energetically favourable for the light to be compressed into a short intense pulse
- The pulse bounces back and forth through the cavity generating a train of output pulses



克尔透镜锁模原理

- $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ 激光器之所以能产生锁模，是因为光强在足够大时， $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ 晶体内部的克尔效应导致自聚焦。
- 加上在腔内适当位置引入光阑，使之产生与饱和吸收染料有同样作用的效应，即由于强度的变化导致透过率的变化。

-----强度调制

克尔透镜锁模原理

- ◆ 由于峰值与前后沿部分强度不同，产生的非线性自聚焦效应也不同。
- ◆ 它们通过小孔后有不同结果，峰值部分将顺利通过小孔光阑，而前后沿由于光强较弱、自聚焦不显著而被小孔损耗掉。
- ◆ 以上说明，对于一个腔内光脉冲，**自聚焦与腔内光阑的结合，相当于一个快饱和吸收体，对光脉冲的前后沿具有压缩作用。**因此，这种自聚焦与小孔光阑的结合，具有选择和压缩脉冲的作用

克尔透镜锁模原理

◆ 折射率随时间或者空间变化

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

n 为与光强无关的折射率

n_2 为非线性折射率

$I(t)$ 为脉冲光强

克尔透镜锁模原理

◆ 高斯光束通过介质后，产生自聚焦效应的焦距

$$f_m = \frac{\alpha \omega_m^2}{4 \Delta n_m \Delta L}$$

ω_m 入射增益介质的光斑大小

α 常量, 5.6 ~ 6.7

$$\Delta n_m = n_2 I_m(t)$$

ΔL 增益介质的一小段长度

$I_m(t)$ 入射到该段介质的光强

7.自锁模激光器

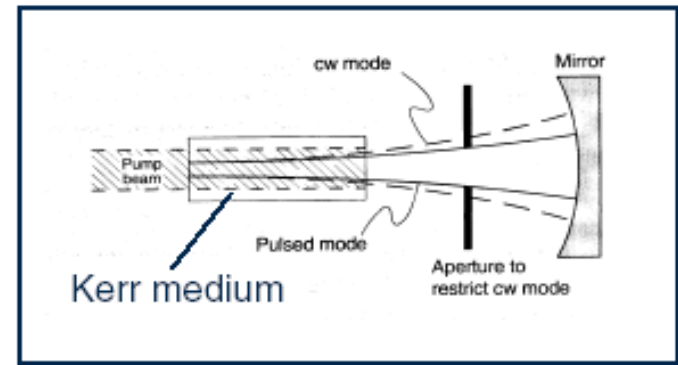
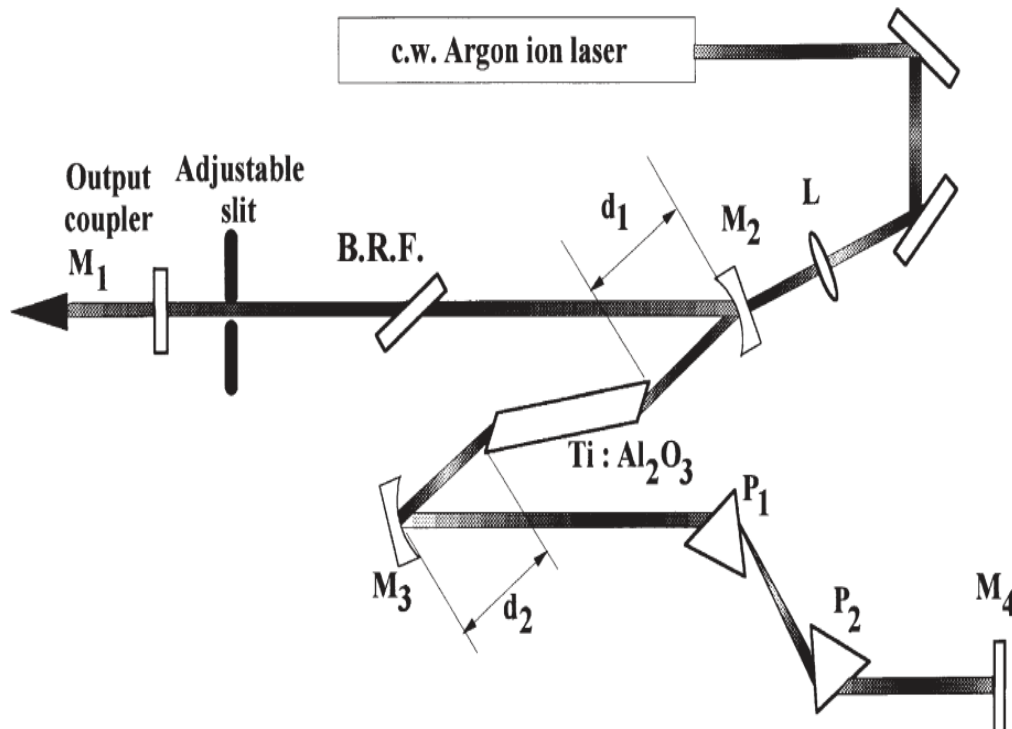
Mode locking

Kerr-lens mode locking

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

Gaussian laser beam

self-focusing



- ✓ lower loss in pulsed mode
- ✓ ~ instantaneous time response
- ✓ fastest mode-locked pulses
 - ✓ Ti:sapphire laser
 - ✓ ~ 100 THz bandwidth
 - ✓ ~ 5 fs pulses
 - ✓ obs.: dispersion compensation

7.自锁模激光器

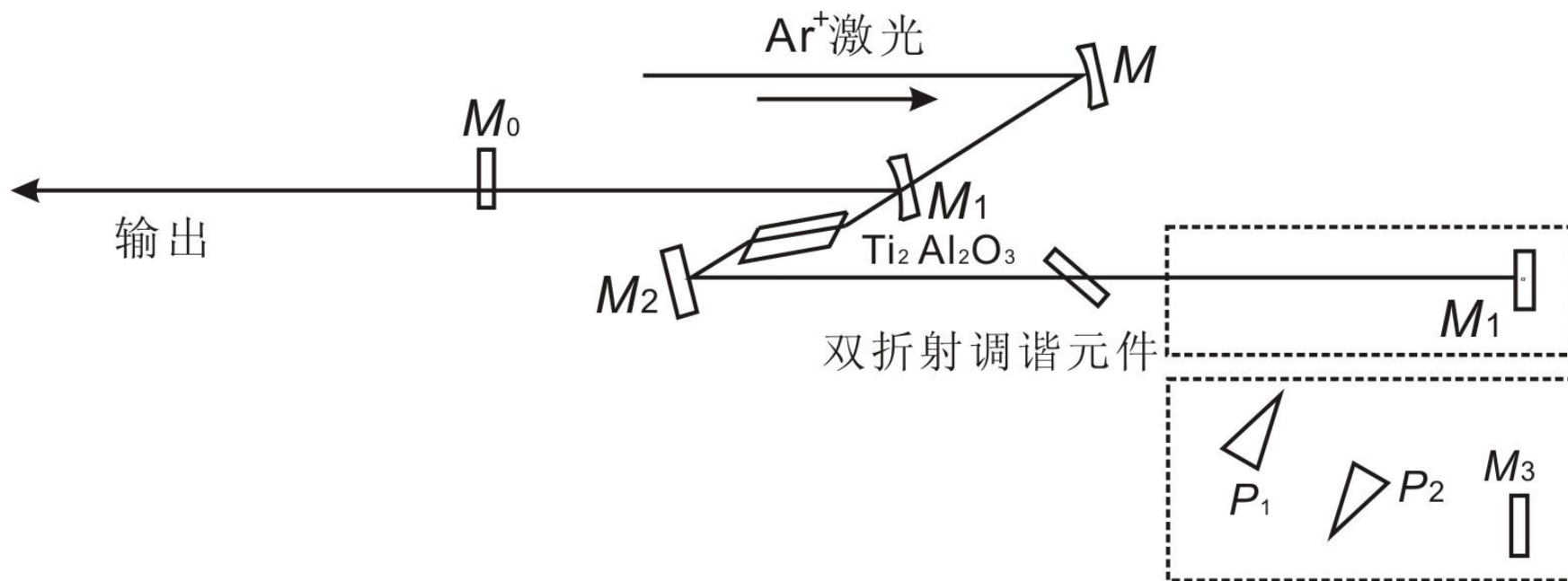


图3. 7-5 自锁模钛宝石激光器机构图

7. 自锁模激光器

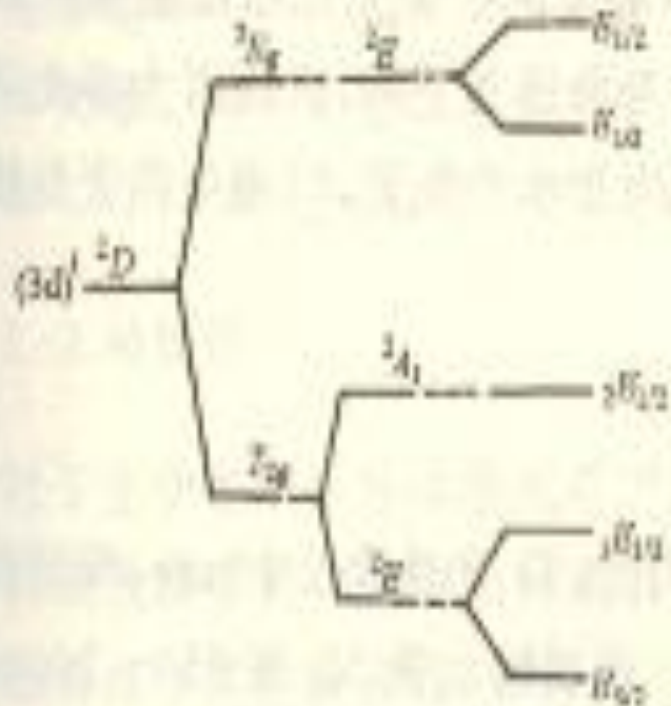


图 3.7-1 掺钛蓝宝石晶体中 Ti^{3+} 离子的能级图

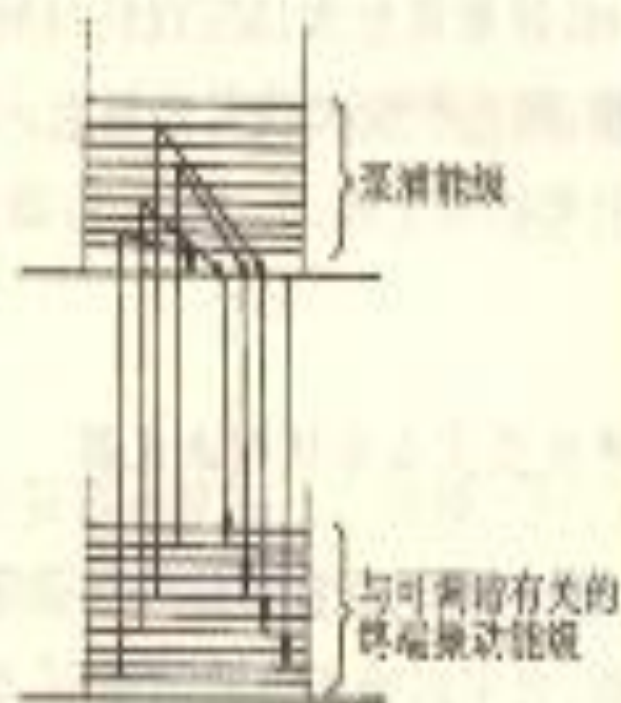


图 3.7-2 掺钛蓝宝石晶体的能级跃迁图

7.自锁模激光器

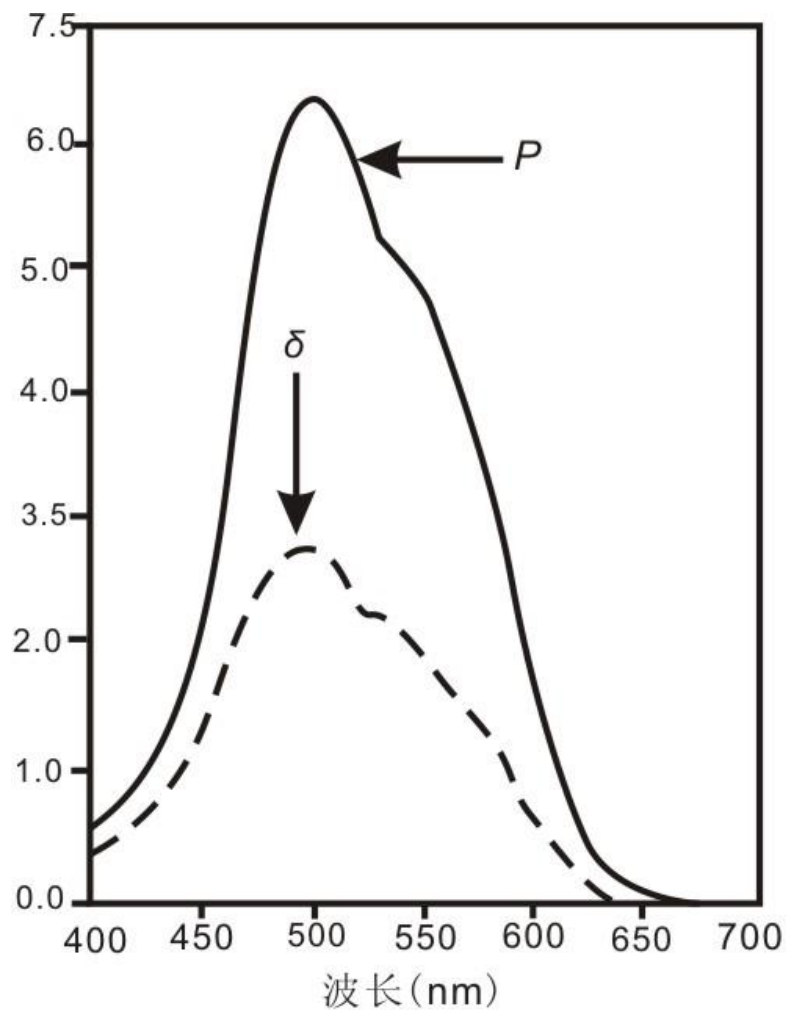


图3. 7-3 钛宝石晶体的吸收光谱

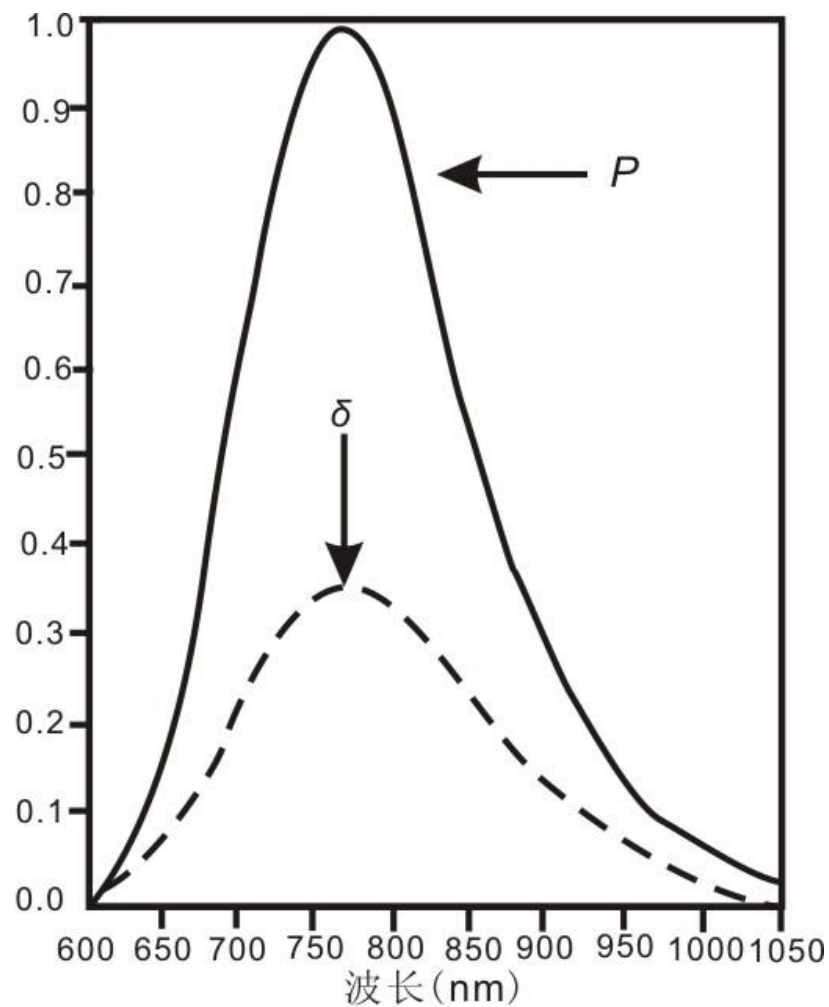


图3. 7-4钛宝石晶体的荧光光谱

8.超短脉冲压缩技术

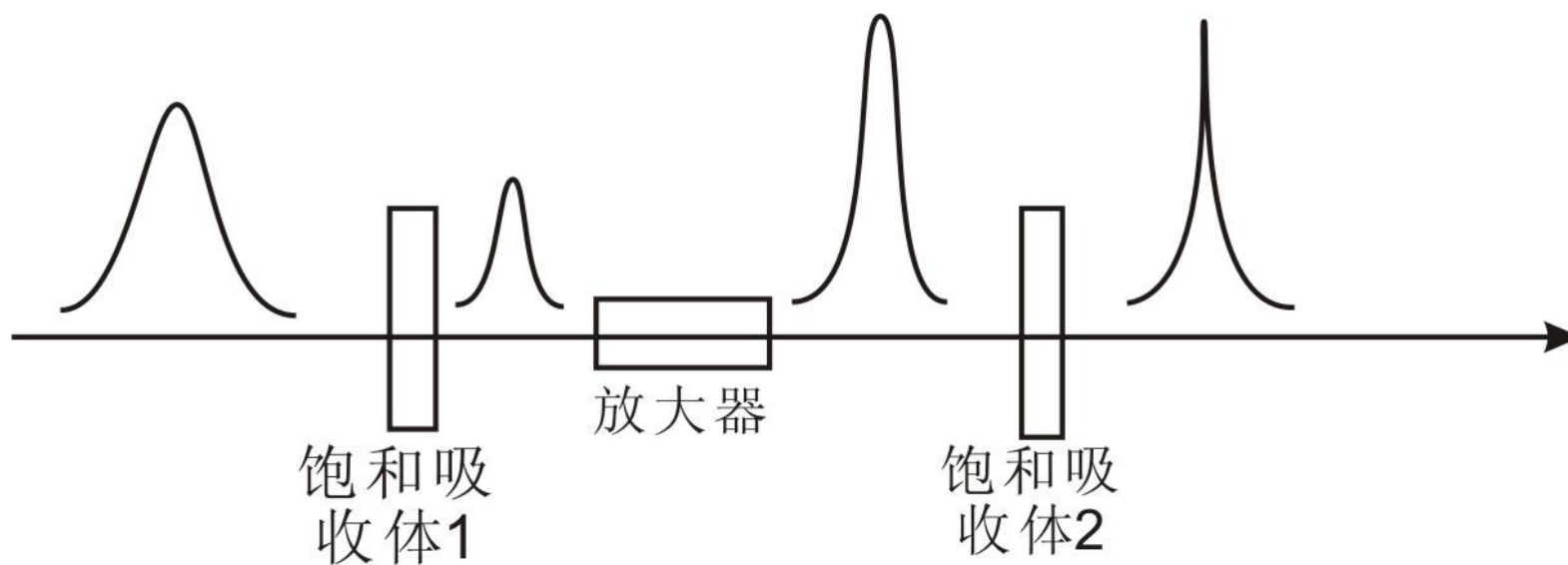


图32. 饱和吸收法压缩光脉冲

8.超短脉冲压缩技术

由频率和相位的关系可以得到：
$$\Delta\omega = -\frac{d\Delta\phi(t)}{dt} = -\frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 L \frac{\partial I(t)}{\partial t}$$

由于光克尔效应，光脉冲不同部位由于光强不同，导致不同的频移，即啁啾(chirp)， $Okerr \rightarrow SPM \rightarrow chirp$ 。

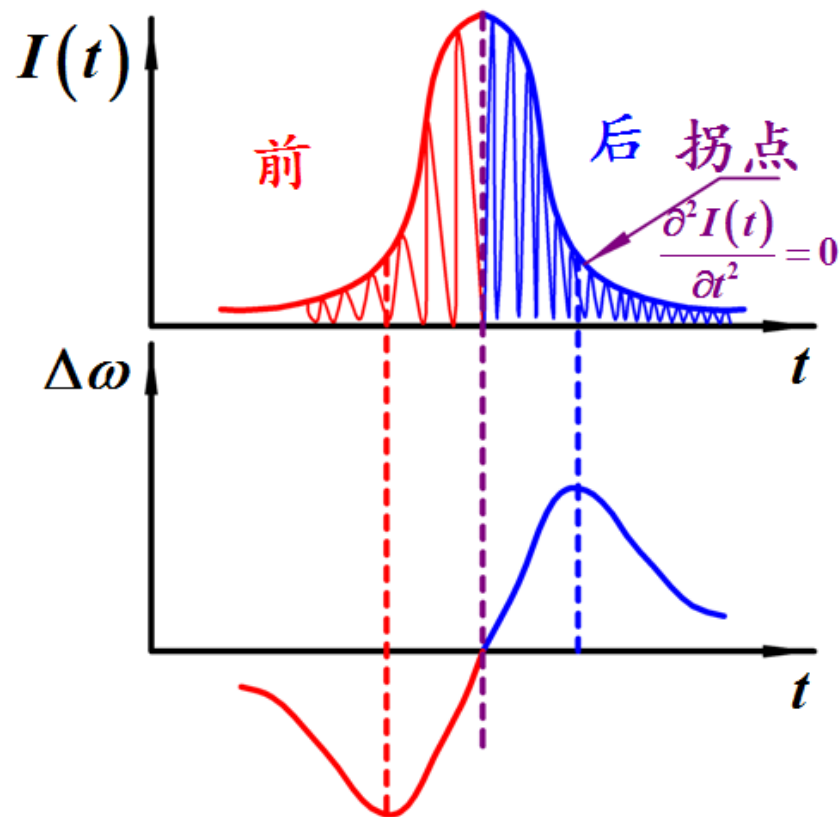
光脉冲前沿 $\frac{\partial I(t)}{\partial t} > 0 \Rightarrow \Delta\omega < 0$,

产生低频光子，红移；

光脉冲后沿 $\frac{\partial I(t)}{\partial t} < 0 \Rightarrow \Delta\omega < 0$,

产生高频光子，蓝移。

即SPM产生了正啁啾



8.超短脉冲压缩技术

实际上，由SPM引起的 $\Delta\omega$ 是以消耗中心频率 ω_0 的光子为代价，产生出新频率的光子。

对于瞬态响应过程，脉冲前沿 $\frac{\partial I}{\partial t} > 0$ ，出现低频Stokes光子分布，

脉冲后沿 $\frac{\partial I}{\partial t} < 0$ ，出现高频反Stokes光子分布。

SPM增加了光脉冲的谱线宽度，传输过程中在能量恒定的条件下，对脉冲前、后沿按光子频率低、高进行了分配，造成了低频分量的速度大于高频分量速度的效果。

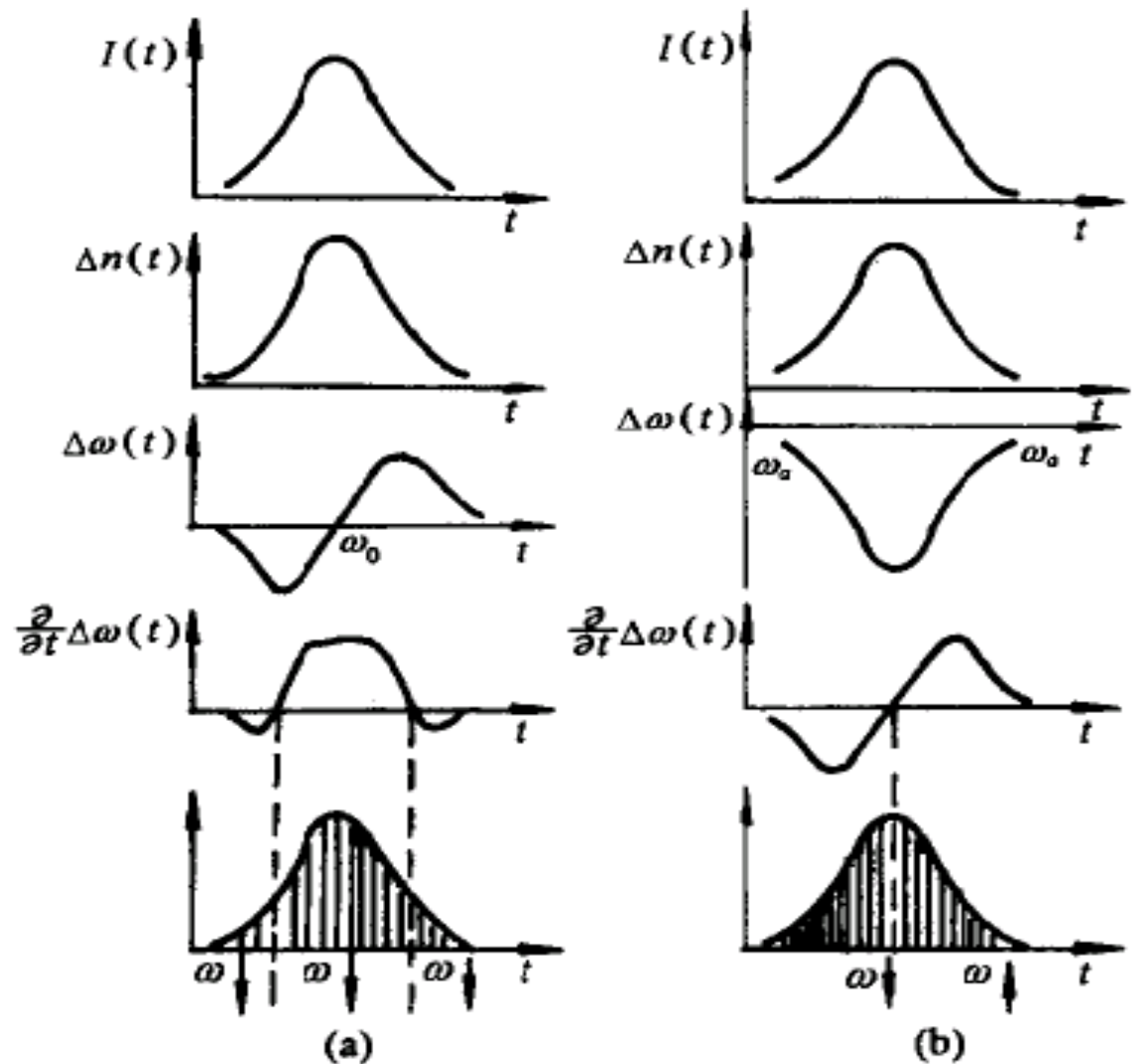
由于谱线变宽，因此，SPM不展宽脉冲的时间宽度。

实际上，SPM也是光纤激光脉冲压缩和孤子(Soliton)激光器的基础。

8.超短脉冲压缩技术

(a) 自相位调制响应
时间 $T_r \ll \tau_p$, 脉冲前后沿具有
负啁啾, 脉冲中间部分只有正啁啾, 谱带
加宽, 而且是向原载
波频率 ω_0 的高端和
低端同时扩展。

(b) $T_r \gg \tau_p$, 脉冲
频谱的扩展只是向 ω
< ω_0 端扩展, 即频
率向低频端扩展。



超短光脉冲在介质传输中的自相位调制效应

8.超短脉冲压缩技术

将*GVD*和*SPM*的效应综合进行分析，不难得出以下结论：

对于*GVD*的线性正啁啾，正色散 $\beta_2 > 0$ 的情形，加上*SPM*效应后，脉冲前、后沿将拓宽，光脉冲时间宽度增大，前、后沿变陡，形成所谓的“方波自成形”，可用于啁啾脉冲放大（*CPA*）技术。

对于负色散 $\beta_2 < 0$ 的情形，*SPM*使高频分量向脉冲前沿部分移动，低频分量向脉冲后沿部分移动，形成非线性的负啁啾效应，正好与*GVD*的线性正啁啾过程相反，起到了脉冲压缩的作用。

由于激光介质对飞秒脉冲的正色散和*SPM*效应，主要表现为正啁啾性质，因此为了获得压窄脉宽，必须引入负色散器件，抵消正啁啾带来的脉冲展宽。

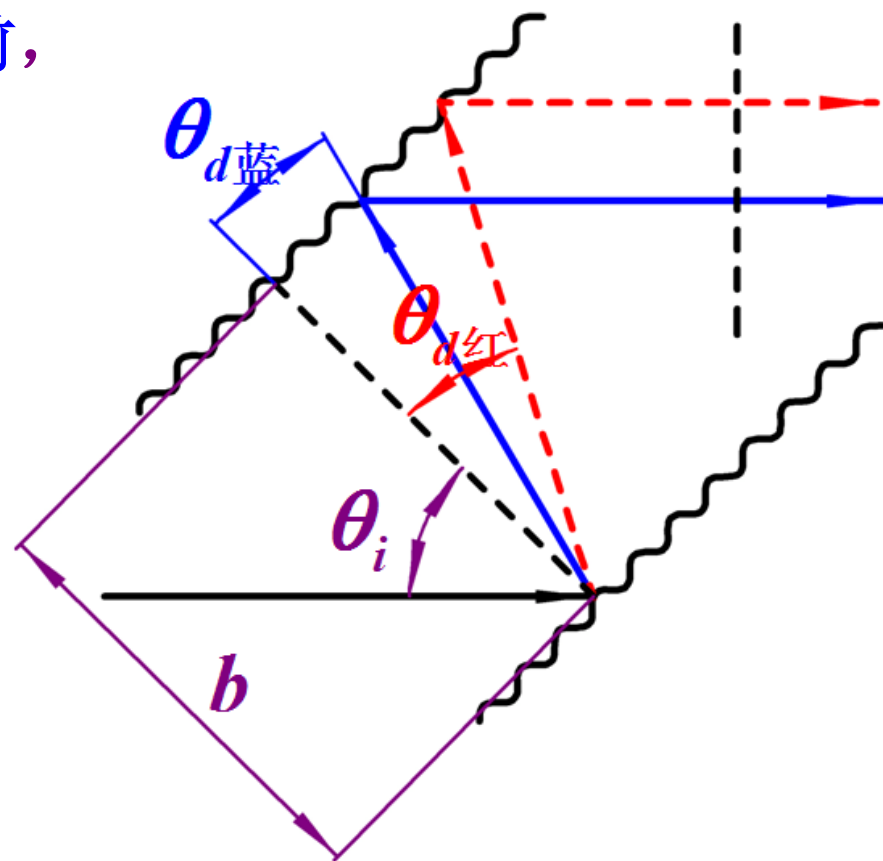
8.超短脉冲压缩技术

脉冲压缩器件

1、对正色散波段光脉冲的光栅对压缩（腔外）

利用光栅对，可以使不同波长的光走不同长度的光程，调整光栅之间的相对位置，能够使长波(红光)比短波(蓝光)走较长的光程，使短波(蓝光)超前，即“蓝前红后”，使光栅对成为负色散元件，可以抵消 $\beta_2 > 0$ 正色散介质对波包的展宽作用，起到压缩脉冲的作用。

缺点：闪耀光栅损耗较大，因此一般只能在腔外使用。



8.超短脉冲压缩技术

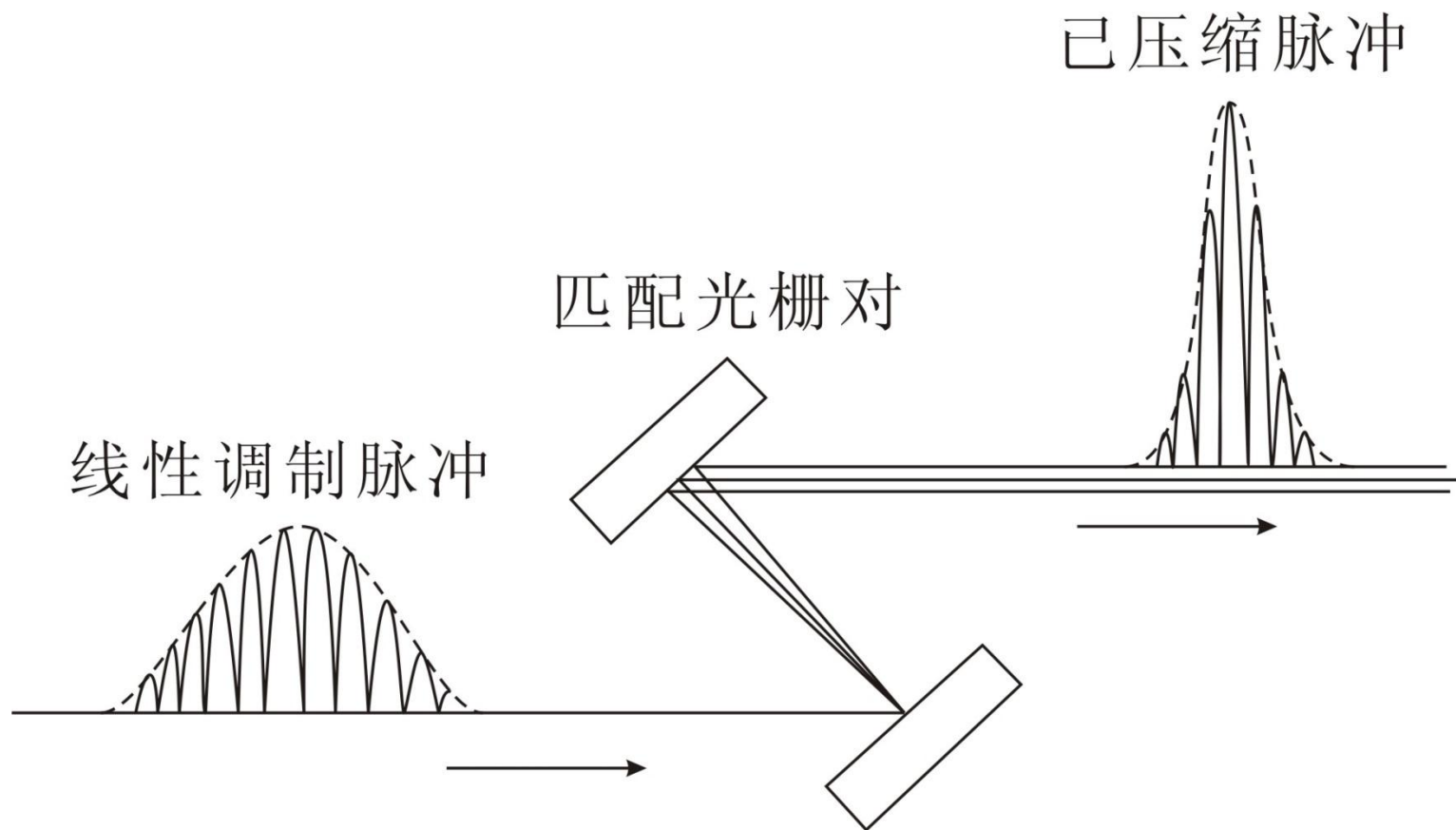


图3. 5-2 超短脉冲被光栅对的反射压缩示意图

8.超短脉冲压缩技术

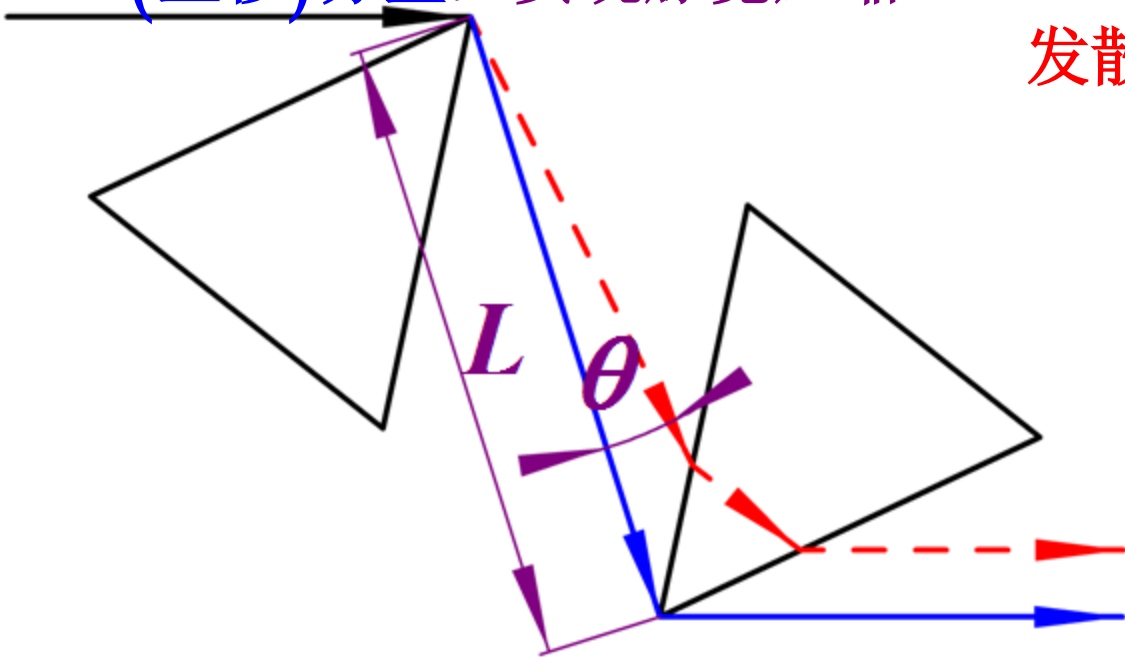
2、对正色散波段光脉冲的棱镜对压缩（腔内）

棱镜对的配置按负色散延迟方式。

尽管在透明区，单个棱镜玻璃是正常色散的，但是通过调整两个棱镜之间的距离和方位，可以调节折射光线的几何路径差，使正啁啾脉冲的低频(红移)分量经过棱镜对的时间长于高频(蓝移)分量，实现脉宽压缩。

采用两个棱镜互相补偿光线的发散，使出射光束为平行光。

为最大程度地减少插入损耗，两个棱镜的入射面和出射面互相平行，入射角和出射角为布儒斯特角和最小偏向角。



棱镜对色散补偿压缩脉冲

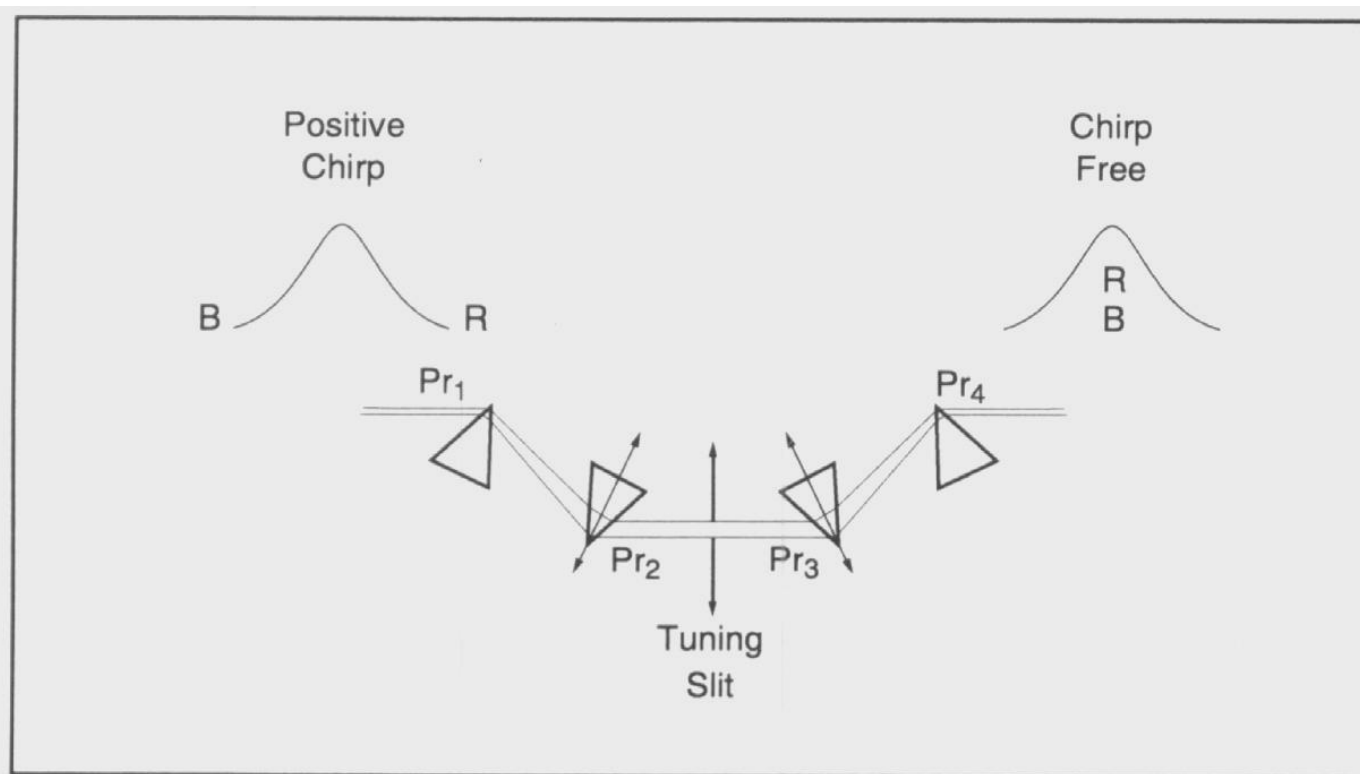


Figure A-6: The four prism sequence used for dispersion compensation in the Tsunami laser. An input pulse with a positive chirp (red frequencies at the leading edge of the pulse) experiences negative GVD (red frequencies have longer group delay time) in the prism sequence. The net effect is that the prism sequence compensates for the positive GVD and produces a pulse which has no chirp.

棱镜对色散补偿压缩脉冲

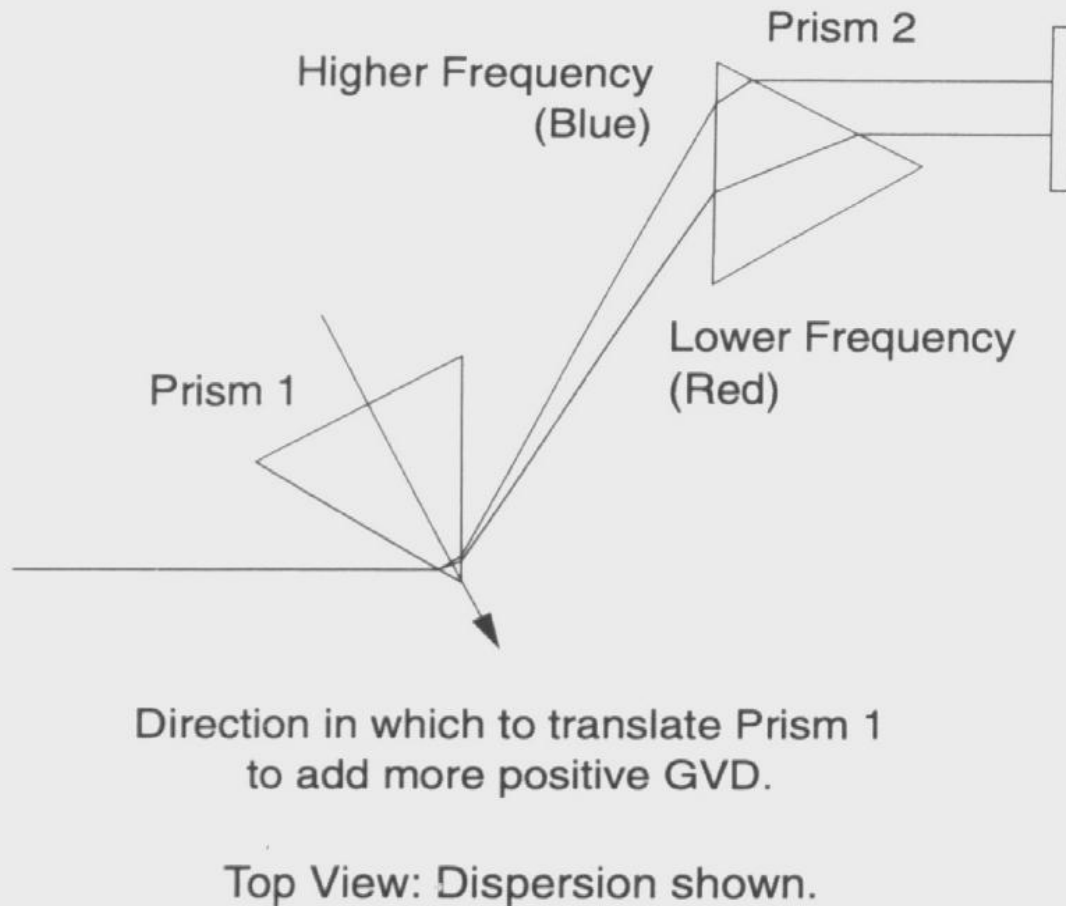


Figure B-4: Using two prisms to compensate for positive GVD.

8.超短脉冲压缩技术

3、压缩脉宽的其他方法与装置包括：

*Gires — Tournis*干涉仪，其特点是通过改变光线的入射角及干涉仪的厚度来改变群速度和 β_2 的正负号。

利用特殊设计的宽带低损耗，具有负色散系数的啁啾镜 (*Chirped mirror*) 能产生10飞秒以下超短光脉冲。

采用双通式光纤—光栅对装置，可增大GVD量，减少光栅间隔，校正光束截面，还可以在光纤芯部刻蚀衍射光栅来取代光栅对。

晶体中声光效应产生的相位光栅，也可作为光栅对的替代选择。目前看来，为了进一步压缩脉宽，还必须采用具有光孤子效应的器件装置。

8.超短脉冲压缩技术

3、压缩脉宽的其他方法与装置包括：

*Gires — Tournis*干涉仪，其特点是通过改变光线的入射角及干涉仪的厚度来改变群速度和 β_2 的正负号。

利用特殊设计的宽带低损耗，具有负色散系数的啁啾镜 (*Chirped mirror*) 能产生10飞秒以下超短光脉冲。

采用双通式光纤—光栅对装置，可增大GVD量，减少光栅间隔，校正光束截面，还可以在光纤芯部刻蚀衍射光栅来取代光栅对。

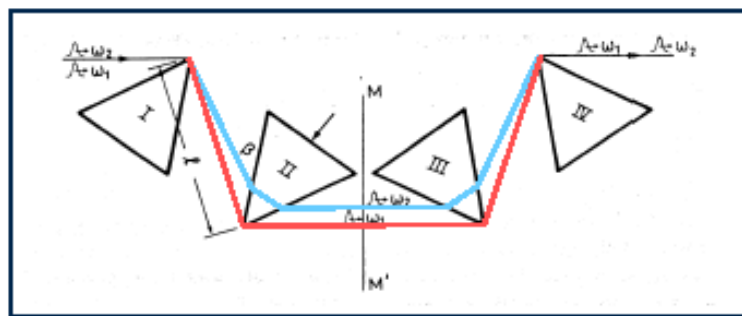
晶体中声光效应产生的相位光栅，也可作为光栅对的替代选择。目前看来，为了进一步压缩脉宽，还必须采用具有光孤子效应的器件装置。

Dispersion compensation

Mode locking

Dispersion compensation

1°

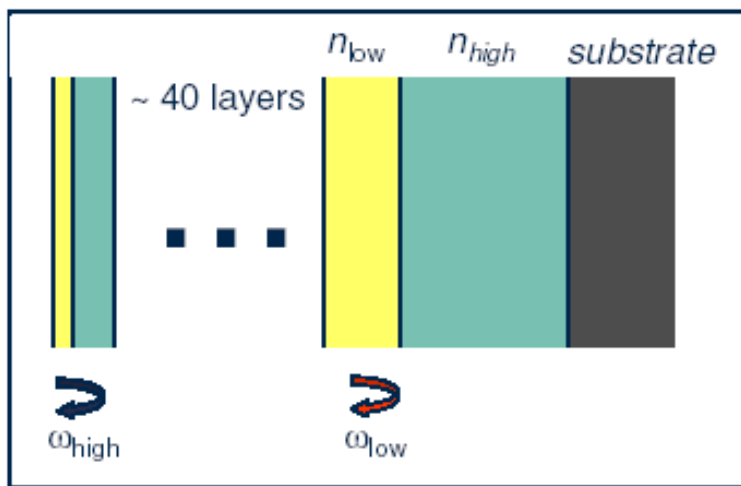


$$\omega_2 > \omega_1$$

Normal optical materials possess *positive* GDD: $\tau_g(\omega_2) > \tau_g(\omega_1)$

The four prism setup provides *negative* GDD: $\tau_g(\omega_2) < \tau_g(\omega_1)$

2°

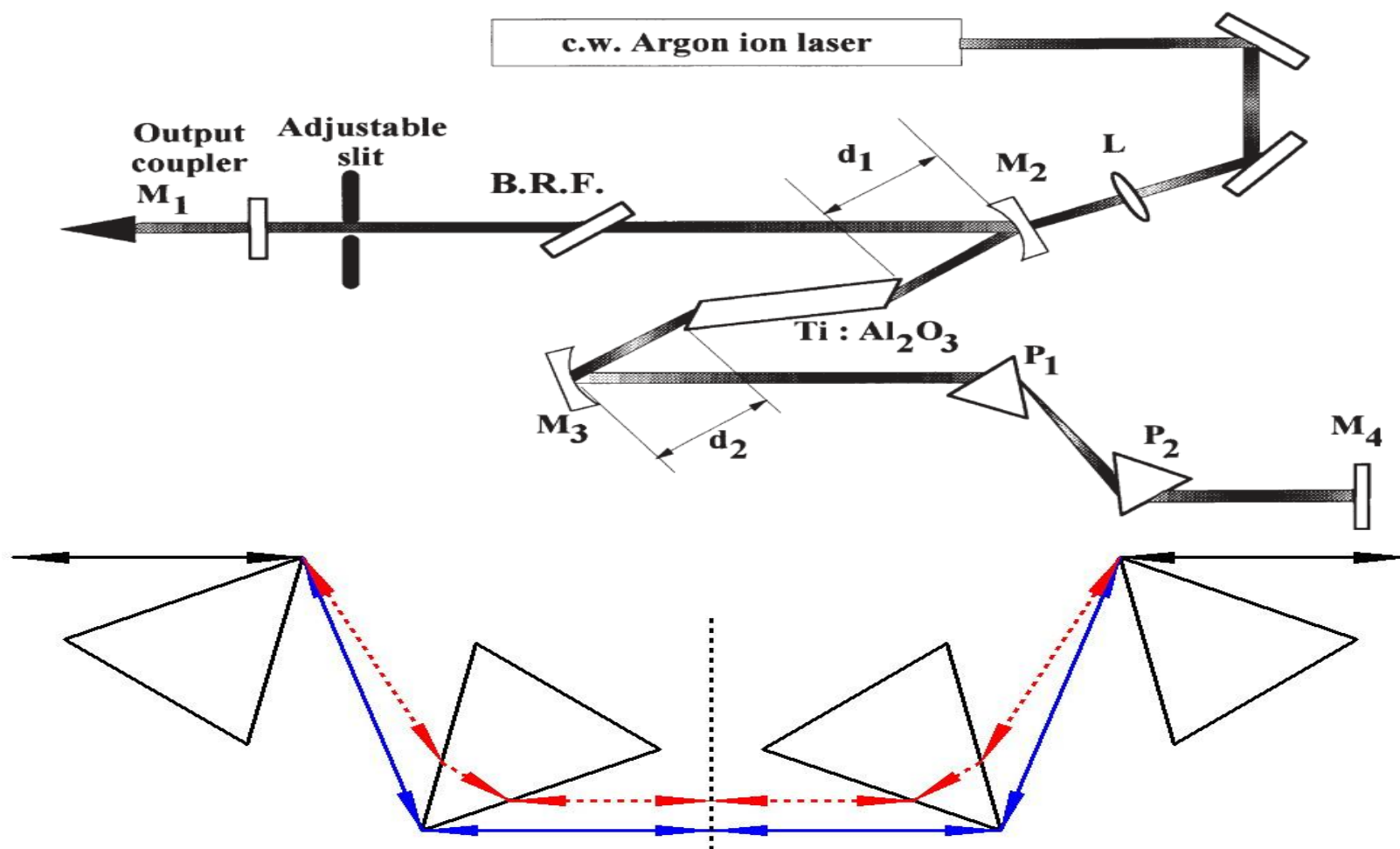


Chirped multilayer dielectric cavity mirror

$$\tau_g(\omega_2) < \tau_g(\omega_1)$$

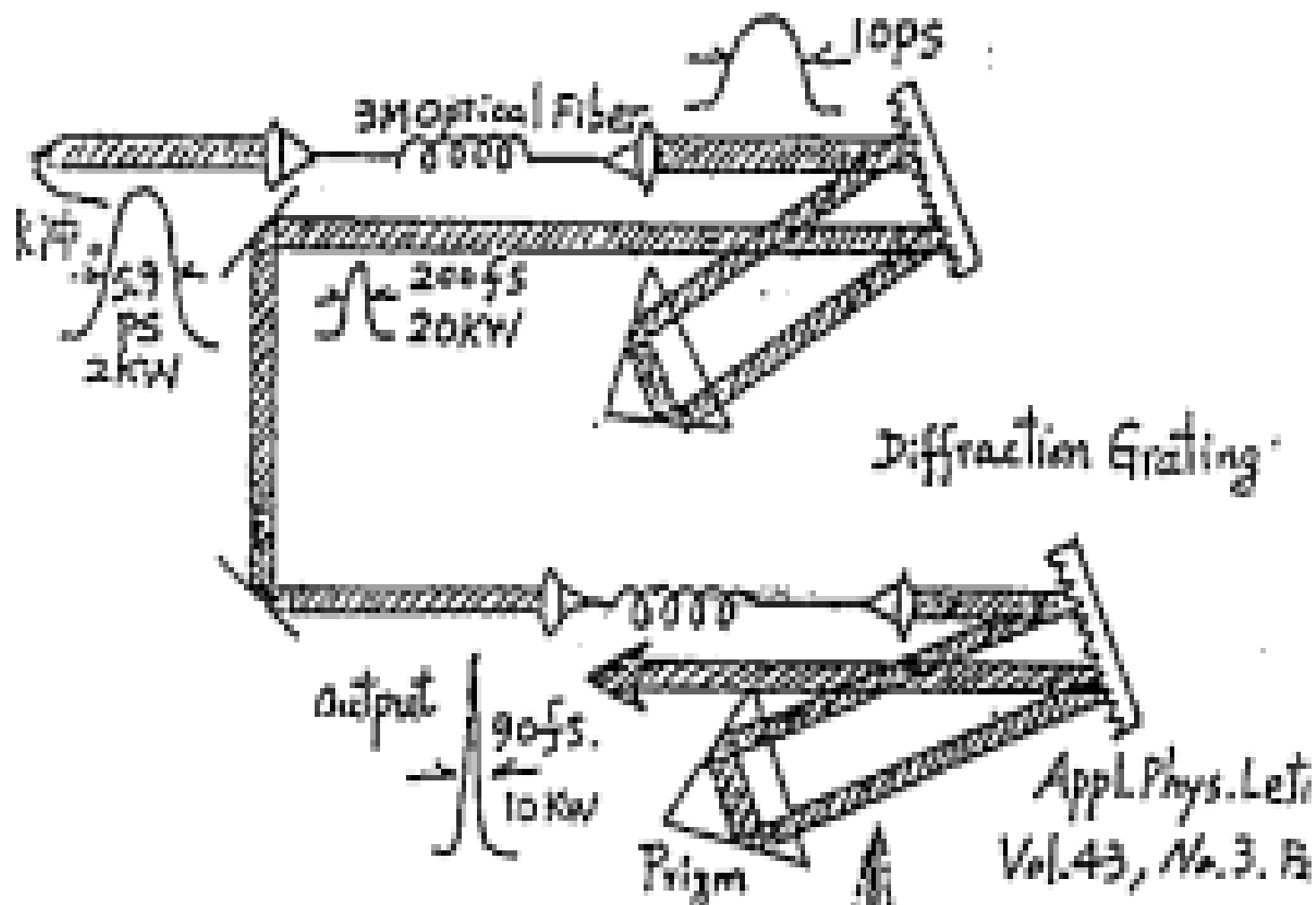
8.超短脉冲压缩技术

展宽及压缩应用



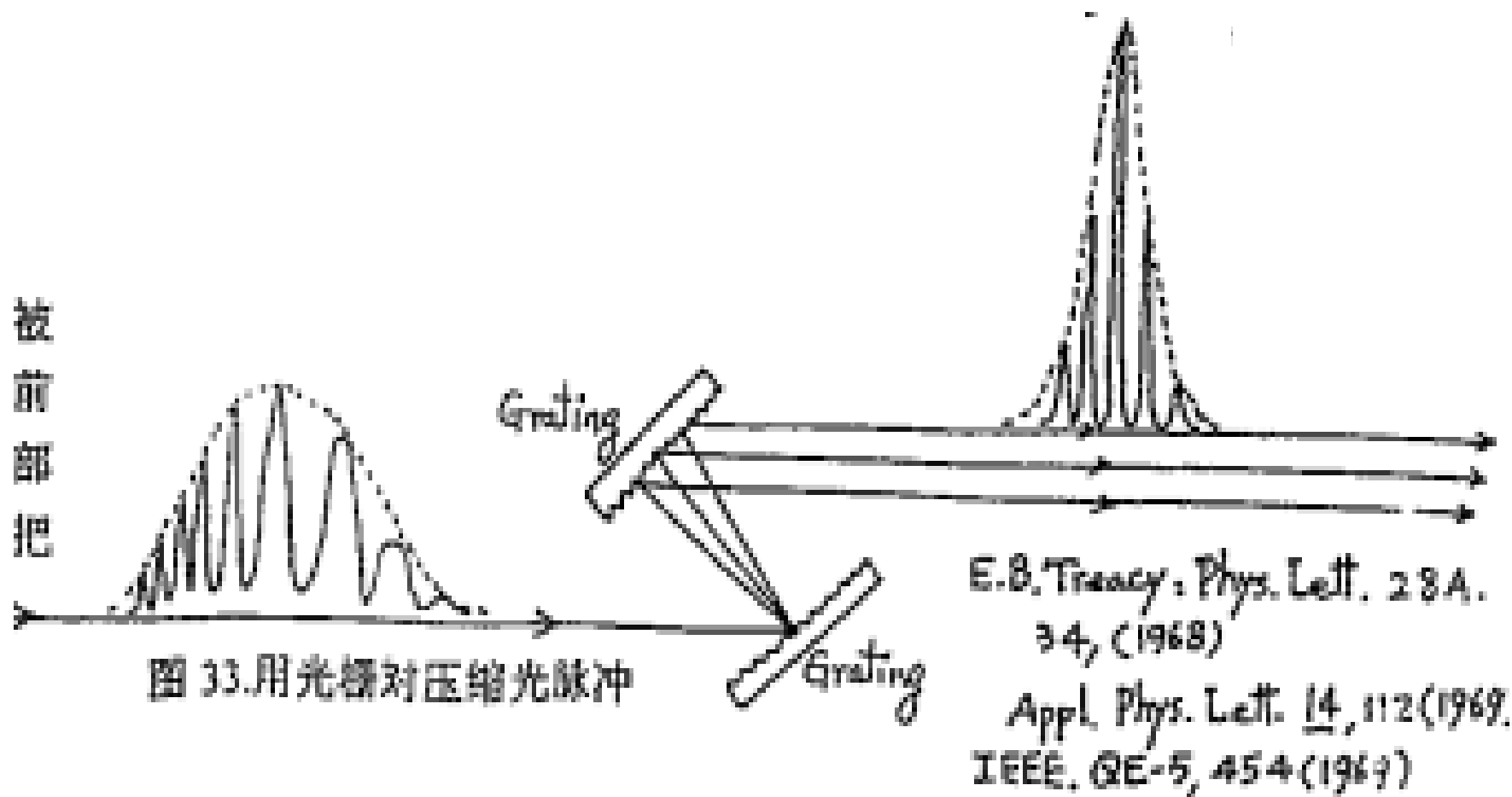
8.超短脉冲压缩技术

展宽及压缩应用



8.超短脉冲压缩技术

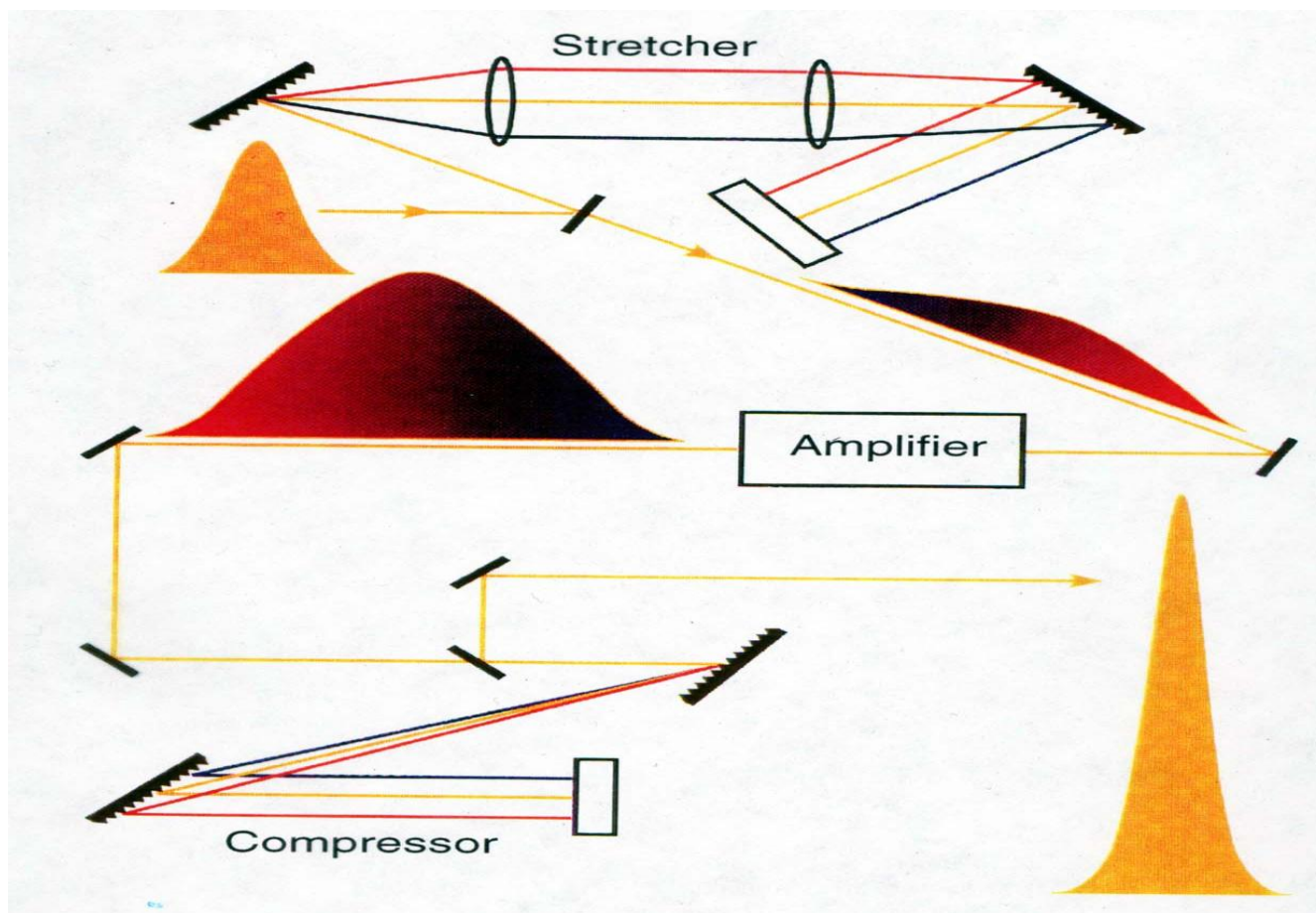
展宽及压缩应用



8.超短脉冲压缩技术

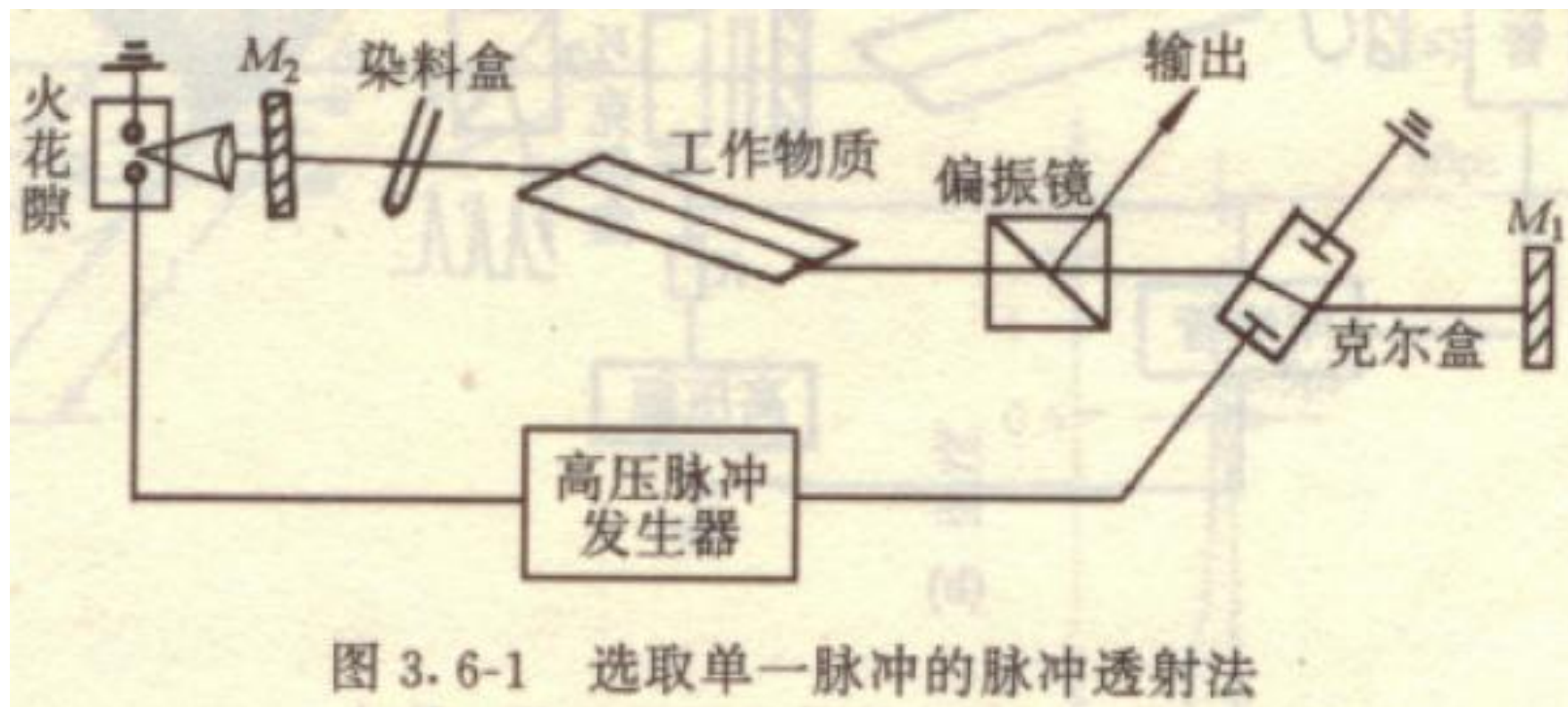
展宽及压缩应用

CPA啁啾光路



通过光栅对
实现飞秒脉
冲展宽、放
大及压缩

9、单脉冲获取技术



9、单脉冲获取技术

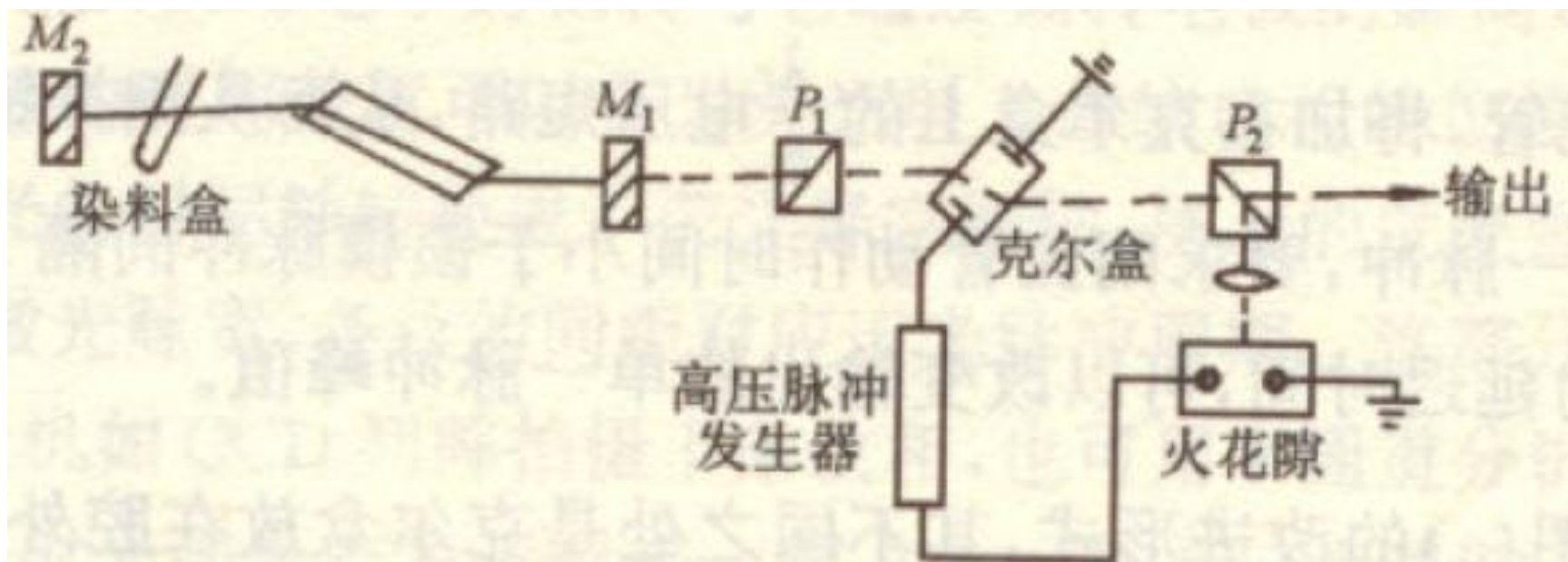


图 3.6-2 腔外选单一脉冲法

9、单脉冲获取技术

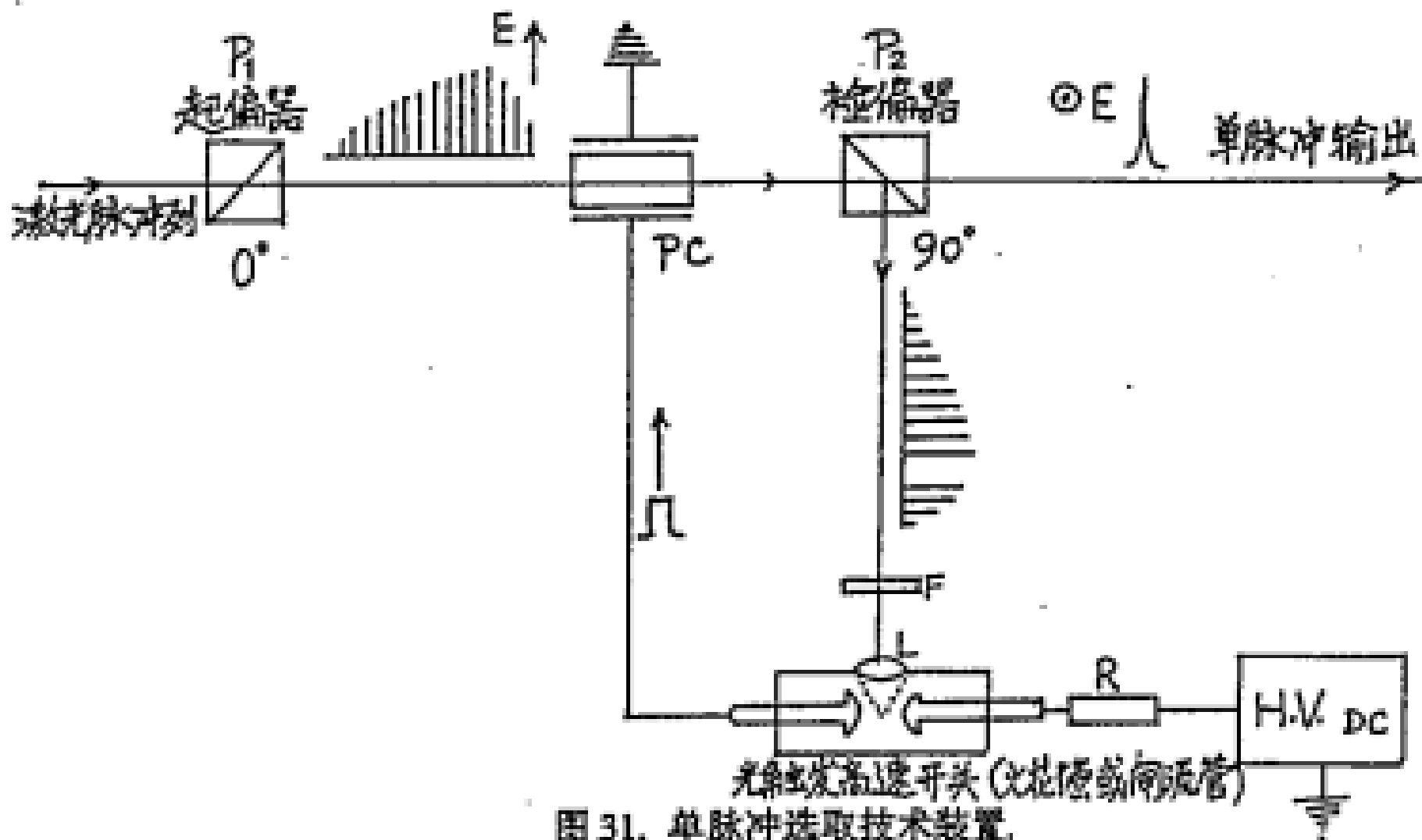


图 31. 单脉冲选取技术装置.