

# 实验十六 YAG激光器的调Q

## 一 实验目的

1. 掌握饱和吸收介质的基本特性，掌握饱和吸收晶体进行激光器被动调Q的基本原理和方法。
2. 掌握电光晶体和电光调制的基本原理，掌握固体激光器电光调Q的基本原理和方法。

## 二 实验原理

### 2.1 Q调制基本原理

通过前面的实验，我们已经知道在泵浦激励过程中，当工作物质中反转集居数密度 $\Delta n$ 增加到阈值时就产生激光。当 $\Delta n$ 超过 $\Delta n_t$ 时，随着受激辐射的产生，上能级粒子数被大量消耗，反转集居数 $\Delta n$ 迅速下降到低于阈值 $\Delta n_t$ ，此时激光振荡迅速衰减。然后泵浦的抽运又使上能级逐渐积累粒子，形成第二个激光尖峰。如此不断重复下去，便会形成一系列小的尖峰脉冲。因为每个激光脉冲都是在阈值附近产生的，所以输出脉冲的峰值功率都较低。此时增大输入能量，只能使尖峰脉冲的数目增多，而不能有效地提高峰值功率水平。同时，激光输出的时间相干性也很差。

为了得到高的峰值功率和窄的单个激光脉冲，人们提出了Q调制技术[23, 24]。它的基本原理是通过某种方法，使谐振腔的损耗（Q值，“调Q”名称便来自于此）按照预设的方式变化：在泵浦激励刚开始时，先使光腔具有很高的损耗 $\delta_H$ ，激光器由于阈值高而不能产生激光振荡，因此亚稳态上的粒子数便可以积累到较高的水平；然后在适当的时刻，突然降低腔的损耗，因此阈值也随之突然降低，此时反转集居数大大超过阈值，受激辐射迅速地增强；于是在极短时间内，上能级储存的大量的粒子能量转变为激光能量，在输出端形成一个很强的激光脉冲输出。采用调Q技术很容易获得峰值功率高于兆瓦，脉宽为几十毫微秒，甚至更小的激光巨脉冲。

图 16.1为调Q过程的示意图。在 $t < 0$ 时，损耗为 $\delta_H$ ，腔内光子寿命为 $H$ ，相应的阈值为

$$\Delta n'_t = \frac{\delta_H}{\sigma_{21}l} \quad (16.1)$$

在 $t < 0$ 时，泵源激励使反转集居数不断增长，至 $t = 0$ 时刻，反转集居数密度增加到 $\Delta n$ 。但因 $\Delta n < \Delta n'_t$ ，所以不能产生激光，此时腔内只有由自发辐射产生的少量光子，光子数密度 $N_i$ 很小。在 $t = 0$ 时刻，损耗突然降至 $\delta$ （光子寿命为 $R$ ），阈值也相应地降至 $\Delta n_t$

$$\Delta n_t = \frac{\delta}{\sigma_{21}l} \quad (16.2)$$

由于 $n_i$ 比 $n_t$ 大得多，所以腔内光子数密度 $N$ 迅速增长。同时受激辐射又使反转集居数密度迅速减少，到 $t = t_p$ 时刻， $\Delta n = \Delta n_t$ ，腔内光子数密度不再增长， $N$ 达到最大值 $N_m$ 。当 $t > t_p$ 时，由于 $\Delta n < \Delta n_t$ ，腔内光子数密度 $N$ 迅速减少。当 $N$ 又减少到 $N_i$ 时，巨脉冲熄灭，此时 $\Delta n = \Delta n_f$ 。

### 2.2 饱和吸收与被动调Q

在谐振腔中设置一饱和吸收体，利用其饱和吸收效应可以控制谐振腔的损耗。所谓饱和吸收晶体，是指晶体的吸收系数在小光强时很大，但随着光强的增加，吸收系数趋于饱和值的现象。可近似地把饱和吸收体看成是两能级系统，利用稳态二能级速率方程，以及速率方程，可求出中心频率处的吸收系数为：

$$\beta = \frac{\beta^0}{1 + I/I'_s}$$

式中， $\beta^0$ 是中心频率小信号吸收系数； $I$ 和 $I'_s$ 分别为入射光强和饱和光强。简并度相等的二能级系统的饱和光强为：

$$I'_s = \frac{h\nu}{2\sigma_{12}\tau_2} \quad (16.3)$$

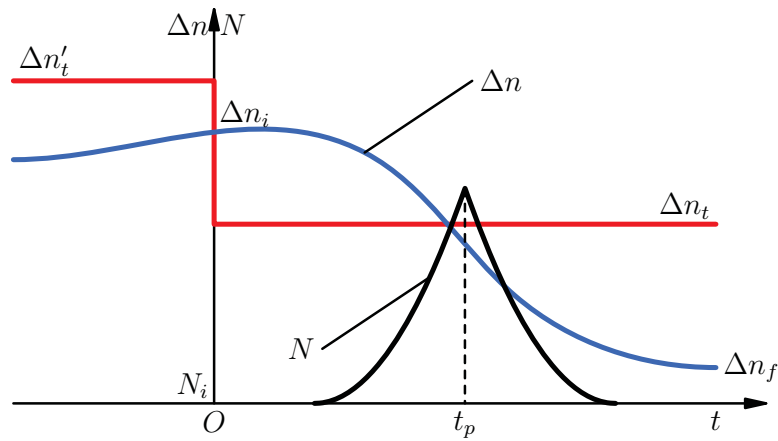


图 16.1: 调Q过程的原理图。

式中,  $\sigma_{12}$ 为吸收截面;  $\tau_2$ 为高能级寿命。由式16.3可见, 吸收系数随光强的增加而减少, 当光强很大时, 吸收系数为零, 入射光几乎全部透过。饱和吸收体的透过率随光强的变化如图 16.2所示。

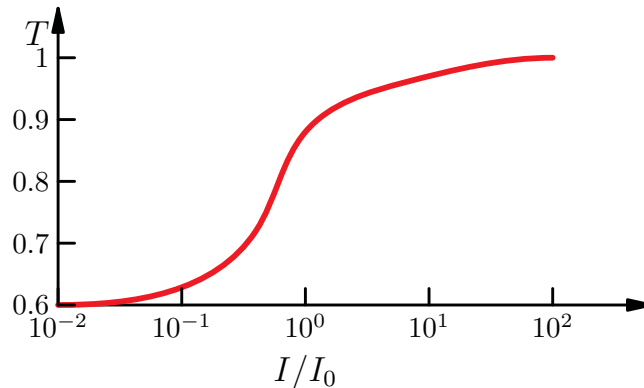


图 16.2: 染料盒透过率随光强变化的曲线。

最早出现的被动调Q激光器是以染料作为饱和吸收介质的。对钕玻璃和YAG等激光器适用的染料有BDN、五甲川、十一甲川和蓝色素等, 其相应的溶剂有丙酮、氯苯、二氯乙烷等。对红宝石激光器适用的染料有隐花菁、金属酞菁、钒酞菁、氯铝钛菁、钼钛菁、叶绿素D等, 其相应的溶剂有丙酮、甲醇、氯苯、硝基苯等。将上述染料掺入透明塑料基质制成的染料片, 染料浓度及泵浦能量的大小对巨脉冲特性有明显影响。浓度太低或泵浦能量太大都容易形成多脉冲输出。浓度太高则会提高激光器阈值。染料调Q是一种被动式快开关, 使用简单, 与脉冲激光器配合可获得峰值功率千兆瓦, 脉宽数十纳秒的激光巨脉冲。其缺点是染料易变质, 需经常更换, 输出不够稳定。

近年来, 发展了系列新型固体饱和吸收材料。适用于1060nm波段的固体饱和吸收材料有:  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 、 $\text{Cr}^{4+}:\text{GSGG}$ 、 $\text{Cr}^{4+}:\text{GSAG}$ 、 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  (色心材料)及GaAs等。将 $\text{Cr}^{4+}$ 和 $\text{Nd}^{3+}$ 同时掺入晶体, 还可实现自调Q。

将饱和吸收体放在谐振腔中, 当泵浦过程开始时, 由于其吸收系数大, 谐振腔损耗很大, 激光器不能起振。随着激光工作物质中反转集居数的积累, 放大的自发辐射逐渐增加, 当光强与饱和吸收体的 $I'_s$ 相比拟时, 吸收系数显著减少。当这一过程发展到一定程度时, 单程增益等于单程损耗, 激光器开始起振。随着激光强度的增加, 饱和吸收体的吸收系数又继续下降, 而这又促使激光更迅速地增加, 于是产生了受激辐射不断增长的雪崩过程。当光强增加至可与增益介质的饱和光强相当时, 增益系数显著下降, 最终导致激光熄灭。

由上述巨脉冲发展过程可知, 用作被动Q开关的饱和吸收体应具备下列特性:

1. 吸收峰中心波长应与激光器激光波长吻合;
2. 饱和光强 $I'_s$ 要适当。

$I'_s$ 小于增益介质的饱和光强 $I_s$ 是巨脉冲产生的必要条件,  $I'_s$ 太大还会因Q开关速度太慢而严重影响调Q效果。但 $I'_s$ 也不宜过小, 否则很弱的光就能使其透明, 工作物质的反转集居数便不能充分积累。

### 2.3 电光调Q

晶体的电光效应是电光开关的主要作用过程，其本质是在外加电场作用下，使构成晶体的粒子排列情况发生一定的变化，从而引起晶体的折射率也发生变化，致使晶体的双折射性质发生明显的变化。晶体的折射率 $n$ 随外加电场 $E$ 的变化，可以用一个非线性函数关系式表示：

$$\eta = \eta_0 + aE + bE^2 + \dots \quad (16.4)$$

式中， $a$ ， $b$ 是常数， $\eta_0$ 是在 $E = 0$ 时的折射率， $\eta$ 是加了外电场 $E$ 后的折射率， $\Delta\eta$ 表示加外电场前后折射率的变化量。式16.4中 $aE$ 是一次项，由该项所引起的折射率变化称为一次电光效应，也叫线性电光效应，普克尔（Pockels）效应。由二次项 $bE^2$ 引起的折射率变化称为二次电光效应，又叫克尔（Kerr）效应。前者一般总比后者显著。故目前线性电光效应得到广泛应用。而电光Q开关就是以普克尔效应为基础的。

理论和实验证明，具有对称中心的晶体不具有线性电光效应，故电光晶体应没有对称中心。在32类晶体中有11类晶体具有对称中心，所以只有21类晶体可以产生线性电光效应。其次是入射光必须在光轴与感应主轴组成的平面内传播。如图16.2所示。 $X'$ ， $Y'$ ， $Z'$ 为感应主轴，其中 $Z'$ 与光轴 $Z$ 重合。只要入射光沿晶体光轴与感应主轴组成的平面（即 $X'OZ'$ ，平面和 $Y'OZ'$ 平面）内传播，都可以产生线性电光效应，且不受晶体中偏光振动方向转动的影响。同理可证在其他方向上的入射均会失去线性关系。因此使用电光晶体时，除了要选择没有对称中心的晶体材料外，还必须特别注意晶体的切割方向和放置方位，使入射光能满足上述条件。

### 2.4 带起偏器的电光Q开关

带起偏器的电光晶体是应用较广的调Q装置。其特点是利用一个起偏棱镜兼作起偏和检偏用。图16.3为其装置原理图，选用YAG晶体为工作物质；起偏棱镜采用方解石空气隙棱镜（即格兰—付克棱镜），用KD\*P晶体作调制晶体，它是Z切割的，利用其 $\gamma_{63}$ 纵向电光效应。这种装置的调Q作用过程类似于前面所讲的工作原理。其不同之处在于电光晶体上只加 $U_\pi/4$ 电压，使其起到一个 $\lambda/4$ 波片的作用。当线偏振光通过晶体后便产生了 $\pi/2$ 相位差，或者说偏振面旋转了 $45^\circ$ ，而往返经过晶体后，偏振面便会发生 $90^\circ$ 的旋转，偏振光此时便不能再通过格兰棱镜。格兰棱镜即同时起到了起偏和检偏的作用。我们在这里之所以用带气隙的格兰—付克棱镜而未采用胶合的格兰—汤姆生棱镜的原因是后者在强功率激光作用下，胶合层容易被破坏。

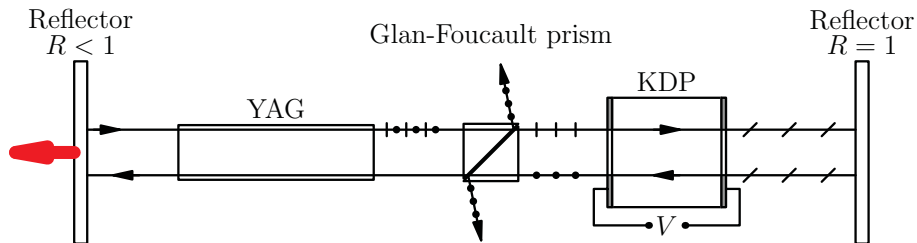


图 16.3: 典型的电光调Q激光器工作原理图。

电光Q开关是目前使用最广泛的一种Q开关，适用于脉冲激光器，其主要特点是开关时间短（约ns）。电光调Q激光器可以获得脉宽窄、峰值功率高的巨脉冲。例如，典型的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 电光调Q激光器的输出光脉冲宽度为 $10 \sim 20\text{ns}$ ，峰值功率可达数兆瓦至数十兆瓦，而对于钕玻璃激光器，不难获得数百兆瓦的峰值功率。常用电光晶体有KDP、KD\*P、 $\text{LiNbO}_3$ 及BSO等。

下面分析KD\*P晶体电光调Q过程。KD\*P晶体属于KDP类电光晶体，它们都具有42m点群。这类晶体不为零的电光系数只有 $\gamma_{41}$ 和 $\gamma_{63}$ 两个。而描述其折射率的椭球方程为

$$\frac{x^2}{\eta_o^2} + \frac{y^2}{\eta_o^2} + \frac{z^2}{\eta_e^2} + 2\gamma_{41}E_yxz + 2\gamma_{63}E_zxy = 1$$

其中电光系数 $\gamma_{41}$ 是描述电场方向垂直光轴时的电光效应， $\gamma_{63}$ 是描述电场方向平行光轴时的电光效应。因为 $\gamma_{63} > \gamma_{41}$ ，所以在使用KDP类晶体时，为了提高调Q器件的效率，一般都是沿晶体光轴方向加电场。故需要垂直光轴切割晶片（Z-切割）。

通常晶体的通光方向与电场方向要么平行，要么相互垂直。前者称为纵向电光效应，后者称为横向电光效应。我们知道，在外电场作用下，光沿光轴传播时引起的双折射最大。而且不存在易受温度影响的自然双折射。这是一大优点，所以对于KDP类晶体普遍应用 $\gamma_{63}$ 的纵向电光效应。

电光调Q激光器的原理分析如图16.4所示。未加电场前晶体的折射率主轴 $x, y, z$ 。沿晶体光轴方向 $z$ 施加一外电场 $E$ ，由于普克尔效应，主轴变为 $x', y', z'$ 。令光束沿 $z$ 轴方向传播，经偏振器后变为平行于 $x$ 轴的

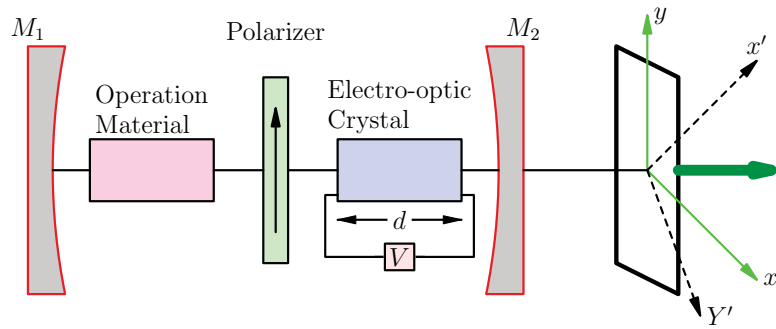


图 16.4: 电光晶体Q开关激光器原理图。

线偏振光，入射到晶体表面时分解为等幅的 $x'$ 和 $y'$ 方向的偏振光；在晶体中二者具有不同的折射率 $x$ 和 $y$ 。经过晶体长度 $d$ 距离后，二偏振分量产生了相位差：

$$\delta = \frac{2\pi\nu d}{c}(\eta'_y - \eta'_x) = \frac{2\pi\nu\eta_0^3\gamma_{63}}{c}Ed = \frac{2\pi\nu\eta_0^3\gamma_{63}}{c}V \quad (16.5)$$

式中 $\eta_0$ 为晶体寻常光折射率； $\gamma_{63}$ 是晶体的电光系数； $V$ 是加在晶体两端的电压。

式16.5表明，对于KDP类晶体的 $\gamma_{63}$ 纵向电光效应，在外电场作用下引起的相位差正比于加在晶片上的电压 $V$ ，而与晶片的厚度 $d$ 无关。当 $\delta = \pi/2$ 时，所需电压称作四分之一波电压，记作 $V_{\lambda/4}$ 。图 16.2中电光晶体上施以电压 $V_{\lambda/4}$ 时，从偏振器出射的线偏振光经电光晶体后，沿 $x'$ 和 $y'$ 方向的偏振分量产生了 $\pi/2$ 位相延迟，经全反射镜反射后再次通过电光晶体后又将产生 $\pi/2$ 延迟，合成后虽仍是线偏振光，但偏振方向垂直于偏振器的偏振方向，因此不能通过偏振器。这种情况下谐振腔的损耗很大，处于低 $Q$ 值状态，激光器不能振荡，激光上能级不断积累粒子。如果在某一时刻，突然撤去电光晶体两端的电压，则谐振腔突变至低损耗、高 $Q$ 值状态，于是形成巨脉冲激光。

由于 $\gamma_{63}$ 纵向电光效应要求外加电场和通光方向都与光轴同向，因此要用既能导电又能透光材料作电极，但大多数物质都不具有这种特性，故多采用中空的环形电极。同时由于KDP类晶体易潮解，故对晶体又必须采取密封防潮措施。

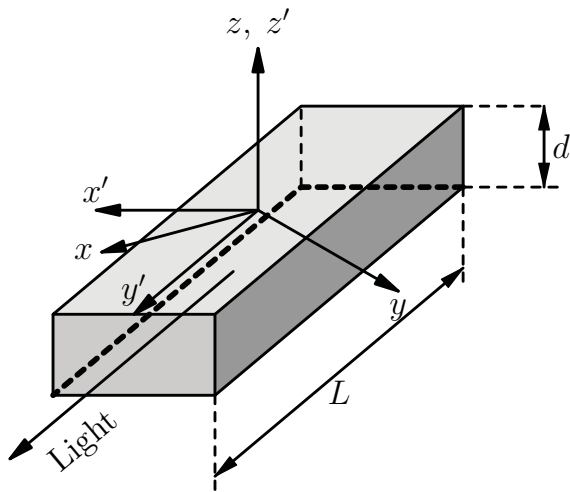


图 16.5:  $\gamma_{63}$ 横向工作。

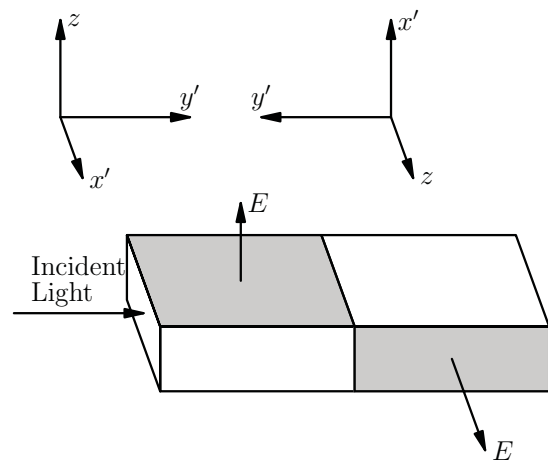


图 16.6: 自然双折射补偿。

至于 $\gamma_{63}$ 横向电光效应的应用，除要求电场方向与晶体光轴方向保持一致外，还必须使光的传播方向与电场方向垂直。为此，晶体通常采用 $45^\circ$ -Z切割，如图16.5所示。晶片的长和宽是与 $x, y$ 轴成 $45^\circ$ 角。光沿晶体的正(110)方向传播，晶片在电场方向的厚度为 $d$ ，在光传播方向的长度为 $L$ 。当外电场沿 $Z$ 轴方向作用于晶体时，晶体的两个主轴旋转至 $X', Y'$ ，而通光方向正好与 $Y'$ 轴重合。感应折射率在晶体中的方位与纵向运用时完全相同，透射光的相位差为：

$$\delta = \frac{2\pi L}{\lambda}(n_o - n_e) - \frac{\pi d}{\lambda l}n_o^3\gamma_{63}V \quad (16.6)$$

式中第一项表示由于自然双折射所造成的相位差，第二项表示因电场引起的相位差。由式16.6可见，横向效应与晶体的尺寸 $(L/d)$ 有关，通过改变晶体的纵横比值 $(L/d)$ 可以降低半波电压(或 $V_{\lambda/4}$ 电压)，这是它的

一个优点。但自然双折射引起的相位差是与外电场无关的，而且这个量容易受温度变化的影响。这些不可控的成分对电光效应的应用是不利的。

为了补偿这个固有的相位差，可以采用同一次磨制而成的从材料到外形几乎完全相同的两块晶片，如图16.6拼接。让一块晶体的 $X'$ 和 $Z$ 轴分别与另一块晶体的 $Z$ 和 $X'$ 轴平行排列。这样就能使第一块晶体中的 $o$ 光进入第二块晶体后变成 $e$ 光，而使 $e$ 光相应地变成 $o$ 光。而两块等同晶体随温度的变化基本相同，故由自然双折射引起的相位差和其随温度的变化均可消除。但因这种补偿方法要求两块晶体完全等同，长度和温度的微小差别也会造成严重的影响，故对晶体加工的精度要求很高。除特殊需要外，很少采用这种 $\gamma_{63}$ 横向效应作 $Q$ 开关。

以铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )为代表的LN类电光晶体不存在纵向电光效应，只能横向方式工作，即电场沿光轴( $Z$ 轴)方向作用时，光束沿 $x$ 或 $y$ 轴方向通过。这与KDP类晶体的横向运用相同，需要两块等同的晶体对自然双折射进行补偿。不过该类晶体的电光系数较大，可采用光束沿光轴 $Z$ 方向传播，而电场则加在与 $Z$ 轴垂直的 $X$ 轴或 $y$ 轴上。此类晶体的电光调制特性在实验七中已经有详细介绍，此处不再赘述。

调试带有起偏镜的电光 $Q$ 开关时，欲得到理想的开关效果，则必须严格保持格兰棱镜的起偏方向与调制晶体的 $X$ 轴(或 $y$ 轴)方向一致，以保证起偏方向与调制晶体加压后感应折射率椭球的感应主轴 $X'$ 和 $Y'$ 成 $45^\circ$ 角。简便的调试方法是在调制晶体加压的状态下，转动格兰棱镜和调制晶体的相对位置，直到激光不能振荡为止。为此在设计激光器时，要注意使它们之间有相对转动的自由度以满足调试的要求。

### 三 实验装置和步骤

本实验要求正确搭建光路，得到被动调 $Q$ ，和主动调 $Q$ 两种情况下的激光输出特性。

#### 3.1 被动调 $Q$ 的实验

**实验装置**  $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 固体激光器，激光电源， $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 饱和吸收晶体，激光器能量计、PIN输出功率探测器、数字存储示波器。

**实验装置图** 实验装置如图 16.7所示。该实验是在 $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 固体激光器激光器正常工作的基础上进行的。首先得到未调 $Q$ 的激光系统，然后在激光谐振腔中加入 $\text{Cr}^{4+}$ :YAG可饱和吸收晶体，测量调 $Q$ 前后的激光输出参数。

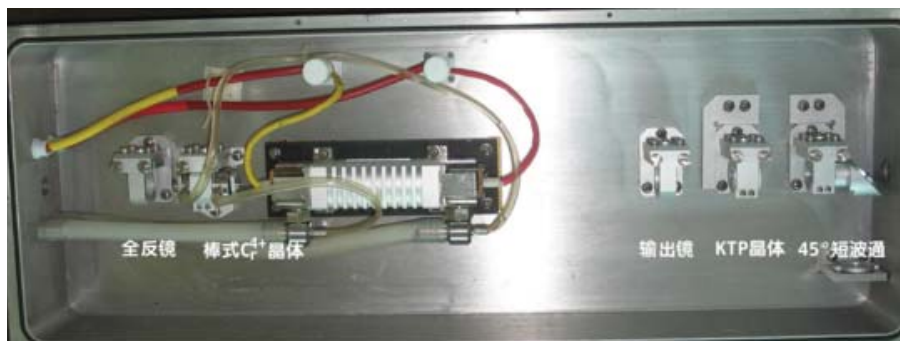


图 16.7: 被动调 $Q$ 的 $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 激光器的图片。

实验步骤:

1. 检查 $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 固体激光器的水路系统是否正确和正常，尤其是 $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 可饱和吸收晶体的水冷是否正常；
2. 检查 $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 固体激光器的电路系统接线是否正确和正常；
3. 检查 $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 固体激光器的光路系统是否正确。
4. 如果水路、电路、光路系统阶正常，请示老师是否可以接通激光电源。
5. 接通激光电源，逐渐增加泵浦电压。放一张黑纸于透镜前面，一个激光脉冲可把黑纸烧一焦斑，这时便证实有 $1.064\mu\text{m}$ 激光输出，从焦斑大小判别它功率大小。
6. 若 $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 固体激光器输出已经基本正常，用能量计测量红外激光脉冲的输出能量，和任课老师给出的红外激光脉冲的标准输出能量值相比，是否到达基本要求。如果达到基本要求，记录红外激光脉冲的能量和输出波形。
7. 完成上述基本实验准备之后，请示老师是否可以进行下面的被动调 $Q$ 实验。

8. 将 $\text{Cr}^{4+}$ :YAG可饱和吸收晶体推入到全反镜和激光晶体之间的光路中, 开启激光, 检查激光器是否工作正常。
9. 精心地调节 $\text{Cr}^{4+}$ :YAG可饱和吸收晶体的位置, 用试纸探测, 确认激光器达到最大输出, 再用能量计测量激光输出的能量, 用探测器和示波器测量脉冲激光输出波形。
10. 将小孔光阑推入到输出镜和激光晶体之间的光路中, 观察和测量脉冲激光器的输出脉冲能量和脉冲波形。
11. 将 $\text{Cr}^{4+}$ :YAG可饱和吸收晶体推入到全反镜和激光晶体之间的光路中, 重复上述实验过程。

### 3.2 电光调Q的实验

**实验装置**  $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 固体激光器, 激光电源,  $\text{KD}^*\text{P}$ 电光调Q晶体, 电光调Q电源, 激光器能量计、PIN输出功率探测器、数字存储示波器。

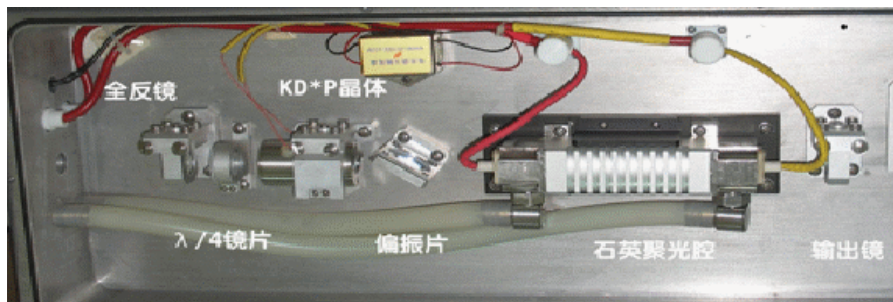


图 16.8: 电光调Q的 $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 激光器的图片。

实验步骤:

1. 首先完成与上面实验同样的准备步骤, 在未调Q时, 先得到正确的激光输出; 然后请示老师, 是否可以进行下面的调Q实验部分。
2. 将 $\lambda/4$ 波片和偏振片推入光路, 开启激光, 检查激光器是否工作正常。
3. 将 $\text{KD}^*\text{P}$ 电光晶体沿轨道垂直地逐步推入光路, 开启电源, 用试纸检查是否有激光输出, 如无激光输出, 适当调节上述三个元件的位置。
4. 精心地调节 $\text{KD}^*\text{P}$ 电光晶体的位置和偏振片的方向, 使激光器达到最强, 再用能量计测量激光输出的能量, 用探测器和示波器测量脉冲波形。
5. 分析比较调Q前后输出脉冲的强度、波形、功率等参数的差别。

## 四 思考题

完成实验后, 请思考如下的问题:

1. 激光调Q的基本原理是什么? 人们为什么要进行调Q, 调Q后的激光输出有那些变化?
2. 饱和吸收调Q和电光晶体调Q的基本原理分别是什么? 以本实验所用材料和实验装置为例加以说明。
3. 从实验配置上看, 你认为现在使用的电光晶体使用的是横向电光效应, 还是纵向电光效应, 说明理由。

## 注意事项

注意: 本实验所的激光波长为1064nm, 不再可见光范围, 并且输出光强较大, 属于强激光, 能够将人眼致盲; 因此实验时必须严格按照实验操作规程, 佩戴防护眼睛, 以免被激光所伤害。