

Nd:YAG 激光器自由运转及调 Q 实验

【实验目的】

1. 了解固体激光器的结构及工作原理（自由运转和染料调 Q），掌握其调整方法；
2. 了解固体激光器的主要参数的测试技术；
3. 观察调 Q 脉冲经过 KTP 晶体实现倍频现象，了解倍频中相位匹配特性。

【实验原理】

一、自由振荡

1. 固体激光器组成

固体激光器主要由工作物质，泵浦光源和光学谐振腔三大部分组成。常用的工作物质有红宝石，掺钕钇铝石榴石（Nd: YAG），钛宝石等晶体和钕玻璃等。谐振腔常用两个平面或球面反射镜。泵浦光源常用氙灯、氪灯、高压汞灯，碘钨灯。在本实验中，激光器的主要元件为：

- ①工作物质：掺钕钇铝石榴石（Nd: YAG）；
- ②光学谐振腔：双氙灯，双椭圆聚光腔，重复脉冲电源；
- ③谐振腔镜：双色镜，部分反射镜。

2. 自由振荡固体激光器的输出特性

自由振荡激光器输出激光脉冲的特点是具有尖峰结构，即由许多振幅、脉宽和间隔作随机变化的尖峰脉冲组成。每个尖峰的宽度约为 $0.1 \sim 1 \mu\text{s}$ ，间隔为数微秒，脉冲序列的时间长度大致等于闪光灯泵浦持续的时间。这种现象称为激光器的弛豫振荡。

产生弛豫振荡的主要原因是：当激光器的工作物质被泵浦，上能级的粒子反转数超过阈值条件时，即产生激光振荡，使腔内光子密度增加而发射激光。随着激光的发射，上能级粒子数被大量消耗，导致粒子反转数降低，当低于阈值水平时，激光振荡就停止，这时，由于光泵的继续抽运，上能级粒子反转数重新积累，当超过阈值时，又产生第二个脉冲，如此不断重复上述过程，直到泵浦结束。可见每个脉冲都是在阈值附近产生的，因此脉冲的峰值功率水平较低，从这个作用过程可以看出，增加泵浦功率也是无助于峰值功率的提高，而只会使小尖峰的个

数增加。

二、调 Q 的概念

在激光技术中，用品质因数 Q 来描述与谐振腔损耗有关的特性。 Q 值定义为

$$Q = 2\pi\nu_0 \frac{\text{腔内存储的激光能量}}{\text{每秒损耗的能量}}$$

用 W 表示腔内存储的能量， δ 表示腔的单程损耗，且设谐振腔长度为 L ，工作介质折射率 n ，光速 c ，则 Q 值可表示为

$$Q = 2\pi\nu_0 \frac{W}{\delta Wc/nL} = \frac{2\pi nL}{\delta\lambda_0}$$

式中 λ_0 为真空激光波长。由上式可见， Q 值与谐振腔损耗成反比：损耗大，则 Q 值高，不易起振。

三. 被动染料调 Q

被动调 Q 是利用染料的可饱和吸收特性来完成调 Q 运转的。

1. 可饱和吸收特性

能量为 $h\nu$ 的光子入射到有机染料内，将引起染料分子的受激吸收跃迁，染料呈吸收状态，随着入射光强的增强，从基态 E_1 跃迁到高能态 E_2 （见图 1a）。随着高能态染料分子增多，此时燃料的吸收率将逐渐降低。直至跃迁处于动态平衡，吸收等于零，吸收达到饱和，染料变为透明（见图 1b）。染料的这种特性叫饱和吸收特性，吸收饱和时对应的光强为 I_s 为饱和光强。

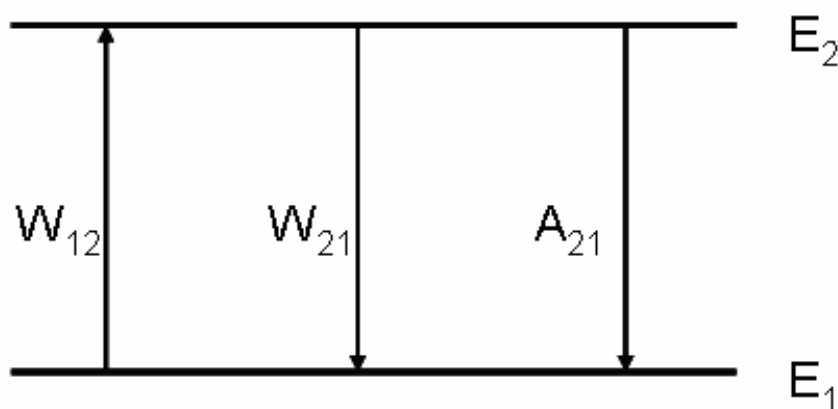


图 1 (a)

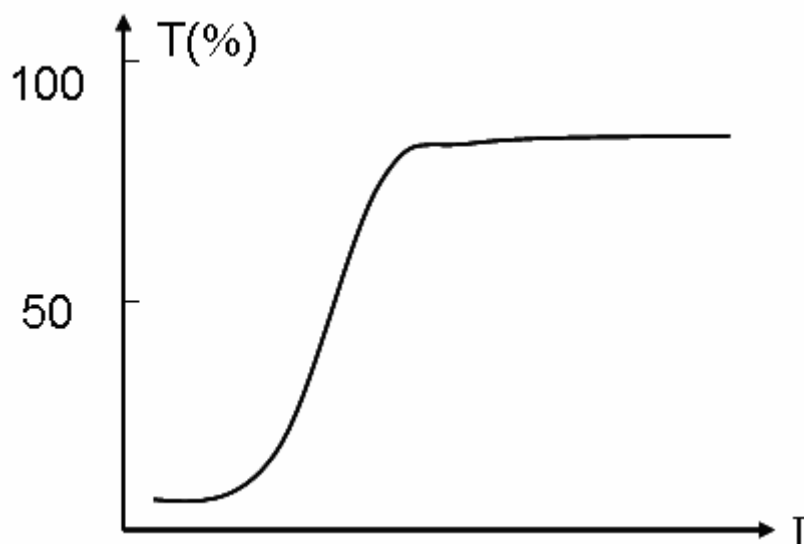


图 1 (b)

2. 染料调 Q 原理

将具有饱和吸收特性的染料（溶液或固态片）置于谐振腔内。最初，腔内自发荧光很弱，但染料吸收系数很大，光的透过率很低，腔处于低 Q 值状态，不能形成激光振荡。随着光泵的继续作用，粒子反转数积累，腔内荧光逐渐增强，染料吸收系数逐渐减小，透过率逐渐增大。当光强增为饱和光强 I_s 时，染料吸收达到饱和而变得透明，此时腔的 Q 值猛增，产生激光振荡，输出调 Q 激光。因为光泵是脉冲式的，故腔内光场迅速减弱（ $I \rightarrow 0$ ），染料又恢复了吸收特性，接着重复上面的过程。

四. 脉冲倍频实验

1. KTP 晶体

由于晶体中存在色散现象，所以在倍频晶体中的通光方向上，基频光与倍频光所经历的折射率 n_ω 与 $n_{2\omega}$ 是不同的。图 2 给出了一个单轴晶体的色散及 1064nm 倍频匹配点的折射率关系曲线。图 2 中的实线代表了寻常光的折射率，点划线代表了非寻常光的折射率，中间的点线则代表了非寻常光在改变入射光角度时得到的折射率。由图中可以看出，当改变晶体中入射光的角度，中间的非常光折射率曲线随之变化，在如图的位置上，可以实现 1064nm 的倍频。即在特定的通光方向上，532nm 的倍频光与 1064nm 的基频光折射率可以实现相等，实现倍频的相位匹配。

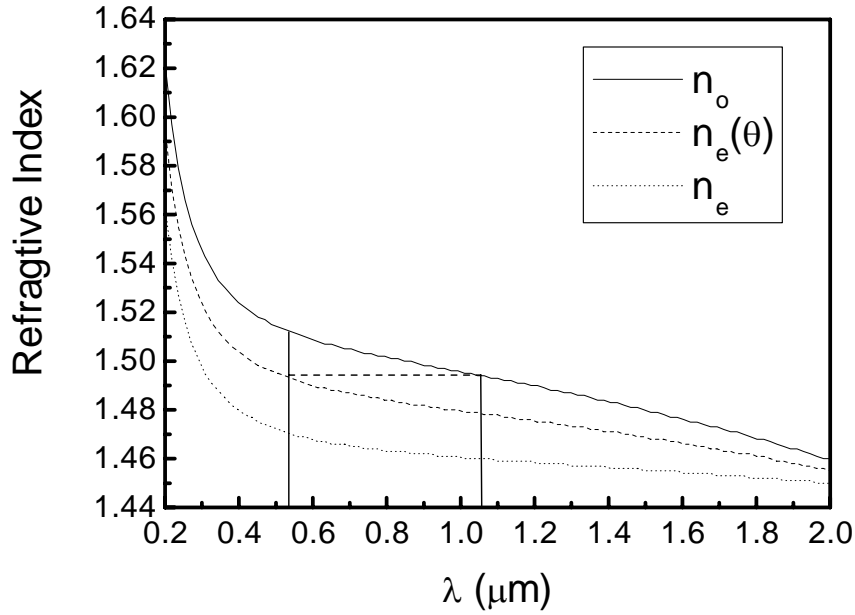


图2 单轴晶体色散曲线及倍频原理示意图

2. 倍频效率

KTP 晶体属于双轴晶体，实验中采用 II 类相位匹配，其 1064nm 的倍频最佳相位匹配角为 $\theta = 90^\circ$ ， $\phi = 23.2^\circ$ 。稍微转动晶体的方位角 ϕ ，倍频光功率随晶体角度变化。

倍频效率：

设 ω 为基频光， 2ω 为倍频光，则由理论计算可以得到倍频的效率为

$$\eta_{SHG} = \frac{|I_{2\omega}|}{|I_{\omega}|} = \frac{8\pi^2 L^2 d_{eff}^2}{n_{\omega}^2 n_{2\omega}^2 \lambda_{\omega}^2 c \epsilon_0} |I_{\omega}| \left[\frac{\sin\left(\frac{\Delta k L}{2}\right)}{\frac{\Delta k L}{2}} \right]^2$$

上式中 I_{ω} 为基频光光强， $I_{2\omega}$ 为倍频光光强， L 为晶体长度， d_{eff} 为晶体倍频有效非线性系数， n_{ω} 为基频光折射率， $n_{2\omega}$ 为倍频光折射率， $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$ 为三波相互作用时的波矢量失配。由公式给出的倍频效率是一个 Sinc 平方函数，当 $\Delta k = 0$ 时效率达到最大值，失配量在 π 的整数倍时达到最小值。

[注] 晶体长度为 4.9mm。实验中倍频晶体经过切割处理，其最佳匹配角度垂直于通光面，误差不超过 $\pm 1^\circ$ 。

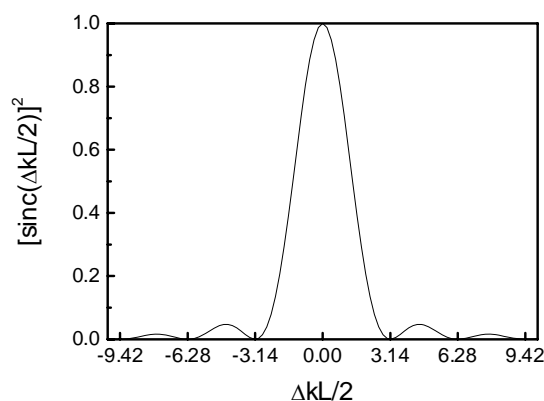


图3 倍频效率的 sinc 平方函数图

【实验步骤】

一、自由振荡

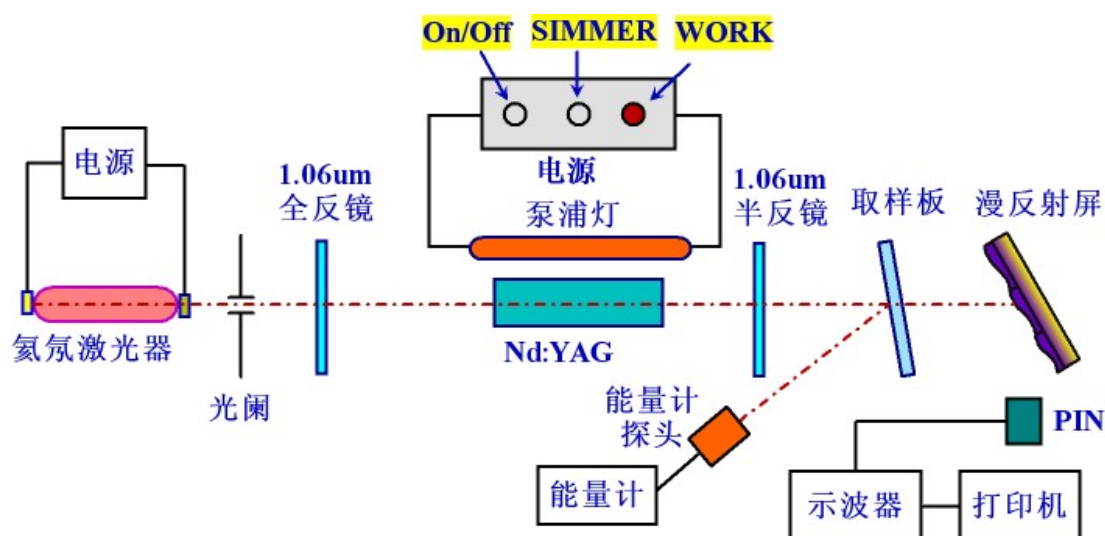


图4 自由振荡 YAG 激光器光路图

1. 用氦氖激光器调整光路。按照图4光路，调整氦氖激光器，使氦氖激光通过Nd:YAG晶体前后两孔的中心，保持不动；放入1.06μm半反镜，调整使其反射光沿原路返回；放入1.06μm全反镜，调整使其反射光沿原路返回。此时他们都与光轴垂直，达到谐振腔的腔镜平行。
2. 打开总电源，打开泵浦灯的电源，检查冷却水泵、高压等，设定电源的工作电压约在~750V。

注意：打开泵浦灯电源步骤：首先旋转开关钥匙，使其处于“On”位置；按下“SIMMER”按钮，再按下“WORK”按钮，此时电源开始工作。调节“CHARGE VOLT”下的旋钮，可以设定工作电压大小。如果要暂停泵浦电压，可以再次

按“WORK”按钮，使其恢复到原来的位置。

关机时，按照相反顺序操作。

3. 微调激光器的 $1.06\mu\text{m}$ 半反镜，用黑相纸在 $1.06\mu\text{m}$ 半反镜后面接收激光光斑，当光斑变圆时，光路调节完毕。
4. 按图 4 光路连接好后面个测量仪器，改变泵浦电压，用激光能量计测出不同电压下的输出能量 E_{out} ，给出 $E_{\text{out}} \sim E_p$ 曲线。 $E_p = CU^2/2$, $C=100\mu\text{F}$ 。（选做）
（电压每隔 50V 测量一个值，泵浦电压最大不超过 900V）
5. 按照图 4 光路，用示波器观察激光器的振荡波形，并打印结果。

二、染料调 Q

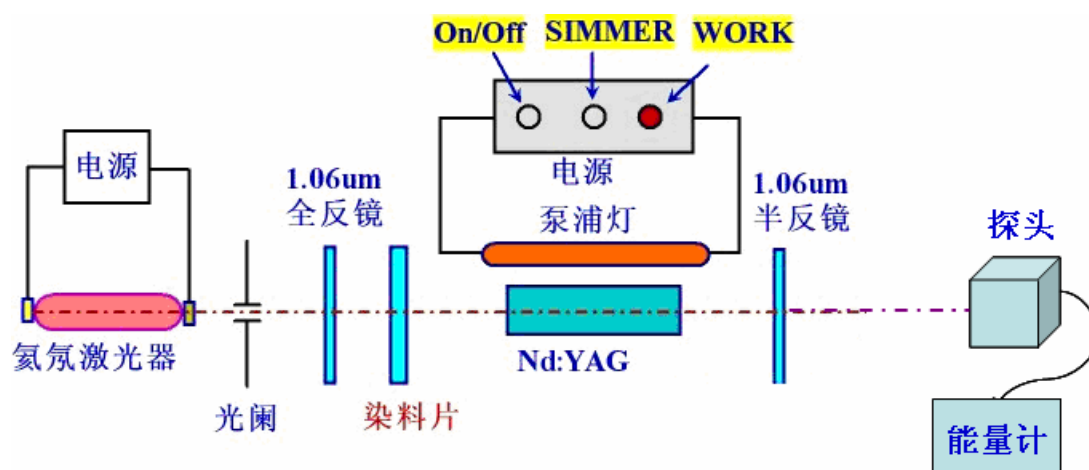


图 5 YAG 激光器调 Q 光路图

1. 按照图 5 光路，用氦氖激光器调整光路，将染料片插入 $1.06\mu\text{m}$ 全反镜和 Nd:YAG 晶体之间，调整使其反射光沿原路返回；打开泵浦灯的电源，设定电源的工作电压约在 $\sim 750\text{V}$ 。微调激光器的 $1.06\mu\text{m}$ 半反镜，用黑相纸在 $1.06\mu\text{m}$ 半反镜后面接收激光光斑，使其输出正常。
2. 改变泵浦电压，用激光能量计测出不同电压下的输出能量 E_{out} ，给出 $E_{\text{out}} \sim E_p$ 曲线。
3. 按照图 5 光路，用示波器记录激光器的调 Q 脉冲波形，并打印结果。
4. 将实验结果、数据以及图表整理并写出实验报告。

三、脉冲倍频

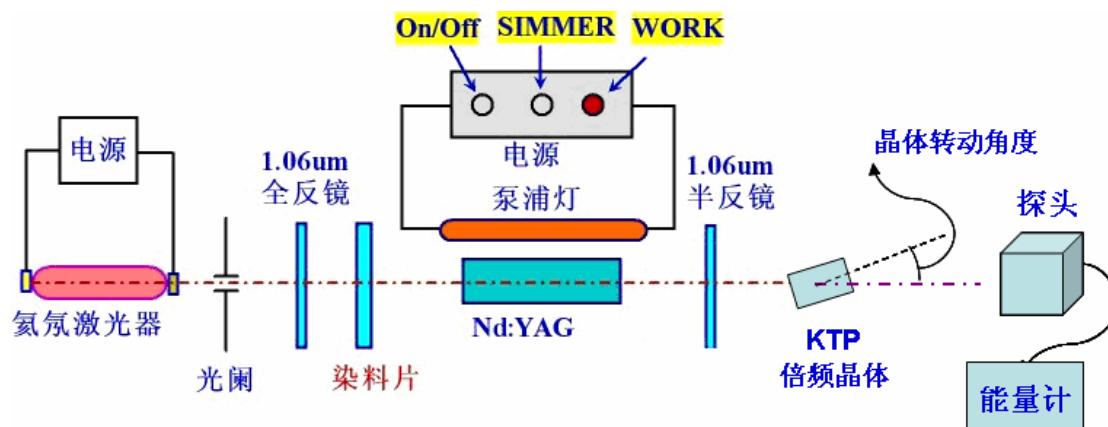


图 6 脉冲倍频实验光路图

1. 将倍频晶体如图 6 所示放置在光路中，让激光正入射倍频晶体。
2. 将泵浦电压保持在 750V，调节倍频晶体和光轴之间的夹角，每次改变一度，用能量计记录倍频光脉冲的能量。
3. 夹角范围为 $\pm 10^\circ$ ，共采集 20 组数据。
4. 将实验结果，数据拟合，画出转化效率随角度变化的关系图，并且和图 3 加以比较。

【安全事项】

1. 激光器的电源功率最大输很大，由于固体激光器效率低，大部分都转换为热量，所以一定要保证水冷却系统工作后方可进行操作，否则晶体和氦灯会发生损坏。
2. PIN 管器是高灵敏度光电二极管，不可直接将激光输出直接打在上面。只能探测强光打在物体上的散射光。
3. 防止激光射入眼睛；不要直接对着氦氖激光观察；
4. YAG 激光器开始工作时泵浦等上有高压，调制是不要碰及。

TDS220 示波器常用按钮：

垂直控制钮—P₁₄，幅度调节

水平控制钮—P₁₅，时间分辨率调节

触发控制钮—P₁₆、P₃₆，调节触发方式（设置在“正常”状态）

Run/Stop 钮—P₁₇，启动/停止波形

Hardcopy 钮— P_{28} ，打印波形

能量计（Astral ACX25FXS）使用方法：

1. 打开能量计电源，按模式开关 **Mode** 按钮选择工作状态（**Joules Mode**），选择量程 **300mJ** 档。
2. 按下 **ZERO** 按钮清零，接着让一个激光脉冲进入能量计探头，期间在显示器上会显示 **Trig** 指示，直到 **Trig** 指示消失，按下 **ZERO** 按钮，液晶屏上出现脉冲能量读数，记录。
3. 如果读数跳动，需要等待一定时间知道能量计恢复平衡状态，然后再重复步骤 2.