

Nd: YAG 固体激光器实验

一、 实验内容与器件

- 1、了解半导体激光器的工作原理和光电特性
- 2、掌握半导体泵浦固体激光器的工作原理和调试方法

二、 实验原理概述

1. 激光产生原理

光与物质的相互作用可以归结为光与原子的相互作用，有三种过程：吸收、自发辐射和受激辐射。

如果一个原子，开始处于基态，在没有外来光子，它将保持不变，如果一个能量为 $h\nu_{21}$ 的光子接近，则它吸收这个光子，处于激发态 E_2 。在此过程中不是所有的光子都能被原子吸收，只有当光子的能量正好等于原子的能级间隔 E_1-E_2 时才能被吸收。

激发态寿命很短，在不受外界影响时，它们会自发地返回到基态，并放出光子。自发辐射过程与外界作用无关，由于各个原子的辐射都是自发的、独立进行的，因而不同原子发出来的光子的发射方向和初相位是不相同的。

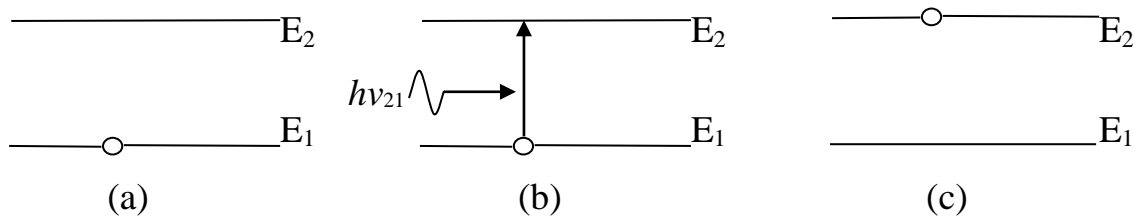


图 1、光与物质作用的吸收过程

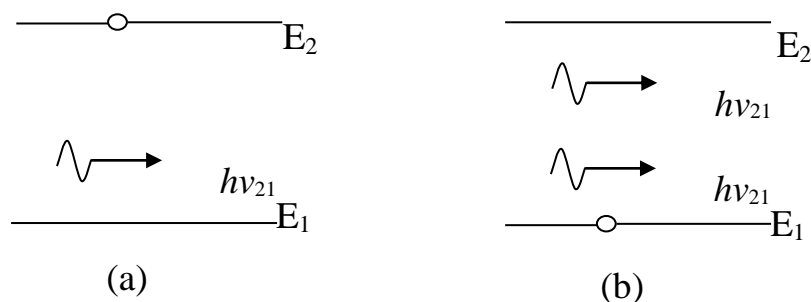


图 2、光与物质作用的受激辐射过程

处于激发态的原子，在外的光子的影响下，会从高能态向低能态跃迁，并两个状态间的能量差以辐射光子的形式发射出去。只有外来光子的能量正好为激发态与基态的能级差时，才能引起受激辐射，且受激辐射发出的光子与外来光子的频率、发射方向、偏振态和相位完全相同。激光的产生主要依赖受激辐射过程。激光器主要有：工作物质、谐振腔、泵浦源组成。工作物质主要提供粒子数反转。

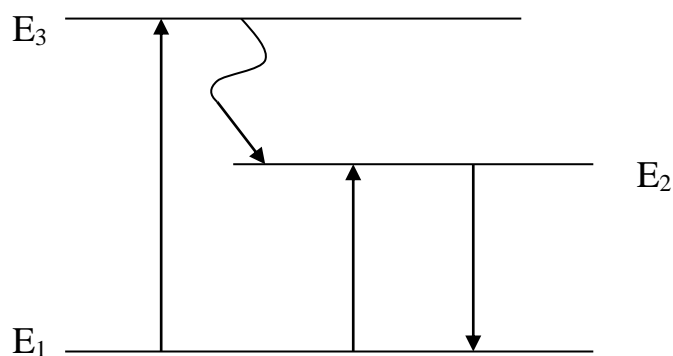


图 3、三能级系统示意图

泵浦过程使粒子从基态 E_1 抽运到激发态 E_3 ， E_3 上的粒子通过无辐射跃迁（该过程粒子从高能级跃迁到低能级时能量转变为热能或晶格振动能，但不辐射光子），迅速转移到亚稳态 E_2 。 E_2 是一个寿命较长的能级，这样处于 E_2 上的粒子不断积累， E_1 上的粒子又由于抽运过程而减少，从而实现 E_2 与 E_1 能级间的粒子数反转。激光产生必须有能提供光学正反馈的谐振腔。处于激发态的粒子由于不稳定性而自发辐射到基态，自发辐射产生的光子各个方向都有，偏离轴向的光子很快逸出腔外，只有沿轴向的光子，部分通过输出镜输出，部分被反射回工作物质，在两个反射镜间往返多次被放大，形成受激辐射的光放大即产生激光。

2 YAG 固体激光器

固体激光器基本都是由工作物质、泵浦系统、谐振腔和冷却、滤光系统构成。固体激光器工作物质是固体激光器的核心。影响固体激光器工作特性的关键是固体激光工作物质的物理和光谱性质，这主要是指吸收带、荧光谱线、热导率等。实验中，我们采用掺钕钇铝石榴石 ($\text{Nd}:\text{YAG}$) 作为工作物质，它的激活离子是钕离子 (Nd^{3+})，其吸收谱线如图 4 所示，在可见光和红外区域有几个较强的吸收带，我们关注的是 808nm 附近的吸收谱线。在本实验中，半导体激光器是用来做固体激光器的泵浦光源。我们采用了输出波长为 808nm, InGaAlAs/GaAs 量子阱结构设计、光斑预整形、输出功率大于 2W 的多模半导体激光器，工作电流可调，采用半导体制冷片对其进行温度控制。

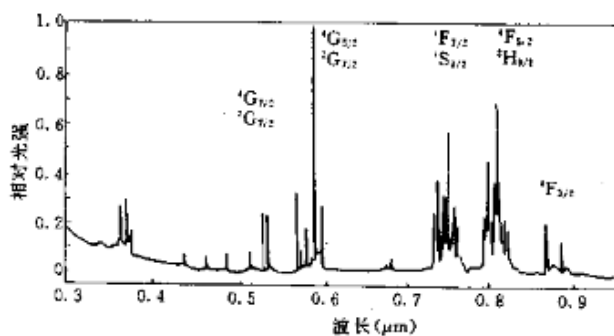


图 4 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体的吸收光谱 (300K)

YAG 中 Nd^{3+} 与激光产生有关系的能级结构如图 5 所示。它属于四能级系统。其激光上能级 E_3 为 ${}^3F_{3/2}$ ，激光下能级 E_2 为 ${}^4I_{13/2}$ ， ${}^4I_{11/2}$ ，其荧光谱线波长分别为 $1.35\mu\text{m}$ 和 $1.06\mu\text{m}$ ， ${}^4I_{9/2}$ 相应于 E_1 。由于 $1.06\mu\text{m}$ 比 $1.35\mu\text{m}$ 波长的荧光强约 4 倍，在本实验中，我们通过腔镜镀膜，

选择让 $1.06\mu\text{m}$ 的激光产生振荡，并输出。

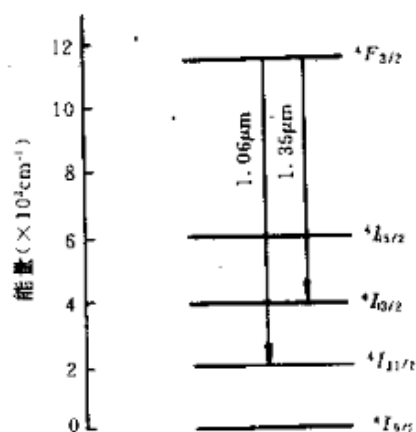


图 5 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 能级结构

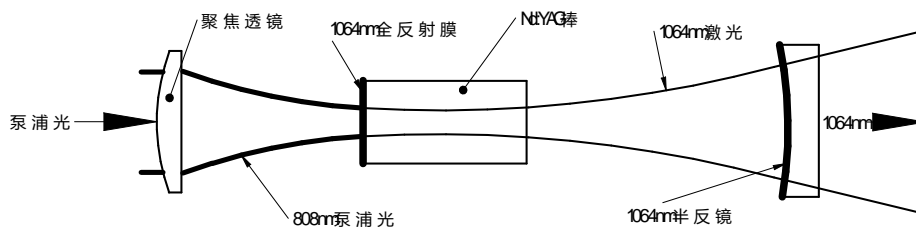


图 6 半导体激光器泵浦固体激光器结构示意图：端面泵浦

本实验系统采用了图 6 形式的端面泵浦方式，其中 YAG 棒左侧镀有 1064nm 的全反射膜，凹面镜表面镀有 1064nm 的半反膜，透光率约 5%，曲率半径 250mm。这两个反射膜形成了固体激光器的谐振腔。

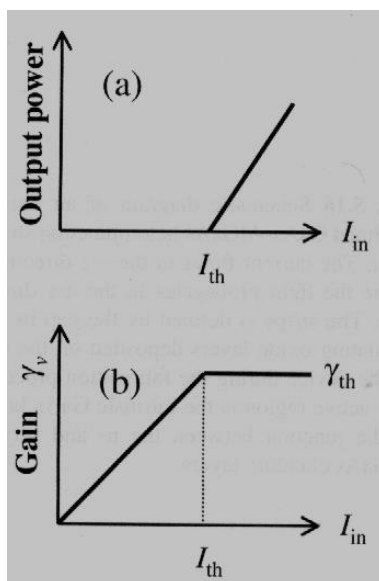


图 7 固体激光器的输出功率与增益系数

固体激光器的三个重要参数是增益、阈值和输出功率。增益系数定义为：

$$\gamma_v = dI / (dx \times I(x))$$

那么在增益介质中传播 x 距离后的光强为：

$$I(x) = I_0 e^{\gamma_v x}$$

要形成稳定的激光共振腔，要求在腔内激光往返走一个来回的增益和损耗能够抵消，即

$$R_1 R_2 e^{2\gamma_v l} e^{-2\alpha_b l} = 1,$$

其中，l 为增益介质长度，R₁ 和 R₂ 为前后两个激光腔镜的反射率，α 为吸收系数。此时，可以得到增益系数的阈值：

$$\gamma_{th} = \alpha_b - \frac{1}{2l} \ln(R_1 R_2).$$

当增益系数大于阈值时，就有激光输出（图 7）。输出激光功率为：

$$P_{out} = \eta \frac{h\nu}{e} (I_{in} - I_{th}).$$

对应的激光输出斜率效率为：

$$\frac{P_{out}}{(I_{in} - I_{th})} = \eta \frac{h\nu}{e}.$$

其中，I_{in} 是输入功率，I_{th} 是阈值功率，η 为电光转换效率，hν 为光子，e 为电子。

三、 实验方法与步骤

1. 半导体激光器的电光特性

在这个实验里，我们主要了解泵浦激光器的使用条件、参数特性。



- 1) 调整温度控制点到 25℃，功率指示计打到 20mW 档，功率计调零。
- 2) 将激光器工作电流调整到 0.6-1A 左右，半导体激光器发出 808nm 激光，观察光斑形状；调节准直透镜，使 808 激光成为近似的平行光，且整个光斑落在探测器有效区域内。
- 3) 重新将电流调到最小，确定温度控制在 25℃。仔细缓慢的调整工作电流，以 0.1A 为一档，记录电流和激光输出功率之间的对应数据。
- 4) 绘制半导体激光器的 I-P 曲线，求出激光器的阈值电流。

注意事项：

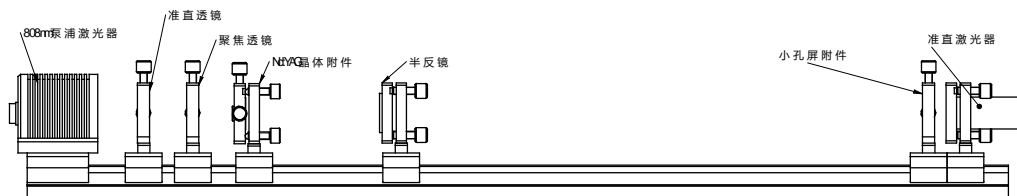
严禁用眼睛正对激光出射方向！避免反射、散射的激光进入眼睛！

半导体激光器在测量后，应尽快将电流调整到最小值。长时间在大电流下工作，会缩短激光器寿命，并使温度失控。

2. 半导体泵浦固体激光器的安装、调试和研究

在这个实验中，我们将安装调试一台半导体端面泵浦的固体激光器，并对其参数、特性进行一些观察和研究。

- 1) 在第一个实验的基础上，按下图排列、安装相关附件。



- 2) 将 808nm 半导体激光器（泵浦激光器）的工作电流调到 0.6-1A 左右，寻找聚焦透镜后激光焦点的位置，将 YAG 晶体镀全反射膜的表面置于焦点附近。
- 3) 将激光器工作电流调到 2A 左右，仔细观察 YAG 晶体中泵浦激光焦点处的情况，应可观察到晶体中有一白线，此为泵浦激光激发的荧光。前后仔细移动 YAG 晶体附件，使白线最亮。将工作电流调回到 0.6A 左右。
- 4) 打开准直激光器电源，调整导轨另一端的准直激光器和孔屏附件，使经过小孔屏的 650nm 红色准直激光打在 YAG 晶体上，仔细调整准直激光的方向和小孔屏的位置，使准直激光穿过 YAG 晶体和泵浦激光的焦点重合。
- 5) 寻找从 YAG 晶体全反射表面反射回的准直激光光点，调整 YAG 晶体附件上的两个调整螺钉，使光点（1 号光点）回到小孔中，则准直激光垂直于 YAG 晶体的全反射表面。
- 6) 将 YAG 激光的半反射镜附件安装在小孔屏和 YAG 晶体附件之间，距 YAG 晶体约 80-100mm。观察从半反镜反射回的 650nm 激光光斑情况。从这个反射镜将反射回两个光斑，一个是从第一个平面反射回的小光斑，另一个是从第二个突面反射回的大光斑（2 号光点）（半反镜是一个曲率半径为 250mm 的凹面镜）。
- 7) 而这时，原来在第 6 步中回到小孔中的 1 号光点也变化了形状和位置。调整半反镜附件上的两个调整螺钉，使 2 号光点与 1 号光点尽量重合，这时，YAG 激光器的两个反射镜已相互平行，构成一个激光谐振腔。
- 8) 将泵浦激光器的电流调到 2.5A，如果光路调节得较好的话，这时已有 1064nm 的激光输出，由于 1064nm 属于红外激光，我们肉眼看不见，我们可以将红外显示片放在固体激光器的出光端，看一下显示片上是否有红外光激发的可见荧光，一般情况下，可看到一个红色或绿色的光斑，说明固体激光器已经起振，输出 1064nm 激光。如果光路调节的很好，泵浦激光器的电流稍微一调大，准直激光就熄灭了。这是由于光路调整的非常准确，1064nm 的激光穿过小孔屏，进入了准直激光器，抑制了准直激光的发生。
- 9) 如果光路不好，用红外显示片可能观察不到 1064nm 的激光，这说明固体激光器没有起振或输出功率太低，主要原因一般是半反镜调整的不好，谐振腔失调。这时可以在红外显示片的监视下，微调半反镜上的两个调整螺钉，直到显示片上有光点，固体激光器出光为止。
- 10) 将激光功率计探头安装在固体激光器出光端，用于探测 1064nm 激光的功率。
- 11) 仔细调整半反镜，选择功率计适当的档位监视其功率变化，将功率调到最大。
- 12) 改变半反镜与 YAG 晶体之间的距离即腔长，重复第 11 步。观察功率变化和光斑变化情况，根据谐振腔理论，体会腔型对激光参数的影响。

13) 前后微调聚焦透镜的位置，观察激光功率变化的情况，体会模式匹配的原理和意义。

14) 将激光器调到最佳状态（在确定的电流和温度下，输出功率最大）。设定一个确定的温度值，如25℃，并稳定住，将泵浦激光器电流调到最低，准备测量泵浦光功率与固体激光器输出功率的对应关系和转换效率

15) 在上一步设定的温度下，以0.1A或0.2A为一档，改变泵浦激光器的工作电流，同时观察记录固体激光器的输出功率，根据泵浦激光器的I-P曲线，画出泵浦功率与固体激光器输出功率曲线P(泵浦)—P(固体)。确定固体激光器阈值和斜率效率。

注意事项：

YAG 激光器输出的 1064nm 激光为红外不可见激光，在实验操作时，务必注意眼睛安全！严禁眼睛与光路在同一水平面上！

3. 思考与讨论

- 1 如何测量固体激光器的增益？
- 2 固体激光器的最优腔长与波长是否有关？

四、 参考文献

- 1 周炳琨等，《激光原理》
- 2 钱士雄等，《非线性光学：原理与进展》
- 3 黄昆等，《固体物理学》