

实验十四 YAG激光器的装调

一 实验目的

1. 了解Nd³⁺:YAG 固体激光器的工作原理, 掌握基本的装调技术。
2. 熟悉Nd³⁺:YAG 脉冲固体激光器的基本特性, 掌握脉冲激光能量、脉宽和峰值功率的测量方法。

二 基本原理

2.1 Nd³⁺:YAG 物质特性

以三价钕离子作为激活粒子的钕激光器是使用最广泛的固体激光器。以Nd³⁺离子部分取代Y₃Al₅O₁₂离子的激光工作物质称为掺钕钇铝石榴石(简称Nd:YAG) [14, 15]。图 14.1给出Nd:YAG晶体中Nd³⁺离子与激光产生过程有关的能级图。处于基态⁴I_{9/2}的钕离子吸收泵浦光发射的光子能量后跃迁到⁴F_{7/2}、²S_{2/2}和⁴F_{5/2}、²H_{9/2}等能级上(吸收带的中心波长是810nm和750nm, 带宽为30nm), 然后全都通过无辐射跃迁, 迅速降落到⁴F_{3/2}能级。⁴F_{3/2}能级是寿命为0.23ms的亚稳态能级。处于⁴F_{3/2}能级的Nd³⁺离子可以向多个下能级跃迁并产生辐射, 其中跃迁几率最大的是⁴F_{3/2}到⁴I_{11/2}的跃迁(辐射光波长为1064nm), 其次是⁴F_{3/2}到⁴I_{9/2}的跃迁(辐射波长为950nm), ⁴F_{3/2}到⁴I_{13/2}的跃迁几率最小(波长为1319nm)。可以看出, ⁴F_{3/2}到⁴I_{11/2}跃迁属四能级系统, 由于⁴I_{11/2}能级位于基态之上, 集居数很少, 因此只需很低的泵浦能量就能实现激光振荡。所以Nd:YAG激光器的振荡波长通常为1064nm。⁴F_{3/2}到⁴I_{13/2}跃迁虽然也属于四能级系统, 但跃迁几率小, 只在设法抑制1064nm激光的情况下才能产生个1319nm的激光。⁴F_{3/2}至⁴I_{9/2}跃迁属于三能级系统, 室温下难以产生激光。

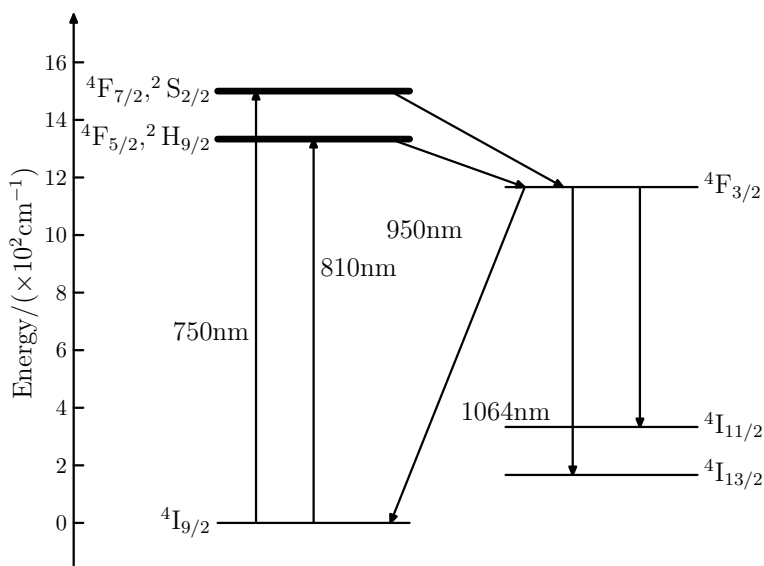


图 14.1: Nd³⁺:YAG 激光器中Nd³⁺的能级图。

如前所述, Nd:YAG 激光器属四能级系统, 有量子效率高、受激辐射截面大的优点, 其阈值远小于红宝石和钕玻璃激光器。钕铝石榴石晶体还具有较高的热效率, 易于散热, 因此Nd:YAG 激光器不仅可以单次脉冲运转, 还可以用于高重复频率脉冲和连续运转。目前, Nd:YAG 连续激光器的最大输出功率已超过1000W; 每秒5000次重复频率激光器的输出峰值功率已经达到千瓦以上, 每秒几十次重复频率的调Q激光器的峰值功率可以达几百兆瓦。

另一类钕激光器是钕玻璃激光器, 钕玻璃是在硅酸盐或磷酸盐玻璃中掺入适当的Nd³⁺制成的。钕玻璃中Nd³⁺离子的能级结构与Nd:YAG 基本相同, 只是能级对应的能量和宽度略有差异, 泵浦吸收带稍宽,

荧光寿命较长 (0.6ms)，荧光线宽较宽 (250cm^{-1})，但是量子效率较低，受激辐射截面约为Nd³⁺:YAG的1/30。一般情况下激光波长为1060nm，采取特殊选模措施时可产生1370nm激光。

由于钕玻璃的荧光寿命长，易于积累高能级粒子，又容易制成光学均匀性优良的大尺寸材料，因此可用于大能量以及大功率激光器。大能量钕玻璃激光器的输出能量已达上万焦耳。由于荧光线宽较宽，适于制成锁模器件，钕玻璃锁模激光器可产生脉宽小于1ps的超短光脉冲。钕玻璃的热导率低，振荡阈值又较Nd³⁺:YAG高，因此不宜用于连续和高重复情况下运转。

除上述掺Nd³⁺材料外，已实现激光运转的掺Nd³⁺晶体达140多种，目前发展最成熟和认为有前途的晶体有掺钕铝酸钇 (Nd³⁺:YAlO₃，简称Nd:YAP)、掺钕氟化钇锂 (Nd³⁺:LiYF₄，简称Nd:YLF)、掺钕钒酸钇 (Nd³⁺:YVO₄)和五磷酸钕 (Nd:P₅O₄，简称NdPP)等。其中Nd:YAP晶体的特点是所产生的激光线偏振度高，其1320nm波长激光效率高，易实现1079nm和1320nm双波长远转。但是其破坏阈值较低，热畸变较严重。Nd:YLF晶体荧光寿命长、热效应小，适于连续运行，所构成的半导体激光器泵浦的激光器效率高、阈值低。Nd:YVO₄的特点是受激发射截面大，泵浦吸收谱线宽，吸收截面大，而且吸收系数对温度变化不灵敏，用半导体激光器泵浦时波长匹配好，因而效率高、阈值低。其缺点是热性能差，不宜于放电灯泵浦。NdPP中钕离子是晶体化合物的组成部分，因此浓度比上述掺杂晶体高出数十倍，此外还具有发射截面大的特点，因此阈值低、效率高，可构成微型激光器。

2.2 固体激光器的激励方式

固体激光器是指以晶体或玻璃作为工作物质的激光器。少量的过渡金属离子或稀土离子渗入晶体或玻璃中，经光束激励后产生受激辐射。参与受激辐射的离子密度一般为 $10^{25} - 10^{26}\text{m}^{-3}$ ，较气体工作物质高3个量级以上。激光上能级的寿命也比较长 ($10^{-4} - 10^{-3}\text{s}$)，因此易于获得大能量输出，适于进行调Q以获得大功率脉冲输出。

气体放电灯光泵激励

固体激光器普遍采用光激励，将处于基态的粒子抽运到激发态，形成粒子数反转。光激励又可分为气体放电灯激励，和半导体激光器激励两种方式。

以气体放电灯为激励光源是广为采用的一种激励方式。脉冲激光器采用脉冲氙灯，连续激光器采用氙灯或碘钨灯。放电灯的发射光谱由连续谱和线状谱组成，覆盖非常宽的频率范围，其中只有与激光工作物质吸收波长相匹配的光，才能有效地用于光激励。为了使气体放电灯发出的光有效地入射到激光工作物质，聚光装置是必不可少的，通常采用椭圆或紧包聚光腔。椭圆聚光腔结构和圆柱腔都是常用的典型结构。在椭圆聚光腔中，灯与激光棒分别置于椭圆的两个焦轴上，腔内壁镀有高反射层。图 14.2是一个典型的椭圆聚光腔。

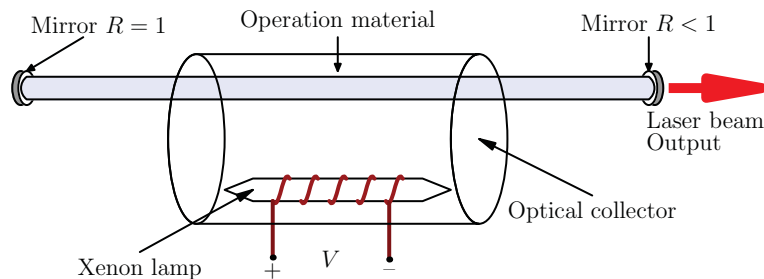


图 14.2: 气体放电激励的固体激光器的椭圆聚光腔。

在《激光原理与技术》教材中，给出了激光器输出功率（能量）和工作物质吸收的泵浦光功率（能量）的关系。但是实际上，工作物质吸收的光泵功率（能量）是难以测量的，我们能测出的是光泵的输入电功率 P_p （或者电功率 ε_p ）。激光器输出功率和光束输入电功率间的关系为

$$P = \frac{\nu_0}{\nu_p} \eta_0 \eta_1 \eta_{pt} \left(\frac{P_p}{P_{pt}} - 1 \right) \quad (14.1)$$

其中 P_{pt} 为光泵输入电功率阈值； ε_{pt} 为光泵输入电功率阈值 ν_0 为激光频率； ν_p 泵浦光频率； η_0 激光器谐振腔内激光能量转换为输出激光能量的效率。 $\eta_0 = T/2\delta$ ； η_1 为 F_3 能级至 F_2 能级的无辐射跃迁效率； η_p 光泵效率，可表示为 $\eta_p = \eta_L \eta_c \eta_\alpha$ ； η_L 为光泵在工作物质吸收带内的辐射功率（能量）与光泵输入电功率（能量）之比。 η_c 为聚光效率 η_α 为工作物质的吸收效率。

$$\eta_\alpha = 1 - \exp[-\alpha(\nu_p)d] \quad (14.2)$$

式中 $\alpha(\nu_p)$ 为工作物质对泵浦光的吸收系数； d 为工作物质的吸收长度。激光器的总效率 η_t 为

$$\eta_t = \frac{P}{P_p} = \frac{\nu_0}{\nu_p} \eta_0 \eta_1 \eta_p \left(1 - \frac{P_{pt}}{P_p}\right) \eta_t = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} = \frac{\nu_0}{\nu_p} \eta_0 \eta_1 \eta_p \left(1 - \frac{\varepsilon_{pt}}{\varepsilon_p}\right) \quad (14.3)$$

激光器的微分效率为：

$$\eta_s = \frac{P}{P_p - P_{pt}} = \frac{\nu_0}{\nu_p} \eta_0 \eta_1 \eta_p \quad (14.4)$$

$$\eta_s = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p - \varepsilon_{pt}} = \frac{\nu_0}{\nu_p} \eta_0 \eta_1 \eta_p \quad (14.5)$$

由于气体放电灯激励的能量转换环节较多，并且辐射光谱很宽，因此只有很小一部分能量分布在激光工作物质的有效吸收谱内，通常约为1% - 3%，因此激光器的效率较低，通常用的Nd:YAG 激光器的效率约为1% - 3%。

半导体激光二极管激励

采用波长与激光工作物质吸收波长相匹配的激光作激励光源，能够大幅度提高激光器效率。例如，Nd:YAG中宽约30nm的810nm泵浦吸收带中，含有多条吸收谱线，若用波长为810nm的半导体激光二极管泵浦，可以准确地对准此吸收带中带宽约2nm的809nm吸收谱线。半导体激光二极管激励的固体激光器总效率可以做到7 - 20%，远远高于放电灯激励的固体激光器。另外，它还具有小型化、全固态、长寿命，及工作物质热效应较小等优点。近年来，单个半导体激光器功率已越过1w，半导体激光器列阵功率已达数百瓦。大功率半导体激光器的出现促进了半导体激光器激励的固体激光器迅速发展，并获得广泛应用。

激光二极管泵浦可采用端面泵浦与侧面泵浦两种形式。端面泵浦装置简单，泵浦光束与谐振腔模匹配良好，工作物质对泵浦光的吸收比较高，因而阈值功率低，效率较大。图14.3(a)为激光二极管端面泵浦的固体激光器结构示意图。激光二极管出射光束可近似地看作在 x 和 y 方向具有不同束腰半径的高斯光束。经过特殊设计的透镜系统，能够将其转换为在 x 、 y 方向对称，并且横截面小于固体激光器谐振腔基模束腰的光束，使得与腔模之间最大限度的交叠。激光工作物质输入端面镀有对泵浦光增透，而对固体激光器激光波长全反射的介质膜层， M_2 为半反半透镜。 M_1 和 M_2 组成固体激光器的谐振腔。要得到更大功率的激光输出，需采用功率更大的半导体激光器列阵作泵浦光源。由于列阵的发光面积大，采取侧面泵浦的方式更为有利，如图14.3(b)所示。在板状固体激光工作物质的一侧，放置泵浦半导体激光器的列阵。另一侧的全反射板使泵浦光汇聚到工作物质中。激光在工作物质内通过侧面全内反射的折线形式传输，因此可以使其经过增益介质的有效长度大于外形长度，从而获得大功率输出。

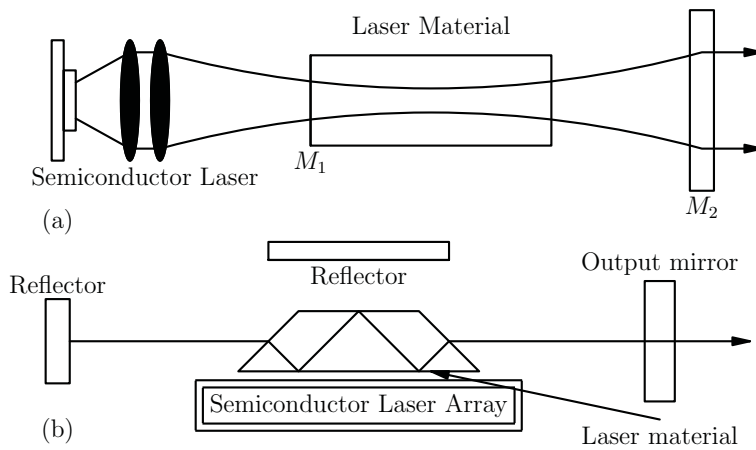


图 14.3: (a) 半导体激光器端面泵浦; (b) 半导体激光器列阵泵浦。

由于泵浦光也是高斯光束，它与腔内激光束的交叠程度会影响激光器的阈值泵浦光功率和效率。通常用交叠积分 J 来描述这一交叠程度，它定义为

$$J = \iiint r(x, y, z) s(x, y, z) dV \quad (14.6)$$

其中 $r(x, y, z)$ 为泵浦光的能量密度空间分布函数（度归一化）； $s(x, y, z)$ 为激光的能量密空间分布函数（度归一化）； dV 为体积元，积分在激光工作物质体积内进行。交叠积分越大，则阈值泵浦光功率越低。工作物质的泵浦吸收谱线和已有大功率半导体激光器发射波长匹配是构成半导体激光器泵浦的



图 14.4: 半共焦腔结构的氙灯泵浦Nd:YAG 激光系统。

固体激光器的必要条件。适于构成此类激光器的固体工作物质有Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YLF, Tm:Ho:YAG及Cr:LiSAF 等。这些材料的特性在很多关于激光原理与技术教材中都已经给出, 此处不再赘述。为了使波长准确匹配, 往往对半导体激光器的温度加以控制。

三 实验装置与操作

本实验要求认真细致的调节激光器的谐振腔, 并且要求测量到激光输出, 得到激光器的泵浦电压与输出光功率的 $V \sim P_O$ 曲线。实验装置是一个半共焦腔结构的氙灯泵浦Nd³⁺:YAG 激光系统, 腔结构如图14.4所示。它由光学谐振腔和氙灯泵浦的YAG晶体组成。

注意: 本实验所获得的激光波长为1064nm, 不在可见光范围, 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。

3.1 实验装置

本实验的装置见图14.4所示, 其中包括:

工作物质 本实验选用Nd³⁺:YAG 激光棒, 两端面要镀增透膜。

泵浦系统 泵浦系统采用氙灯泵浦, 泵浦腔采用圆柱并行泵浦腔结构。外形如图14.5所示。图中红线和黄线为氙灯的电电源线, 腔外表设计有散热结构, 并装有水冷系统。

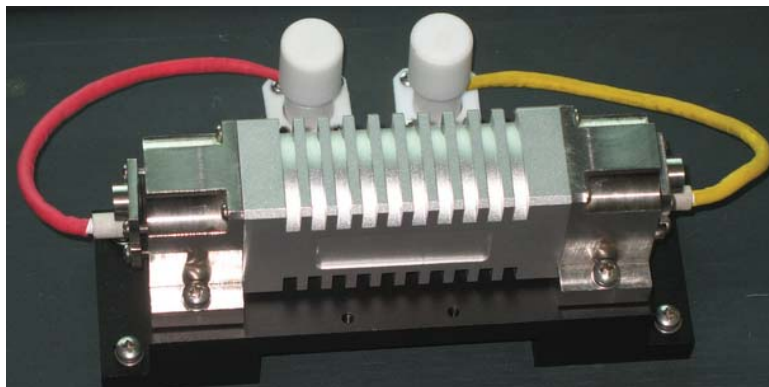


图 14.5: 激光晶体和泵浦腔的组合结构外形照片。

激光电源 激光电源通常是一个开关电源电路, 具体情况应参照激光器电源说明书。通常, 激光器电源同时带有水路, 保护、调Q等控制线路。激光电源的下部是冷却水循环箱, 通常采用去离子水, 避免结垢。

谐振腔 光学谐振腔采用平凹腔结构, 平面反射镜镀1064nm的全反射膜, 凹面球面镜作为输出镜, 镀部分发射膜。通常, 按照最大功率输出设计, 存在一个最佳的透射率, 但实验激光器通常未进行最大功率设计, 因此, 反射镜反射率未按最佳透射率给出。

3.2 激光系统参数测量

图14.4给定的激光实验系统的各个元器件，已经分布在一个铝基座的台面上，并附有一个准直的He-Ne激光指示灯。但激光腔的两个反射镜未调节好，因此不能得到激光输出。认真调节量反射镜，得到激光输出。

1. 通常应当用酒精或乙醚棉球将氙灯和激光棒擦净后，分别安放在圆柱面聚光腔的对应位置上，既要固牢，又不宜过紧。但在本实验中已经完成，一般情况下学生不得拆动泵浦腔，也不得擦拭激光晶体两端。
2. 将全反射和部分反射腔镜分别装在两端可调的反射镜支架上。
3. 一般应当调节He-Ne激光器，使小孔光束在通过谐振腔中心线与基座面平行。(实验中，He-Ne激光器已经安置在固定位置，不必再动。学生可以适当调节谐振腔镜)。
4. 调节两腔镜架和聚光腔架，使小孔光束尽量通过两腔镜和激光棒的中心，并使它们的反射光点均落回小孔。
5. 接好电气系统，检查无误后使激光器运转。首先将电源电压加在较低的位置，然后逐步增加电源电压。再微调腔镜，至使输出光在感光相纸上能够出现均匀的焦斑为止。
6. 测试输出光脉冲与输入泵浦电压之间的关系。
 - (a) 调节到最佳状态后，用能量计测出并记录激光能量。
 - (b) 记录电源电压；
 - (c) 适当调整电源电压，重新完成上述数据记录过程。用作图法得到阈值电源电压。
 - (d) 在能量较大时，记录用功率探测器测量激光输出的波形、脉宽和峰值功率。
7. 重新调节谐振腔，完成上述记录，共两次。分析获得最强输出的方法和物理原因。
8. 用小孔光阑放置在谐振腔中，观察阈值的变化输出分布的变化。

四 思考题

实验完成后，请思考如下的问题：

1. 固体激光器、气体激光器、半导体激光器、光纤激光器各有什么特点？
2. 激光器谐振腔的调节是一个比较困难的过程，给出你调节过程中所采用的方法和思路，并总结该过程中有哪些小窍门。

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。请同学们认真阅读附录中给出的“安全须知”，并且尊章操作。