

Introduction to Laser

激光绪论

Jerry Ling

2025 年 9 月 19 日

主要参考书: *Laser Electronics* by Joseph. 授课老师陶镇生是物理系教授，他的研究方向集中于超快激光和光物质作用。本课程的前置物理知识主要是电动力学和基础量子力学，前置数学知识主要是波动方程和偏微分方程组。

何为激光

Laser，本意为 [Light Amplification by Stimulated Radiation]。实际上的核心部件由谐振腔和增益介质构成。为了对激光的特性和其原理有概念性的认识，我们将从其一般特点出发作为绪论的开始。

一般特点

在空间传播方面，激光有极强的**指向性**。此外，激光谐振腔能够产生特定模式的光束，令发射光具有良好的数学性质。注意，光束的边缘必然是衰减、而非锐利的，否则其横向动量将导致强烈的衍射。作为参考，若激光器的孔径为 $D = 1\text{cm}$ ，那么高斯光束的发散角约在 λ/D 量级，即约 $10\mu\text{rad}$ 。而半导体激光器由于本身薄层发射，原始发散角较大(空间频率分布更宽)。尽管如此，总是有办法通过透镜将相干光调制为准直光。

在能量方面，一般的激光器能产生 **mW** 量级的功率。最早的 **Ruby** 激光器能达到 **kW** 量级，而超快激光器能达到 **GW** 级的峰值功率。

相干性是激光器最突出的特点之一。空间相干：同一时刻两点的光的步调一致性或相位差稳定性。时间相干：同一路径上不同时间的光的步调一致性或相位差稳定性。而激光器产生的电磁波具有高度可控的相干性。

Note: 波长换算至光子能量：

$$E = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} \text{eV} \quad (1)$$

频率特性

连续波激光器可产生高度单一频率的波，而短脉冲/超快激光则发生波包产生的频谱展宽。后者需要使用其他频段的电磁波在中心外的地方发生相消，即**锁模技术 (Mode-locking)** 的原理。

$$\Delta t \approx \frac{1}{2\Delta\omega} \quad (2)$$

注意，上式在各频率相位相同时取等号，也就是在频域相位一致时取 **Transform Limit**。直观理解为在相位完全一致处有最大叠加、而在周围相位快速散开而在时域强度衰减。

当然，激光还可能在各种方面偏离正弦波。除了波段造成的展宽，反射造成的**衰减 (absorption loss)** 将造成洛伦兹展宽；介质（如声子）造成的**相位突变 (decoherence)** 则造成高斯或更复杂的展宽。

Note 1 (comparison of band width). 不妨考虑一个最简单的辐射体——黑体辐射。令黑体内部有若干简单两能级气体被一盏白炽灯激发，并测量一个小的出口处的频谱。这些气体被激发后仍能够在黑体内不断反射，因而其被激发的时间和运行到出口的时间是完全紊乱的。*i.e.* 黑体辐射给出非相干的输出。

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (3)$$

注意上述 *Plank* 通过热分布所导出的辐射密度须要内部气体的能级差覆盖所有波段。而日常常见的白炽灯也是一种非相干光源，其频谱宽度 ~ 10 GHz。作为对比，激光器的带宽可做到 $< \text{MHz}$ 。

一般而言，介质不止有一种发射频段。所以我们需要**谐振腔 (cavity)** 放大某一频段的光。本质上 cavity 利用了驻波的原理，具有若干**模式 (modes)**。令其长度为 L :

$$L = \frac{n\lambda_n}{2} \quad f_n = n \frac{c}{2L} \quad (4)$$

因而，谐振腔可以具有一定的频率选择能力。其允许的频率构成梳状的条谱，从而调整激光器的频率。作为参考，1000nm 的近红外光在 1m 的谐振腔中需要 10^6 级的模式。而注意实际情况中，由于衰减和损失，允许频率是有展宽的。

谐振器

谐振器 (resonator) 是物理中常见的一种结构。从秋千到 RC 电路都属于谐振结构，能够在特定频率下产生共振。为了避免衰减，resonator 需要一种驱动力来维持其本征频率的振荡。这种补偿需要 **coherent**，即与振荡步调一致，好比摇秋千时需要适时地推一把才能维持周期运动。在激光器中，这种对反射损失的补偿通过**增益 (gain)** 来实现。

一般而言，增益介质可以令某一频率的谐振模式重新变回**连续波 (cw)** 模式，从而达到极窄的带宽。要注意，没有增益是无法实现窄线宽的。而放大的基本原理基于**受激辐射 (stimulated emission)**。注意其同自发辐射相比，属于触发事件而非指数随机过程，因而是与激发光同相的。而这其中最

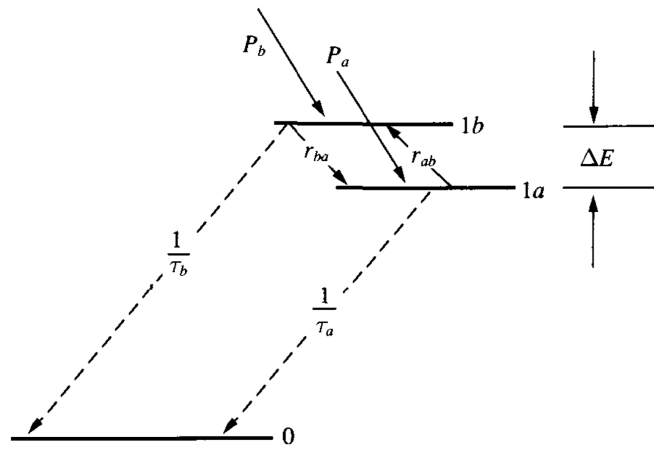


图 1: A three level system

重要的条件是**非平衡 (population inversion)** 态的介质。关于介质的能级条件，将在后续笔记中讨论。

下面我们从简单的统计力学考察一个两能级介质：

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left\{-\frac{e_2 - e_1}{kT}\right\} \quad (5)$$

显然在平衡态下 N_2 的布局数总是小于等于 N_1 (即使温度趋于无穷大)。即使在使用光激发电子向上越迁，由于受激的过程系数一致，一旦 N_2 布局数更高，其立刻更快地会越迁回到 N_1 。i.e. 二能级系统不可能达到反转的状态。

因而，我们必须选取至少具有三个能级的粒子作为介质。这样，只要把电子给泵到高能级上，令其长时间地逗留在**亚稳态**，就能造成亚稳态和基态之间的粒子数反转。实践上可用转动、振动、电子等多种能级来实现。

最后，需要注意谐振腔的模式之间只有 MHz 的间隔 (frequency comb)，而放大系统通常要覆盖若干根线。尽管如此，我们可以调整其放大曲线的**临界点**，使其只有一个频率线在无数次传播时被放大： $Gain * Loss \geq 1$ 当然，调节 L ，即谐振腔大小也会导致频率的移动，有时候温度的升高也会导致这种微动。用**标准具 (Etalon)** 或棱镜对也可以调节光程或调节反射情况，从而达到选择频率的效果。