

3.5. 激光器的损耗与阈值条件

回顾 —— 产生激光的三个必要条件：

1. 工作物质
2. 激励能源
3. 光学谐振腔

内容 —— 研究谐振腔的损耗与阈值条件

我们在前面已经指出, 如果谐振腔内工作物质的某对能级处于粒子数反转状态, 则频率处在它的谱线宽度内的微弱光信号会因增益而不断增强。另一方面, 谐振腔中存在的各种损耗, 又使光信号不断衰减。**能否产生振荡, 取决于增益与损耗的大小。**对光学谐振腔, 要获得光自激振荡, 须令光在腔内来回一次所获增益, 至少可补偿传播中的损耗。

❏ 激光器内损耗的分类及成因

❏ 激光器内形成稳定光强（稳定出光）的过程

❏ 激光器出光的阈值条件

❏ 对介质能级选取的讨论

❏ 激光器所需的最低抽运功率的粗略计算

3.5.1 激光器的损耗

增益介质内部损耗和镜面损耗

一. 内部损耗

增益介质内部由于成分不均匀、粒子数密度不均匀或有缺陷而使光产生折射、散射等使部分光波偏离原来的传播方向，造成光能量的损耗。

$$I = I_0 \exp(G - a_{\text{内}})z$$

$a_{\text{内}}$ ——内部损耗系数，具有 L^{-1} （长度）量纲

二. 镜面损耗

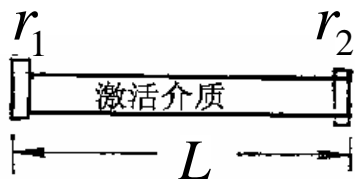
当强度为 I 的光波射到镜面上，其中 $r_1 I$ (或 $r_2 I$)反射回腔内继续放大，其它的部分均为损耗，包括 $t_1 I$ (或 $t_2 I$)、镜面的散射、吸收以及由于光的衍射使光束扩散到反射镜范围以外造成的损耗，用 $a_1 I$ (或 $a_2 I$)表示

$r_1 r_2$ —— $M_1 M_2$ 的反射率

$t_1 t_2$ —— $M_1 M_2$ 的透射率

3.5.2 激光器内形成稳定光强的过程

激光谐振腔内光强由弱变强直至最后达到稳定的过程可以用图(2-15)来描写。 M_2 是反射率 $r_2 \approx 1$ 的全反射镜，置于在 $z=L$ 处， M_1 是反射率 $r_1 < 1$ 的部分反射镜，置于 $z=0$ 坐标处。稳定光强在腔中传播过程由闭合曲线 $A \rightarrow I(L), I(L) \rightarrow I(2L), I(2L) \rightarrow A$ 所表示。



一. 谐振腔内光强的放大过程

(1) 由于自发辐射，在 $z=0$ 处有一束强度为 I_1 的入射光沿腔轴传播，此时由于腔内光强很弱，此时介质的增益系数就是小讯号增益系数 G^0 ，有：

$$I = I_1 \exp(G^0 - a_{\text{内}})z \Rightarrow I_1' = r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{\text{内}})L$$

图中曲线 $I_1 \rightarrow I_1'$ 表示了这个过程。

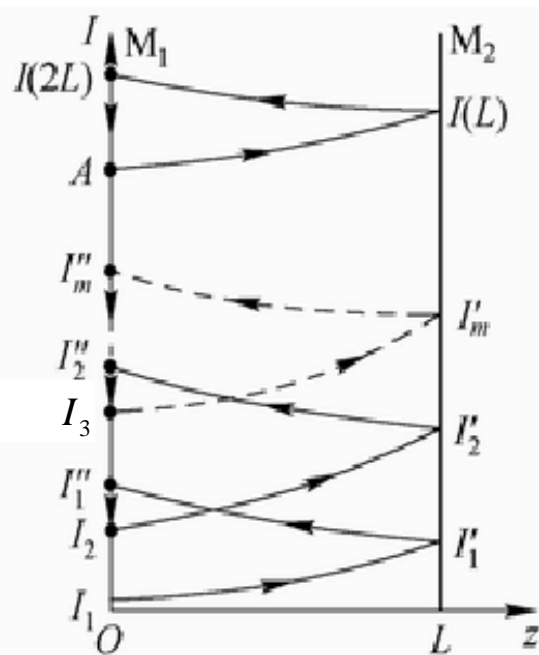
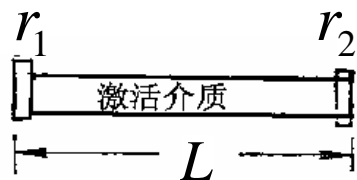


图 (2-15) 激光谐振腔中光强增长

3.5.2 激光器内形成稳定光强的过程



(2) I_1' 又经增益介质进行放大, 再传到 M_1 处时, 光强已增至

$$I_1'' = I_1' \exp(G^0 - a_{\text{内}})L = r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{\text{内}})2L$$

如图中曲线 $I_1' \rightarrow I_1''$ 所示

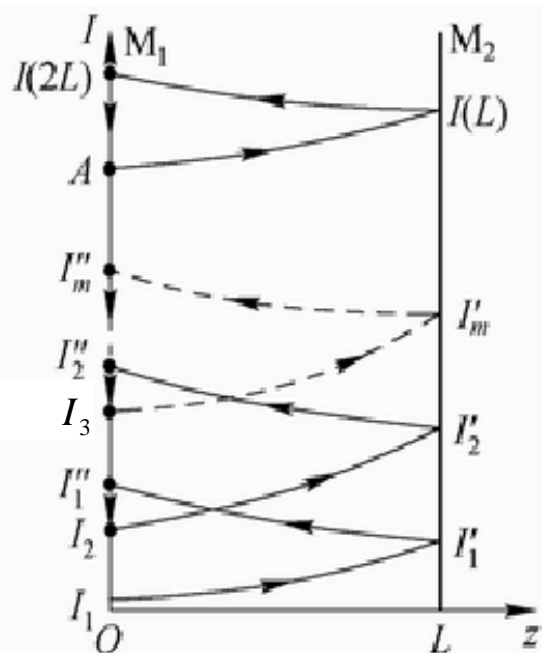
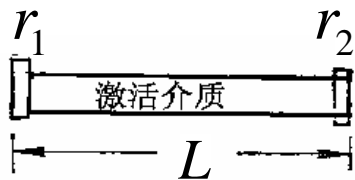


图 (2-15) 激光谐振腔中光强增长

(图中已把两个反射面的镜面损耗都归到第一个反射镜 M_1 上了)



(3) I_1'' 光强在 M_1 上一部分反射回腔内继续放大，这部分为

$$I_2 = r_1 \cdot r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{\text{内}}) 2L$$

一部分作为激光器的输出由 M_1 镜透射出去，其大小为

$$I_{\text{out}} = t_1 \cdot r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{\text{内}}) 2L$$

其余部分都作为镜面损耗而损失掉了，这部分为

$$I_h = a_1 I_1'' = a_1 \cdot r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{\text{内}}) 2L$$

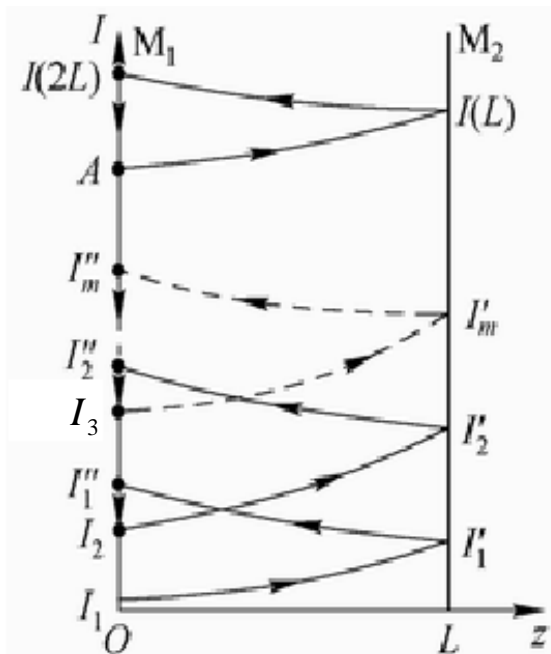


图 (2-15) 激光谐振腔中光强增长

(4) 图中纵轴上 $I_1'' \rightarrow I_2$ 代表总镜面损耗 $I_{\text{out}} + I_h$ ，即

$$I_{\text{out}} + I_h = (a_1 + t_1) \cdot r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{\text{内}}) 2L$$

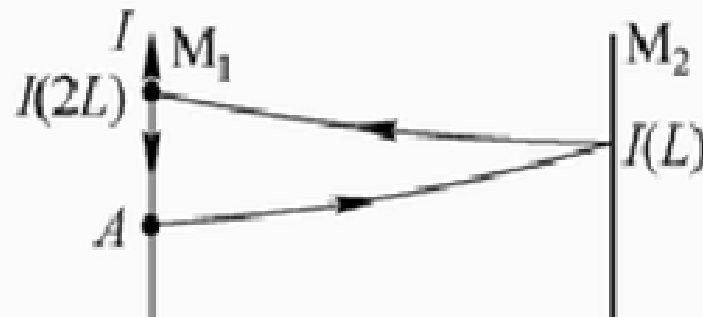
(5) 此时腔内光的放大倍数为 $K = \frac{I_2}{I_1} = r_1 \cdot r_2 \exp(G^0 - a_{\text{内}}) 2L > 1$

二. 谐振腔稳定出光过程

由
$$G(\nu) = \frac{G^0(\nu)}{1 + \frac{I}{I_s}}$$
 知

随着光强的增大，增益系数进一步减小，由增益而增加的光能量仅能补偿损耗而无剩余，输出光强也不再改变，此时：

$$K = r_1 \cdot r_2 \exp(G - a_{\text{内}})2L = 1$$



●在谐振腔的光强变化图上形成闭合的曲边三角形。

3.5.3 阈值条件

一. 获得激光所要求的双程放大倍数为:

$$K = r_1 \cdot r_2 \exp(G - a_{\text{内}})2L \geq 1$$

将上式改写为: $G \geq a_{\text{内}} - \frac{1}{2L} \ln r_1 \cdot r_2$ 令 $a_{\text{内}} - \frac{1}{2L} \ln r_1 \cdot r_2 = a_{\text{总}}$

则形成激光所要求的增益系数的条件为: $G \geq a_{\text{总}}$

二. 随着光强的增大，增益系数不断下降，当它下降到下限值时光强也到达最大值 I_M ，增益系数的下限值为增益系数的阈值，即为：

$$G_{\text{阈}} = \frac{G^0}{1 + I_M/I_S} = a_{\text{总}}; \text{ 对非均匀介质有: } G_{\text{阈}} = \frac{G_D^0}{(1 + I_M/I_S)^{1/2}} = a_{\text{总}}$$

三. 粒子数密度反转分布值的阈值 $\Delta n_{\text{阈}}$ 为：

$$G_{\text{阈}} = \Delta n_{\text{阈}} \cdot B_{21} \frac{\mu}{c} h\nu \cdot f(\nu) = a_{\text{总}} \Rightarrow \Delta n_{\text{阈}} = \frac{a_{\text{总}} \cdot c}{B_{21} \mu h\nu \cdot f(\nu)} \left\{ \begin{array}{l} B_{21} = \frac{A_{21}(c/\mu)^3}{8\pi h\nu^3} = \frac{c^3}{8\pi h\nu^3 \mu^3 \tau} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta n_{\text{阈}} = \frac{8\pi\nu^2 \mu^2 \tau \cdot a_{\text{总}}}{c^2 f(\nu)}$$

激励能源对介质粒子的抽运一定要满足 $\Delta n \geq \Delta n_{\text{阈}}$ ，才能产生激光。

3.5.4 对介质能级选取的讨论

一. 如果激光下能级 E_1 是基态或很接近基态的能级, 则根据玻尔兹曼分布可知 E_1 能级上粒子数密度很大, 这样完全要靠激励能源将下能级中一半以上的粒子不停地抽运到高能级 E_2 上, 且要满足:

$$n_2 \geq n_1 + \Delta n_{\text{阈}}$$

二. 如果下能级不是基态, 并在常温下它就是一个空态, 此时激励能源只要抽运 $n_2 \geq \Delta n_{\text{阈}}$ 的粒子到高能级 E_2 上即可, 这对激励能源的功率要求较低。这就是常说的三能级系统和四能级系统。

三. 以三种固体激光器为例, 分别算出 $\Delta n_{\text{阈}}$ 、 $n_{2\text{阈}}$ 以及 $n_2/\Delta n_{\text{阈}}$, 并进行比较。(见表2-2)

表2-2三种激光器的有关参数

激光器种类	红 宝 石	钕 玻 璃	掺钕钇铝石榴石激光器
能级	三能级系统	四能级系统	四能级系统
激光波长 λ	694.3 μm	1.60 μm	1.06 μm
激光频率 $\nu_0(\text{s}^{-1})$	4.32×10^{14}	2.83×10^{14}	2.83×10^{14}
折射率 μ	1.76	1.52	1.82
线宽 $\Delta\nu(\text{s}^{-1})$	3.3×10^{11}	7×10^{12}	1.95×10^{11}
能级寿命(s)	3×10^{-3}	2.3×10^{-4}	2.3×10^{-4}
$\Delta n_{\text{阈}}(\text{cm}^{-3})$	8.7×10^{17}	1.4×10^{18}	1.8×10^{16}
总粒子数密度 $n(\text{cm}^{-3})$	1.58×10^{19}	2.83×10^{20}	1.38×10^{20}
$n_2(\text{cm}^{-3})$	8.4×10^{18}	1.4×10^{18}	1.8×10^{16}
$n_2(\text{cm}^{-3}) / \Delta n_{\text{阈}} \approx$	10	1	1
效率	0.1~0.3%	4%~0.6%	3%~7%

三能级系统达到阈值时上能级应该具有的粒子数几乎是 $\Delta n_{\text{阈}}$ 的10倍，而四能级系统达到阈值时，只要求上能级的粒子数密度稍大于 $\Delta n_{\text{阈}}$ 即可。

激光器最低抽运功率近似计算

- 从粒子数反转分布出发可以对激光器所需的最低抽运功率进行粗略的计算
- 对于三能级系统来讲，达到阈值时有 $n_2 \gg \Delta n_{\text{阈}}$ ，因此上能级粒子数近似为总粒子数

$$n_2 = n_1 + \Delta n_{\text{阈}} \approx \frac{n}{2}$$

- 连续出光时，高能级上粒子数密度由于自发幅射单位时间内减少值为

$$A_{21} \cdot n_2 \approx \frac{n}{2\tau_{21}}$$

- 为维持激光功率阈值，这部分粒子必须有外部能源抽运来补充，若工作介质体积为V，则能源的阈值抽运功率为

$$P_{\text{阈3}} = A_{21} n_2 h \nu_{13} V = \frac{h \nu_{13} n V}{2\tau_{21}}$$

最低抽运功率计算

- 类似三能级系统，四能级系统的阈值抽运功率为

$$P_{\text{阈}4} = A_{32} \Delta n_{\text{阈}} h \nu_{14} V = \frac{h \nu_{14} \Delta n_{\text{阈}} V}{\tau_{32}}$$

- 因为实际激光能源抽运的转换效率很低（在千分之几到十分之几的范围内变化），实际激光器工作时的抽运功率比阈值抽运功率大很多