

复习纲要

第一章

1. 玻耳兹曼分布;
2. 辐射跃迁和非辐射跃迁;
3. 自发辐射、受激辐射和受激吸收之间的关系 (系数)
4. 均匀增宽和非均匀增宽线型 (原因)
5. 激光形成的条件

第二章

6. 小信号增益系数及物理意义
7. 两种饱和原因及意义;

第三章

8. 横、纵模形成, 间隔, 分布样式
9. 高斯光束
10. 品质因子

第四章

11. 选模 (具体例子, 图)
12. 稳频;
13. 激光束的变换(聚焦, 课, 书本)
14. 调制基本概念, 方式(填空)
15. 调 Q(声, 电, 染)应用

第五章

16. 固体激光器(结构, 中心波长)
17. 气体激光器(He-Ne/CO₂/Ar⁺)

参考习题

(思考题 1) 1. 试计算连续功率均为1W的两光源, 分别发射 $\lambda = 0.5000\mu\text{m}$, $\nu = 3000\text{MHz}$ 的光, 每秒从上一能级跃迁到下一能级的粒子数各为多少?

解: 功率 $P = n_1 hc/\lambda = n_2 h\nu$

$$\text{发射 } \lambda = 0.5000\mu\text{m} \text{ 的光跃迁的粒子数 } n_1 = \frac{P\lambda}{hc} = \frac{1 \times 0.5000 \times 10^{-6}}{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 2.5138 \times 10^{18}$$

$$\text{发射 } \nu = 3000\text{MHz} \text{ 的光跃迁的粒子数 } n_2 = \frac{P}{h\nu} = \frac{1}{6.63 \times 10^{-34} \times 3000 \times 10^6} = 5.0277 \times 10^{23}$$

4.(1) 普通光源发射波长 $\lambda = 0.6000\mu\text{m}$ 时, 如受激辐射与自发辐射光功率体密度之比 $q_{\text{激}}/q_{\text{自}} = 1/2000$, 求此时

单色能量密度 ρ_{ν} . (2) 在 He-Ne 激光器中若 $\rho_{\nu} = 5.0 \times 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$, 设 $\mu = 1$ 求 $q_{\text{激}}/q_{\text{自}}$.

$$\text{解: (1) 单色能量密度 } \rho_{\nu} = \frac{8\pi h}{\lambda^3} \frac{q_{\text{激}}}{q_{\text{自}}} = \frac{8\pi \times 6.63 \times 10^{-34}}{(0.6000 \times 10^{-6})^3} \frac{1}{2000} = 3.857 \times 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{s}/\text{m}^3$$

$$(2) \frac{q_{\text{激}}}{q_{\text{自}}} = \frac{\lambda^3}{8\pi h} \rho_{\nu} = \frac{(0.6328 \times 10^{-6})^3}{8\pi \times 6.63 \times 10^{-34}} \times 5.0 \times 10^{-4} = 7.604 \times 10^9$$

5. 在红宝石 Q 调制激光器中, 有可能将全部 Cr³⁺ (铬离子) 激发到激光上能级并产生巨脉冲. 设红宝石直径为 0.8cm, 长为 8cm, 铬离子浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 巨脉冲宽度为 10ns. 求:

- (1) 输出 0.6943 μm 激光的最大能量和脉冲平均功率;
- (2) 如上能级的寿命 $\tau = 10^{-2} \text{ s}$, 问自发辐射功率为多少瓦?

解: (1) 铬离子数 $n_{20} = \rho V = 2 \times 10^{18} \times \pi \left(\frac{0.8}{2}\right)^2 \times 8 = 8.0384 \times 10^{18}$

$$\text{输出 } 0.6943\mu\text{m} \text{ 激光的最大能量 } W_m = \frac{n_{20}hc}{\lambda} = \frac{8.0384 \times 10^{18} \times 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{0.6943 \times 10^{-6}} = 2.3028\text{J}$$

$$\text{脉冲平均功率 } P = \frac{W_m}{t} = \frac{2.3028}{10 \times 10^{-9}} = 2.303 \times 10^8 \text{W}$$

$$(2) \text{自发辐射粒子数 } N_{\text{自}}(t) = \int_0^t n_{20} e^{-A_{21}t} dt = n_{20} \tau \left(1 - \frac{1}{e}\right)$$

$$\text{自发辐射功率 } P = \frac{N_{\text{自}} h\nu}{\tau} = n_{20} h\nu \left(1 - \frac{1}{e}\right) = 2.3028 \times \left(1 - \frac{1}{e}\right) = 1.456 \text{W}$$

13.(1) 一质地均匀的材料对光的吸收为 0.01mm^{-1} , 光通过 10cm 长的该材料后, 出射光强为入射光强的百分之几?

(2) 一光束通过长度为 1m 的均匀激活的工作物质, 如果出射光强是入射光强的两倍, 试求该物质的增益系数.

解: (1) 出射光强 $I(z) = I_0 e^{-Az} \Rightarrow \frac{I(z)}{I_0} = e^{-0.01 \times 100} = \frac{1}{e} = 0.368$;

$$(2) \text{该物质的增益系数 } G = \frac{1}{L} \ln \frac{I(z)}{I_0} = \ln 2 = 0.693 \text{m}^{-1}$$

(思考题 2) 1. 利用下列数据, 估算红宝石的光增益系数.

$$n_2 - n_1 = 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}, 1/f(\nu) = 2 \times 10^{11} \text{s}^{-1}, t_{\text{自发}} = A_{21}^{-1} \approx 3 \times 10^{-3} \text{s}, \lambda = 0.6943\mu\text{m}, \mu = 1.5, g_1 = g_2$$

解: 增益系数 $G(\nu) = \Delta n B_{21} \frac{\mu}{c} h\nu f(\nu)$, 其中 $A_{21}/B_{21} = 8\pi\mu^3 h\nu^3/c^3$

$$\begin{aligned} \text{即红宝石的光增益系数 } G(\nu) &= \Delta n \frac{c^3}{8\pi\mu^3 h\nu^3} A_{21} \frac{\mu}{c} h\nu f(\nu) = \Delta n \frac{\lambda^2}{8\pi\mu^2} A_{21} f(\nu) \\ &= 5 \times 10^{18} \times 10^6 \times \frac{(0.6943 \times 10^{-6})^2}{8\pi \times 1.5^2} \frac{1}{3 \times 10^{-3}} \frac{1}{2 \times 10^{11}} = 71.04 \text{m}^{-1} \end{aligned}$$

2. He-Ne 激光器中, Ne 原子数密度 $n_0 = n_1 + n_2 = 10^{12} \text{cm}^{-3}$, $1/f(\nu) = 1.5 \times 10^9 \text{s}^{-1}$, $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$,

$t_{\text{自发}} = A_{21}^{-1} \approx 10^{-7} \text{s}$, $g_2 = 3$, $g_1 = 5$, $\mu_1 \approx 1$, 又知 E_2, E_1 能级数密度之比为 4. 求此介质的增益系数 G 的值.

解: 解方程组 $\begin{cases} n_0 = n_1 + n_2 \\ n_2/n_1 = 4 \end{cases}$ 有 $n_1 = \frac{1}{5} n_0$, $n_2 = \frac{4}{5} n_0 \Rightarrow \Delta n = n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 = \frac{17}{25} n_0 = 6.8 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$

增益系数 $G(\nu) = \Delta n B_{21} \frac{\mu}{c} h\nu f(\nu)$, 其中 $A_{21}/B_{21} = 8\pi\mu^3 h\nu^3/c^3$

$$\begin{aligned} \text{即此介质的增益系数 } G(\nu) &= \Delta n \frac{c^3}{8\pi\mu^3 h\nu^3} A_{21} \frac{\mu}{c} h\nu f(\nu) = \Delta n \frac{\lambda^2}{8\pi\mu^2} A_{21} f(\nu) \\ &= 6.8 \times 10^{11} \times 10^6 \times \frac{(0.6328 \times 10^{-6})^2}{8\pi \times 1^2} \frac{1}{10^{-7}} \frac{1}{1.5 \times 10^9} = 72.23 \text{m}^{-1} \end{aligned}$$

4. 稳定谐振腔的两块反射镜, 其曲率半径分别为 $R_1 = 40\text{cm}$, $R_2 = 100\text{cm}$, 求腔长 L 的取值范围.

解: 稳定谐振腔满足 $0 < (1 - L/R_1)(1 - L/R_2) < 1$ 即 $0 < (1 - L/40)(1 - L/100) < 1$

于是, 腔长 L 的取值范围 $0 < L < 40\text{cm}$, 或 $100\text{cm} < L < 140\text{cm}$

7. 设均匀增宽介质的信号增益曲线的宽度为 $\Delta\nu$. 求证: $I = I_0$ 稳定工作时信号增益曲线的线宽为 $\sqrt{2}\Delta\nu$, 并说明其物理意义.

证: 介质中的增益系数 $G(\nu) = \frac{G^0(\nu)}{1 + \frac{I f(\nu)}{I_s f(\nu_0)}} = \frac{\left[(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2 \right] G^0(\nu)}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(1 + \frac{I}{I_s}\right) \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2}$

当 $|\nu - \nu_0| \geq \left(1 + \frac{I}{I_s}\right)^{1/2} \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)$ 时 $G(\nu) = \frac{\left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(1 + \frac{I}{I_s}\right) \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2} G^0(\nu)$

由 $I = I_0 \Rightarrow G(\nu)_m = \frac{G^0(\nu)}{2}$

取 $G(\nu) = \frac{1}{2} G(\nu)_m \Rightarrow \nu = \nu_0 \pm \frac{\Delta\nu}{\sqrt{2}}$

稳定工作时信号增益曲线的线宽为 $\Delta\nu' = \sqrt{2}\Delta\nu$

物理意义: 在光强 $I = I_0$ 的光波作用下, 介质对频率在 $\nu_0 - \frac{\Delta\nu}{\sqrt{2}} \sim \nu_0 + \frac{\Delta\nu}{\sqrt{2}}$ 范围内的光波有增益作用, 在此范围外增益可忽略不计, 光波也在这个线宽范围内对介质有增益饱和作用. 介质对频率为 ν_0 的光波的增益系数值最大, 该光波的增益饱和作用也最大, 频率逐渐偏离 ν_0 时, 增益系数逐渐减小, 光波对介质的增益饱和作用也逐渐减弱.

10. 实验测得 He-Ne 激光器以波长 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ 工作时的小信号增益系数为 $G_0 = 3 \times 10^{-4}/d$, d 为腔内毛细管内径 (cm). 若增益介质为非均匀增宽型, 试计算腔内光强 $I = 50 \text{ W/cm}^2$ 的增益系数 G (设饱和光强 $I_s = 30 \text{ W/cm}^2$ 时, $d = 1\text{mm}$), 并问这时为保持振荡稳定, 两反射镜的反射率 (设 $r_1 = r_2$, 腔长 0.1m) 最小为多少 (除透射损耗外, 腔内其他损耗率 $a_{\text{内}} = 9 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$)? 又设光斑面积 $A = 0.11\text{mm}^2$, 透射系数 $\tau = 0.008$, 镜面一端输出, 求这时输出功率为多少毫瓦.

解: 腔内光强 $I = 50 \text{ W/cm}^2$ 的增益系数 $G(\nu_1) = G_0(\nu_1) / \left(1 + \frac{I}{I_s}\right)^{1/2} = \frac{3 \times 10^{-4}}{10^{-3}} / \left(1 + \frac{50}{30}\right)^{1/2} = 0.1837 \text{ m}^{-1}$

放大倍数临界条件 $K = r_1 r_2 \exp \left[(G - a_{\text{内}}) 2L \right] = 1$

\Rightarrow 两反射镜的反射率 $r_{\text{min}} = \exp \left[(a_{\text{内}} - G) L \right] = \exp \left[(9 \times 10^{-4} \times 10^2 - 0.1837) \times 0.1 \right] = 0.9907$

输出功率 $P_o = I A \tau = 50 \times 0.11 \times 10^{-2} \times 0.008 = 4.4 \times 10^{-4} \text{ W}$

12.(选) 红宝石激光器是一个三能级系统, 设 Cr^{3+} 的 $n_0 = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_{21} = 3 \times 10^{-3} \text{ s}$. 今以波长 $\lambda = 0.5100\mu\text{m}$ 的光泵激励. 试估算单位体积的阈值抽运功率.

解: 能源的阈值抽运功率 $P_{\text{阈}3} = \frac{h\nu_{13} n_0 V}{2\tau_{21}}$

单位体积的阈值抽运功率 $P_{\text{阈}3}/V = \frac{hc n_0}{2\lambda \tau_{21}} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 \times 10^{19} \times 10^6}{2 \times 0.5100 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^{-3}} = 6.5 \times 10^8 \text{ W/m}^3$

13.YAG 激光器为四能级系统, 已知 $\Delta n_{\text{阈}} = 1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_{32} = 2.3 \times 10^{-4} \text{ s}$. 如以波长 $0.75\mu\text{m}$ 的光泵激励. 求单位体积的阈值功率, 并与上题比较: 红宝石的阈值功率是它的几倍.

解: 能源的阈值抽运功率 $P_{\text{阈}4} = \Delta n_{\text{阈}} h\nu_{14} V / \tau_{32}$

单位体积的阈值功率 $P_{\text{阈}4}/V = \frac{\Delta n_{\text{阈}} hc}{\lambda \tau_{32}} = \frac{1.8 \times 10^{16} \times 10^6 \times 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{0.75 \times 10^{-6} \times 2.3 \times 10^{-4}} = 2.075 \times 10^7 \text{ W/m}^3$

红宝石激光器的阈值功率是它的倍数 $6.5 \times 10^8 / 2.075 \times 10^7 = 31.33$

(思考题3)1. 腔长为 0.5m 的氩离子激光器, 发射中心频率 $\nu_0=5.85 \times 10^{14}\text{Hz}$, 荧光宽 $\Delta\nu=6 \times 10^8\text{Hz}$, 问它可能存在几个纵模? 相应的 q 值为多少? (设 $\mu=1$)

$$\text{解: } \Delta\nu_q = \frac{c}{2\mu L} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1 \times 0.5} = 3 \times 10^8 \text{Hz}$$

$$n = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_q} = \frac{6 \times 10^8}{3 \times 10^8} = 2, \text{则可能存在的纵模数有三个, 它们对应的 } q \text{ 值分别为:}$$

$$\nu = \frac{qc}{2\mu L} \Rightarrow q = \frac{2\mu L}{c} \nu = \frac{\nu_0}{\nu_q} = \frac{5.85 \times 10^{14}}{3 \times 10^8} = 1950000, q+1 = 1950001, q-1 = 1949999$$

2. He—Ne 激光器的中心频率 $\nu_0=4.74 \times 10^{14}\text{Hz}$, 荧光宽 $\Delta\nu=1.5 \times 10^9\text{Hz}$. 今腔长 $L=1\text{m}$, 问可能输出的纵模数为若干? 为获得单纵模输出, 腔长最长为多少?

$$\text{解: } \Delta\nu_q = \frac{c}{2\mu L} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1 \times 1} = 1.5 \times 10^8 \text{Hz}, n = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_q} = \frac{1.5 \times 10^9}{1.5 \times 10^8} = 10$$

即可能输出的纵模数为 10 个, 要想获得单纵模输出, 则:

$$\Delta\nu < 2\Delta\nu_q = \frac{c}{\mu L}, \therefore L < \frac{c}{\mu \Delta\nu} = \frac{3 \times 10^8}{1.5 \times 10^9} = 0.2\text{m}, \text{故腔长最长不得大于 } 0.2\text{m}.$$

4. 连续工作的 CO_2 激光器输出功率为 50W, 聚焦后的基模有效截面直径 $2\omega=50\mu\text{m}$, 计算(1)每平方厘米平均功率(50W 为有效截面内的功率) (2)试与氩弧焊设备($10^4\text{W}/\text{cm}^2$)及氧乙炔焰($10^3\text{W}/\text{cm}^2$)比较, 分别为它们的多少倍?

解: (1)每平方厘米的平均功率为:

$$\frac{50}{\pi\omega^2} = \frac{50}{\pi(25 \times 10^{-4})^2} = 2.546 \times 10^6 \text{W}/\text{cm}^2$$

$$(2) \frac{2.546 \times 10^6}{10^4} = 254.6, \text{是氩弧焊的 } 254.6 \text{ 倍; } \frac{2.546 \times 10^6}{10^3} = 2546, \text{是氧乙炔焰的 } 2546 \text{ 倍.}$$

7. 一共焦腔(对称) $L=0.40\text{m}$, $\lambda=0.6328\mu\text{m}$, 束腰半径 $\omega_0=0.2\text{mm}$, 求离腰 56cm 处的光束有效截面半径。

$$\text{解: } \omega_{z=0.56} = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}\right)^2} = 0.2 \times 10^{-3} \times$$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{6328 \times 10^{-10} \times 0.56}{\pi \times (2 \times 10^{-4})^2}\right)^2} = 0.6\text{mm}$$

8. 试讨论非共焦腔谐振频率的简并性、纵模间隔及横模间隔, 并与共焦腔进行比较。

解: 非共焦腔的谐振频率表达式为:

$$\nu_{mnq} = \frac{c}{2\mu L} \left[q + \frac{1}{\pi} (m+n+1) \cos^{-1} \sqrt{g_1 g_2} \right]$$

1) 简并性: 对于纵模来说非共焦腔的谐振频率一般不具有简并性, 除非 $\cos^{-1} \sqrt{g_1 g_2} = \pi/k$ (k 为整数)时才出现纵模的简并; 如果纵模序数一定, 不同的横模可以存在一定的简并, 只要 $m+n$ 不变, 谐振频率就相同;

2) 纵模间隔: $\Delta\nu_{\text{纵}} = \frac{c}{2\mu L}$, 与共焦腔是一致的;

3) 横模间隔: $\Delta\nu_{\text{横}} = \frac{c \cos^{-1} \sqrt{g_1 g_2}}{2\pi\mu L}$, 不仅与腔长有关还与介质的折射率、镜面的曲率半径有关, 这与共焦腔是不同的。

(思考题4)1. 腔长 30 cm 的氦氖激光器荧光宽为 1500MHz, 可能出现三个纵模。用三反射镜法选取单纵模, 问短耦合腔腔长($L_2 + L_3$)应为若干。

$$\text{解: } \Delta\nu_{\text{短}} = \frac{c}{2\mu(L_2+L_3)} = \frac{3 \times 10^8}{2L} , \frac{1.5 \times 10^9}{\Delta\nu_{\text{短}}} < 2 \Rightarrow L = L_2 + L_3 < 0.2\text{m}$$

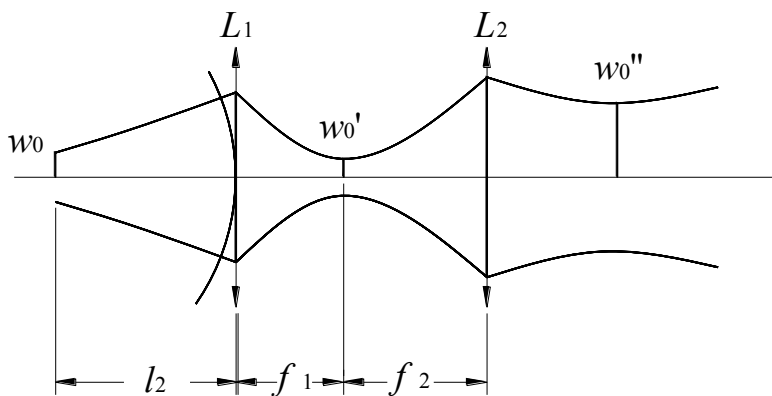
3. 一高斯光束束腰半径 $\omega_0 = 0.2\text{mm}$, $\lambda = 0.6328\mu$, 今用一焦距 f 为 3cm 的短焦距透镜聚焦, 已知腰粗 ω_0 离透镜的距离为 60cm , 在几何光学近似下求聚焦后光束腰粗。

解: $\omega'_0 = \frac{f}{s} \omega_0 = \frac{3}{60} \times 0.2 = 0.01\text{mm}$

4. 已知波长 $\lambda = 0.6328\mu$ 的两高斯光束的束腰半径 ω_{10} , ω_{20} 分别为 0.2mm , 50μ , 试问此二光束的远场发散角分别为多少? 后者是前者的几倍?

解: $2\theta_1 = \frac{2\lambda}{\pi\omega_{10}} = \frac{2 \times 0.6328}{\pi \times 0.2 \times 10^3} = 2.0 \times 10^{-3}\text{rad}$, $2\theta_2 = \frac{2\lambda}{\pi\omega_{20}} = \frac{2 \times 0.6328}{\pi \times 50} = 8.0 \times 10^{-3}\text{rad}$, $\frac{2\theta_1}{2\theta_2} = \frac{1}{4}$

5. 用如图(4-33)所示的倒置望远镜系统改善由对称共焦腔输出的光束方向性。已知二透镜的焦距分别为 $f_1 = 2.5\text{cm}$, $f_2 = 20\text{cm}$, $\omega_0 = 0.28\text{mm}$, $l_1 \gg f_1$ (L_1 紧靠腔的输出镜面), 求该望远镜系统光束发散角的压缩比。



图(4-33) 第5题

解: $M' = \frac{f_2}{f_1} \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{20}{2.5} \times \sqrt{2} = 11.31$

*思考题 3-4 引用其他文献资料, 再次对其表示感谢.

*限于水平, 错误或不妥之处在所难免, 诚恳地希望读者批评指正. E-mail: ifreestudy@163.com