

## 哈尔滨工业大学激光原理 2004 年真题

真空中的光速： $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$

普朗克常数： $h=6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$

电子电荷： $e=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$

一、 简要回答下列问题（30 分）

- 1、 光子；
- 2、 原子的自发发射与受激发射；
- 3、 激光；
- 4、 光子简并度；
- 5、 谐振腔中的横模与纵模；
- 6、 增益系数；
- 7、 增益饱和；
- 8、 烧孔效应；
- 9、 兰姆凹陷；
- 10、 正常色散与反常色散；

二、 以  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  激光器为例：（25 分）

- (1) 画出该激光器基本结构示意图，说明各部分作用；
- (2) 该激光器可以产生  $1.06 \mu\text{m}$  ( ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ ) 和  $0.914 \mu\text{m}$  ( ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$  (基态)) 波长的激光，说明激光形成过程；
- (3) 在通常情况下， $1.06 \mu\text{m}$  和  $0.914 \mu\text{m}$  激光哪一种容易形成？为什么？

三、 某单横模  $632.8 \text{nm}$  He—Ne 激光器，采用平凹腔，腔长  $L=0.1 \text{m}$ ，凹面镜为全反镜，曲率半径为  $R=1 \text{m}$ ，平面镜为输出镜：（25 分）

- (1) 画出该腔等价共焦腔的位置；
- (2) 输出镜面上的光斑尺寸多大？输出光束发散角是多少？
- (3) 若激光介质谱线的多普勒宽度为  $\Delta\nu_D=1500 \text{MHz}$ ，均匀线宽  $\Delta\nu_H=150 \text{MHz}$ ，问该激光器可能有多少个纵模振荡？

四、 稳定球面腔中的基模光束为高斯光束。说明高斯光束与普通球面波的异同。（20 分）

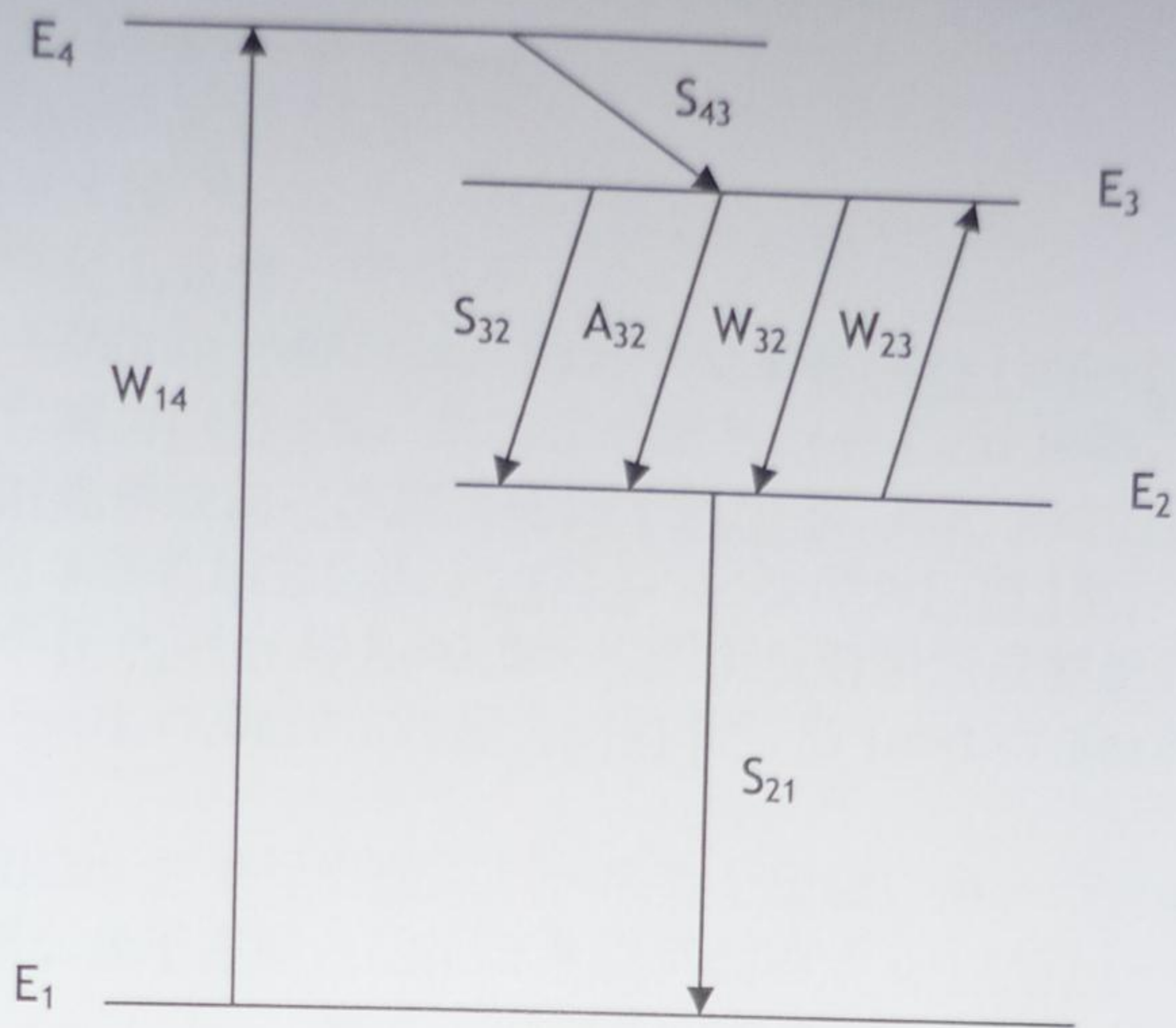
五、 考虑 He—Ne 激光器的  $632.8 \text{nm}$  的跃迁，其上能级  $3\text{S}_2$  与下能级  $2\text{P}_4$  的寿命均为  $2 \times 10^{-8} \text{s}$ ，管内气压  $P=266 \text{Pa}$ ，试计算均匀线宽  $\Delta\nu_H$  和非均匀线宽  $\Delta\nu_D$ ，并将它们作比较（取原子量  $M=20$ ，室温  $300 \text{K}$ ，压力加宽系数  $\alpha=0.53 \text{MHz/Pa}$ ）。（20 分）

六、 对于如图所示的四能级系统：（20 分）

- (1) 列出完整的速率方程组；
- (2) 证明稳态小信号情况下的粒子数反转： $\Delta n^0 = n_1 w_{14} \tau_3 \approx n w_{14} \tau_3$

式中  $n$  为总粒子数， $\tau_3 = \frac{1}{A_{32} + S_{32}}$  为  $E_3$  能级寿命。（证明时可作合理的近

似）



七、 说明均匀加宽与非均匀加宽两种情况下，增益饱和规律。(10分)

## 一、简单题

1、光是由一群以光速  $c$  运动的光量子组成；每一个光子都具有一定的能量、质量、动量；每个光子都具有两个独立的偏振方向；光子具有自旋且自旋量子数是整数。

2、原子的自发发射是在没有任何外界作用情况下，原子由高能级  $E_2$  向低能级  $E_1$  辐射出能量为  $E_2 - E_1$  的光子的过程；当原子体系受到外来的能量为  $h\nu$  的光子照射时，如果  $h\nu = E_2 - E_1$ ，则处于高能级  $E_2$  上的原子会因外来的这个光子的作用而从高能级  $E_2$  跃迁到低能级  $E_1$  上去，这时原子将辐射出一个和外来光子完全一样的光子，这个过程叫受激发射；

3、激光是由受激发射光放大产生的光。其产生的必要条件是在外界激励下，上下能级打到粒子数反转，即  $\Delta n = n_2 - n_1 \geq 0$ ，充分条件是介质的增益要大于损耗，即： $G^0 \geq \alpha$ 。

4、处于同一个光子的量子状态中的平均光子数（同态光子数）；普通光源的光子简并度为  $\bar{n} = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$ ；激光简并度为  $\bar{n} = \frac{P \cdot \tau_c}{h\nu}$

5、谐振腔中场分布分为纵向分布（以频率为标志）和横向分布（以衍射花样为标志），纵向分布称为纵模，横向分布称为横模。

6、介质的增益系数是光通过单位长度介质后光强增加的百分比， $G = \frac{dI}{I dz}$ 。具体的， $G = \Delta n \sigma_{21}$ ，即增益系数与粒子反转大小  $\Delta n$  有关，还与两个能级间的受激发射截面  $\sigma_{21}$  的大小有关。

7、当激光器内光强达到一定值时， $\Delta n$ （从而  $G$ ）将随光强的增大而减小，这种现象称为增益饱和；小信号增益系数  $G^0 \geq \alpha$ ，由于饱和作用，到稳态时，总有  $G = \alpha$ 。

8、对于多普勒加宽下的增益系数曲线，速度不同的原子群有不同的中心频率，而具有相同中心频率的一群原子，又有一个小的均匀加宽效应存在，因此当频率为  $\nu_A$ 、强度为  $I_{\nu_A}$  的准单色光入射到非均匀加宽的增益介质时，使中心频率为  $\nu_A$  的那一群反转粒子发生饱和，对中心频率远离  $\nu_A$  的反转粒子不发生作用；饱和后的那群反转粒子对总的非均匀加宽增益曲线  $\nu_A$  处的增益贡献减小，所以在  $\nu_A$  处出现了一个增益凹陷，这种现象叫做增益曲线的烧孔效应。

9、在非均匀加宽的气体激光器中，当把激光器频率调到原子谱线中心频率时，在输出功率曲线中反而出现下降的现象，称为兰姆凹陷，产生的条件是  $\Delta \nu_D \gg \Delta \nu_H$ 。

10、色散是指折射率对入射光频率（或波长）的依赖关系。对吸收介质，在其中心频率  $\omega_0$  两边，折射率随入射光频率的增加而增加，称为正常色散；在  $\omega_0$  附近，折射率随着入射光频率的增加而减少，称为反常色散。

## 二、1、

2、(1)受激吸收；

(2)快速无辐射跃迁；

${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$ ,  ${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$

(3)粒子数反转；

${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ,  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$

(4)个别自发发射，光放大

(5) 通过谐振腔作用, 形成激光

$${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}, 1.06\mu\text{m} \quad ({}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}, 1.35\mu\text{m})$$

$${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}, 0.914\mu\text{m}$$

3、1.06 $\mu\text{m}$  的激光容易形成。因为  ${}^4I_{11/2}$  能级几乎是空的, 粒子基本都在基态, 所以很容易形成粒子数反转, 从而形成激光。

$$\text{三、1、} z_1 = \frac{L(R_2 - L)}{2L - R_1 - R_2} = 0, \quad z_2 = \frac{-L(R_1 - L)}{2L - R_1 - R_2} = L = 0.1;$$

$$f = \left[ \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(2L - R_1 - R_2)^2} \right]^{\frac{1}{2}} = (RL - L^2)^{\frac{1}{2}} = 0.3$$

$$2、\omega_0 = \left( \frac{\lambda f}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.246\text{mm}; \quad \omega_{s1} = \omega_0 \left[ 1 + \left( \frac{z_1}{f} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.246\text{mm};$$

$$\omega_{s2} = \omega_0 \left[ 1 + \left( \frac{z_2}{f} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.259\text{mm}; \quad \theta = \frac{2\omega_0}{f} = 1.64 \text{ mrad}$$

3、因为  $\Delta v_D \gg \Delta v_H$ , 所以主要考虑多普勒加宽。  $\Delta v_q = \frac{c}{2\eta L} = 1.5 \times 10^9$ ,  $m = \frac{\Delta v_D}{\Delta v_q} = 1$

四、区别: 1) 高斯光束是变曲率中心球面波, 即  $R(z) = z + \frac{f^2}{z}$ ; 2) 高斯光束能量分布不均

匀, 以高斯形式分布; 3) 二者传输规律不同; 联系: 如果用  $q$  参数表示高斯光束, 则  $q$  与  $R$  具有相同的传输规律。

$$\text{五、} \Delta v_H = \Delta v_N + \Delta v_L = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} \right) + \alpha P = 156.895\text{MHz}$$

$$\Delta v_D = 7.16 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{T}{M}} v_0 = 1314.66\text{MHz} \gg \Delta v_H$$

$$\text{六、1、} \begin{cases} \frac{dn_4}{dt} = n_1 W_{14} - n_4 S_{43} \\ \frac{dn_3}{dt} = n_2 W_{23} - n_3 W_{32} - n_3 (A_{32} + S_{32}) + n_4 S_{43} \\ \frac{dn_1}{dt} = n_2 S_{21} - n_1 W_{14} \\ n = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 \\ \frac{dN_l}{dt} = n_3 W_{32} - n_2 W_{23} - \xi N_l + n_3 A_{32} \end{cases}$$

2、稳态情况下, 有  $\frac{dn_4}{dt} = \frac{dn_3}{dt} = \frac{dn_1}{dt} = 0$ , 所以有  $n_1 W_{14} = n_4 S_{43}$

$$n_3 W_{32} - n_2 W_{23} = n_3 W_{32} - n_2 \frac{g_3}{g_2} W_{32} \quad (g_3 B_{32} = g_2 B_{23}, \Rightarrow g_3 W_{32} = g_2 W_{23} \Rightarrow W_{23} = \frac{g_3}{g_2} W_{32})$$

$$= \Delta n W_{32} \quad (\Delta n = n_3 - \frac{g_3}{g_2} n_2)$$

$$= \Delta n B_{32} \rho g(\nu, \nu_0) = \Delta n B_{32} g(\nu, \nu_0) N h \nu$$

$$\therefore \frac{A_{32}}{B_{32}} = \frac{8\pi h \nu^3}{\nu^3} = \frac{8\pi h \nu}{\nu \lambda^2} \Rightarrow B_{32} = \frac{\nu \lambda^2}{8\pi h \nu} A_{32}$$

$$\sigma_{32} = \frac{\lambda^2}{8\pi} A_{32} g(\nu, \nu_0)$$

$$\therefore n_3 W_{32} - n_2 W_{23} = \Delta n B_{32} g(\nu, \nu_0) N h \nu = \Delta n \sigma_{32} \nu N$$

$$\Delta n = n_3 - \frac{g_3}{g_2} n_2 \approx n_3, \text{ 小信号下有 } n_3 W_{32} - n_2 W_{23} \approx 0$$

$$\text{所以有: } \Delta n = n_3 = \frac{n_1 W_{14}}{A_{32} + S_{32}} = n_1 W_{14} \tau_3 \approx n W_{14} \tau_3$$

七、当激光器内光强达到一定值时， $\Delta n$ （从而  $G$ ）将随光强的增大而减小，这种现象称为增益饱和；均匀加宽情况下，整个增益曲线均下降，下降后的曲线宽度变宽

$$\Delta \nu'_H = \sqrt{1 + \frac{I_\nu}{I_s}} \Delta \nu_H, \text{ 即饱和后增益系数变小, 增益曲线变宽; 非均匀加宽情况下, 在对应}$$

于光强为  $I_{\nu_A}$  的频率  $\nu_A$  处将出现一个凹陷，即烧孔效应。