

激光原理复习题(页码是按第五版书标注的, 黄色底纹的页码是按第六版书标注的)

填空 $6 \times 4' = 24'$ 简答 $6 \times 6' = 36'$ 计算 $12' + 15' = 27'$ 论述 $1 \times 13' = 13'$

1.什么是光波模式和光子态? 什么是相格? Page5

答: 光波模式(page5): 在一个有边界条件限制的空间 V 内, 只能存在一系列独立的具有特定波矢 \vec{k} 的平面单色驻波。这种能够存在于腔内的驻波(以某一波矢 \vec{k} 为标志)称为光波模式。

光子态(page6): 光子在由坐标与动量所支撑的相空间中所处的状态, 在相空间中, 光子的状态对应于一个相格。

相格(page6): 在三维运动情况下, 测不准关系为 $\Delta x \Delta y \Delta z \Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z \approx h^3$, 故在六位相空间中, 一个光子态对应(或占有)的相空间体积元为 $\Delta x \Delta y \Delta z \Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z \approx h^3$, 上述相空间体积元称为相格。

2.如何理解光的相干性? 何谓相干时间、相干长度、相干面积和相干体积? Page7

答: 光的相干性(page7): 在不同的空间点上、在不同的时刻的光波场的某些特性的相关性。

相干时间(page7): 光沿传播方向通过相干长度 L_c 所需的时间, 称为相干时间。

相干长度: 相干光能产生干涉效应的最大光程差, 等于光源发出的光波的波列长度。

相干面积:

相干体积(page7): 如果在空间体积 V_c 内各点的光波场都具有明显的相干性, 则 V_c 称为相干体积。

3.何谓光子简并度, 有几种相同的含义? 激光源的光子简并度与它的相干性什么联系? Page9

答: 光子简并度(page9): 处于同一光子态的光子数称为光子简并度。

光子简并度有以下几种相同含义(page9): 同态光子数、同一模式内的光子数、处于相干体积内的光子数、处于同一相格内的光子数。

联系: 激光源的光子简并度决定着激光的相干性, 光子简并度越高, 激光源的相干性越好。

4.什么是黑体辐射? 写出 Planck 公式, 并说明它的物理意义。Page10

答: 黑体辐射(page10): 当黑体处于某一温度 T 的热平衡情况下, 它所吸收的辐射能量应等于发出的辐射能量, 即黑体与辐射场之间应处于能量(热)平衡状态, 这种平衡必然导致空腔内存在完全确定的辐射场, 这种辐射场称为黑体辐射或平衡辐射。

Planck 公式(page10):
$$\rho_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

物理意义(page10): 在单位体积内, 频率处于 ν 附近的单位频率间隔中黑体的电磁辐射能量。

5.描述能级的光学跃迁的三大过程, 并写出它们的特征和跃迁几率。Page10

答: (1)自发辐射

过程描述(page10): 处于高能级 E_2 的一个原子自发的向 E_1 跃迁, 并发射一个能量为 $h\nu$ 的光子, 这种过程称为自发跃迁, 由原子自发跃迁发出的光波称为自发辐射。

特征: a) 自发辐射是一种只与原子本身性质有关而与辐射场 ρ_ν 无关的自发过程, 无需外来光。b) 每个发生辐射的原子都可看作是一个独立的发射单元, 原子之间毫无联系而且各个原子开始发光的时间参差不一, 所以各列光波频率虽然相同, 均为 ν , 各列光波之间没有固定的相位关系, 各有不同的偏振方向, 而且各个原子所发的光将向空间各个方向传播, 即大量原子的自发辐射过程是杂乱无章的随机过程, 所以自发辐射的光是非相干光。

自发跃迁爱因斯坦系数:
$$A_{21} = \frac{1}{\tau_s}$$

(2)受激吸收

过程描述(page12): 处于低能态 E_1 的一个原子, 在频率为 ν 的辐射场作用(激励)下, 吸收一个能量为 $h\nu$ 的光子并向 E_2 能态跃迁, 这种过程称为受激吸收跃迁。

特征: a) 只有外来光子能量 $h\nu = E_2 - E_1$ 时, 才能引起受激辐射。b) 跃迁概率不仅与原子性质有关, 还与辐射场的 ρ_ν 有关。

受激吸收跃迁概率(page12): $W_{12} = B_{12} \rho_\nu$ (B_{12} 为受激吸收跃迁爱因斯坦系数, ρ_ν 为辐射场)

(3)受激辐射

过程描述(page12): 处于上能级 E_2 的原子在频率为 ν 的辐射场作用下, 跃迁至低能态 E_1 并辐射一个

能量为 $h\nu$ 的光子。受激辐射跃迁发出的光波称为受激辐射。

特征：a) 只有外来光子能量 $h\nu = E_2 - E_1$ 时，才能引起受激辐射；b) 受激辐射所发出的光子与外来光子的频率、传播方向、偏振方向、相位等性质完全相同。

受激辐射跃迁概率： $W_{21} = B_{21}\rho_\nu$ (B_{21} 为受激辐射跃迁爱因斯坦系数， ρ_ν 为辐射场)

6. Einstein 系数有哪些？它们之间的关系是什么？ Page13

答：系数(page11-12)：自发跃迁爱因斯坦系数 A_{21} ，受激吸收跃迁爱因斯坦系数 B_{12} ，受激辐射跃迁爱因斯坦系数 B_{21}

关系(page13)： $B_{21}f_1 = B_{12}f_2$ ， $A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21}$ ， f_1, f_2 为 E_1, E_2 能级的统计权重(简并度)

7. 试证明，由于自发辐射，原子在 E_2 能级的平均寿命为 $\tau_s = \frac{1}{A_{21}}$ 。 Page13

证明：根据自发跃迁概率定义 $A_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{sp} \frac{1}{n_2} \dots \dots (1)$

$(dn_{21})_{sp}$ 表示在 dt 时间内由于自发跃迁引起的由 E_2 向 E_1 跃迁的原子数。

在单位时间内能级 E_2 减少的粒子数为 $\frac{dn_2}{dt} = - \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{sp}$ 将(1)式带入得 $\frac{dn_2}{dt} = -A_{21}n_2$

由此式可得 $n_2(t) = n_{20} e^{-A_{21}t}$ (n_{20} 为 $t=0$ 时刻高能级具有的粒子数)

所以自发辐射的平均寿命 $\tau_s = \frac{1}{n_{20}} \int_0^\infty n_2(t) dt = \frac{1}{n_{20}} \int_0^\infty n_{20} e^{-A_{21}t} dt = \frac{1}{A_{21}}$

8. 一质地均匀的材料对光的吸收系数 0.01 mm^{-1} ，光通过 10 cm 长的该材料后，出射光强为入射光强的百分之几？ Page23 (8)

解：设进入材料前的光强为 I_0 ，经过距离 z 后的光强为 $I(z)$ ，则 $I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$

所以出射光强与入射光强之比 $\frac{I_{out}}{I_0} = e^{-\alpha l} = e^{-0.01 \times 100} = e^{-1} \approx 0.368$ 。所以出射光强占入射光强的 36.8%。

9. 激光器主要由哪些部分组成？各部分的作用是什么？

答：激光工作物质：用来实现粒子数反转和产生光的受激发射作用的物质体系。接收来自泵浦源的能量，对外发射光波并能够强烈发光的活跃状态，也称为激活物质。

泵浦源：提供能量，实现工作物质的粒子数反转。

光学谐振腔：a) 提供轴向光波模的正反馈；b) 模式选择，保证激光器单模振荡，从而提高激光器的相干性。

10. 什么是热平衡时能级粒子数的分布？什么是粒子数反转？如何实现粒子数反转？ Page15

答：热平衡时能级粒子数的分布(page15)：在物质处于热平衡状态时，各能级上的原子数（或集居数）服从玻尔兹曼分布

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{f_2}{f_1} e^{\frac{-(E_2 - E_1)}{k_b T}}。$$

粒子数反转：使高能级粒子数密度大于低能级粒子数密度。

如何实现粒子数反转(page15)：外界向物质供给能量（称为激励或泵浦过程），从而使物质处于非平衡状态。

11. 如何定义激光增益？什么是小信号增益？大信号增益？增益饱和？ Page16

答：激光增益定义(p15)：设在光传播方向上 z 处的光强为 $I(z)$ ，则增益系数定义为 $g = \frac{dI(z)}{dz} \frac{1}{I(z)}$ ，表示光通过单位长度激活物质后光强增长的百分数。

小信号增益(p16)：当光强很弱时，集居数差值 $(n_2 - n_1)$ 不随 z 变化，增益系数为一常数 g^0 ，称为线性增益或小信号增益。

大信号增益(p17)：在放大器中入射光强 I 与 I_s (I_s 为饱和光强) 相比拟时， $g(I) = \frac{g_0}{1 + \frac{I}{I_s}}$ ，为大信号增

益。

增益饱和(p16): 当光强足够强时, 增益系数 g 也随着光强的增加而减小, 这一现象称为增益饱和效应。

12. 什么是自激振荡? 产生激光振荡的条件是什么? Page17

答: 自激振荡(p18): 不管初始光强 I_0 多么微弱, 只要放大器足够长, 就总是形成确定大小的光强 I_m , 这就是自激振荡的概念。

产生条件(p18): $g^0 \geq \alpha$, g^0 为小信号增益系数, α 为包括放大器损耗和谐振腔损耗在内的平均损耗系数。

13. 激光的基本特性是什么? Page19

答: 激光四性: 单色性、相干性、方向性和高亮度。这四性可归结为激光具有很高的光子简并度。

14. 如何理解激光的空间相干性与方向性? 如何理解激光的时间相干性? 如何理解激光的相干光强? Page19-23

答: (1) 激光的方向性越好, 它的空间相干性程度越高。(p19)

(2) 激光的相干时间 τ_c 和单色性 $\Delta\nu$ 存在着简单关系 $\tau_c = \frac{1}{\Delta\nu}$, 即单色越好, 相干时间越长。(p21)

(3) 激光具有很高的亮度, 激光的单色亮度 $B_\nu = \frac{2h\nu}{\lambda^2} \bar{n}$, 由于激光具有极好的方向性和单色性, 因而具有极高的光子简并度和单色亮度。(p22)

15. 什么是谐振腔的谐振条件? 如何计算纵模的频率、纵模间隔和纵模的数目? Page27-28

答: (1) 谐振条件(p27): 谐振腔内的光要满足相长干涉条件 (也称为驻波条件)。波从某一点出发, 经腔内往返一周再回到原来位置时, 应与初始出发波同相 (即相差为 2π 的整数倍)。如果以 $\Delta\Phi$ 表示均匀平面波在腔内往返一周时的相位滞后, 则可以表示为 $\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_q} \cdot 2L' = q \cdot 2\pi$ 。 λ_q 为光在真空中的波长, L' 为

腔的光学长度, q 为正整数。

(2) 如何计算纵模的频率、纵模间隔和纵模的数目(p27-28):

纵模的频率: $\nu_q = q \cdot \frac{c}{2L'}$; 纵模间隔: $\Delta\nu_q = \frac{c}{2L'}$

? 纵模的数目: 对于满足谐振条件频率为 ν_q 的波, 其纵模数目 $N = \left[\frac{\Delta\nu_{osc}}{\Delta\nu_q} \right] + 1$, $\Delta\nu_{osc}$ 为小信号增益曲线

中大于阈值增益系数 G_l 的那部分曲线所对应的频率范围(振荡带宽)。

16. 在激光谐振腔中一般有哪些损耗因素, 分别与哪些因素有关? Page31-33

答: 损耗因素(p28)

几何偏折损耗: 与腔的类型、腔的几何尺寸、模式有关。

衍射损耗: 与腔的菲涅尔数、腔的几何参数、横模阶次有关。

腔镜反射不完全引起的损耗: 与腔镜的透射率、反射率有关。

材料中的非激活吸收、散射、腔内插入物所引起的损耗: 与介质材料的加工工艺有关。

17. 哪些参数可以描述谐振腔的损耗? 它们的关系如何? Page29-31

答: (1) 描述参数(p28-p39)

a) 平均单程损耗因子: $\delta = \frac{1}{2} \ln \frac{I_0}{I_1}$ (I_0 为初始光强, I_1 为往返一周后光强)

b) 腔内光子的平均寿命: $\tau_R = \frac{L'}{\delta c}$

c) 品质因数: $Q = 2\pi\nu\tau_R = 2\pi\nu \frac{L'}{\delta c}$

(2) 关系: 腔的损耗越小, 平均单程损耗因子越小, 腔内光子的平均寿命越长, 品质因数越大。

18. 什么是腔的菲涅尔数? 它与腔的损耗有什么关系? Page33

答: 菲涅尔数(p32): $N = \frac{a^2}{L\lambda}$ 称为腔的菲涅尔数 (a 为孔半径, L 腔长)。即从一个镜面中心看到另一个

镜面上可以划分的菲涅尔半周期带的数目（对平面波阵面而言）。

与腔的损耗关系(p32):衍射损耗随腔的菲涅尔数的减小而增大。

19.什么是共轴球面腔的稳定性条件? (p35) Page36

$$\begin{cases} 0 < g_1 g_2 < 1 \\ g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}, g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} \end{cases}$$

L 为两球面镜 M_1, M_2 的距离, R_1, R_2 分别为 M_1, M_2 的曲率半径, 当凹面镜向着腔内时, R 取正值, 当凸面镜向着腔内时, R 取负值。

20.激光器的谐振腔由一面曲率半径为 1 m 的凸面镜和曲率半径为 2 m 的凹面镜组成, 工作物质长 0.5 m , 其折射率 1.52 , 求腔长 L 在什么范围内是稳定腔? Page98 (5)

解: 设两腔镜 M_1 和 M_2 的曲率半径分别为 R_1 和 R_2 , $R_1 = -1\text{ m}, R_2 = 2\text{ m}$,

工作物质长 $l = 0.5\text{ m}$, 折射率 $n = 1.52$

根据稳定条件判据: $0 < (1 - \frac{L'}{R_1})(1 - \frac{L'}{R_2}) < 1$ 即 $0 < (1 - \frac{L'}{-1})(1 - \frac{L'}{2}) < 1 \dots \dots (1)$ 其中

$$L' = (L - l) + \frac{l}{n} \dots \dots (2)$$

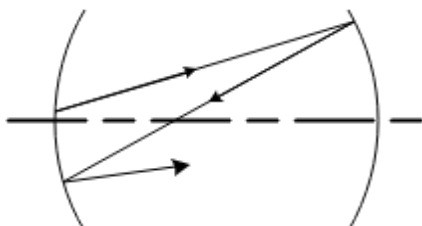
由(1)式解得 $1\text{ m} < L' < 2\text{ m}$, 由(2)式得 $L = L' + 0.5 \times (1 - \frac{1}{1.52}) = L' + 0.17$

结合(1)(2)式得 $1.17\text{ m} < L < 2.17\text{ m}$

21.试利用往返矩阵证明共焦腔为稳定腔, 即任意傍轴光线在其中可以往返无限多次, 而且两次往返即自行闭合。Page98 (3)

证明: 设光线在球面镜腔内的往返情况如下图所示

其往返矩阵为:

$$T = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix}$$


由于是共焦腔, 有 $R_1 = R_2 = L$ 往返矩阵变为 $T = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, 若光线在腔内往返两次, 有

$$T^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

可以看出, 光线在腔内往返两次的变换矩阵为单位阵, 所以光线两次往返即自行闭合, 即共焦腔为稳定腔。

22.如何理解激光谐振腔衍射理论的自再现模? Page40-43

答: (p38)开腔镜面上, 经过足够多次往返后, 能形成这样一种稳恒场, 其分布不再受衍射的影响, 在腔内往返一次能够再现出发时的场分布。这种稳恒场经一次往返后, 唯一可能的变化是, 镜面上各点的场分布按同样的比例衰减, 各点的相位发生同样大小的滞后。把这种开腔镜面上的经一次往返能再现的稳恒场分布称为开腔的自再现模。

23.求解菲涅尔-基尔霍夫衍射积分方程得到的本征函数和本征值各代表什么? Page51

答: 本征函数(p42):描述腔的一个自再现模式或横模。其模描述镜面上场的振幅分布, 幅角描述镜面上场的相位分布。

本征值(p43):表示自再现模在渡越一次时的幅值衰减和相位滞后。其模值量度自再现模在腔内往返一次的功率损耗, 幅角量度自再现模的单程相移, 从而也决定模的谐振频率。

24.什么是一般稳定球面腔与共焦腔的等价性? Page65-66

答:(p65)(1)任意一个共焦球面腔与无穷多个稳定球面腔等价;(2)任一满足稳定条件的球面腔唯一地等价于某一个共焦腔。即如果某一个球面腔满足稳定性条件,则必定可以找到而且也只能找到一个共焦腔,其行波场的某两个等相位面与给定球面腔的两个反射镜面重合。

25.今有一球面腔, $R_1 = 1.5m, R_2 = -1m, L = 80cm$ 。试证明该腔为稳定腔; 求出它的等价共焦腔的参数; 在图中画出等价共焦腔的具体位置。Page98 (10)

解: (1)该球面腔的 g 参数

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} = 1 - \frac{0.8}{1.5} = \frac{7}{15}$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} = 1 - \frac{0.8}{-1} = 1.8$$

由此 $g_1 g_2 = 0.85$ 满足谐振腔的稳定性条件 $0 < g_1 g_2 < 1$, 因此该腔为稳定腔。

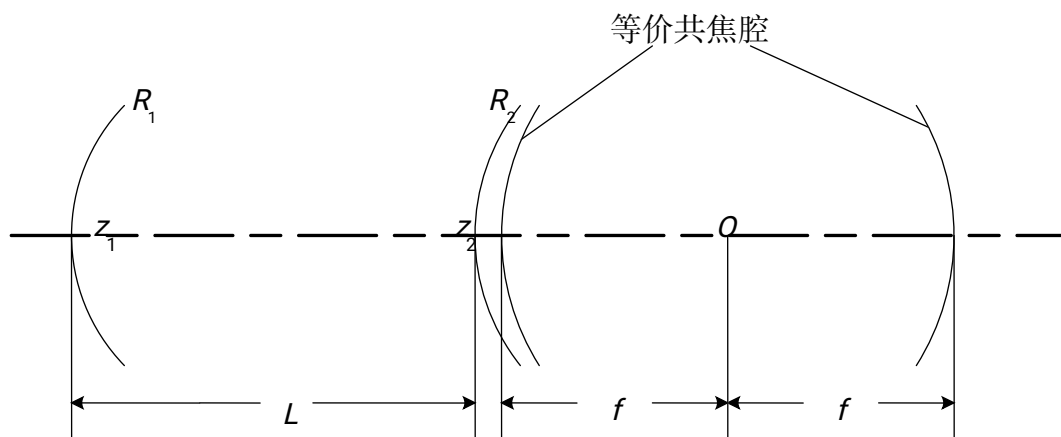
(2)两反射镜距离等效共焦腔中心 O 点的距离和等价共焦腔的焦距分别为

$$z_1 = \frac{L(R_2 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)} = -1.31m$$

$$z_2 = \frac{-L(R_1 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)} = -0.51m$$

$$f = \sqrt{\frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{[(L - R_1) + (L - R_2)]^2}} = 0.50m$$

(3)等价共焦腔的具体位置如下图



26.如何计算基模高斯光束的主要参量, 腰斑的位置、镜面上光斑的大小、任意位置处激光光斑的大小、等相位面曲率半径、光束的远场发射角、模体积。Page58-61

答: 设稳定腔腔长为 L , 两腔镜 M_1 和 M_2 的曲率半径分别为 R_1 和 R_2

则: (1)腰斑位置距 M_1 的距离为 $\left| \frac{L(R_2 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)} \right|$, 距 M_2 的距离为 $\left| \frac{-L(R_1 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)} \right|$

$$(2)M_1 \text{ 镜面上光斑的大小: } w_{s_1} = \sqrt{\frac{\lambda |R_1|}{\pi}} \left[\frac{L(R_2 - L)}{(R_1 - L)(R_1 + R_2 - L)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$M_2 \text{ 镜面上光斑的大小: } w_{s_2} = \sqrt{\frac{\lambda |R_2|}{\pi}} \left[\frac{L(R_1 - L)}{(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$(3) \text{任意位置处激光光斑大小: } w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2}$$

$$\left(f^2 = \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2}, w_0 = \sqrt{\frac{\lambda f}{\pi}} \right)$$

$$(4) \text{等相位面曲率半径: } R(z) = z \left[1 + \left(\frac{f}{z}\right)^2 \right] = z + \frac{f^2}{z}$$

(5)光束的远场发散角: $\theta_0 = \frac{2\lambda}{\pi w_0}$

(6)模体积: $V_{00} = \frac{1}{2} L \pi \cdot \left(\frac{w_{s_1} + w_{s_2}}{2} \right)^2$

27.某二氧化碳激光器采用平凹腔,凹面镜的 $R = 2m$,腔长 $L = 1m$ 。试给出它所产生的高斯光束的束腰腰斑半径的大小和位置,该高斯光束的焦参数和基膜发散角。($\lambda = 10.6\mu m$) Page99 (15)

解:平面镜的曲率半径 $R' = \infty$

其共焦参数 $f = \sqrt{\frac{L(R-L)(R'-L)(R+R'-L)}{(R+R'-2L)^2}} = \sqrt{L(R-L)} = \sqrt{1 \times (2-1)} = 1m$

束腰腰斑半径 $w_0 = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi}} f = \sqrt{\frac{10.6 \times 10^{-6}}{3.14}} \times 1 = 1.84 \times 10^{-3} m$

腰斑半径距平面镜的距离 $d = \left| \frac{-L(R-L)}{(L-R)+(L-R')} \right| = 0$

所以腰斑处于平面镜上,发散角 $\theta_0 = \frac{2\lambda}{\pi w_0} = \frac{2 \times 10.6 \times 10^{-6}}{3.14 \times 1.84 \times 10^{-3}} = 3.67 \times 10^{-3}$

28.高斯光束的表征方法有哪些?什么是 q 参数?高斯光束 q 参数的变换规律是什么? Page58-61 Page74-77

答:(1)表征方法(p71-72): a)用束腰半径 w_0 (或共焦参数 f)及束腰位置表征高斯光束; b)用光斑半径 $w(z)$ 及等相位面曲率半径 $R(z)$ 表征高斯光束; c)用 q 参数表征高斯光束。

(2) q 参数(p72): 其定义为 $\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)}$

(3)高斯光束 q 参数的变换规律: 当高斯光束在自由空间或通过光学系统时, q 参数满足 $q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}$,

称其为高斯光束 q 的 $ABCD$ 定律, 其中 A, B, C, D 为光学系统的光线变换矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 的 4 个矩阵元。

29.为了使高斯光束获得良好聚焦,常采用的方法有哪些? (p82) Page79-81

答: a)用短焦距透镜;

b)使高斯光束腰斑远离透镜焦点;

c)将高斯光束腰斑半径放在透镜表面处,即使光腰与透镜的距离为 $l=0$,并设法满足条件共焦参数 $f \gg$ 透镜焦距 F 。

30.什么是高斯光束的自再现变换?利用薄透镜对高斯光束实现自再现变换的条件如何? Page84

答:自再现变化(p84):如果一个高斯光束通过透镜后其结构不发生变化,即腰斑半径 w_0 或共焦参数 f 不变,则称这种变化为自再现变化。

条件(p84):透镜的焦距等于高斯光束入射在透镜表面上的波面曲率半径的一半时,即 $R(l) = 2F$ 。

31.非稳腔和稳定腔的区别是什么?举例说明哪些是非稳腔? Page37

答:(1)区别(p35-36):稳定腔中傍轴光线能在腔内往返任意多次而不致横向溢出腔外;而非稳腔中傍轴光线在腔内经过有限次往返后必然从侧面溢出腔外。

(2)非稳腔类型(p89)

所有双凸腔;

所有平-凸腔;

凹面镜曲率半径小于腔长的平-凹腔;

双凹非稳腔 $\begin{cases} \text{一镜曲率半径小于腔长一镜曲率半径大于腔长的双凹腔} (g_1 g_2 < 0) \\ \text{两镜曲率半径之和小于腔长的双凹腔} (g_1 g_2 > 1) \end{cases}$

凹-凸非稳腔 $\begin{cases} \text{凹面镜曲率半径小于腔长的凹-凸非稳腔} (\text{满足 } g_1 g_2 < 0) \\ \text{两镜曲率半径之和大于腔长的凹-凸非稳腔} (\text{满足 } g_1 g_2 > 1) \end{cases}$

32.什么是谱线加宽?有哪些加宽类型?加宽机制是什么? Page129-140

答：(1)谱线加宽(p130)：由于各种因素的影响，自发辐射并不是单色的，而是分布在中心频率 $\nu_0 = \frac{E_2}{E_1}$ 附近一个很小的频率范围内，这就叫谱线加宽。

(2)加宽类型及机制(p131-140)

a)均匀加宽

自然加宽 机制：原子的自发辐射引起的。

碰撞加宽 机制：大量原子（分子、离子）之间的无规则碰撞。

晶格振动加宽： 机制：晶格振动使激活离子处于随周期变化的晶格场，激活离子的能级所对应的能量在某一范围内变化。

b)非均匀加宽

多普勒加宽 机制：由于作热运动的发光原子（分子所发出）辐射的多普勒频移引起的。

晶格缺陷加宽 机制：晶格缺陷部位的晶格场将和无缺陷部位的理想晶格场不同，因而处于缺陷部位的激活离子的能级将发生位移，导致处于镜体不同部位的激活离子的发光中心频率不同。

c)综合加宽

气体工作物质的综合加宽 机制：由碰撞引起的均匀加宽和多普勒非均匀加宽。

固体激光工作物质综合加宽 机制：由晶格热振动引起的均匀加宽和晶格缺陷引起的非均匀加宽。

液体工作物质的综合加宽 机制：溶于液体中的发光分子与其它分子碰撞而导致自发辐射的碰撞加宽。

33.如何理解均匀加宽和非均匀加宽？ Page129-137

答：均匀加宽(p131)：引起加宽的物理因素对每个原子都是等同的，对于均匀加宽，每个发光原子都以整个线型发射，不能把线型函数上的某一特定频率和某些特定原子联系起来，或者说，每一个原子对光谱内任一频率都有贡献。

非均匀加宽(p135)：原子体系中每个原子只对谱线内与它的中心频率相应的部分有贡献，因而可以区分谱线上的某一频率是由哪一部分原子发射的。

34.如何求自然加宽、碰撞加宽和多普勒加宽的线宽？ Page130-131、134

答：自然加宽线宽(p133)： $\Delta \nu_N = \frac{1}{2\pi\tau_{s_2}}$ (τ_{s_2} 为原子在能级 E_2 的自发辐射寿命)

$$\text{碰撞加宽(p135): } \begin{cases} \Delta \nu_H = \frac{1}{2\pi\tau_2} & (\text{下能级为基态}) \\ \Delta \nu_H = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_1} \right) & (\text{下能级为激发态}) \end{cases}$$

$$\text{多普勒加宽(p138): } \Delta \nu_D = 2\nu_0 \left(\frac{2k_B T}{mc^2} \ln 2 \right)^{\frac{1}{2}} = 7.16 \times 10^{-7} \nu_0 \left(\frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} (M \text{ 为原子量})$$

35.分析三能级和四能级系统中粒子在各能级之间的跃迁过程，画出示意图，并写出对应的单模振荡速率方程。

答：p145-p149 Page144-146

注：图 4.4.3 三能级示意图中 w_{31} 改为 w_{13}

☆36.说明均匀加宽和非均匀加宽工作物质中增益饱和的机理，并写出激光增益的表达式。 Page150-152

答：均匀加宽增益饱和机理(p154)

在均匀加宽情况下，每个粒子对谱线不同频率处的增益都有贡献，也就是说均匀加宽的激光工作物质对各种频率入射光的放大作用全都使用相同的反转粒子数，因此强光会导致反转集居数密度的下降，而反转集居数密度的下降又将导致弱光增益系数的下降，结果是增益在整个谱线上均匀地下降。

$$\text{均匀加宽增益表达式: } g_H(\nu, I_{\nu_1}) = \frac{g_H^0(\nu)}{1 + \frac{I_{\nu_1}}{I_s(\nu_1)}}$$

? 非均匀加宽增益饱和机理

非均匀加宽增益表达式：
$$g_i(\nu_1, I_{\nu_1}) = \frac{g_i^0(\nu_1, \nu_0)}{\sqrt{1 + \frac{I_{\nu_1}}{I_s(\nu_1)}}}$$

37.饱和光强的含义？怎样定义的？ Page149

答：(p151)饱和光强 $I_s(\nu_1)$ 的物理意义是：当入射光强度 I_{ν_1} 可以和 $I_s(\nu_1)$ 比拟时，受激辐射造成的上能级集居数衰减率才可以与其它弛豫过程（自发辐射及无辐射跃迁）相比拟。因此当 $I_{\nu_1} \ll I_s(\nu_1)$ 时， Δn 与光强无关，而当 I_{ν_1} 可以和 $I_s(\nu_1)$ 相比拟时， Δn 随着 I_{ν_1} 的增加而减少， Δn 减少到小信号情况下的 $\frac{1}{1 + \frac{I_{\nu_1}}{I_s(\nu_1)}}$ 倍。

定义：
$$I_s(\nu_1) = \frac{h\nu_1}{\sigma_{21}(\nu_1, \nu_2)\tau_2} \approx \frac{h\nu_0}{\sigma_{21}(\nu_1, \nu_2)\tau_2}$$

38. 在强光入射下，均匀加宽和非均匀加宽工作物质中，弱光的增益系数如何变化？ Page151 Page155

答：(1)均匀加宽物质中(p154)

频率为 ν_1 的强光入射不仅使自身的增益系数下降，也使其它频率的弱光的增益系数也以同等程度下降，结果是增益在整个谱线上均匀的下降。

(2)非均匀加宽工作物质中(p157)

频率为 ν_1 的强光入射时，会形成以 ν_1 为中心，宽度为 $\Delta\nu_H \sqrt{1 + \frac{I_{\nu_1}}{I_s}}$ 的烧孔，若入射频率为 ν 的弱光处在烧孔造成的烧孔范围之内，则弱光增益系数将小于小信号增益系数，若 ν 处于烧孔范围之外，则弱光增益系数不受强光的影响仍等于小信号增益系数。

39.描述非均匀加宽工作物质中的增益饱和的“烧孔效应”，并说明原理。 Page153-156

答：(1)描述(p157):对于非均匀加宽工作物质中，在其增益曲线 $g_i(\nu, I_{\nu_1}) - \nu$ 曲线上，在频率 ν_1 处产生一个凹陷，凹陷宽度约为 $\Delta\nu_H \sqrt{1 + \frac{I_{\nu_1}}{I_s}}$ ，频率 ν_1 处的凹陷最低点下降到小信号增益系数的 $(1 + \frac{I_{\nu_1}}{I_s})^{-\frac{1}{2}}$ 倍，以上现象称为增益曲线的烧孔效应。

(2)原理：在非均匀加宽工作物质中，频率 ν_1 的强光只在 ν_1 附近宽度约为 $\Delta\nu_H \sqrt{1 + \frac{I_{\nu_1}}{I_s}}$ 的范围内引起反转集居数的饱和，对表观中心频率处在烧孔范围外的反转集居数没有影响。若有一频率为 ν 的弱光同时入射，如果频率 ν 处在强光造成的烧孔范围之内，则由于反转集居数的减少，弱光增益系数将小于小信号增益系数。如果频率 ν 处于烧孔范围之外，则弱光增益系数不受强光的影响而仍等于小信号增益系数，所以在增益曲线 $g_i(\nu, I_{\nu_1}) - \nu$ 曲线上，在频率 ν_1 处产生一个凹陷，凹陷宽度约为 $\Delta\nu_H \sqrt{1 + \frac{I_{\nu_1}}{I_s}}$ 。

☆40.激光器的振荡条件是什么？稳定工作条件？ Page164

答：(1)振荡条件：满足腔的谐振条件，成为腔的梳状模之一；频率落在工作物质的谱线范围内，即对应增益系数大于等于阈值增益系数。

?(2)稳定工作条件：增益系数等于于阈值增益系数

41.为什么三能级系统比四能级系统需要更强的激励？ Page166

答(p168):这是因为四能级系统系统的激光下能级为激发态， $n_1 \approx 0$ ，所以只需把 Δn_1 个粒子激励到 E_2 能级就可以使增益克服腔的损耗而产生激光。而在三能级系统中，激光下能级是基态，至少要将 $n \frac{f_2 / f_1}{1 + f_2 / f_1}$ 个粒子激励到 E_2 能级上去，才能形成集居数反转，所以三能级系统的阈值能量或阈值功率要比四能级系统大得多。

42.在均匀加宽和非均匀加宽激光器中模式竞争有什么不同？ Page168-169

答：(p170-171)均匀加宽激光器中只要有几个满足阈值条件的纵模，就会在振荡过程中相互竞争，结果

总是靠近中心频率 ν_0 的一个纵模得胜，形成稳定振荡，其它纵模都被抑制而熄灭。因此理想情况下，均匀加宽稳态激光器的输出应是单纵模的，单纵模的频率总是在谱线中心频率附近。

非均匀加宽激光器中也存在模式竞争，当纵模形成的烧孔重叠时会发生竞争，竞争模的输出功率无规则起伏。

43. 论述均匀加宽激光器中增益的空间烧孔效应引起的多纵模振荡以及消除纵模空间烧孔的方法。

Page168-169

答：(1)描述(p170)：当频率为 ν_q 的纵模在腔内形成稳定振荡时，腔内形成一个驻波场，波腹处光强最大，波节处光强最小。因此虽然 ν_q 的模在腔内的平均增益系数小于 g_t ，但实际上轴向各点的反转集居数密度和增益系数是不相同的，波腹处增益系数最小（反转集居数密度）最小，波节处增益系数（反转集居数密度）最大，这一现象称作增益的空间烧孔效应。

?(2)消除纵模空间烧孔的方法(p171)

高气压气体激光器；使用含光隔离器的环形行波腔

44. 什么是兰姆凹陷？定性解释其成因。 Page172-173

答：(1)(p174)激光器的单模输出功率 P 和单模频率 ν_q 的关系曲线中，在 $\nu_q = \nu_0$ 处，曲线有一凹陷，称为兰姆凹陷。

(2)成因(p175)

当 $\nu_q = \nu_1$ 时， $g_i^0(\nu_1) = g_t$ ；

当 $\nu_q = \nu_2$ 时，激光振荡将在增益曲线的 ν_2 及 $\nu_2 = 2\nu_0 - \nu_2$ 处造成两个凹陷；

当 $\nu_q = \nu_3$ 时，由于烧孔面积增大，所以功率 P_3 比 P_2 大；

当频率 ν_q 接近 ν_0 ，且 $|\nu_q - \nu_0| < \left(\frac{\Delta\nu_H}{2}\right) \cdot \sqrt{1 + \frac{I_{\nu_q}}{I_s}}$ 时，两个烧孔部分重叠，烧孔面积的和可能小于 $\nu_q = \nu_3$

时两个烧孔面积的和，因此 $P < P_3$ 。当 $\nu_q = \nu_0$ 时，两个烧孔完全重合，此时只有 $\nu_z = 0$ 附近的原子对激光有贡献，虽然它对应着最大的小信号增益，但由于对激光作贡献的反转集居数减少了，即烧孔面积减少了，所以输出功率 P_0 下降到某一极小值，从而出现兰姆凹陷。

45. 什么是激光器的弛豫振荡现象？ Page175-177

答：(p176)一般固体脉冲激光器所输出的并不是一个平滑的光脉冲，而是一群宽度只有微秒量级的短脉冲序列，即所谓“尖峰”序列，激励越强，则短脉冲之间的时间间隔越小，把上述现象称为弛豫振荡效应或尖峰振荡效应。

46. 为什么存在线宽极限？它取决于什么？ Page177-179

答：(1)(p180-181)由于存在着自发辐射，稳定振荡时的单程增益略小于单程损耗，有源腔的净损耗 δ_s 不等于零，虽然该模式的光子数密度 n_l 保持恒定，但自发辐射具有随机的相位，所以输出激光是一个具有衰减的有限长波列，因此具有一定的谱线宽度 $\Delta\nu_s$ ，这种线宽是由于自发辐射的存在而产生的，因而是无法排出的，因此称为线宽极限。

(2)取决于输出功率、损耗及腔长。

输出功率越大，线宽就越窄；减小损耗和增加腔长也可以使线宽变窄。

47. 什么是频率牵引？ Page181-182

答：(p183)在有源腔中，由于增益物质的色散，使纵模频率比无源腔纵模频率更靠近中心频率，这种现象叫做频率牵引。

48. 长度为 10cm 的红宝石棒置于长度为 20cm 的光谐振腔中，红宝石 694.3nm 谱线的自发辐射寿命 $\tau_s \approx 4 \times 10^{-3} s$ ，均匀加宽线宽为 $2 \times 10^5 MHz$ ，光腔单程损耗因子 $\delta = 0.2$ 。求：(1) 中心频率处阈值反转粒子数密度 Δn_t ；(2) 当光泵激励产生反转粒子数密度 $\Delta n = 1.2 \Delta n_t$ 时，有多少个纵模可以振荡？（红宝石折射率为 1.76） Page182 (2)

解：(1) 阈值反转粒子数密度为

$$\Delta n_t = \frac{\delta}{\sigma_{21} l} = \frac{4\pi^2 \Delta\nu_H \eta^2 \tau_s \delta}{l \lambda^2} = \frac{4\pi^2 \times 2 \times 10^{11} \times 1.76^2 \times 4 \times 10^{-3} \times 0.2}{10 \times (694.3 \times 10^{-7})^2} = 4.06 \times 10^{17} cm^{-3}$$

(2) 按照题意 $g_m = 1.2 g_t$ ，若振荡带宽为 $\Delta\nu$ ，则应该有

$$1.2 g_t \frac{\left(\frac{\Delta \nu_H}{2}\right)^2}{\left(\frac{\Delta \nu}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu_H}{2}\right)^2} = g_t$$

由上式可得 $\Delta \nu = \sqrt{0.2} \Delta \nu_H = 8.94 \times 10^{10} \text{ Hz}$

相邻纵模频率间隔为

$$\Delta \nu_q = \frac{c}{2l'} = \frac{c}{2(l \times 1.76 + (L - l))} = \frac{3 \times 10^{10}}{2(10 \times 1.76 + 10)} = 5.43 \times 10^8 \text{ Hz}$$

$$\text{所以 } \frac{\Delta \nu}{\Delta \nu_q} = \frac{8.94 \times 10^{10}}{5.43 \times 10^8} = 164.6$$

所以有 164 ~ 165 个纵模可以起振。

☆49. 简述横模和纵模选择的原理及具体方法。 Page210-212

答：(1) 横模选择(p210)

原理：在各个横模增益大体相同的条件下，不同横模间衍射损耗有差别，在稳定腔中，基膜的衍射损耗最低，随着横模阶次的增高，衍射损耗将迅速增加。如果降低基膜的衍射损耗，使之满足阈值条件（基膜的单程增益至少能补偿它在腔内的单程损耗），则其它模因损耗高而不能起振被抑制。

横模选择方法(p211)

小孔光阑选模、谐振腔参数 g, N 法，非稳腔选模，微调谐振腔

(2) 纵模选择

原理(p212): 一般谐振腔中有着相同的损耗，但由于频率的差异而具有不同的小信号增益系数。因此，扩大和充分利用相邻纵模间的增益差，或人为引入损耗差是进行纵模选择的有效途径。

纵模选择方法

短腔法、行波腔法、选择性损耗法

50. 激光器主要的稳频技术有哪些？ Page214-219

答：(p214-219) 兰姆凹陷稳频、塞曼稳频、饱和吸收稳频、无源腔稳频。

51. Q 调制激光器的工作原理，目前常用的几种调 Q 方法。 Page220、Page221-223

答：(1) 工作原理(p220)

通过某种方法使谐振腔的损耗因子 δ (或 Q) 值按照规定的程序变化，在泵浦源刚开始时，先使光腔具有高损耗因子 δ_H ，激光器由于阈值高而不能产生激光振荡，于是亚稳态上的粒子数可以积累到较高的水平，然后在适当的时刻，使腔的损耗因子突然降到 δ ，阈值也随之突然降低，此时反转集居数大大超过阈值，受激辐射极为迅速地增强。于是在极短时间内，上能级存储的大部分粒子的能量转变为激光能量，形成一个很强的激光巨脉冲输出。

(2) 调 Q 方法(p221-223) 电光调 Q 、声光调 Q 、被动调 Q

52. 什么是激光器的注入锁定？其实际意义是什么？ Page228、Page233

答：(1)(p228) 分为两类：连续激光器的注入锁定，脉冲激光器的注入锁定

a) 连续激光器的注入锁定：在一连续激光振荡器中注入一弱的单色信号，若注入光信号频率 ν_1 足够接近激光器的自由振荡频率 ν ，则激光振荡可以完全为注入信号控制，激光器振荡模式的频率跃变为 ν_1 ，相位与注入信号同步。

b) 脉冲激光器的注入锁定：在调 Q 或增益开关激光器启动过程中注入一弱信号，可使频率与注入信号频率最接近的模式优先起振，其它模式被抑制，实际上激光振荡并未被注入信号真正锁定，激光频率仍为激光器自由振荡的频率。

?(2) 注入锁定的实际意义(p233)

a) 利用注入锁定，可以由一个功率较小、但窄线宽、单模运转、频率稳定的激光器来控制一个高功率或动态调制激光器的光束质量；

b) 使用激光器模式相位锁定阵列可产生空间相干性好、发散角小的高功率光束；

c) 测量系统或应用系统中的光学元件的向后散射对激光器而言是一注入信号，会导致激光器频率不稳定，需要在某些场合采取插入光隔离器等措施减小后向散射；

53. 激光器的锁模原理以及利用振幅调制锁模和位相调制锁模的方法。 Page234、Page237、Page238

答：(1)锁模原理(p234)：使激光器中各振荡模式的频率间隔保持一定，并具有一定的超短脉冲，这种激光器称为锁模激光器。

(2)振幅调制锁模的方法(p237)：调制激光工作物质的增益或腔内损耗，均可使激光振幅得到调制，如果调制频率 $f = \frac{c}{2L'}$ ，可实现锁模。

(3)位相调制锁模锁模(238)：在激光器谐振腔内插入一电光晶体，利用晶体折射 n 随外加电压的变化，产生相位调制。