



课后习题答案网

——思路岛下载

【思路岛课后习题答案网】为广大学子提供各科课后习题答案，不用积分，不用注册，就能下载！
全心打造一流的课后习题答案下载平台！

第一章 绪论

1. 光电子器件按功能分为哪几类？每类大致包括哪些器件？

光电子器件按功能分为光源器件、光传输器件、光控制器件、光探测器件、光存储器件。

光源器件分为相干光源和非相干光源。相干光源主要包括激光和非线性光学器件等。非相干光源包括照明光源、显示光源和信息处理用光源等。

光传输器件分为光学元件(如棱镜、透镜、光栅、分束器等等)、光波导和光纤等。

光控制器件包括调制器、偏转器、光开关、光双稳器件、光路由器等。

光探测器件分为光电导型探测器、光伏型探测器、热伏型探测器、各种传感器等。

光存储器件分为光盘(包括 CD、VCD、DVD、LD 等)、光驱、光盘塔等。

2. 谈谈你对光电子技术的理解。

光电子技术主要研究物质中的电子相互作用及能量相互转换的相关技术，以光源激光化、传输波导（光纤）化，手段电子化，现代电子学中的理论模式和电子学处理方法光学化为特征，是一门新兴的综合性交叉学科。

3. 谈谈光电子技术各个发展时期的情况。

20 世纪 60 年代，光电子技术领域最典型的成就是各种激光器的相继问世。

20 世纪 70 年代，光电子技术领域的标志性成果是低损耗光纤的实现，半导体激光器的成熟特别是量子阱激光器的问世以及 CCD 的问世。

20 世纪 80 年代，出现了大功率量子阱阵列激光器；半导体光学双稳态功能器件的得到了迅速发展；也出现了保偏光纤、光纤传感器，光纤放大器和光纤激光器。

20 世纪 90 年代，掺铒光纤放大器(EDFA)问世，光电子技术在通信领域取得了极大成功，形成了光纤通信产业；另外，光电子技术在光存储方面也取得了很大进展，光盘已成为计算机存储数据的重要手段。

21 世纪，我们正步入信息化社会，信息与信息交换量的爆炸性增长对信息的采集、传输、处理、存储与显示都提出了严峻的挑战，国家经济与社会的发展，国防实力的增强等都更加依赖于信息的广度、深度和速度。

4. 举出几个你所知道的光电子技术应用实例。

如：光纤通信，光盘存储，光电显示器、光纤传感器、光计算机等等。

5. 据你了解，继阴极射线管显示（CRT）之后，哪几类光电显示器件代表的技术有可能发展成为未来显示技术的主体？

等离子体显示（PDP），液晶显示（LCD），场致发射显示（EL）。



第二章 光学基础知识与光场传播规律

1. 填空题

(1) 光的基本属性是光具有波粒二象性，光粒子性的典型现象有光的吸收、发射以及光电效应等。光波动性的典型体现有光的干涉、衍射、偏振等。

(2) 两束光相干的条件是频率相同、振幅方向相同、相位差恒定，最典型的干涉装置有杨氏双缝干涉、迈克耳孙干涉仪。两束光相长干涉的条件是 $\delta = m\lambda (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ δ 为光程差。

(3) 两列同频平面简谐波振幅分别为 E_{01} 、 E_{02} ，位相差为 ϕ ，则其干涉光强为 $E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \phi$ ，两列波干涉相长的条件为 $\phi = 2\pi m (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$

(4) 波长 λ 的光经过孔径 D 的小孔在焦距 f 处的衍射爱里斑半径为 $1.22 \frac{\lambda}{D} f$ 。

2. 在玻璃 ($\epsilon_r = 2.25, \mu_r = 1$) 上涂一种透明的介质膜以消除红外线 ($\lambda = 0.75 \mu m$) 的反射。

(1) 求该介质膜应有的介电常量及厚度。

(2) 如紫外线 ($\lambda = 0.42 \mu m$) 垂直照射至涂有该介质膜的玻璃上，反射功率占入射功率百分之多少？

(1) $n = \sqrt{\epsilon_r} = 1.5$ 正入射时，当 $n = \sqrt{n_0 n_G}$ 时，膜系起到全增透作用 $n = \sqrt{n_0 n_G} = \sqrt{1.0 \times 1.5} = 1.225$ ，正入射下相应的薄膜厚度最薄为

$$h = \frac{\lambda_0}{4n} = \frac{0.75}{4 \times 1.225} = 0.153 \mu m$$

(2) 正入射时，反射率为

$$\begin{aligned} \rho_{\perp} &= \frac{(n_0 - n_G)^2 \cos^2 \frac{2\pi nh}{\lambda_0} + \left(\frac{n_0 n_G}{n} - n\right)^2 \sin^2 \frac{2\pi nh}{\lambda_0}}{(n_0 + n_G)^2 \cos^2 \frac{2\pi nh}{\lambda_0} + \left(\frac{n_0 n_G}{n} + n\right)^2 \sin^2 \frac{2\pi nh}{\lambda_0}} \\ &= \frac{(n_0 - n_G)^2 \cos^2 \frac{2\pi nh}{\lambda_0}}{(n_0 + n_G)^2 \cos^2 \frac{2\pi nh}{\lambda_0} + \left(\frac{n_0 n_G}{n} + n\right)^2 \sin^2 \frac{2\pi nh}{\lambda_0}} = 3.57\% \end{aligned}$$

3. 有两个具有共轭复振幅的单色波，具有相同的频率，其复值分别为 $U(r)$ 及 $U^*(r)$ 。比较它们的强度、波前和波前法线。以平面波 $U(r) = A \exp(-jk^{(x+jy)}/\sqrt{2})$ 与球面波 $U(r) = (A/r) \exp(-jkr)$ 为例。

平面波 $U(r) = A \exp(-jk^{(x+y)}/\sqrt{2})$ 的强度 $I = A^2$, 因波前可以是任意的曲面, 故它的波前即为波前函数 $U(r)$, 波前法线垂直于波前。

它的共轭波 $U^*(r) = A \exp(jk^{(x+y)}/\sqrt{2})$ 的强度 $I = A^2$, 波前函数同样是该波的表达式, 波前法线垂直于波前。

球面波 $U(r) = (A/r) \exp(-jkr)$ 的强度为 $I = (A/r)^2$, 波前函数即该波表达式, 波前法线垂直于波前。

它的共轭波 $U^*(r) = (A/r) \exp(jkr)$ 的强度为 $I = (A/r)^2$, 波前函数即该波表达式, 波前法线垂直于波前。

4. 光束垂直投射在无限大不透明的环状小孔 (半径为 **a** 和 **b**, $a \gg b$) 上, 发生夫琅和费衍射, 求光强度 dI 的角分布。
见物理光学

5. 一束波长为 **0.5** μm 的光波以 45° 角从空气入射到电极化率为 $2 + j0.6$ 的介质表面上, 求

(1) 此光波在介质中的方向 (折射角)。

(2) 光波在介质中的衰减系数。

$$(1) n^2 = 1 + 2 = 3 \quad n = \sqrt{3}$$

$$\text{由 } n_1 \sin \theta_1 = n \sin \theta_2 \text{ 得 } \sin \theta_2 = \frac{\sqrt{6}}{6} \quad \theta_2 = \arcsin \frac{\sqrt{6}}{6}$$

$$(2) \text{ 衰减系数 } r = -k \times (-0.6) = \frac{2\pi n}{\lambda} \times 0.6 = 1.3 \times 10^7$$

6. 输出波长 $\lambda = \mathbf{632.8 nm}$ 的 **He-Ne** 激光器中的反射镜是在玻璃上交替涂覆 **ZnS** 和 **ThF₃** 形成的, 这两种材料的折射率系数分别为 **1.5** 和 **2.5**。问至少涂覆多少个双层才能使镜面反射系数大于 **99.5%**?

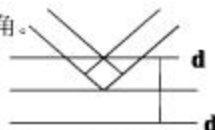
$$\text{设玻璃的折射率 } n_G = 1.5 \text{ 由题意: } \rho_{\perp, i_0} = \left[\frac{n_0 - \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2P} \frac{n_H^2}{n_G}}{n_0 + \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2P} \frac{n_H^2}{n_G}} \right]^2 \geq 0.995, \text{ 即}$$

$$\frac{1 - \left(\frac{2.5}{1.5}\right)^{2P} \frac{1.5^2}{1.5}}{1 + \left(\frac{2.5}{1.5}\right)^{2P} \frac{1.5^2}{1.5}} \leq -0.9975 \quad \text{即} \quad 0.0025 \times \left(\frac{5}{3}\right)^{2P} \times 1.5 \geq 1.9975$$

$$\left(\frac{5}{3}\right)^{2P} \geq 532.7 \quad 2P = 12.3 \quad P \approx 7 \quad \text{故至少涂覆 7 个双层。}$$

7. 有 **m** 个相距为 **d** 的平行反射平面。一束光以倾角 θ 投射反射面。设每一反射平面仅反射

一小部分光，大部分光投射过去；又设各层的反射波幅值相等。证明 $\sin \theta = \lambda/2d$ 时，合成的反射波强度达到最大值，这一角度 θ 称为 **Bragg** 角。



因各辐射波的反射波幅值相等，当它们反射波叠加，相位依次相差 2π 的整数倍时，合成的反射波强度达到最大值，最简单情况下，相位相差 2π 。

如图所示： $k2d\sin\theta = 2\pi$ 即 $\frac{2\pi}{\lambda} 2d\sin\theta = 2\pi$ 故当 $\sin\theta = \lambda/2d$ 时，反射波强度达到最大值。

8. 从麦克斯韦通式 (2-28) 出发，推导波动方程 (2-44)。

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{对该式取旋度左边} = \nabla \times (\nabla \times E) = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$$

$$\text{右边} = -\frac{\partial(\nabla \times B)}{\partial t} \quad (\text{由 } B = \mu_0 H + \mu_0 M) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times (H + M)$$

$$\text{由 } \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} = \sigma E + J_s + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \text{上式}$$

$$= -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[(\sigma E + J_s + \frac{\partial D}{\partial t}) + \nabla \times M \right]$$

$$= -\mu_0 \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial E}{\partial t} - \mu_0 \frac{\partial J_s}{\partial t} - \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times M)$$

在电介质中，一般有 $M=0$ ，从而 $\mu = \mu_0$ ， $B = \mu_0 H$ ，于是上式可化为

$$\nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = -\mu_0 \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial E}{\partial t} - \mu_0 \frac{\partial J_s}{\partial t}$$

$$= -\mu_0 \frac{\partial^2 (\epsilon_0 E + P)}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial E}{\partial t} - \mu_0 \frac{\partial J_s}{\partial t}$$



1. 填空

- (1) 最早的电光源是炭弧光灯, 最早的激光器是 1960 年由美国国家的梅曼制作的 红宝石激光器。
- (2) 光在各向同性介质中传播时, 复极化率的实部表示色散与频率的关系, 虚部表示物质吸收与频率的关系。
- (3) 激光器的基本结构包括激光工作物质、泵浦源和光学谐振腔。激光产生的充分条件是阈值条件和增益饱和效应, 必要条件包括粒子数反转分布和减少振荡模式数。
- (4) 今有一个球面谐振腔, $r_1=1.5\text{m}, r_2=-1\text{m}, L=80\text{cm}$, 它属于稳定腔。

2. 试简单说明以下光电子学术语的科学含义:

(1) 受激辐射(画出二能级图)

处于激发态 E_2 上的原子, 在频率为 ν_{21} 的外界光信号作用下, 从 E_2 能级跃迁到 E_1 能级上, 在跃迁过程中, 原子辐射出能量为 $h\nu_{21}$, 与外界光信号处于同一状态的光子, 这两个光子又可以去诱发其他发光粒子, 产生更多状态相同的光子, 这样, 在一个入射光子作用下, 就可以产生大量运动状态相同的光子, 这一发射过程称为受激发射过程。

(2) 谱线的多普勒加宽

多普勒展宽是由于气体物质中作热运动的发光粒子所产生的辐射的多普勒频移引起的。

(3) 谱线的自然加宽

自然加宽是由于粒子存在固有的自发跃迁, 从而导致它在受激能级上寿命有限所形成的。

(4) 光放大

光束在激活介质中传播时, 设入射端面处光强为 $I_0(\nu)$, 距离 x 处光强为 $I(\nu)$, 且

$$\frac{N_1}{g_1} < \frac{N_2}{g_2}, \text{ 则}$$

$$\frac{d\rho(\nu_{21})}{\rho(\nu_{21})} = \frac{dI(\nu_{21})}{I(\nu_{21})} = (N_2 \frac{g_1}{g_2} - N_1) B_{21} h\nu_{21} dt > 0 \quad \text{可见光强在激活介质中不断}$$

放大, 为此, 我们引入激活介质的增益系数 $G(\nu)$

$$G(\nu) = \frac{dI(\nu)}{I(\nu)dx}$$

式中, $dI(\nu)$ 是传播距离 dx 时的光强的增量。这说明: 介质的增益系数在数值上等于光束强度在传播单位长度的距离时, 光强增加的百分数。由于 $dI(\nu) > 0$, 因而 $G(\nu) > 0$, 所以 $G(\nu)$ 可以表示光在激活介质当中的放大特性。

3. 计算与推导

- (1) $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ 时, 什么温度下自发辐射率与受激辐射率相等? $T=300\text{K}$ 时, 什么波长下

自发辐射率相等？

自发辐射率为 A_{21} ，受激辐射率为 W_{21} ， $n_{21} = B_{21} \rho(\nu_{21})$ 。

由爱因斯坦关系式可知： $\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu_{21}^3 n^3}{c^3}$ ，

由普朗克公式可知： $\rho(\nu_{21}) = \frac{8\pi h\nu_{21}^3 n^3}{c^3} \frac{1}{\exp(\frac{h\nu_{21}}{kT}) - 1}$ ，

由题意 $A_{21} = W_{21}$ ，故 $\exp(\frac{h\nu_{21}}{kT}) - 1 = 1$ ，

$$T = \frac{h\nu_{21} \ln 2}{k} = \frac{hc^3 \ln 2}{k\lambda^3} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times (3 \times 10^8)^3 \times 0.6931}{1.38 \times 10^{-23} \times (0.5 \times 10^{-6})^3} = 7.19 \times 10^{13} K$$

当 $T=300K$ 时，

$$\lambda^3 = \frac{hc^3 \ln 2}{kT} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times (3 \times 10^8)^3 \times 0.6931}{1.38 \times 10^{-23} \times 300} = 2.997 \times 10^{12}$$

$$\lambda = 1.442 \times 10^4 M$$

(2) He-Ne 激光器的反射镜间距为 0.2m，求最靠近 632.8nm 跃迁谱线中心的纵模阶数、纵模频率间隔。如果增益曲线宽度为 1.5×10^9 Hz，则可能引起的纵模总数是多少？

气体的折射率 $n \approx 1$

$$\text{由 } \nu_q = \frac{c}{2nL} q \text{ 得}$$

$$q = \frac{2nL}{\lambda} = \frac{2 \times 1 \times 0.2}{632.8 \times 10^{-9}} = 6.32 \times 10^5$$

$$\text{纵模频率间隔 } \nu_q = \frac{c}{2nL} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1 \times 0.2} = 7.5 \times 10^8 \text{ Hz}$$

$$\text{实际振荡纵模总数 } q = \left[\frac{\nu_T}{\nu_q} \right] + 1 = \left[\frac{1.5 \times 10^9}{7.5 \times 10^8} \right] + 1 = 3$$

(3) 红宝石激光器的工作物质有特性： $N_2 - N_1 = 5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 、300K 处，

$$\nu \approx \frac{1}{g(\nu_0)} = 2 \times 10^{11} \text{ Hz}, \tau_r = 3 \times 10^{-3} \text{ s}, \nu = 4.326 \times 10^{14} \text{ Hz}, n = 1.78, \text{求其在中心频率处的增益}$$

系数 $G(\nu)$ 。

(4) 一维电子振荡器在电磁场 $E(t)$ 作用下的运动方程如式 (3-2)，推导简谐电场与简谐振

子条件下, 复极化率 $\tilde{\chi}(\omega)$ 的表达式。

电子运动方程为 $m \frac{d^2 x}{dt^2} = -m\omega_0^2 x - m\gamma \frac{dx}{dt} - eE$, 在简谐电场和简谐振子条件下, 则瞬时电

场 $E(t)$ 与位置偏移 $x(t)$ 为

$$x(t) = x(\omega)e^{i\omega t}$$

$$E(t) = E(\omega)e^{i\omega t}$$

$E(\omega)$ 、 $x(\omega)$ 表示对应于频率 ω 的振幅值, 将 $x(t)$ 、 $E(t)$ 代入运动方程, 并求解得

$$x(\omega) = -\frac{e}{m} \frac{E(\omega)}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega\gamma}$$

在平面光波场作用下, 原子在光场作用下产生感应极化, 形成电偶极振子

$$p = -ex = \text{Re}(p(\omega)e^{i\omega t})$$

$$p(\omega) = \frac{e^2}{m} \frac{E(\omega)}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega\gamma}$$

设单位体积中原子数为 N , 则介质极化强度

$$P = Np = \text{Re}(P(\omega)e^{i\omega t})$$

$$P(\omega) = \frac{Ne^2}{m} \frac{E(\omega)}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega\gamma} = \chi(\omega)\epsilon_0 E(\omega)$$

$$\text{又} \quad P(\omega) = \chi(\omega)\epsilon_0 E(\omega) = [\chi'(\omega) - j\chi''(\omega)]\epsilon_0 E$$

$$\chi(\omega) = \frac{Ne^2}{m} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega\gamma}$$

4. 简述题

(1) 简述激光的特点。

激光的特点主要表现在以下四个方面: ①激光具有激光极好的方向性②激光的单色性非常好③激光的相干性好④激光具有极高的亮度和单色亮度。信息光电子技术中所用的光源, 着重单色性、高速脉冲性、方向性、可调谐性和高能量密度等。激光正是满足这些条件的最好的光源。

(2) 分析单色辐射场与连续辐射场与粒子体系相互作用情况。

I 单色辐射场与粒子体系的相互作用

如图 3-8 所示, 粒子线型函数为 $g(\nu)$, 中心频率为 ν_0 , 谱线宽度为 ν , 辐射场 ρ_ν

的中心频率为 ν_0' , 带宽为 ν' 。单色辐射场与粒子体系相互作用过程, 要求粒子体系的展宽要

远大于辐射场宽度，即 ν 与 ν' 间满足公式 $\nu \gg \nu'$ ， ν' 很小，于是

$(\frac{dN_{21}}{dt})_a = N_2 B_{21} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu) \rho(\nu) d\nu$ 中被积函数只有在 ν_0' 附近一个很窄的范围 ν' 内不为零。且在

ν' 内 $g(\nu)$ 可以认为不便，于是单色辐射场能量密度可表示为

$$\rho(\nu) = \rho(\nu') \delta(\nu' - \nu)$$

$$(\frac{dN_{21}}{dt})_a = N_2 B_{21} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu) \rho(\nu') \delta(\nu' - \nu) d\nu = N_2 B_{21} g(\nu') \rho(\nu') = N_2 W_{21}(\nu')$$

$$W_{21}(\nu') = B_{21} g(\nu') \rho(\nu') = \frac{A_{21} c^3}{8\pi n^3 h\nu'^3} g(\nu') \rho(\nu') = \frac{A_{21} c^2 I_{\nu'}}{8\pi n^3 h\nu'^3} g(\nu') = \frac{\lambda^2 I_{\nu'}}{8\pi n^3 h\nu' \tau_s} g(\nu') \quad \text{式中，}$$

$$I_{\nu'} = \frac{c\rho(\nu')}{n} \quad (\text{单位: } W/m^2) \text{ 为光辐射强度。}$$

上式表明由于谱线宽度，和粒子体系产生相互作用的单色光场的频率 ν_0' 并不一定要精确位于 $g(\nu)$ 的中心频率 ν_0 处才能产生受激辐射，而是在 ν_0 附近一定频率范围内均可，跃迁概率的大小取决于单色光场中心频率 ν_0' 相对于线型函数中心频率 ν_0 的位置， $\nu_0' - \nu_0$ 越小，则 W_{21} 越大，当 $\nu_0' = \nu_0$ 时，受激跃迁概率最大。这种相互作用不仅与 $\rho_{\nu'}$ 、 B_{21} 有关，而且还与 $g(\nu)$ 有关。

II 连续辐射光场与粒子体系相互作用

当连续辐射光场与粒子体系相互作用时（图 3-9），满足条件 $\nu' \gg \nu$ ，于是

$(\frac{dN_{21}}{dt})_a = N_2 B_{21} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu) \rho(\nu) d\nu$ 中被积函数只有在 ν_0 附近很小的范围内（ ν 量级）才不为零，

且 ν 内可以认为 $\rho(\nu')$ 近似为常量 $\rho(\nu_0)$ ，于是

$$(\frac{dN_{21}}{dt})_a = N_2 B_{21} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu) \rho(\nu') d\nu = N_2 B_{21} \rho(\nu_0) \int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu) d\nu = N_2 B_{21} \rho(\nu_0) = N_2 W_{21}$$

式中， $\rho(\nu_0)$ 为连续辐射光场在粒子线型函数中心频率 ν_0 处的单色能量密度。

可见，连续辐射场中只有频率等于粒子体系中心频率 ν_0 的那部分辐射场才能引发粒子体系受激辐射，其他部分实际上被粒子体系所散射。

(3) 试推导爱因斯坦关系式。

设一个原子系统有两特定能级 E_1 、 E_2 ，($E_1 < E_2$)，其简并度分别为 g_1 、 g_2 ，若原子系统在温度 T 处于热平衡状态， E_1 、 E_2 能级的原子数密度分别为 N_1 、 N_2 ，则原子系统从辐射场中吸收能量 $\hbar\omega_{21}$ 后，单位时间内从 E_1 跃迁到 E_2 能级的原子数为

$$\Delta N_{12} = B_{12} \rho(\nu_{21}) N_1$$

式中， $\rho(\nu_{21})$ 表示热平衡状态下光辐射场的能量密度。

处于 E_2 上的原子，可以通过自发辐射与受激辐射两种途径跃迁至 E_1 上，单位时间内， $E_2 \rightarrow E_1$ 的原子数 ΔN_{21} 为

$$\Delta N_{21} = [A_{21} + \rho(\nu_{21}) B_{21}] N_2$$

由于系统处于热平衡状态，则应有以下关系式成立 $\Delta N_{21} = \Delta N_{12}$ 即

$$\rho(\nu_{21}) B_{12} N_1 = [A_{21} + \rho(\nu_{21}) B_{21}] N_2$$

$$\text{因而有} \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{\rho(\nu_{21}) B_{12}}{A_{21} + \rho(\nu_{21}) B_{21}}$$

又由于在热平衡状态下， N_1 、 N_2 按照玻尔兹曼分布

$$\frac{N_2/g_2}{N_1/g_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{KT}\right) = \exp\left(-\frac{\hbar\omega_{21}}{KT}\right)$$

式中， K 为玻尔兹曼常量。于是有

$$\rho(\nu_{21}) = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{\frac{B_{12} g_1}{B_{21} g_2} \exp\left(\frac{\hbar\omega_{21}}{KT}\right) - 1}$$

在热平衡条件下，光辐射的能量密度 $\rho(\nu_{21})$ 又可由普朗克公式给出

$$\rho(\nu_{21}) = \frac{8\pi \hbar^3 \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega_{21}}{kT}\right) - 1}$$

式中， c 为真空光速，于是比较上述两式，可知

$$B_{12} g_1 = B_{21} g_2$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu_{21}^3 n^3}{c^3}$$

这即为爱因斯坦关系式。

(4) 为什么二能级系统不能产生激光？

(画出二能级图) 当外界激励能量作用于二能级体系物质时，首先建立起自发辐射，在体系中有初始光辐射之后，一方面物质吸收光，使 N_1 减少、 N_2 增加；另一方面由于物质中存在辐射过程，使 N_2 减小、 N_1 增加，两种过程同时存在，最终达到 $N_1 = N_2$ 状态，光吸收和受激发射相等，二能级系统不再吸收光，达到所谓的自发辐射状态，这种状态下 N_2 不再继续增加；即便采用强光照，共振吸收和受激发射以相同的概率发生，也不能实现粒子数反转。

(5) 以一个三能级原子系统为例，说明激光器的基本组成和产生激光的基本原理。

激光器的基本结构包括激光工作物质、泵浦源、和光学谐振腔。

激光工作物质提供形成激光的能级结构体系，是激光产生的内因。要产生激光，工作物质只有高能态（激发态）和低能态（基态）是不够的，还至少需要有这样一个能级，它可以使得粒子在该能级上具有较长得停留时间或较小得自发辐射概率，从而实现其与低能级之间得粒子数反转分布，这样得能级称为亚稳态能级。这样，激光工作物质应至少具备三个能级。

(画三能级图) 如图所示，其中 E1 是基态，E2 是亚稳态，E3 是激发态。外界激发作用使粒子从 E1 能级跃迁到 E3 能级。由于 E3 的寿命很短 (1.0E-9s 量级)，因而不允许粒子停留，跃迁到 E3 的粒子很快通过非辐射迟豫过程跃迁到 E2 能级。由于 E2 能级是亚稳态，寿命较长 (1.0E-3s 量级)，因而允许粒子停留。于是，随着 E1 的粒子不断被抽运到 E3，又很快转到 E2，因而粒子在 E2 能级上大量积聚起来，当把一半以上的粒子抽运到 E2，就实现了粒子数反转分布，此时若有光子能量为 $h\nu = E2 - E1$ 的入射光，则将产生光的受激辐射，发射 $h\nu$ 的光，从而实现光放大。

泵浦源提供形成激光的能量激励，是激光形成的外因。由于在一般情况下介质都处于粒子数正常分布状态，即处于非激活状态，故欲建立粒子数反转分布状态，就必须用外界能量来激励工作物质。我们把将粒子从低能态抽运到高能态的装置称为泵浦源或激励源。事实上，激光器不过是一个能量转换器件，它将泵浦源输入的能量转变成激光能量。主要有以下几种泵浦方式：①光激励方式②气体辉光放电或高频放电方式③直接电子注入方式④化学反应方式。

光学谐振腔为激光器提供反馈放大机构，使受激发射的强度、方向性、单色性进一步提高。不论哪种光学谐振腔，它们都有一个共同特性，那就是都是开腔，即侧面没有边界的腔，这使偏轴模不断耗散，以保证激光定向输出。谐振腔分为稳态腔（低损耗腔）和非稳态腔（高损耗腔）两大类。

(6) 分析四能级与三能级激光器相比所具有的优点。

(画四能级图) 四能级系统能级结构如图所示，由于 E_4 到 E_3 、 E_2 到 E_1 的无辐射跃迁