

复习中结合例题 尽量保证一块复习完 例题可以做对

一、 激光光学 (谐振腔与高斯光束)

1. 矩阵光学
2. 平面和球面谐振腔
3. 高斯光束及特性

重点复习公式 会计算

二、 光子光学

1. 能级分布
2. 相互作用

重点掌握速率方程和各个概念之间的数学关系

比如光子流密度、功率、概率之间的关系

三、 激光器原理

1. 激光放大器
2. 激光振荡器+输出特性
3. 脉冲激光器

重点掌握模式选择、增益饱和、脉冲等

四、 半导体

1. 半导体基础概念
2. 相互作用 费米分布 能带
3. 半导体激光放大器
4. 发光二极管
5. 半导体激光器

6. 记一下典型激光器

五、 电光和声光调制

六、 非线性光学

矩阵光学

1. $\begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 自由空间 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$ 边界折射 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n_2 - n_1)}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$ 球面边界折射 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$ 薄透

镜折射 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 平面镜 $\begin{bmatrix} 1 & \frac{d}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 平行平板 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}$ 球面镜反射

2. 传播矩阵由 M1 到 Mn, 而矩阵相乘从右往左乘

3. 针对周期型光学系统, 稳定解条件为 $|b| \leq 1$, 即 $|\frac{A+D}{2}| \leq 1$

谐振腔

1. 谐振腔波矢 $kq = \frac{q\pi}{d}$ 才满足谐振条件, 得到谐振频率 $\nu q = q \frac{c}{2d}$

频率间隔为 $\nu_F = \frac{c_0}{2dn} = \frac{c}{2d}$

2. 模式密度指单位腔长、单位频率的模式数, 对一维而言

$$M(\nu) = \frac{1}{\nu_F} \cdot \frac{1}{d} \cdot 2$$

3. 谐振腔细度 $F = \frac{2\gamma^{\frac{1}{2}}}{1-\gamma}$ γ 为振幅损耗, 谐振峰半高全宽 $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{F}$ 频率

半高带宽为 $\delta\nu = \frac{\nu_F}{F}$

4. 损耗系数 $\alpha_r = \alpha_s + \alpha_{m1} + \alpha_{m2}$ 其中 $\alpha_{m1} = \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{R_1}$, $\alpha_{m2} = \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{R_2}$

总功率衰减 $\gamma^2 = e^{-2\alpha r d}$, 可见 γ 增加, F 下降

5. 光子寿命 $\tau_p = \frac{1}{c\alpha r}$ 也是衰减时间, $\gamma^2 = e^{(-2\alpha r d)}$, 可见 τ_p 为总功率衰减

到 $\gamma^2 = e^{-2}$ 的时间。 $\delta\nu = \frac{1}{2\pi\tau_p} = \frac{c\alpha r}{2\pi} \Rightarrow F \approx \frac{\pi}{\alpha r d}$

6. 品质因子 $Q = \frac{2\pi}{c\alpha r / \nu_0} = \frac{\nu_0}{\delta\nu} = 2\pi\nu_0\tau_p = \frac{\nu_0 F}{\nu_F}$

7. 球面谐振腔稳定条件 $0 \leq \left(1 + \frac{d}{R_1}\right) \left(1 + \frac{d}{R_2}\right) \leq 1$

高斯光束

稳定振荡模式光场的一种解就是高斯光束。

1. 高斯光束宽度 $W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}$.

2. 高斯光束波前曲率半径 $R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right]$ $\zeta(z) = \tan^{-1} \left(\frac{z}{z_0} \right)$

$W_0 = \left(\frac{\lambda z_0}{\pi} \right)^{1/2}$ 曲率半径在 $z=z_0$ 处最小

3. 轴上各点光强分布 $I(0, z) = \frac{I_0}{1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2}$

4. 功率 $P = 0.5 I_0 (\pi W_0^2)$ 光功率等于最高光强乘束腰面积值的一半

5. W_0 为束腰半径, 在 $z=z_0$ 时达到 $\sqrt{2}W_0$, 在远场随 z 线性增加。

发散角 $\theta_0 = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{2W_0} = \frac{W_0}{z_0}$

6. 焦深为 $2z_0$, $z_0 = \frac{W_0^2 \pi}{\lambda}$

7. 当 $z \rightarrow -\infty$, $\zeta = \frac{-\pi}{2}$; 当 $z \rightarrow +\infty$, $\zeta = \frac{\pi}{2}$

8.经过光学系统变换的高斯光束

①透镜前后 $W' = W$, 曲率半径满足 $\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} = \frac{1}{f}$

② $W'_0 = MW_0$

③ $z' - f = M^2(z - f)$ z' 和 z 代表束腰位置

④ $2z'_0 = M^2(2z_0)$

⑤ $2\theta'_0 = 2\theta_0 / M$

⑥ $M = \frac{Mr}{(1+r^2)^2}$, $r = \frac{z_0}{z-f}$, $M_r = \left| \frac{f}{z-f} \right|$

M_r 对应无限远的光束放大

8. 高斯光束聚焦

把透镜置于束腰位置, $W'_0 = \frac{W_0}{\left[1 + \left(\frac{z_0}{f} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$ 达到最小, $z' = \frac{f}{1 + \left(\frac{f}{z_0} \right)^2}$

9. 高斯光束准直

令 z' 很大, 则最佳 $z = z_0 + f$ 处, 形成准直效果

10.高斯光束扩束

第一个短焦透镜用于高斯光束聚焦, 第二个长焦透镜用于高斯光束准直。

11.高斯光束从球面镜的反射

$W_2 = W_1, \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R}$ R 为球面镜曲率半径

12.球面谐振腔

①球面镜曲率半径由 $R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right]$ 给出

②对称球面腔稳态条件为 $0 \leq \frac{d}{|R|} \leq 2$

能级与分布

1. 玻尔兹曼分布适用于原子或分子。

原子处于某一能级的概率为 $P(E_m) \propto \exp[-E_m / (k_B T)]$

若 N_1 个原子在 E_1 上, N_2 个原子在 E_2 上则 $\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right)$

2. 费米-狄拉克分布适用于半导体

能级 E 上占据电子的概率为 $f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_f) / (k_B T)] + 1}$

写成玻尔兹曼分布一样形式 $P(E) \propto \exp\left[-\frac{E - E_f}{k_B T}\right]$

E_f 为常数, 费米能级。当 $E \gg E_f$ 时, 可近似玻尔兹曼分布。

光子原子相互作用

1. 自发辐射: 粒子位于高能级自发跃迁至低能级并释放光子

单位时间跃迁概率密度 $P_{sp} = \frac{c}{V} \sigma(\nu)$ 自发跃迁速率为 $\frac{dN}{dt} = -P_{sp} N$

不受外在辐射影响

2. 吸收: 低能级粒子吸收光子并跃迁至高能级

$P_{ab} = \frac{c}{V} \sigma(\nu)$ 受到外在辐射影响, n 个光子时, $P_{ab} = n \frac{c}{V} \sigma(\nu)$

3. 受激辐射: 高能级粒子受到另一个光子辐射作用, 从高能级跃迁至低能级的同时辐射出另外一个相同模式的光子。 n 个光子时,

$$P_{st} = n \frac{c}{V} \sigma(\nu)$$

4. $\sigma(\nu) = Sg(\nu)$, S 是跃迁强度为 $\sigma(\nu)$ 的面积, $g(\nu)$ 是归一化跃迁截面

5. 所有模式总自发辐射 $P_{sp} = \frac{8\pi S}{\lambda^2} = \frac{1}{t_{sp}}$, λ 为介质中波长, 因此得到

$$S = \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}}, \quad \sigma(\nu) = Sg(\nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}} g(\nu)$$

6. 单频幅射光下受激辐射的概率密度 $W_i = \phi\sigma(\nu)$, 光子流密度

$$\phi = n \frac{c}{V} = \frac{I}{h\nu}$$

7. 宽频幅射光下 $P_{sp} = A$, $W_i = B\rho(\nu_0)$,

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{t_{sp}} \\ B &= \frac{\lambda^3}{8\pi h t_{sp}} \quad \frac{B}{A} = \frac{\lambda^3}{8\pi h} \end{aligned}$$

8. 线性加宽

① 寿命加宽 (自然加宽)

由于光谱有不确定性, 即存在线宽 $\delta\nu = \frac{1}{2\pi\tau}$, 对应该能级存在能量不确定性 $\Delta E = \frac{h}{2\pi\tau}$ 。两个 E1 和 E2 能级之间的能量展宽可求出

$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}$, 对应产生线宽 $\Delta\nu = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right)$, 中心频率为 $(E_2 - E_1)/h$

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu / 2\pi}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu / 2)^2}, \quad \text{峰值 } g(\nu_0) = \frac{2}{\pi\Delta\nu}$$

$$\text{代入峰值可得峰值跃迁截面 } \sigma(\nu_0) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 t_{sp} \Delta\nu}$$

$$\text{若所有衰减由自发辐射造成得最大跃迁截面 } \sigma_0 = \frac{\lambda^2}{2\pi}$$

② 碰撞加宽

考虑碰撞的影响, 洛伦兹线性的线宽为 $\Delta\nu = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + 2f_{col} \right)$

③ 非均匀加宽

激光放大器和激光特性

1. 增益与相移

① 激光介质的增益系数为 $\gamma(\nu) = N\sigma(\nu) = N \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}} g(\nu)$

代表每单位介质长度光子流密度的净增益

$$N = N_2 - N_1$$

② 总增益 $G(\nu)$ 为 $G(\nu) = \phi(d) / \phi(0)$, 也就是 $G(\nu) = \exp[\gamma(\nu)d]$

③ 线宽频率与波长的对应关系为

$$\Delta\lambda = \left| \Delta(c_0 / \nu) \right| = + (c_0 / \nu^2) \Delta\nu = (\lambda_0^2 / c_0) \Delta\nu,$$

④ 在窄线宽 $\Delta\nu \ll \nu_0$ 的洛伦兹线性增益下, 相移系数为

$$\varphi(\nu) = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \gamma(\nu) \quad \text{中心无相移}$$

2. 泵浦

① 无辐射速率方程(仅考虑泵浦和自发辐射和非辐射跃迁)

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= R_2 - \frac{N_2}{\tau_2} \\ \frac{dN_1}{dt} &= -R_1 - \frac{N_1}{\tau_1} + \frac{N_2}{\tau_{21}} \end{aligned} \quad \text{稳态求得稳态粒子数差 } N_0 = R_2\tau_2 \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_{21}} \right) + R_1\tau_1$$

可见要有大增益, 就要有大 N_0 , 对应强泵浦, 上能级衰减慢, 下能级清空快。

能级寿命存在反比相加关系, 在能级跃迁中除了自发辐射还有非辐射跃迁成分, 因此 $\tau_{21}^{-1} = \tau_{sp}^{-1} + \tau_{nr}^{-1}$

② 有辐射速率方程 (额外考虑受激辐射和受激吸收)

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= R_2 - \frac{N_2}{\tau_2} - N_2 W_i + N_1 W_i \\ \frac{dN_1}{dt} &= -R_1 - \frac{N_1}{\tau_1} + \frac{N_2}{\tau_{21}} + N_2 W_i - N_1 W_i \end{aligned} \quad \text{稳态下求得} \quad \begin{aligned} N &= \frac{N_0}{1 + \tau_s W_i} \\ \tau_s &= \tau_2 + \tau_1 \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_{21}} \right) \end{aligned}$$

$\tau_s > 0$ 因此有辐射时稳态粒子数差偏小

③ 四能级系统 分成 3、2、1、0 四个能级

$\tau_{32} \rightarrow 0$ 此时 $R_2 = R$, $R_1 = 0$, 代入无辐射速率方程得到

$$N_0 = R \tau_2 \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_{21}} \right), \quad \text{作近似得到 } N \approx \frac{R t_{sp}}{(1 + t_{sp} W_i)}$$

泵浦速率并非固定不变, 近似条件下与能级 2 粒子数及总数相关

$$R \approx (N_a - N) W$$

$$\text{代入后重写为 } N = \frac{N_0}{1 + \tau_s W_i}$$

$$\text{其中 } N_0 \approx \frac{t_{sp} N_a W}{1 + t_{sp} W} \propto W \quad (W \ll t_{sp} \text{ 时}) \quad \tau_s \approx \frac{t_{sp}}{1 + t_{sp} W} \approx t_{sp} \quad (W \ll t_{sp} \text{ 时})$$

④ 三能级系统 分成 3、2、1 三个能级

三能级系统基态当作下能级

$$\tau_{32} \rightarrow 0 \text{ 此时 } R_1 = R_2 = R, \quad \tau_2 = \tau_{21}, \tau_1 = \infty$$

$$\text{速率方程为 } R - \frac{N_2}{\tau_{21}} - N_2 W_i + N_1 W_i = 0 \quad \text{而 } N_1 + N_2 = N_a, \text{ 求得}$$

$$N = \frac{N_0}{1 + \tau_s W_i}$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } N_0 &= 2R\tau_{21} - N_a, \quad \tau_s = 2\tau_{21} \\ N_0 &\approx 2Rt_{sp} - N_a, \quad \tau_s \approx 2t_{sp} \quad (t_{sp} \ll t_{nr}) \end{aligned}$$

$$\text{可见三能级系统为了使得 } N_0 > 0 \text{ 需要 } R > \frac{N_a}{2t_{sp}}$$

基态的高粒子数集居从本质上成为粒子数反转的障碍, 而四能级

中不存在这一点

考虑泵浦速率 $R \approx (N_a - N)W/2$ 带入后 N 的形式不变但其中

$$N_0 = \frac{N_a(t_{sp}W - 1)}{1 + t_{sp}W}, \quad \tau_s = \frac{2t_{sp}}{1 + t_{sp}W}$$

⑤ 举例

三能级的红宝石激光放大器 694.3nm、四能级的掺钕钇铝石榴石激光放大器 Nd: YAG 1.06 μ m、三能级的掺铒石英光纤激光放大器 1.55 μ m, CO₂ 激光器 10.6 μ m、四能级的 He-Ne 激光器 632.8nm、四能级的 Ar³⁺ 激光器 515nm

3. 增益饱和

① 增益系数

$$\gamma(\nu) = \frac{\gamma_0(\nu)}{1 + \phi/\phi_s(\nu)} \quad \text{其中小信号增益 } \gamma_0(\nu) = N_0\sigma(\nu) = N_0 \frac{\lambda^2}{8\pi\tau_{sp}} g(\nu)$$

$$\text{饱和光子流密度 } \phi_s(\nu) = \frac{1}{\tau_s\sigma(\nu)}$$

② 增益

放大器输入光子流密度与输出光子流密度关系为

$$\ln Y + Y = (\ln X + X) + \gamma_0 d \quad X \text{ 和 } Y \text{ 是归一化的输入与输出}$$

当 X 和 Y 均 $\ll 1$ 则 $Y \approx X \exp(\gamma_0 d)$ 与小信号近似一致

当 $X \gg 1$ 时, 则 $Y \approx X + \gamma_0 d$

可见总增益 G 在小信号时有最大值, 在 $X \gg 1$ 时下降为 1

③ 饱和吸收体

在大光子流密度时, 吸收会减弱, 称为饱和吸收体, 相当于饱和

增益反过来的过程，透射率会逐渐增大最终到 1.

4. 激光振荡

① 在谐振腔中来回一周 $\exp(-2\alpha_r d) = R_1 R_2 \exp(-2\alpha_s d)$

② 激光振荡条件

第一个条件为小信号增益 $\gamma_0(\nu) > \alpha_r$

$N_t = \frac{\alpha_r}{\sigma(\nu)}$ 称为阈值反转粒子数差,其正比于 α_r , 反比于 τ_p , 正比于线

宽 $\delta\nu$

第二个条件为 $2kd + 2\varphi(\nu)d = 2\pi q$

冷腔共振频率 $\nu'_q = \nu_q - (\nu_q - \nu_0) \frac{\delta\nu}{\Delta\nu}$ 被拉向中心频率

$\delta\nu$ 为光谱线宽，单模的线宽； $\Delta\nu$ 为原子线宽，是多模的大包络

5. 输出特性

① 腔内光子流密度

当饱和增益系数等于损耗系数时来确定内部光子流密度

$$\gamma_0(\nu)[1 + \phi / \phi_s(\nu)] = \alpha_r \text{ 解得 } \phi = \phi_s(\nu) \left[\frac{\gamma_0(\nu)}{\alpha_r} - 1 \right] = \phi_s(\nu) \left[\frac{N_0}{N_t} - 1 \right], \quad \gamma_0(\nu) > \alpha_r$$

饱和增益系数为损耗系数两倍时达到饱和光子流密度

② 输出光子流密度

假设反射镜 1 的透射率为 T 则输出光子流密度 $\phi_0 = \frac{T\phi}{2}$

代入腔内光子流密度公式和透射率影响的损耗系数可以得到

$$\phi_0 = \frac{1}{2} \phi_s T \left[\frac{g_0}{L - \ln(1-T)} - 1 \right]$$

取微分即可得到最佳 T

在 $T \ll 1$ 情况下, 近似可以得到 $T_{\text{op}} \approx (g_0 L)^{1/2} - L$

③ 内部光子数密度为 $n = n_s \left(\frac{N_0}{N_t} - 1 \right)$, $N_0 > N_t$

其中 $n_s = \phi_s(\nu) / c$ 为饱和光子数密度, 还可写作

$$n = (N_0 - N_1) \frac{\tau_p}{\tau_s}, \quad N_0 > N_t$$

$\frac{N_0 - N_1}{\tau_s}$ 代表稳态时光子产生的速率, 等于 $\frac{n}{\tau_p}$ 代表失去光子的速率

④ 激光中只有有限的振荡频率可以工作, 可能的振荡模式为

$$M \approx \frac{B}{\nu_F} \text{ .带宽除以频率间隔}$$

⑤ 均匀加宽介质

假定所有原子相同, 具有相同的线性函数。由于模式竞争, 最后剩下一个最靠近中心频率的模式维持振荡。

实际上由于不同模式占据了介质不同空间, 工作在多模状态, 称为空间烧孔效应。

⑥ 非均匀加宽介质

不同原子有不同的线性函数, 当模式间隔大于原子线宽时, 不同模式中不同原子分别各自相互作用, 未作用的原子仍保持高增益, 而参与作用的会直到增益饱和, 在增益谱上产生空洞, 称为光谱烧孔。一般光谱烧孔效应维持的模式比空间烧孔效应多。

⑦ 多普勒加宽

一个频率为 ν_q 的模式在两个反射镜之间以相同速度来回运动与两类原子作用使得中心频率两侧的原子饱和, 出现孔洞。

当 $\nu_q = \nu_0$ 时，两个烧孔合并为一个，该模式功率略下降，称为兰姆凹陷。

⑧ 光谱分布由两个因素决定：激活介质的原子线性和腔的模式
空间分布由两个因素决定：腔的形状和增益介质的形状

⑨ 选模

- i. 激光谱线分隔较远时，棱镜可用来选择输出谱线，但不可选择纵模（折射率色散不够，分不出单个频率）
- ii. 横模的选择可用形状可变的光阑
- iii. 偏振的选择可用布鲁斯特窗，偏振片会对某个偏振方向的光产生较大损耗，使它不会起振。
- iv. 纵模的选择可以采用
 - (1) 增大损耗使得只有增益最大的纵模可以振荡
 - (2) 减小腔长增加纵模间隔
 - (3) 利用一个镜间距远小于腔长的倾斜放置的 FP 腔可用于纵模选择，该 FP 模式间隔要大于带宽 B
 - (4) 多镜腔，比如两个不同腔长的耦合腔

脉冲激光器

1. 常用技术为

- ① 增益开关。调制泵浦的开关来控制激光器增益
- ② Q 开关。周期性调制激光腔内损耗实现开关，泵浦一直开着，能量以反转粒子数形式储存

③ 腔倒空。周期性调制输出镜的透射率实现开关, 泵浦一直开着, 能量以光子形式储存

④ 锁模。

2. 激光振荡过程主要由两个变量主导: 腔内的光子数密度 $n(t)$ 和单
位体积的反转粒子数密度 $N(t)$

3. 调 Q

调 Q 固定的是 N_0 , 调节的是 N_t 。

增益开关固定的是 N_t , 调节的是 N_0

电光调 Q 和声光调 Q 见简答题。

可饱和吸收体调 Q:

可饱和吸收体的透射率随着光强增大而增大, 饱和吸收时透射率为 1, 将它加入到谐振腔内, 最初, 吸收体损耗很高, 反转粒子数大量增加, 当增益刚开始超过损耗时, 随着激光功率增加, 吸收体逐渐饱和, 透射率大幅提升, 损耗迅速下降, 形成脉冲激光。脉冲产生后, 饱和吸收体又恢复到高损耗低透射的状态。

速率方程:

$$\frac{dn}{dt} = \left(\frac{N}{N_t} - 1\right) \frac{n}{\tau_p} \quad \text{两式相除可得} \quad \frac{dn}{dN} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{N_t}{N} - 1\right)$$
$$\frac{dN}{dt} = -2 \frac{N}{N_t} \frac{n}{\tau_p}$$

$$\text{积分后得} \quad n \approx \frac{1}{2} N_t \ln(N) - \frac{1}{2} N + \text{constant}$$

$$\text{功率} \quad P_0 = h\nu A \phi_0 = \frac{1}{2} h\nu c T A n = h\nu T \frac{c}{2d} V n$$

$$\text{脉冲峰值功率} \quad n_p = \frac{1}{2} N_i \left(1 + \frac{N_t}{N_i} \ln \frac{N_t}{N_i} - \frac{N_t}{N_i}\right) \quad P_p = h\nu T \frac{c}{2d} V n_p \approx \frac{1}{2} h\nu T \frac{c}{2d} V N_i$$

$$\text{脉冲能量 } E = \frac{1}{2} h\nu T \frac{c}{2d} V \tau_p (N_i - N_f)$$

$$\text{其中最终反转粒子数密度 } \ln \frac{N_i}{N_f} = \frac{N_i - N_f}{N_t}$$

$$\text{脉冲带宽 } \tau_{pulse} = \tau_p \frac{N_i / N_t - N_f / N_t}{N_i / N_t - \ln(N_i / N_t) - 1}$$

4. 锁模

更短的激光脉冲一般采用锁模技术，可产生 fs 量级脉冲。锁模时指通过外部手段让模相互耦合并保持位相锁定，形成激光脉冲序列。

$$\text{周期 } T_F = \frac{2d}{c}$$

$$\text{脉宽 } \tau_{pulse} = \frac{T_F}{M} = \frac{1}{M V_F} = \frac{1}{\Delta \nu}$$

$$\text{模式数目 } M = \frac{\Delta \nu}{\nu_F}$$

$$\text{脉冲长度 } d_{pules} = c \tau_{pulee} = \frac{cd}{M}$$

$$\text{峰值强度 } I_p = M^2 |A|^2 = M \bar{I}$$

半导体

1. 能带、电荷载流子及材料

① 导带中的电子能量不仅取决于该电子动量的大小，还取决于该电子在晶体中的运动方向。能量与动量为简单抛物线关系。

② 导带最低值能量为 E_c ，价带最高值能量为 E_v 。 E_c 和 E_v 对应相同动量的半导体为直接带隙材料，适合作高效率光子发射器，不满足的则是间接带隙材料。直接带隙材料有 GaAs、GaSb、

InP、InAs、InSb, 间接带隙材料有 Si、Ge、Se、AlP、AlAs、AlSb、GaP (怀疑单质都是间接)

- ③ N 型半导体掺杂额外价电子的原子, 比如用 V 族替代 IV 族, P 型半导体掺杂缺少价电子的原子, 比如用 III 族替换 IV 族。
- ④ 非掺杂半导体为本征材料, 自由移动电子和空穴相等, 掺杂半导体为非本征材料, N 型中电子远大于空穴, P 型中空穴远大于电子。

2. 电子和空穴浓度

- ① 载流子浓度随能量的分布与态密度和能级被占据的概率有关。
- ② 态密度是电子波数介于 $k \sim k + \Delta k$ 之间的能态数目与波数差之比, 即单位频率间隔之内的模数。态密度在能带边缘为 0, 随着远离边缘以一定的速率增加。
- ③ 占据概率由费米狄拉克分布描述。费米函数是 E 的单调递减函数。在任何温度下 $f(E_f) = 0.5$ 。在 $T = 0K$ 时, 当 $E > E_f$, $f(E) = 0$, 当 $E \leq E_f$, $f(E) = 1$ 。费米能级是绝对零度下能级被占据与否的分界线。
- ④ 单位体积内电子和空穴的密度 (能量分布上的密度) 为能级 E 的态密度与占据概率的乘积。对 dE 积分后可得到单位体积的数量, 也就是浓度。
- ⑤ 对绝对多数本征材料, 费米能级位于禁带中间位置。对 N 型, 费米能级位于禁带中间位置上端 (费米能级越高意味着电子越容易激发到导带上), 对 P 型, 费米能级位于禁带中间位置下

端。

⑥ 载流子浓度的乘积与费米能级的位置和掺杂程度无关，这一不变性称为质量作用定理。

⑦ 以上占据概率和载流子浓度只有在热平衡下成立。在准平衡下（电子和空穴之间不处于热平衡，而各自内部处于热平衡），导带和价带可采用不同的费米函数， E_{fc} 和 E_{fv} 称为准费米能级。

能级 E 被电子占据的概率为 $f_c(E)$ ，被空穴占据的概率为 $1 - f_v(E)$ 。

3. 载流子的产生、复合及注入

① 热平衡复合速率 $G_0 = r n_0 p_0$ （热激发产生电子空穴对的速率）

② 通过外部注入以速率 R 产生额外电子空穴对可得 $G_0 + R = rnp$

$$n = n_0 + \Delta n, p = p_0 + \Delta p, \Delta n = \Delta p \quad \text{可得} \quad R = \frac{\Delta n}{\tau}$$

$$\text{其中额外载流子的复合寿命} \quad \tau = \frac{1}{r[(n_0 + p_0) + \Delta n]}$$

③ 内部量子效率定义为辐射电子空穴复合速率与总的复合速率之比。

④ 在同一种半导体材料不同掺杂区域的界面形成的是同质结。不同半导体材料的界面形成的是异质结。

⑤ 异质结能带的会产生局部跳变，其势能不连续性可以阻止特定载流子进入不期望区域，可以降低少子形成的电流，增加注入效率。

⑥ 双异质结可以将载流子限制在某个空间内，这对于提高注入式激光二极管的效率至关重要。

光子与电子、空穴的相互作用

1. 概述机制

- ① 带间跃迁：一个被吸收的光子可使价带中的一个电子向上跃迁到导带中，从而产生电子空穴对。
- ② 杂质能级与导带/价带之间的跃迁：在掺杂半导体中，一个被吸收的光子可导致施主/受主能级与导带或价带之间的跃迁。
- ③ 自由载流子（带内）跃迁：一个被吸收的光子可以将其能量传递给某一能带内的一个电子，从而使该电子跃迁到同一能带内更高的地方。
- ④ 声子跃迁：长波长的光子通过直接激发晶格振动释放能量。
- ⑤ 激子跃迁：一个光子的吸收产生一对通过库伦作用相互束缚的电子空穴对。

2. 带间吸收与发射

- ① 直接带间吸收和发射只能在光子能量 $h\nu > E_g$ 的频率发生，因此最大波长 $\lambda_g = hc_0/E_g$ ，也称为带隙波长/截止波长。
- ② 吸收一个光子后，电导率会提升，这被用来探测。
- ③ 电子空穴复合可发射一个光子。自发辐射是发光二极管原理，受激辐射是半导体放大器和激光器的工作原理。
- ④ 吸收和发射满足的条件是能量守恒、动量守恒以及与光子作用特定的电子和空穴的能量和动量（如下）

$$E_2 = E_c + \frac{m_r}{m_c}(h\nu - E_g) \text{ 和 } E_1 = E_v - \frac{m_2}{m_n}(h\nu - E_g) = E_2 - h\nu \text{ 其中 } \frac{1}{m_r} = \frac{1}{m_v} + \frac{1}{m_c}$$

⑤ 光学联合态密度 $\rho(\nu)$ 指能与能量为 $h\nu$ 的光子相互作用的态密度，它正比于 $h\nu - E_g$ 的开方。

⑥ 间接带隙半导体一般不发生光子辐射，但可以发生光子吸收。

3. 吸收率和发射率

① 决定吸收率和发射率的有三个因素：占据概率、跃迁概率、态密度

② 占据概率 $f_e(\nu)$ 和 $f_a(\nu)$ 分别为导带上 E_2 的态被电子占据/为空且价带上 E_1 的态为空/被电子占据的概率（“/” 左右是分别对应的）。数学上就是准平衡下的两者概率乘积。

③ 跃迁概率考虑自发辐射和受激辐射，用跃迁截面 σ 表征。

$$r_{sp}(\nu) = \frac{1}{\tau_r} \rho(\nu) f_e(\nu)$$

④ $r_{st}(\nu) = \phi_\nu \frac{\lambda^2}{8\pi\tau_r} \rho(\nu) f_e(\nu)$ r_{sp} 可用来描述自发辐射的 LED, r_{st} 可

$$r_{ab}(\nu) = \phi_\nu \frac{\lambda^2}{8\pi\tau_r} \rho(\nu) f_a(\nu)$$

用于描述半导体激光放大器和注入式激光器, r_{ab} 可用于描述半导体光探测器。r 是每秒每赫兹每单位体积的光子数。

⑤ 热平衡时，代入 $\rho(\nu)$ 和 $f_e(\nu)$ 得

$$r_{sp}(\nu) \approx D_0 (h\nu - E_g)^{1/2} \exp\left(-\frac{h\nu - E_g}{k_B T}\right), \quad h\nu \geq E_g$$

$$\text{其中 } D_0 = \frac{(2m_r)^{3/2}}{\pi^2 \tau_r} \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

自发辐射率可通过增大 $f_e(\nu)$ 提高, 可以使材料处于非热平衡态。

⑥ 准平衡时的增益系数

$$\gamma_0(\nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi\tau_r} \rho(\nu) f_g(\nu)$$

其中费米反转因子 $f_g(\nu) \equiv f_c(\nu) - f_a(\nu) = f_c(E_2) - f_v(E_1)$

半导体电子器件

1. 发光二极管

① 发光二极管 LED 是由直接带隙半导体材料制成的正向偏压的 P-N 结，通过注入式电致发光原理发射光。

② 注入式发光原理见 “载流子的产生、复合及注入③”

$$\text{每秒的光子通量 } \Phi = \eta_i RV = \eta_i \frac{V\Delta n}{\tau} = \frac{V\Delta n}{\tau_r}$$

③ 自发辐射每秒的光子通量为 rsp 乘以体积，对所有频率积分。

④ LED 特性

i. 内部光子通量 $\Phi = \eta_i RV = \eta_i \frac{i}{e}$ ， i 为直流源电流，内部量子效率可以认为是产生的光子通量与注入电子通量之比。

ii. 输出光子通量 $\Phi_0 = \eta_e \Phi$ ， η_e 是总透射效率。输出功率 $P = h\nu\Phi_0$

iii. 总量子效率 η 为发射光功率与外加电功率之比，通常 LED 中 $h\nu = eV$ ，所以 $\eta = \eta_{ex} = \eta_i \eta_e$

iv. 响应度为出射光功率与注入电流之比。 $\mathbb{R} = \frac{P}{i}$

v. 光谱分布。弱泵浦下光谱密度在 $h\nu_p = E_g + kBT/2$ 达到最大值。

vi. 材料。三元和四元化合物的优点在于发射波长会随着组

分不同而改变。

- vii. 响应时间。LED 典型上升时间为 1~50ns
- viii. 器件结构。面发射 LED 通常比边发射 LED 更高效，异质结的 LED 提供更优良的性能。
- ix. 空间模式。常用环氧树脂透镜置于 LED 上用于减小发散角度。

2. 半导体激光器

- ① 优点：体积小，效率高，易于与电子器件集成，泵浦容易，易于通过注入电流调制。

② 放大、反馈和振荡

- i. 放大。半导体放大器的增益系数 γ_0 具有峰值 γ_p ，其注入载流子浓度近似成正比，与注入电流密度 J 成正比。

$$\gamma_p \approx \alpha \left(\frac{J}{J_T} - 1 \right), J_T = \frac{el}{\eta_i \tau_r} \Delta n_T$$

l 是有源区厚度， α 是热平衡吸收系数， Δn_T 是恰好使半导体透明的注入载流子浓度。

- ii. 反馈。PN 结的有源区为平面镜光学谐振腔，形成反馈。
- iii. 空气-半导体界面的反射率为 $\left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$ ，这是谐振腔损耗的主要原因。另一个较大的损耗是光能量在放大器的有源层外的分布，解决方法是双异质结，使得中间层折射率高，称为折射率波导型，广受青睐。
- iv. 振荡条件是增益超过损耗，即 $\gamma_p > \alpha r$

阈值电流密度 J_t 越小性能越好，双异质结有更小的 J_t 。

③ 功率

- i. 稳态激光内部光子通量等于超过阈值的电子流量 it （每秒的注入电子）与内部量子效率 η_i 的乘积。
- ii. 输出光子通量是内部光子通量 Φ 与发射效率 η_e 的乘积
- iii. 半导体注入式激光器有四个效率：内部量子效率 η_i 、发射效率 η_e 、微分量子效率 $\eta_d = \eta_i \eta_e$ 和总效率

④ 光谱分布

- i. 光谱分布由三个因素决定：光谱带宽 B 、线性加宽机制、谐振腔模式
- ii. 半导体激光器特征：光谱宽度大，更倾向均匀加宽，谐振腔腔长显著小于其他激光器，纵模线宽小。

⑤ 空间分布

⑥ 单频模式选择

- i. 除了减小腔长、加入标准具 FP、耦合腔以外，还可用带有频率选择性的反射器代替解理面，以及使用带有周期性空间波纹的波导将光栅直接制作在有源层的相邻层。

⑦ 典型激光器特征：半导体激光器波长覆盖了从近紫外到远红外的波段。

电光调制

1. 普克尔效应和克尔效应

2. 电光调制器

① 位相调制器

半波电压 $V_\pi = \frac{d}{L} \frac{\lambda_0}{\gamma n^3}$ 纵向调制器的 $d=L$

② 可调位相延迟器

半波电压 $V_\pi = \frac{d}{L} \frac{\lambda_0}{\gamma_1 n_1^3 - \gamma_2 n_2^3}$

③ 光强调制器

i. 干涉法

利用马赫曾德干涉仪，器件透过率为 $T = \frac{I_0}{I_i} = \cos^2 \frac{\varphi}{2}$

代入 $\varphi = \varphi_0 - \pi \frac{V}{V_\pi}$ 可得 $T(V) = \cos^2 \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\pi}{2} \frac{V}{V_\pi} \right)$

ii. 偏振法

偏振法利用马吕斯定律，同理得到 $T(V) = \sin^2 \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\pi}{2} \frac{V}{V_\pi} \right)$

④ 角度扫描器

i. 顶角为 α 的棱镜使得光线偏转 $\theta = (n-1)\alpha$

n 代入可得偏折角变化量 $\Delta\theta = \alpha\Delta n = -\frac{1}{2}\alpha\gamma n^3 E = -\frac{1}{2}\alpha\gamma n^3 \frac{V}{d}$

要获得一定数量的分辨率，外加电压必须是半波电压整数倍。

声光调制

1. 光波通过由声波产生的折射率光栅会产生衍射，可分为布拉格衍射，对应较厚的光栅；拉曼-奈斯衍射，对应较薄的光栅。

2. 布拉格角 $\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda}$ 角度偏移量 (第一个极小值) $\theta - \theta_B \approx \frac{\lambda}{2L}$

3. 多普勒频移, 衍射光频率为光频率 \pm 声波频率。

4. 声光器件

① 声光调制器

② 扫描器 通过调节声波的方向改变入射角。

非线性光学

填空题目

1. 直接间隙半导体有: **GaAs、InP、**

2. 激光谐振器的三个组成部分: **谐振腔、增益介质、泵浦**

3. 谐振腔的作用答两点 **能量储存、频率选择**

4. 均匀加宽/非均匀的 (单纵模/多纵模) ,原因是因为效应;

均匀加宽的多纵模是因为空间烧孔效应。

5. 两束激光频率为 ω_1 和 ω_2 入射到非线性晶体的出射的四种新的频率为**三波混频**, 为什么只有一种频率可见?

因为光波的混频必须满足频率匹配和位相匹配的条件, 所以三波混频通常只有一种频率可见。

简答:

1. 自发辐射/受激辐射的区别

① 自发辐射是在没有任何外界作用下, 激发态原子自发地从高能级(激发态)向低能级(基态)跃迁并辐射出一个光子的过程; 而受激辐射是在外来光子辐射模式的作用下, 原子从高能级跃迁到低能级并辐射

出一个光子的过程。区别在于自发与非自发。

② 不同原子自发辐射产生的光在频率、相位、偏振方向及传播方向都有一定的任意性，而受激辐射中产生的光子与外来光子的频率、传播方向、偏振情况、位相完全一致，二者具有相同的模式。

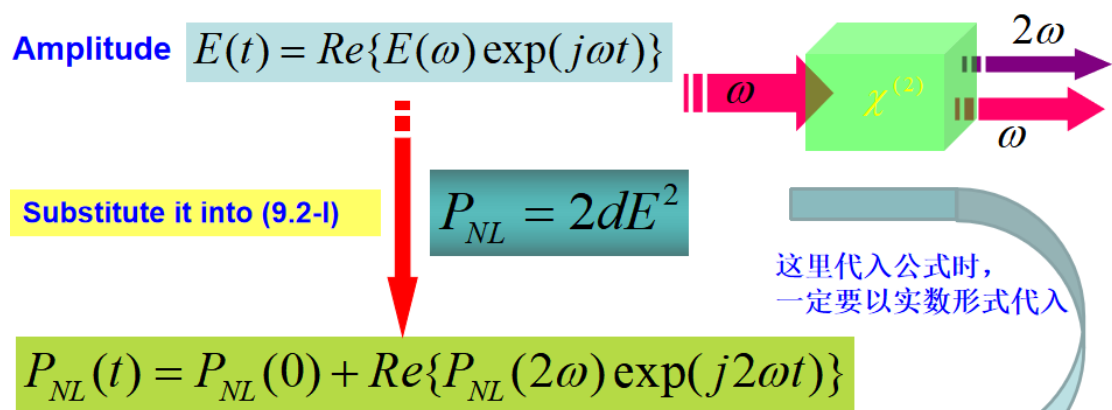
③ 受激辐射可用于产生激光，自发辐射不能。

2. 二次谐波 SHG 的原理

对于非线性光学介质，P 和 E 成非线性关系如下：

$$P = \varepsilon_0 \chi E + 2dE^2 + 4\chi^{(3)}E^3 + \dots$$

只考虑二阶非线性项 $P_{NL} = 2dE^2$ ，代入得到下列表达式：



得到的 PNL 包括零频分量和倍频分量，倍频分量 (2ω 项) 即表示产生的二次谐波。

3. 声光调制 Q 的物理原理

电光调 Q：在电光效应作用下，电光材料会产生双折射现象，可以使入射的线偏振光偏转一定角度。在电光调制器件前后加入相同偏振方向的偏振片，就形成了电光开关，将电光开关加入激光器内部即可实现调 Q。当加上电压时，入射光被偏转 90° ，开关关闭，处于低 Q

值，反转粒子数增加。当不加电压时，入射光可以在谐振腔内振荡，处于高 Q 值，形成脉冲激光。

声光调 Q：在布拉格衍射中，衍射光强度与声波强度成正比。在较强的声波作用下，衍射光的反射率可趋近于 1。将该声光器件加入激光器内部即可实现调 Q。当加上声波时，透射光强趋近于 0，处于低 Q 值，反转粒子数增加。当不加声波时，透射光强趋近于 1，入射光可以在谐振腔内振荡，处于高 Q 值，形成脉冲激光。

4. 三能级和四能级的区别

① 四能级系统共四个能级，具有单独的下能级；三能级系统只有三个能级，其利用基态能级作为下能级。

② 四能级系统下能级几乎没有粒子，反转粒子数很容易变大，因此其阈值低，容易实现正增益；而三能级系统阈值较高，需 $R > \frac{N_a}{2t_{sp}}$ 才能实现正增益。

5. 同质结和异质结的区别

同质结是指在同一种半导体材料内不同掺杂区域的界面形成的结，而异质结是指在不同半导体材料的界面形成的结。

同质结有源区对载流子和光子的限制作用较弱，而异质结则对其具有较强的限制作用（如不同带隙类型的半导体用于同一器件，可以选择光子在该结构中特定区域发射/吸收；折射率不同的异质结材料可以用于制作能够限制、引导光子的光波导）。

同质结的能带示意图（即势能变化）是连续的，而带隙不同材料构

成的异质结将会使其能带示意图中产生局部跳变，即势能的不连续性。

6. 半导体激光器为什么用双异质结？

由两个异质结造成的能带图中的不连续性有助于将载流子限制在某个期望的空间区域。（例如，P-P-N 型结构的费米能级在 P-P 结和 P-N 结的界面导带/价带边缘急剧下降，正向偏置时这些能量片段能够限制少数载流子的注入。）由此双异质结将电子和空穴限制在一个较窄的区域内，有助于提高注入式激光二极管的效率。

7. 均匀加宽和非均匀加宽区别

① 均匀加宽假定引起加宽的物理因素对每一个原子都相同；所有的原子都相同，并且有相同的线性函数，每一个原子对光谱内任一频率都有贡献；而非均匀加宽认为介质由不同的原子组成，这些原子有不同的线型函数或者不同的中心频率，每个原子只对谱线内与它中心频率相应的部分有贡献。

② 由于空间烧孔效应（对应均匀加宽介质）可以维持的模式一般少于光谱烧孔效应，所以非均匀加宽介质的模式数量通常大于均匀加宽介质。

8. 模式竞争原理

当泵浦打开后，所有增益大于损耗的纵模均开始增大，但靠近跃迁中心频率的模式增长得更快。随着反转粒子数的被逐渐耗空，增益降低，距离谱线中心较远的模式的损耗会首先大于增益，功率会减小，最终只有一个距离中心频率最近的模式可以维持振荡，这就是模式竞争的原理。

9.解释三能级系统泵浦光子的吸收饱和现象

$N = \frac{N_0}{1 + \tau_s W_i}$ 代入 $W_i = \phi \sigma(\nu)$ 可得到 $N = \frac{N_0}{1 + \phi / \phi_s(\nu)}$ 和 $\gamma(\nu) = \frac{\gamma_0(\nu)}{1 + \phi / \phi_s(\nu)}$, 可见

增益系数是光子流密度的单调下降函数, 存在饱和吸收现象。

选择 22 分 11 题

填空 17 分 17 空

简答题 24 分 4 题

计算 37 分 3 题

2020-2021 学年 光电子期末回忆卷

一、选择题

1. 高斯光束在谐振腔内的传播图正确的是
2. 发光效率最低的激光器是?
3. 受激辐射面积说法错误的是?
4. 增益等于损耗时的时间是?
5. 声波向上传播, 布拉格衍射后衍射光的频率是?
6. 哪种方式选择纵模?
7. 谐振腔小信号增益+损耗, 问来回五周光强变成原先多少倍?
8. 液晶施加电压后改变的本质是什么?
9. He-Ne 出现多个纵模, 是什么原因?

10.掺杂后，费米能级上占据电子的概率会怎么变？

11.横模相关知识选一个错误的

二、填空题

1.本征的时候费米能级在（）变成 P 型，费米能级在（）

2.激光的三个组成部分

3.两束激光频率为 ω_1 和 ω_2 入射到非线性晶体的出射的四种新的频率为（）（）（）（），为什么只有一种频率可见？（）

4.电光效应本质属于____（非线性还是线性）

5.声光器件提高衍射效率，可以改变_____

6.四种脉冲激光器技术()()()()

7.为什么均匀加宽会出现多个纵模？

三、简答与计算题

1.高斯光束与平面波在同一个谐振腔内谐振的频率是否相同？为什么？

2.地球上出射 10mm 直径的高斯光束，到月球光斑 30km 直径，现在要让月球光斑为 100m，给出了地月距离，问地球上扩束后出射的高斯光束的直径应该是多少？

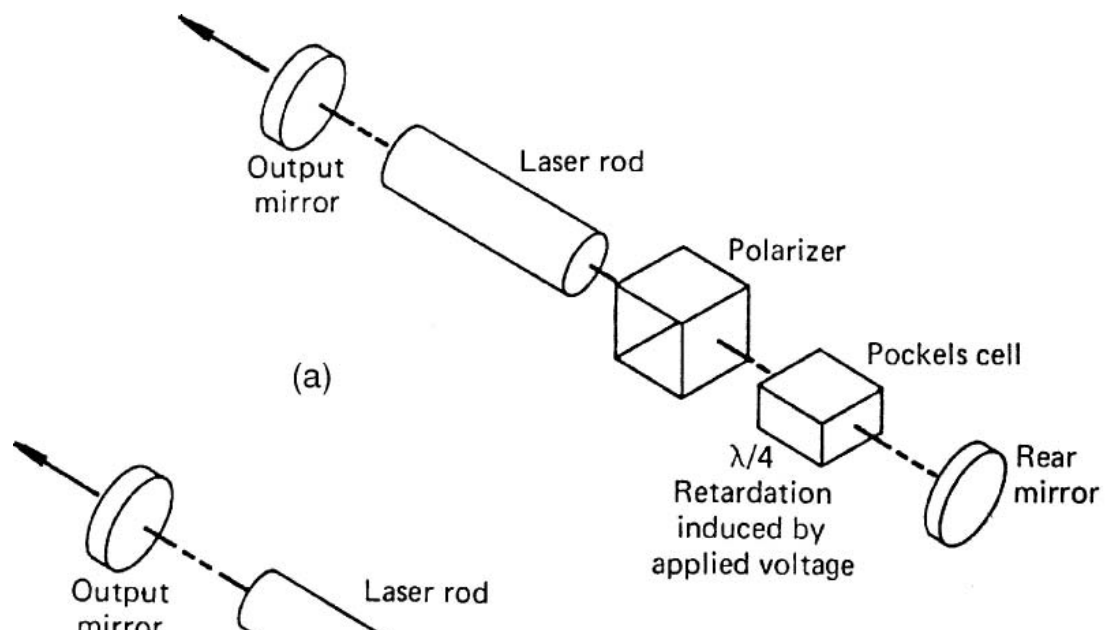
3.给出了以下条件

a) E_{fc} 关于 Δn 和 m_e 的函数和 E_{fv} 关于 Δn 和 m_h 的函数

- b) 光学联合态密度关于 Δn , $h\nu - E_g$ 的函数
- c) r_{sp} 关于 S (跃迁强度), 光学联合态密度和反转费米能级因子 f_g 的函数

- (1) 画出增益系数 γ_0 与 $h\nu$ 的图像
- (2) 给出增益带宽与 Δn 的函数

4. 根据下图解释电光效应? 施加的电压应该是?



四、计算题

1. 高斯光束经过透镜之后求束腰位置和束腰半径
2. 书上 P144 页例子 5.3 原题
3. 书上 P138-139 页例子 5.2 原题