

## 激光对原子选择性激发引起量子态 粒子数分布变化的瞬态解

当激光对原子、分子体系进行选择激发时,会导致被作用的原子、分子体系量子态粒子数分布的变化——对平衡态统计分布的偏离。研究这种偏离,求解激光场作用下量子态粒子数分布函数,对于解决激光光谱学、激光化学中许多课题有重要意义。

这里,我们考虑激光场对原子体系的选择性激发。

1. 激光场为一矩形脉冲,辐射能量密度

$$\rho(\nu, t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \rho(\nu) & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

2. 激光具有足够好的单色性,以致光强

$$I(\nu) = I_0 \delta(\nu' - \nu) \quad (2)$$

其中  $\nu$  为可调谐激光频率,  $\nu'$  为任一频率。

3. 调谐激光频率,使基态  $E_0$  之粒子选择性地跃迁到激发态  $E_i$  能级。

4. 略去经中间态返回基态的较小贡献。

在上述近似而合理的假设条件下,基态  $E_0$  及激发态  $E_i$  的粒子数之变化遵守微分方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_0(t)}{dt} &= -N_0(t)W_{0i} + N_i(t)W_{i0} + N_i(t)A_{i0} \\ \frac{dN_i(t)}{dt} &= -N_i(t)W_{i0} - \frac{N_i(t)}{\tau} + N_0(t)W_{0i} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $A_{i0}$  代表自发发射几率,  $\tau$  代表激发态  $E_i$  的平均寿命,  $W_{i0} = W_{0i} = B_{i0} \frac{nI_0}{c} G(\nu, \nu_0)$  代表受激发射(或吸收)几率,而  $B_{i0} = B_{0i}$  为受激发射(或吸收)系数,  $n$  为原子体系作为一种光学介质的折射率,  $I_0$  为光强,  $G(\nu, \nu_0)$  为原子能级的谱线线性函数,  $\nu_0$  为它的中心频率,  $\nu$  为激光调谐频率,  $c$  为光速。

根据微分方程理论,利用初始条件(玻尔兹曼分布):

$$N_0(0) = N \frac{g_0}{Z} e^{-\frac{E_0}{kT}} \quad (4)$$

$$N_i(0) = N \frac{g_i}{Z} e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (5)$$

其中  $Z$  为配分函数及边界条件

$$N'_0(t_0) = N_0(t_0) \quad (6)$$

$$N'_i(t_0) = N_i(t_0) \quad (7)$$

(带撇为  $t \geq t_0$  区域之解,不带撇为  $0 \leq t \leq t_0$  区域之解),再考虑到激光场作用下,由于激光的高强度,使之受激发射(或吸收)几率远大于自发发射几率。最后得到激发态粒子数分布函数的解析表达式:

$$N_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{N}{Z} \{ [g_i e^{-\frac{E_i}{kT}} + g_0 e^{-\frac{E_0}{kT}}] \\ + [g_i e^{-\frac{E_i}{kT}} - g_0 e^{-\frac{E_0}{kT}}] e^{-\frac{2B_{i0}nI_0G(\nu, \nu_0)}{c} t} \} \\ (0 \leq t \leq t_0) \\ N_i(t_0) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (t \geq t_0) \end{cases} \quad (8)$$

从以上结果可以看到,当  $t=0$  时,  $N_i(t)$  还原为通常的玻尔兹曼分布:

$$N_i(0) = \frac{N}{Z} g_i e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (10)$$

而在激光作用的时间间隔 ( $0 \leq t \leq t_0$ ),  $N_i(t)$  是不断增加的,其增加速率为:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \frac{N}{2Z} \left[ g_0 e^{-\frac{E_0}{kT}} - g_i e^{-\frac{E_i}{kT}} \right] \times \frac{2B_{i0}nI_0G(\nu, \nu_0)}{c} e^{-\frac{2B_{i0}nI_0G(\nu, \nu_0)}{c} t} \quad (11)$$

当激光作用足够长时,粒子抽运达饱和状态。饱和状态所需时间,依赖于  $B_{i0}$ 、 $I_0$ 、 $G(\nu, \nu_0)$  三个物理参数。通过 ① 选择受激吸收系数  $B_{i0}$  (或对应的跃迁几率) 大的能级, ② 提高入射激光的强度  $I_0$ , ③ 调谐入射激光频率  $\nu$ , 使之尽可能接近  $E_i$  能级的谱线函数的中心频率  $\nu_0$ , 以增大  $G(\nu, \nu_0)$  之数值, 都可以用来缩短  $N_i(t)$  达到饱和的时间。正确运用这些结果, 对于激光光谱学与激光化学中涉及中间能级的许多实验技术(如两步光致电离法、共振电离光谱法、激光荧光光谱等)将带来效益。

(河北大学物理系 钱时惕)