

光泵远红外分子激光的多光子过程

林贻堃 丘秉生 宫蒂

(无线电电子学系)

在光泵分子气体激光过程中,分子系统的能级跃迁是不可能只限在三或四能级之间的。本文作者曾将六能级系统的理论结果,用来计算HF分子的拉曼激光过程,得到了与实验符合得很好的结果及整套的拉曼调谐曲线⁽³⁾。理论的另一个结论,即在增益频率曲线的中点,由于受激拉曼过程和双光子吸收过程相互竞争的结果,有一频宽很窄的下陷^(1,3),已经被P. Mathieu及T.R. Izatt⁽⁴⁾在连续调谐光泵CH₃F远红外拉曼激光实验中所证实,过去的工作只对六能级系统的拉曼过程的调谐特性进行分析,因而未能较全面地揭示六能级系统中多光子过程对受激发射的贡献。本文在过去工作的基础上⁽¹⁻³⁾,假定分子系统是六能级系统,对大功率光泵分子气体激光的多光子过程进行理论研究。

假定分子为六能级系统(振动基态三个能级,振动激发态三个能级),应用讯号流程图法解密度矩阵方程⁽³⁾,可得如下的解析表达式:

$$P_{65} + P_{32} = \frac{B_S}{\Delta} \left\{ \left(\frac{r_{23}}{L_{32}} - \frac{r_{56}}{L_{66}} \right) (1 - N_1) + |B_P|^2 (r_{56} + r_{23}) \left(\frac{1}{L_{62}} - \frac{1}{L_{35}} \right) (2 - N_1) \right. \\ \times \frac{1}{L_{65} L_{32}} + |B_P|^2 \left[\frac{1}{L_{35}} \left(\frac{r_{25}}{L_{25}} - \frac{r_{36}}{L_{36}} \right) + \frac{1}{L_{62}} \left(\frac{r_{25}}{L_{62}} - \frac{r_{36}}{L_{63}} \right) \right] \\ \left. \times \left(\frac{1}{L_{65}} + \frac{1}{L_{32}} \right) (1 - N_1) \right\}$$

$$P_{54} + P_{21} = \frac{B_S}{\Delta} \left\{ \left(\frac{r_{12}}{L_{21}} - \frac{r_{45}}{L_{54}} \right) (1 - N_2) + |B_P|^2 (r_{45} + r_{12}) \left(\frac{1}{L_{51}} - \frac{1}{L_{24}} \right) \right. \\ \times (2 - N_2) \frac{1}{L_{54} L_{21}} + |B_P|^2 \left[\frac{1}{L_{24}} \left(\frac{r_{14}}{L_{14}} - \frac{r_{25}}{L_{25}} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{L_{51}} \left(\frac{r_{14}}{L_{41}} - \frac{r_{25}}{L_{52}} \right) \right] \left(\frac{1}{L_{54}} + \frac{1}{L_{21}} \right) (1 - N_2) \right\}$$

其中

$$\Delta = 1 - |B_P|^2 \left[\left(\frac{1}{L_{65}} - \frac{1}{L_{32}} \right) \left(\frac{1}{L_{35}} - \frac{1}{L_{62}} \right) + \left(\frac{1}{L_{34}} - \frac{1}{L_{61}} \right) \left(\frac{1}{L_{64}} - \frac{1}{L_{31}} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{L_{51}} - \frac{1}{L_{24}} \right) \left(\frac{1}{L_{21}} - \frac{1}{L_{54}} \right) \right]$$

$$N_1 = |B_P|^2 \left[\left(\frac{1}{L_{34}} - \frac{1}{L_{61}} \right) \left(\frac{1}{L_{64}} - \frac{1}{L_{31}} \right) + \left(\frac{1}{L_{51}} - \frac{1}{L_{24}} \right) \left(\frac{1}{L_{21}} - \frac{1}{L_{54}} \right) \right]$$

· 本文于1983年1月收到。

$$N_2 = |B_p|^2 \left[\left(\frac{1}{L_{34}} - \frac{1}{L_{61}} \right) \left(\frac{1}{L_{64}} - \frac{1}{L_{31}} \right) + \left(\frac{1}{L_{62}} - \frac{1}{L_{35}} \right) \left(\frac{1}{L_{32}} - \frac{1}{L_{66}} \right) \right]$$

系统单位长度增益为

$$G = - \frac{2N_2 |\mu_s|^2 \tau}{\epsilon_0 \hbar c B_s^*} \omega_s \text{Im} [P_{21} + P_{32} + P_{64} + P_{65}]$$

式中h为约化普朗克常数。

六能级系统的多光子过程大致可以分为如下六种：拉曼过程(R)、泵频单光子吸收(S_p)、单光子过程(S)、红外及远红外双光子吸收过程(D)、远红外双光子吸收(D')及三光子过程(T)。根据给出的结果，我们提出六能级系统多光子共振图表如图1所示：

图中x和y分别表示泵频和远红外频率的失谐量，δ、c₁及c₂是与分子能级结构有关的常数。应用这图表可以预见六能级系统中各种多光子过程的频率调谐特性以及它们之间的相互作用。

图1中，拉曼过程R₂₄线和双光子吸收过程D₁₆线的交点，以及R₃₆和D₂₆线的交点，即拉曼调谐曲线的中点，有一频宽很窄的增益下陷，使调谐中断。这结果已为P.Mathieu及T.R.Izatt的实验所证实。

通过多光子共振图的分析，我们发现三光子过程T₃₄的跃迁几率，通常是远小于拉曼或双光子过程的，它对系统增益的贡献也很小；但是在T₃₄线与D₁₆和D₂₆线的交点附近，由于D₁₆和D₂₆过程的作用，T₃₄对系统增益的贡献可能得到较大的增强。在用10MW/cm²的大功率光泵CH₃F分子气体的情况下，计算出如图2和图3所示的很强的增益尖峰。

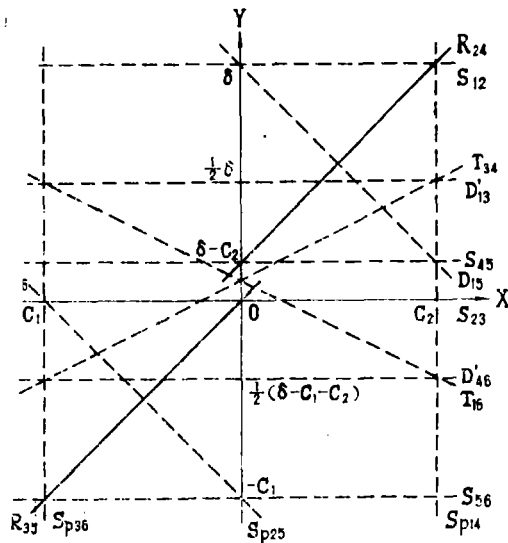


图1 六能级系统多光子共振图

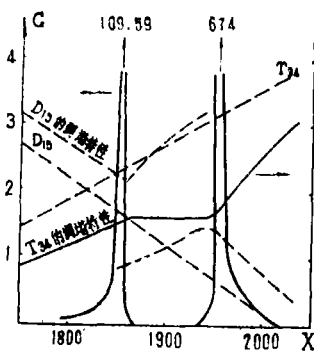


图2 T₃₄和D₁₅所形成的增益和频率响应曲线

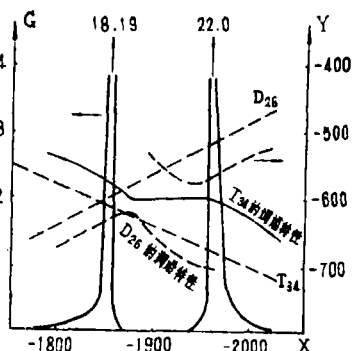


图3 T₃₄和D₂₆所形成的增益和频率响应曲线

六能级系统中相应于这些过程的能级跃迁示于图 4 和图 5:

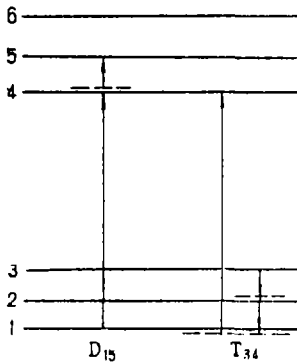


图 4 D_{15} 和 T_{34} 的量子跃迁

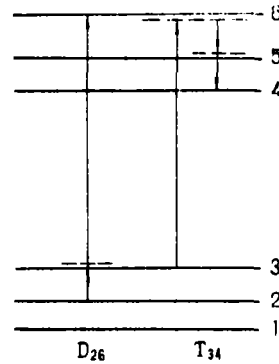


图 5 D_{26} 和 T_{34} 的量子跃迁

从图 4 可见, D_{15} 过程起着将处在能级 1 的分子向能级 5 抽运而使能级 1 的粒子集居数减少的作用。这时若 T_{34} 中的红外光子频率与 ω_{41} 的频偏不是很大时, 光泵又把处于能级 1 的分子抽运到能级 4; 这样, 在大功率泵浦的作用下, 能级 1、4 和 5 的粒子集居数几乎相等, 能级 1 的粒子集居数比正常泵浦情况下更少, 因而使能级 3 和能级 1 之间的粒子集居数反转加强。于是 T_{34} 和 D_{15} 的共同作用便产生很强的远红外受激发射。由此产生了三光子过程的受激发射的 1 个增益峰值。

理论计算得出如下一些结果:

1. 采用六能级近似比三或四能级更为合理。
2. 应用多光子共振图, 可以预见系统的调谐特性。由于多光子过程的相互作用, 调谐曲线及增益频率响应曲线会受到干扰。
3. 在 T_{34} 线与 D_{15} 及 D_{26} 线的交叉点附近, 三光子共振对系统增益的贡献, 由于双光子吸收过程而得到很大的加强, 因而能够得到出乎意料的高增益值。
4. AC Stark效应是多光子过程相互作用的结果。AC Stark分裂的数值等于 $2B_p/n$, 其中 n 是多光子共振过程中的远红外光子数。

参 考 文 献

1. 林贻堃、宫蒂, 光学学报, 2 (1982), 3, 210.
2. Lin Yikun et al., *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 3 (1982), 553.
3. 林贻堃、丘秉生、宫蒂、郭冰莹, 中国电子学会第三届年会论文集, 1982, P.111.
4. P. Mathieu and T. R. Izatt, *Opt. Lett.*, 6 (1981), 8, 369.