

光泵 NH₃ 分子亚毫米波激光的模式竞争^{*}

罗锡璋, 陈伟斌, 丘茹曼

(中山大学电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

摘要: 采用半经典密度矩阵理论研究了光泵 NH₃ 分子亚毫米波激光的 P 支跃迁 ($V_2: a \rightarrow sP(5, 4)$) 和 Q 支跃迁 ($V_2: a \rightarrow sQ(5, 4)$) 的模式竞争。推导了四能级系统的激光介质的增益表达式; 采用迭代法, 数值计算了不同工作条件下的 P 支跃迁和 Q 支跃迁的输出光强, 得到了模式竞争的规律: 在压强较低的情况下, P 支跃迁占优势; 在压强较高情况下, Q 支跃迁占优, 但光强很弱并受到严重的自吸收效应所抑制。计算结果与实验相符。

关键词: 亚毫米波; 光泵亚毫米波激光; 模式竞争

中图分类号: 0433.54 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579(2005)06-0029-03

光泵亚毫米波激光中存在模式竞争: 对于特定的能级系统和泵浦源, 在一定实验条件下, 只产生特定的跃迁模式, 而其它模式被抑制。1973 年, Gullberg^[1] 报道了用 TEA CO₂-10R(6) 泵浦 2 m 长的 NH₃ 分子亚毫米波激光器, 能够观察到 74 μm 的亚毫米波谱线; 1987 年丘秉生^[2] 也作了类似的报道; 1996 年秦家银^[3] 报道在 TEA CO₂-10R(6) 泵浦 0.2 m 长的小型超辐射 NH₃ 分子亚毫米波激光器的实验中, 只是在泵浦能量较低的情况下观察到 291 μm 的亚毫米波谱线, 没能观察到 74 μm 的谱线。因而可知对于不同的实验装置和条件, 竞争的情况有所不同。光泵亚毫米波激光器的小型化随着气体样品管的缩短, 工作气体的最佳压强升高^[4], 使得受激发射的物理过程更复杂, 跃迁的模式竞争更激烈, 因而有必要进一步深入研究。

1 理论计算

1.1 计算方法

TEA CO₂-10R(6) 泵浦 NH₃ 分子亚毫米波激光器时发生的 $V_2: a \rightarrow sP(5, 4)$ 跃迁 (P 支, 对应谱线波长为 74 μm) 和 $V_2: a \rightarrow sQ(5, 4)$ 跃迁 (Q 支, 对应谱线波长为 291 μm) 的模式竞争涉及到如图 1 三光子的四能级系统。

光泵激光过程中的模式竞争可以用半经典密度矩阵理论描述, 分量形式为:

$$\left. \begin{aligned} i\hbar \frac{\partial \rho_{jk}}{\partial t} &= \hbar \omega_{jk} \rho_{jk} + [H', \rho]_{jk} - \frac{i\hbar}{\tau_{jk}} \rho_{jk} \\ i\hbar \frac{\partial \rho_{jj}}{\partial t} &= [H', \rho]_{jj} - \frac{i\hbar}{\tau_{jj}} (\rho_{jj} - \rho_{jj}^e) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

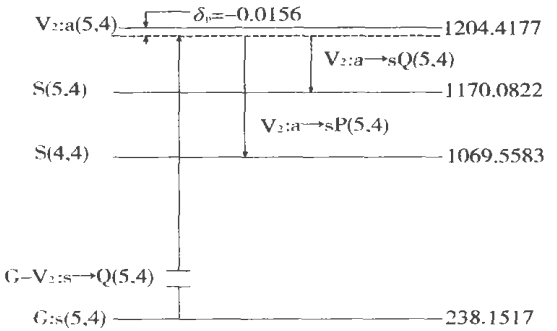


图 1 与 CO₂-10R(6) 泵浦激光匹配的 NH₃ 分子四能级系统

Fig 1 Part of the energy levels of NH₃ molecule matching CO₂-10R(6) pumping laser (4-level system)

($j, k=1, 2, 3, 4; j \neq k$)

其中 τ_{jk} 和 τ_{jj} 分别为横向弛豫和纵向弛豫时间; ρ 为密度矩阵, ρ_{jk} , ρ_{jj} 分别为密度矩阵非对角元和角元; ρ_{jj}^e 为热平衡状态下的 j 能级粒子集居度; H' 为分子系统与激光场相互作用的哈密顿量。经过冗长的求解, 可得到受激 NH₃ 分子系统内各处对亚毫米波信号和泵浦信号的增益系数:

$$\left. \begin{aligned} G_{s1} &= (2N_v u_{s1}^2 T_a / \hbar \epsilon_0 c h) (w_{s1} / B_{s1}) \text{Im}(P_{24}) \\ G_{s2} &= (2N_v u_{s2}^2 T_a / \hbar \epsilon_0 c h) (w_{s2} / B_{s2}) \text{Im}(P_{34}) \\ G_p &= (2N_v u_p^2 T_a / \hbar \epsilon_0 c h) (w_p / B_p) \text{Im}(P_{14}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 N_v 为激光介质有效工作分子数密度, $n = \sqrt{\epsilon / \epsilon_0}$ 为激活介质的折射率, c 为光速, h 为普朗克常数, ϵ_0 为介电常数。

利用迭代法, 根据 (3) 式, 可以数值计算 P

* 收稿日期: 2005-05-17

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (021757)

作者简介: 罗锡璋 (1945 年生), 男, 教授, 博士生导师; E-mail: isslxz@zsu.edu.cn;

支跃迁和 Q 支跃迁的输出光强^[9]，从而可研究模式竞争的规律。

$$\left. \begin{aligned} I_{s1} &= I_0 \exp(G_{s1} z) \\ I_{s2} &= I_0 \exp(G_{s2} z) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

1.2 计算结果

忽略各种损耗的条件下，P 支和 Q 支输出光强随工作气压 P 的变化曲线见图 1。从图 1 可以看出，对于 P 支跃迁 (I_{s1})，当 $P=79 \times 133$ Pa 时，输出光强达到最大；而对于 Q 支跃迁 (I_{s2})，当 $P=87 \times 133$ Pa 时，输出光强达到最大。Q 支的变化相比于 P 支，较为缓慢。另外，在转换阈值 A 点 ($P=79 \times 133$ Pa) 之前，P 支跃迁的输出光强一直占据优势；P 继续增大时，Q 支跃迁的输出光强会高于 P 支跃迁的输出光强，两者峰值比大于 4 : 1。计算还表明：当泵浦功率增强时，P 支和 Q 支跃迁的最佳工作气压升高，输出光强增强，转换阈值也随着升高。

比较图 (2) 和图 (3)，可知随着激光器腔长的缩短，P 支跃迁和 Q 支跃迁输出的最佳压强升高，转换阈值变高。对于图 (3)， $L=0.4$ m， I_{s1} 和 I_{s2} 的峰值比约 2 : 1。

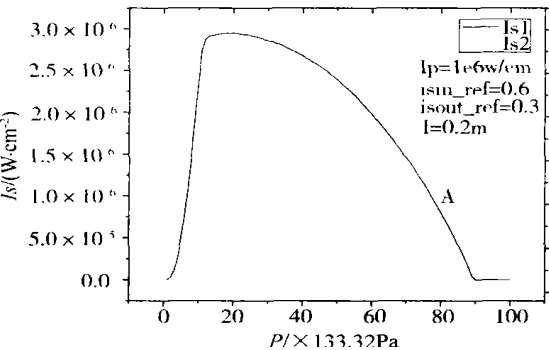


图 2 P 支和 Q 支输出光强随工作气压 P 的变化 (激光器腔长 $L=0.2$ m)

Fig 2 Laser outputs of P-transition and Q-transition vs operating pressure P (laser cavity length $L=0.2$ m)

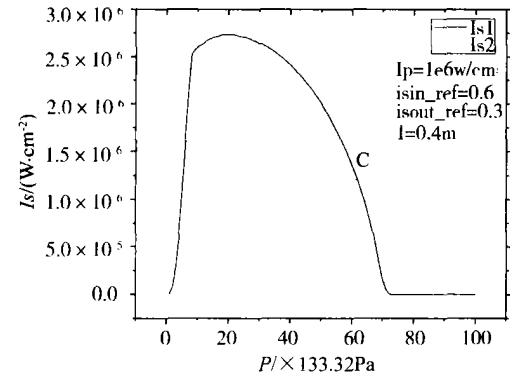


图 3 P 支和 Q 支输出光强随工作气压 P 的变化 (激光器腔长 $L=0.4$ m)

Fig 3 Laser outputs of P-transition and Q-transition vs operating pressure P (laser cavity length $L=0.4$ m)

2 实验研究

在不同的工作条件下，利用 TEA—CO₂ 10R (6) 泵浦 0.2 m 长的小型 NH₃ 分子亚毫米波激光器，成功获得了亚毫米波激光输出。用金属栅网法布里—珀罗干涉仪测量输出激光的波长，图 4 是典型的干涉图样，相邻两干涉峰的距离 (即法布里—珀罗干涉仪栅网的扫描距离) 为 37 μm，所测的激光波长为 74 μm，对应的跃迁为 V₂:aP (5, 4) (P 支)。在各种工作条件下，我们仅观察到这一波长的谱线，没有观察到对应波长为 291 μm 的 V₂:aQ (5, 4) (Q 支) 跃迁的谱线，这也表明了模式竞争中，P 支胜出，Q 支被抑制。

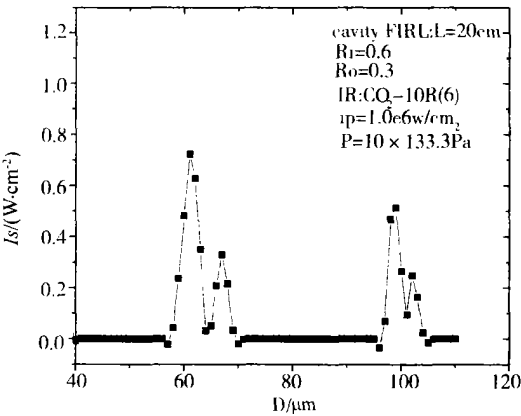


图 4 光泵 NH₃ 分子亚毫米波激光的 F-P 干涉特性图

Fig 4 The measured F-P interferogram

图 5 为腔长 $L=0.2$ m 时，输出光强随工作气体压强变化的实验曲线。其最佳气压 $P=14.5 \times 133.32$ Pa (理论计算最佳气压 $P=15 \times 133.32$ Pa)。此外，当工作气体压强 $P \geq 50 \times 133.32$ Pa 时，已观测不到光强的输出，这与理论结果差别较大，这是由于实际中，高压时，亚毫米波信号的自吸收效应很严重 (近似地为 $kP^{2[6,7]}$)，而理论计算时忽略了各种损耗之故。

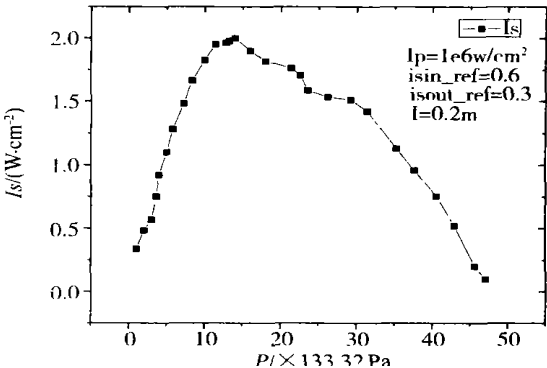


图 5 输出光强与工作气体压强关系的实验研究

Fig 5 The measured SMMW laser output vs operating gas pressure

3 结 语

光泵亚毫米波激光受激发射的物理过程复杂, 就跃迁的模式竞争而言, 存在如下规律:

(1) 对于 P 支跃迁和 Q 支跃迁这两种不同模式跃迁, 起先 P 支跃迁占据优势, 随着工作气压的升高, P 支跃迁逐渐减弱, 而 Q 支跃迁逐渐增强, 必定存在一个转换阈值 (至少 $P=60 \times 133.32 \text{ Pa}$ 以上), 以后, P 支跃迁处于劣势, 而 Q 支跃迁占据优势。

(2) 对于不同的泵浦功率密度, 阈值不同, 并且随着泵浦功率密度的增强, 最佳工作气压升高, 输出光强增强, 阈值也随着升高。

(3) 对于不同的激光器腔长, 阈值不同, 并且随着腔长的增长, 阈值减小, 并且对应的 P 支跃迁和 Q 支跃迁的峰值差距也变小, 但始终大于 2:1。

(4) 即使在 Q 支点优势的竞争条件下, Q 支的输出光强仍然比竞争中 P 支占优势时的输出光强要小得多, 考虑到 Q 支占优时, 通常工作气压大于 $60 \times 133.32 \text{ Pa}$, 这时自吸收效应严重, 故 Q 支通常被抑制。实验观察不到 Q 支跃迁的输出, 也说明

明了这一点。

参考文献:

- [1] GUILBERG K, HARTMAN B, KLEMAN B. Submillimeter emission from optically pumped NH_3 [J]. Phys Scripta, 1973, 8(1): 177-182.
- [2] 丘秉生, 杨建勋, 罗锡璋, 等. 脉冲光泵 NH_3 远红外激光的实验研究 [J]. 中国激光, 1987, 14(6): 351-354.
- [3] 秦家银, 郑兴世, 罗锡璋, 等. 小型光泵 NH_3 分子远红外激光器的模式竞争 [J]. 光学学报, 1996, 16(11): 1570-1575.
- [4] 罗锡璋, 林贻? . 超小型光泵远红外激光研究 [J]. 电子学报, 1992, 20(11): 39-44.
- [5] 张迅, 肖冬梅, 张萍, 等. 光泵远红外激光拉曼光谱中的频谱尖峰现象 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(1): 37-39.
- [6] TOWNE C H, SCHAWLOW A L. Microwave Spectroscopy [M]. New York: Dover Publications Inc, 1975.
- [7] LIN Y K, ZHENG X S, LUO X Z, et al. Self-absorption effect and scattering loss revision for the optically pumped far infrared laser [J]. Chinese Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1992, 10(5): 427-433.

Mode Competition in Optically Pumped NH_3 Sub-Millimeter Wave Laser

LUO Xi zhang, CHEN Wei bin, QIU Ru man

(Department of Electronics & Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the semi classical density matrix theory, mode competition between $V_2: a \rightarrow sP(5, 4)$ (P-transition) and $V_2: a \rightarrow sQ(5, 4)$ (Q-transition) in optically pumped NH_3 sub millimeter wave laser (SMMWL) was studied. The gain coefficients of laser media in a four energy-level system were deduced. The output powers of P-transition and Q-transition were numerically calculated by means of iteration method under different operating conditions. The rules of mode competition can be summarized as follows: In low operating gas pressure condition, P-transition was in dominant position; while in high gas pressure condition, Q-transition dominated, but much weaker and was restrained by serious self-absorption of SMMW laser. The calculated results were verified by our experiment.

Key words: sub millimeter wave (SMMW), optically pumped sub millimeter wave laser (OPSMMWL), mode competition