

文章编号: 1001-9014(2005)03-0221-03

# 缓冲气体对光泵亚毫米波激光作用的定量解释

保延翔, 黄晓, 张迅, 罗锡璋  
(中山大学 电子与通信工程系, 广东 广州, 510275)

**摘要:** 建立缓冲气体对光泵亚毫米波激光作用的理论模型, 通过量子力学理论推导了缓冲气体退激活几率, 从而使缓冲气体的作用能够定量进行计算. 实验上对 CO<sub>2</sub>-9(R30) 泵浦 NH<sub>3</sub> 分子 67.2 μm 谱线作了测量, 实验结果与理论计算吻合得较好. 这一工作对寻找光泵小型腔式亚毫米波气体激光器的高效缓冲气体有指导意义.

**关键词:** 激光技术; 光泵亚毫米波激光; 缓冲气体; 退激活

**中图分类号:** TN248.2 **文献标识码:** A

## QUANTIFICATIONAL EXPLANATION OF THE EFFECT OF BUFFER GAS ON OPTICALLY PUMPED SUBMILLIMETER WAVE LASER

BAO Yan-Xiang, HUANG Xiao, ZHANG Xun, LUO Xi-Zhang

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

**Abstract:** The model of buffer gas effect on optically pumped submillimeter wave laser was established. And the deactivation rate of buffer gas was deduced by quantum theory, so that the buffer gas effect could be calculated quantificationally. The CO<sub>2</sub>-9(R30) laser pumping NH<sub>3</sub> 67.2 μm line was calculated theoretically and measured experimentally. The experiment results agree with the theoretical calculation. This work would be in favor of finding high-efficient buffer gas of optically pumped submillimeter wave laser.

**Key words:** laser technique; optically pumped submillimeter wave laser; buffer gas; deactivation

### 引言

许多亚毫米波工作者对光泵亚毫米波激光器光子能量转换效率很低做了研究. T. Y. Chang 和 C. Lin<sup>[1]</sup>发现: 在连续波工作方式, 相对于纯 CH<sub>3</sub>F 工作情况, 1:1 的 CH<sub>3</sub>F: C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> 可以提高 55% 的输出功率和提高 100% 的最佳 CH<sub>3</sub>F 工作气压. Lawandy 和 Koepf<sup>[2]</sup>在 CH<sub>3</sub>F 连续亚毫米波激光中加入 SF<sub>6</sub>, 使输出功率提高了一倍. R. Behn<sup>[3]</sup>等人发现, 相对于纯 D<sub>2</sub>O 工作情况, 加入 SF<sub>6</sub> 可使亚毫米波激光的输出能量提高 75%. R. Behn<sup>[4]</sup>等人还报道, 在光泵 D<sub>2</sub>O 385 μm 亚毫米波激光时, 加入 SF<sub>6</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> 中的某一种缓冲气体, 能够使光泵效率提高 40%. 在我们的光泵 NH<sub>3</sub> 分子亚毫米波激光的研究中, 发现添加适量的缓冲气体 N<sub>2</sub> 可以使 12.08 μm 辐射的输出功率增加 6 倍, 使 67.2 μm 辐射的输出功率增

加 1 倍<sup>[5]</sup>.

### 1 缓冲气体工作模型

缓冲气体作用模型如图 1 所示. 光泵亚毫米波激光器光子能量转换效率很低, 其中一个主要的原因是工作气体分子具有一个快速的转动驰豫速率和一个慢得多的振动驰豫速率. 快速的转动驰豫使激光振动激发态上能级(E3)的粒子数快速减少, 振动激发态下能级(E2)粒子数快速增多, 而较慢的振动驰豫导致大量的粒子滞留在 E2 上, 使振动基态上的粒子数得不到及时补充, 也降低了粒子数反转密度, 使亚毫米波激光辐射强度不能持续增加, 甚至减弱, 产生了“瓶颈效应”. 克服这个瓶颈效应的一个有效方法是在工作气体中加入适当比例的某种缓冲气体, 这种缓冲气体有助于加快工作气体分子的振动驰豫, 从而提高粒子数反转密度, 最终达到提高光

收稿日期: 2004-06-03, 修回日期: 2005-03-18

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(021757, 04300458)

作者简介: 保延翔(1969-), 男, 广东广州人, 工程师, 中山大学硕士, 主要从事亚毫米波激光和自动控制研究.

Received date: 2004-06-03, revised date: 2005-03-18

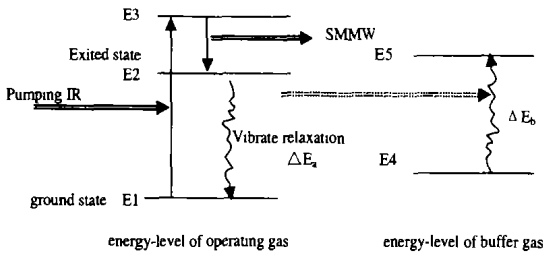


图1 缓冲气体作用模型  
Fig.1 The model of buffer gas mechanism

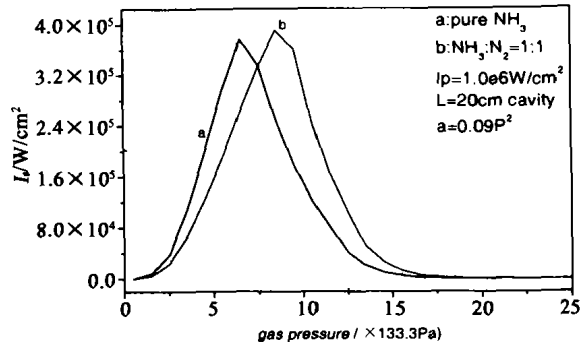


图3 添加缓冲气体前后的亚毫米波输出光强(理论计算)  
Fig.3 The intensity of SMMW with respect to before and after adding buffer gas(calculated)

子转换效率、提高激光输出功率的目的。

## 2 振动退激活率

结合 SSH 理论<sup>[6]</sup>, 利用量子力学理论来推导和计算光泵亚毫米波激光器中工作气体分子振动激发态下能级的退激活率  $P_{ij}$ . 两个分子的质心相对运动需要用两个参数描述: 一个是  $r$ , 表示质心的距离; 另一个是  $\theta$  角, 表示矢量  $r$  与分子最近距离时分子的连线的夹角. 现用  $\Psi$  表示空间中两个分子碰撞的波函数, 它满足薛定谔方程

$$H^{(s)}\Psi - \frac{\hbar^2}{8\pi^2\mu} \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \Psi \right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \Psi \right) \right) + V\Psi = W\Psi \quad (1)$$

这里  $V = V_r(r) \cdot V_{int}(s)$ .  $H^{(s)}$  是内部振动的哈密顿量,  $W$  是系统的总能量.

通过畸变波法可以推导出, 非共振情况 ( $\Delta E \gg 0$ ) 下的振动跃迁几率

$$P_{1 \rightarrow 0} = P_0 P_c 8 \left( \frac{\pi}{3} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{8\pi^3 \mu \Delta E}{\alpha^{*2} \hbar^2} \right)^2 V_{1 \rightarrow 0}^2 \chi^{\frac{1}{2}} e^{-\left( 3\chi - \left[ \frac{\Delta E}{2kT} + \frac{\epsilon}{kT} \right] \right)} \quad (2)$$

式(2)中  $\Delta E$  为共振能级差,  $P_0$  为立体几何因子,  $P_c$  为碰撞截面基准因子,  $V^2$  为振动因子.  $S$  为表

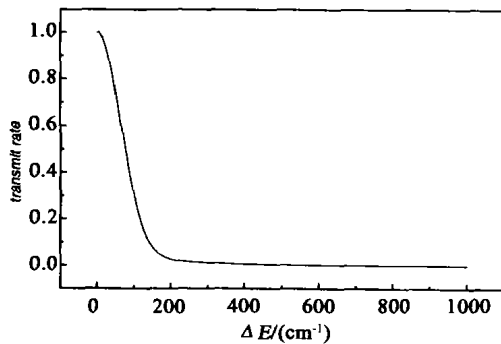


图2 缓冲气体退激活几率曲线  
Fig.2 The deactivation rate of buffer gas

面原子,  $N_s$  为表面原子数,  $m_s$  为原子质量,  $\alpha^*$  为分子势能函数的参数. 内部运动系数  $A_{sa}^2$  从分子的简正坐标中得到.

近共振情况 ( $\Delta E \rightarrow 0$ ) 下的振动跃迁几率

$$P_{ij} = P_0 [V^j(a)]^2 \left( \frac{64\pi^2 \mu k_B T}{\alpha^{*2} \hbar^2} \right) e^{\frac{\epsilon}{k_B T}} \quad (3)$$

为了统一整个  $P_{ij}$  的表达式, 可以利用数学拟合的方法得到  $P_{ij}$  的表达式,  $P_{ij}$  随着  $\Delta E$  光滑连续单调下降变化,  $P_{ij} \in (0, 1)$ , 构造下面的拟合跃迁几率函数:

$$P_{1 \rightarrow 0} = P_0 P_c 8 \left( \frac{\pi}{3} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{8\pi^3 \mu \Delta E}{\alpha^{*2} \hbar^2} \right)^2 V_{1 \rightarrow 0}^2 \chi^{\frac{1}{2}} e^{-3\chi + \frac{\Delta E}{2kT} - \frac{\epsilon}{kT}} + P_0 V_{1 \rightarrow 0}^2 \left( \frac{64\pi^2 \mu k_B T}{\alpha^{*2} \hbar^2} \right) e^{\frac{\epsilon}{k_B T}} \cdot e^{-c_1 \Delta E^{c_2}} \quad (4)$$

$\exp(-c_1 \Delta E^{c_2})$  是拟合因子.

式(4)就是我们需要的退激活几率公式. 在工作气体是氨气 ( $\text{NH}_3$ ), 缓冲气体是氮气 ( $\text{N}_2$ ) 的情况下,  $P_{1 \rightarrow 0}$  的曲线如图 2 所示. 在能级差  $\Delta E$  很小时, 跃迁几率几乎接近 1. 随着能级差  $\Delta E$  增加, 跃迁几率无限趋近于 0. 说明在工作气体和缓冲气体能级

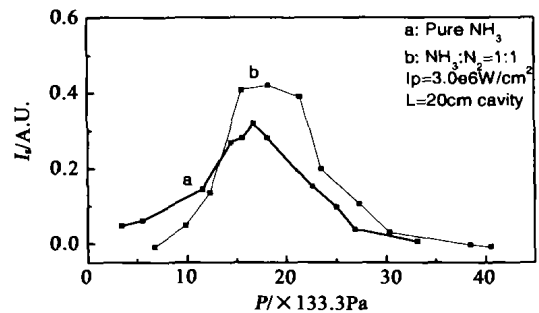


图4 添加缓冲气体前后的亚毫米波输出光强(实验测量)  
Fig.4 The intensity of SMMW with respect to before and after adding buffer gas(experimental)

能发生共振时,可以达到很高的能量传递几率,从而能在很大程度上消除“瓶颈效应”.而在工作气体与缓冲气体能级不能发生共振时,几乎不存在气体之间的能量传递.

### 3 计算结果和实验验证

图4为用 $\text{CO}_2$ -9R(30)谱线作泵浦源,分别泵浦纯 $\text{NH}_3$ 和加入缓冲气体 $\text{N}_2$ 的 $\text{NH}_3$ 亚毫米波激光67.2 $\mu\text{m}$ 谱线输出光强理论计算图.由图可见,加入适当的缓冲气体,可使亚毫米波激光输出获得提高,最佳工作气压升高.图5是同一谱线的实验测量结果,由图可见,实验与理论计算结果吻合得较好.

### REFERENCES

[1] Chang T Y, Lin C. Effects of buffer gases on an optically

pumped  $\text{CH}_3\text{F}$  FIR laser[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(4): 362—369.

[2] Lawandy N M, Koepp G A. Relaxation oscillations in optically pumped molecular lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**: 366—372.

[3] Behn R, Kjelberg I, Morga P D, et al. High power  $\text{D}_2\text{O}$  laser optimized for microsecond pulse duration[J]. *J. Appl. Phys.* 1983, **54**(6): 2995—3002.

[4] Behn R, Dupertuis M A, Kjelberg I, et al. Buffer gases to increase the efficiency of an optically pumped far infrared  $\text{D}_2\text{O}$  laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1985, **QE-21**(8): 1278—1285.

[5] LI Hong-Jian, LUO Xi-Zhang, Huang Xiao, et al., Effects of buffer gas on the output of OPFIR  $\text{NH}_3$  cavity laser[J], *Int. J. IR&MMW*, 2000, **21**(5): 700—710.

[6] Schwartz R N, Slawsky Z I, Herzfeld K F. Calculation of vibrational relaxation time in gases[J], *J. of Chem. Phys.*, 1952, **20**(10): 1591—1599.