

文章编号: 0258-7025(2004)07-0780-05

缓冲气体对光抽运远红外激光器 频谱特性的影响

张 萍, 张 迅, 黄 晓, 罗锡璋, 秦家银

(中山大学电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

摘要 基于分子振动弛豫理论完善了缓冲气体的作用模型, 利用半经典密度矩阵理论与量子力学理论, 定量分析了缓冲气体对小型光抽运远红外激光过程的作用机理以及缓冲气体作用下小型腔式光抽运 NH_3 分子远红外激光器的频谱特性, 讨论了工作气压、抽运功率等工作参数对频谱特性的影响, 并对理论计算结果进行了实验验证, 二者符合得较好。研究结果表明, 在小型光抽运远红外激光器中加入适当的缓冲气体, 大量工作气体分子与缓冲气体分子之间的无规碰撞会引起谱线加宽, 而且可以使远红外激光输出信号增强。

关键词 激光技术; 光抽运远红外激光器; 缓冲气体; 频谱特性

中图分类号 TN 248.2⁺2 **文献标识码** A

Effects of Buffer Gas on the Spectrum Characteristics of Optically Pumped Miniature Cavity Far-Infrared Laser

ZHANG Ping, ZHANG Xun, HUANG Xiao, LUO Xi-zhang, QIN Jia-yin

(Department of Electronics & Communication Engineering, Sun Yet-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract Based on the theory of vibrational relaxation, the buffer gas mechanic model is developed. The mechanism of buffer gas and spectrum characteristics of optically pumped miniature cavity NH_3 far-infrared laser are calculated by semi-classical density matrix theory and quantum mechanics theory. The effects of operating gas pressure and pumping power on spectrum characteristics are studied quantitatively. And the theoretical results are verified by the experiments. The results shows that the spectrum of far-infrared laser can be widened when certain buffer gas is added into the laser medium, and the output power of far-infrared laser increase too.

Key words laser technique; optically pumped far-infrared laser; buffer gas; spectrum characteristics

1 引 言

传统的光抽运远红外激光器的能量转换效率很低, 导致其实际应用受到很大的限制。研制小型高效、大范围连续调谐的光抽运远红外激光器一直是该领域的重要课题。研究结果^[1~6]表明, 造成光抽运远红外激光转换效率低的一个主要原因是“瓶颈效应”。克服“瓶颈效应”的一个有效方法是在激光工作物质中加入一定比例的缓冲气体, 以加快工作气体分子的振动弛豫, 从而提高粒子数反转密度, 最终达到提高光子转换效率及激光输出的目的。但上

述工作大多停留在实验经验总结和定性分析阶段, 没有具体深入到分子能级内部对整个激光过程及缓冲气体的作用进行更深入的定量分析和研究。

为此, 本文以 N_2 为缓冲气体, 用 CO_2 -9R(30) 谱线抽运长度为 20 cm 的腔式 NH_3 分子远红外激光器产生波长为 67.2 μm 的远红外激光为例, 利用量子力学及半经典密度矩阵理论研究了缓冲气体对小型脉冲光抽运远红外激光过程的作用机理以及缓冲气体作用下小型腔式光抽运 NH_3 分子远红外激光器的频谱特性。

收稿日期: 2003-03-04; 收到修改稿日期: 2003-06-12

基金项目: 广东省自然科学基金(编号: 001173, 021757)和中山大学重点建设高水平大学专项基金资助项目。

作者简介: 张 萍(1975—), 女, 湖北大悟人, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: isszp@zsu.edu.cn

2 理论模型

2.1 光抽运远红外激光器中缓冲气体的作用

缓冲气体作用模型如图 1 所示。从分子能级看,远红外激光器工作气体分子吸收抽运中红外能量,使其振动基态 E_1 分子跃迁到振动激发态上能级 E_3 ,振动激发态转动能级间的跃迁 $E_3 \rightarrow E_2$ 辐射出远红外激光。在某些情况下,即使持续加大抽运功率,由于 $E_2 \rightarrow E_1$ 间的振动弛豫时间较长, E_1 态粒子数不能获得及时补充,使远红外输出光强不能继续提高甚至减弱,即出现远红外激光的“振动瓶颈效应”。

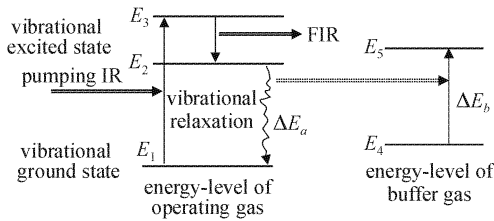


图 1 缓冲气体作用模型

Fig.1 Buffer gas mechanic model

针对不同的工作气体,选择适当的缓冲气体加入到工作气体中,使缓冲气体的某一能级差 $\Delta E_b (E_5 \rightarrow E_4)$ 与 $\Delta E_a (E_2 \rightarrow E_1)$ 近谐。则当 E_2 能级上的粒子通过与缓冲气体碰撞发生能量转移时,原 E_2 态粒子很快失去能量而回到振动基态,补充了基态的粒子数,使整个激光过程可以继续,消除了“振动瓶颈效应”。

2.2 横向弛豫时间

对于工作物质包含两种气体(工作气体 a 和缓冲气体 b) 的光抽运远红外激光器,工作气体的横向弛豫时间为

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{aa}} + \frac{1}{\tau_{ab}} \quad (1)$$

式中 τ_{aa} 为激光工作气体分子自身相互碰撞的横向弛豫时间, τ_{ab} 为一个工作气体分子 a 和一个缓冲气体分子 b 相互碰撞的横向弛豫时间,有

$$\frac{1}{\tau_{ab}} = \xi N_a N_b Q_{ab} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi} \left(\frac{1}{m_a} + \frac{1}{m_b} \right)}$$

其中, N_a, N_b 分别为单位体积中 a 类和 b 类气体的分子数, Q_{ab} 为 a 分子和 b 分子间的碰撞截面, ξ 表示一个工作气体分子与一个缓冲气体分子进行一次碰撞时实现振动退激活的几率,可根据量子力学理论

求出^[7]: $\xi = [V^i(a)]^2 \frac{8\pi^2 \mu k T}{(a^*)^2 h^2}$ 。

从式(1)看到,加入缓冲气体前,激光工作物质只包含一种工作气体分子,工作气体总的横向弛豫时间只有式中右边第一项。加入缓冲气体后,增加了式中右边第二项,导致了总的横向弛豫时间 τ 的下降。由于 τ 的下降,振动激发态下能级的粒子将很快回到基态,从而可以减轻或消除“振动瓶颈效应”。

3 计算结果与讨论

根据半经典密度矩阵原理,光抽运远红外激光器中远红外激光信号增益系数 G_s 和抽运信号增益系数 G_p 分别为^[8]

$$\begin{cases} G_s = -\frac{2N_v |\mu_s|^2 \tau_{23}}{\eta \epsilon_0 \hbar B_s^*} \omega_s \text{Im}(P_{32}) - \alpha_s \\ G_p = -\frac{2N_v |\mu_p|^2 \tau_{13}}{\eta \epsilon_0 \hbar B_p^*} \omega_p \text{Im}(P_{13}) - \alpha_p \end{cases} \quad (2)$$

式中, $B_s = \frac{\mu_s E_s \tau_{23}}{2\hbar}$, $B_p = \frac{\mu_p E_p \tau_{13}}{2\hbar}$, N_v 为激光介质有效工作分子数密度, $\eta = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$, ω_s 和 ω_p 分别为远红外激光信号与抽运激光信号的角频率, α_s, α_p 为激光损耗率。

实验研究对象是 TEA CO_2 激光器 9R(30) 谱线抽运 NH_3 分子,产生波长为 $67.2 \mu\text{m}$ 的远红外激光过程。激光器的工作条件为:腔长 20 cm,直径 32 mm,入射口及出射口内侧的远红外反射系数均为 0.1。与 CO_2 -9R(30) 谱线匹配的 NH_3 分子振动跃迁为 $a \rightarrow sP(6,0)$, $a \rightarrow sP(6,1)$ 和 $a \rightarrow sP(6,2)$,在此用九能级系统^[9](可分解为三个独立的三能级系统)描述,如图 2 所示。此九能级系统根据式(2)采用数值迭代法^[9]进行计算。

3.1 添加缓冲气体前后光抽运远红外激光输出频谱特性的比较

图 3 中的四条曲线 a, b, c, d 分别是图 2 所示的九能级系统在工作气压为 1999.5 Pa,抽运功率密度为 1 MW/cm^2 时,添加不同比例缓冲气体的远红外激光输出频谱特性的理论计算曲线。结合图 2 和图 3 可以看到,纯 NH_3 工作状态下的远红外激光器频谱呈现明显独立的三个单峰,从左到右分别是 $a \rightarrow sP(6,0)$, $a \rightarrow sP(6,1)$ 和 $a \rightarrow sP(6,2)$ 三个 Raman 过程的结果。图中横坐标以 $a \rightarrow sP(6,0)$ 的中心频率(4459.0927 GHz)为零点, $a \rightarrow sP(6,1)$ 的中心频率为 4466.2481 GHz(中心频偏为 7155 MHz), $a \rightarrow sP(6,2)$ 的中心频率为 4488.0880 GHz(中心频偏为 28.9953 GHz)。添加缓冲气体以后,三个独立单峰辐射的谱线带宽被展宽,而且 $a \rightarrow$

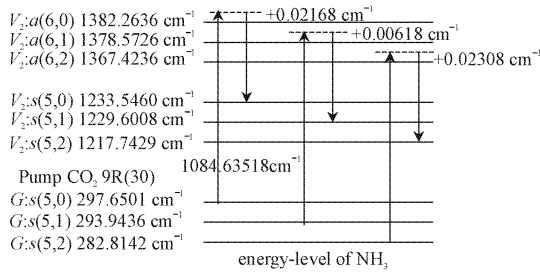


图 2 CO₂-9R(30)抽运 NH₃ 分子 67.2 μm 激光的九能级系统

Fig. 2 Nine-level schematic diagram of quantum transition in NH₃ modular system with CO₂-9R(30) pumping

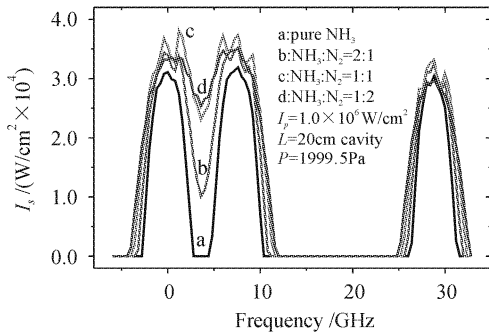


图 3 添加不同比例缓冲气体的远红外激光器的频谱特性

Fig. 3 Frequency characteristics of far-infrared laser corresponding to different ratio of gases mixture

$sP(6,0)$ 和 $a \rightarrow sP(6,1)$ 的谱线开始交叠。随着缓冲气体 N₂ 在样品管中所占比例的增加,辐射的谱线带宽越来越大, $a \rightarrow sP(6,0)$ 和 $a \rightarrow sP(6,1)$ 辐射的交叠部分也越来越多,形成了一个非常大的宽带辐射(半高宽大于 12.5 GHz)。这是由于加入缓冲气体后,大量工作气体分子和缓冲气体分子之间的无规碰撞引起了谱线加宽。而随着缓冲气体所占比例的增多, $a \rightarrow sP(6,0)$ 和 $a \rightarrow sP(6,1)$ 各自辐射的谱线由于碰撞加宽增大,形成了交叠部分,交叠部分的场强比本底噪声强度要大得多,这些交叠的频谱分量作为本底信号被激光过程进一步放大而显著增大,两个拉曼过程产生了强烈的相互增强效应,使得 $a \rightarrow sP(6,0)$ 和 $a \rightarrow sP(6,1)$ 辐射谱线的两个双峰完全连接起来,出现了很宽的频谱。

3.2 工作气压对添加缓冲气体的远红外激光器频谱特性的影响

图 4(a), (b) 和 (c) 是工作气压分别为 666.5

Pa, 1999.5 Pa 和 5998.5 Pa, 抽运功率密度为 3.0 MW/cm² 时, 添加不同比例的缓冲气体后远红外激光器的频谱特性曲线。由图可知, 在不同的工作气压下, 添加不同比例的缓冲气体后远红外激光器的频谱特性与上述基本规律相似。对每一组三能级系统的频谱来说, 当压强很低时, 谱线呈现为双峰形状, 这是由于在强交流电场作用下, NH₃ 分子能级出现 AC-Stark 分裂, 从而发射出两条频率十分接近的谱线, 频谱带宽较窄。随着压强的升高, 分子数密度增加, 碰撞几率增大, 工作气体分子的辐射由于压力加宽效应, AC-Stark 分裂的双峰相互交叠, 频谱带宽增大。工作气压继续增大, 两交叠的频谱分量作为本底信号被激光过程进一步放大而增大, 两个拉曼过程产生了互相增强效应。但随着工作气压的进一步升高, Raman 过程的竞争加强, 导致输出强度较低的小峰被输出强度较大的大峰完全吸收, 其结果是 AC-Stark 的双峰消失, 每一组三能级的

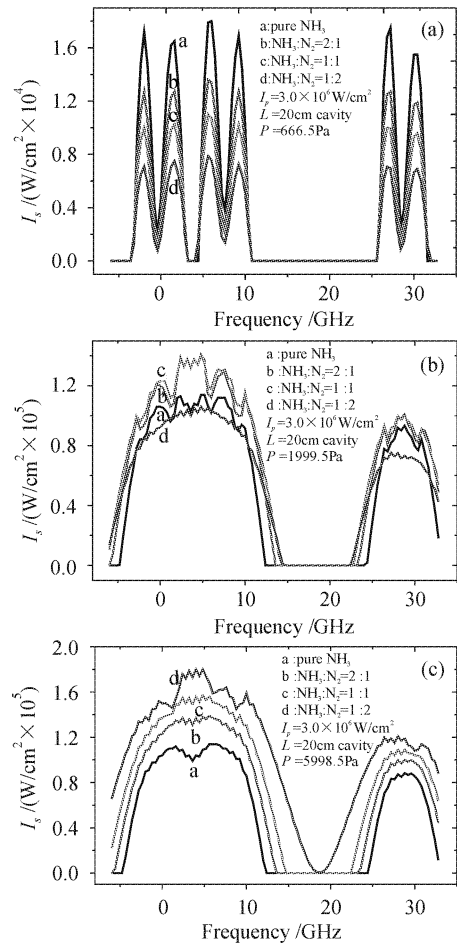


图 4 工作气压对添加缓冲气体的远红外激光器频谱特性的影响

Fig. 4 Frequency characteristics of far-infrared laser for different gas pressure and different ratio of gases mixture

远红外辐射只呈现单峰形状, 表现为很宽的谱带。

3.3 抽运功率密度对添加缓冲气体的远红外激光器频谱特性的影响

图 3, 图 4(b) 和图 5 分别是抽运功率密度为 1.0 MW/cm^2 , 3.0 MW/cm^2 和 6.0 MW/cm^2 , 工作气压为 1999.5 Pa 时, 添加不同比例的缓冲气体后远红外激光器的频谱特性曲线。结合这几个图可以看到, 在不同的抽运功率下, 添加不同比例缓冲气体后远红外激光器的频谱特性与前面所述基本规律类似。但随着抽运功率增加, AC-Stark 分裂的裂距增大, 激光器的辐射带宽增加, 同时频谱的峰值也明显增大, 因此激光器总的输出功率大大增加。

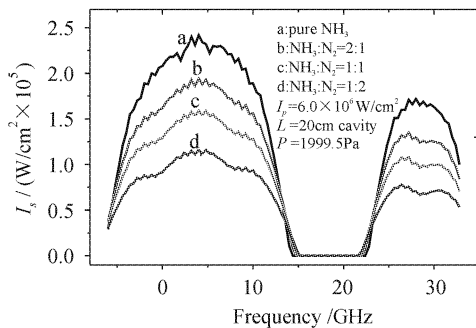


图 5 抽运功率 6.0 MW/cm^2 时添加缓冲气体的远红外激光器频谱特性的影响

Fig. 5 Frequency characteristics of far-infrared laser at pump intensity 6.0 MW/cm^2 for different ratio of gases mixture

4 实验结果

在工作气压为 1999.5 Pa , 抽运功率密度为 3.0 MW/cm^2 , 腔式远红外激光器样品管长为 20 cm 时, 用 TEA- CO_2 9R(30) 激光谱线对添加缓冲气体前后的 NH_3 分子远红外激光器进行抽运, 获得波长为 $67 \mu\text{m}$ 的远红外脉冲信号输出, 由 F-P 干涉仪测得的干涉特性如图 6(a), (b) 所示。图 6(a) 是纯 NH_3 工作状态时的干涉特性曲线, 从图中可以看出, 纯 NH_3 工作时其频谱的半高宽为 13.2 GHz ($12 \mu\text{m}$), 实验干涉特性曲线呈多峰结构, 这是由于拉曼效应和 AC-Stark 效应的结果。

图 6(b) 为添加的缓冲气体 N_2 与工作气体 NH_3 比例为 $1:2$ 时, 腔式 NH_3 分子远红外激光器的 F-P 频谱干涉曲线。由图可知, 添加缓冲气体后的实验干涉特性曲线也呈多峰结构; 频谱的半高宽为 15.4 GHz ($14 \mu\text{m}$)。对比图 6(a), 可以发现添加缓冲气体 N_2 后的远红外激光信号频谱比纯 NH_3 工

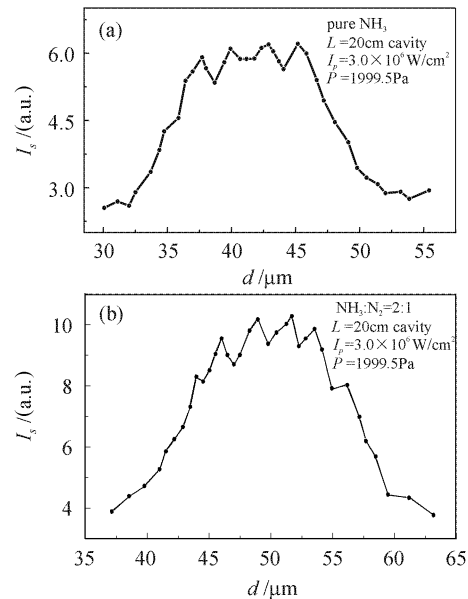


图 6 纯 NH_3 工作状态时(a)和添加缓冲气体后(b)远红外激光器的 F-P 干涉特性

Fig. 6 F-P interference pattern of far-infrared laser for pure NH_3 gas (experiment) (a) and for gases mixture (experiment) (b)

作时的频谱展宽了 2.2 GHz , 而且添加缓冲气体 N_2 后的远红外激光信号输出光强也要比纯 NH_3 工作时的输出光强大。参考图 4(b), 可以看到理论计算结果与实验结果符合得较好。

5 结 论

利用量子力学与半经典密度矩阵理论深入研究了缓冲气体对小型光抽运远红外激光过程的作用机理。研究表明, 在小型光抽运远红外激光器中加入适当的缓冲气体, 会使远红外激光输出谱线加宽, 并且可以使输出信号增强。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Chang, C. Lin. Effects of buffer gases on an optically pumped CH_3F FIR laser [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(4): 362~369
- 2 R. Behn, I. Kjelberg, P. D. Morgan *et al.*. A high power D_2O laser optimized for microsecond pulse duration [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(6):2995~3002
- 3 Luo Xizhang, Qiu Ruman. Optimized operation of optically pumped NH_3 laser emission at $12.08 \mu\text{m}$ and $12.81 \mu\text{m}$ [J]. *Int. J. IR-MMW*, 1997, **18**(3):641~652
- 4 Luo Xizhang, Li Hongjian. The optimum operation of a unified mini-optically pumped NH_3 submillimeter wave laser [J]. *Int. J. IR-MMW*, 1999, **20**(2):203~212
- 5 Li Hongjian, Luo Xizhang, Huang Xiao *et al.*. Effects of buffer

gas on the output of optically pumped NH₃ far-infrared cavity laser [J]. *Int. J. IR-MMW*, 2000, **21**(5):771~780

6 Bao Yanxiang. Effects of buffer gas on superradiant optically pumped far-infrared laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 117~119
 保延翔. 缓冲气体对超辐射光抽运远红外激光器的影响[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):117~119

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

8 Qin Jiayin, Zheng Xingshi, Luo Xizhang *et al.*. Amplifying process of miniature optically pumped far infrared laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(5):385~390
 秦家银,郑兴世,罗锡璋等. 小型光泵远红外激光的放大过程[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(5):385~390

9 Qin Jiayin, Luo Xizhang, Zheng Xingshi *et al.*. Study on optically pumped NH₃ FIR laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(3):262~267
 秦家银,罗锡璋,郑兴世等. 光泵 NH₃ 分子远红外激光研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(3):262~267



• 广告

| | | | | | | |
|---|--|---------|---------|---------|--------|--|
|  | <h2>上海瀚宇光纤通信技术有限公司</h2> | | | | | |
| <h3>Your Reliable Partner to R&D in Laser Optics and Fiber Optics</h3> | | | | | | |
|  | <p>上海瀚宇光纤通信技术有限公司是一家专业致力于服务国内光通信领域科研机构,高校,企业的研究人员的专业公司.为国内光通信领域的研究,试验,新产品开发等项目提供支持.</p> <p>上海瀚宇和世界上许多知名公司和大学保持着良好的技术和市场方面的合作,致力于建立面向全球的多渠道合作体系,为国内的光通信领域的研发提供高端的器件和相关产品,从而推进国内光通信领域的进步.</p> <p>上海瀚宇立足于持续提供全球领先的技术和产品,服务的领域包括:</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>光纤传感领域</td> <td>光纤激光器领域</td> </tr> <tr> <td>光纤放大器领域</td> <td>激光应用领域</td> </tr> </table> <p>上海瀚宇目前能够提供比较丰富的产品:</p> <p>光偏振控制以及保偏产品系列</p> <p>特种光器件系列</p> <p>特种光纤系列</p> <p>高端光纤激光器, 高端光纤放大器系列</p> <p>高功率泵浦激光器系列</p> <p>普通光无源器件等</p> | 光纤传感领域 | 光纤激光器领域 | 光纤放大器领域 | 激光应用领域 |  |
| 光纤传感领域 | | 光纤激光器领域 | | | | |
| 光纤放大器领域 | 激光应用领域 | | | | | |
| <p>SLD 系列产品</p>  | <p>保偏器件</p>  | | | | | |
| <p>特种光纤</p>  | <p>特种光器件</p>  | | | | | |
| <p>大功率泵浦</p>  | <p>普通光无源器件</p>  | | | | | |
| <p>偏振控制产品</p> | <p>公司地址: 上海市闵行区剑川路 910 号 2 号楼 3 楼 公司电话: 021-54704521; 021-54704615 公司邮件: business@shconnet.com.cn</p> <p>邮政编码: 200240 公司传真: 021-54704522 公司网站: www.shconnet.com.cn</p> | | | | | |