

文章编号: 0258-7025(2003)02-0117-03

缓冲气体对超辐射光抽运远红外激光器的影响

保延翔

(中山大学电子系, 广东 广州 510275)

摘要 以 NH_3 作为远红外激光的工作气体, 以 N_2 作为缓冲气体, 对加入缓冲气体前后的小型超辐射光抽运远红外激光器作理论比较研究。基于缓冲气体作用机理模型, 计算出激光工作物质的综合弛豫时间; 通过解半经典的密度矩阵方程, 计算出远红外激光输出的频谱特性和工作气压。计算表明, 加入缓冲气体后, 远红外激光的输出得到提高; 存在一个最佳混合气体比例, 在这一比例下远红外激光输出达到最大; 加入缓冲气体后, 最佳工作气压比加入缓冲气体前获得提高。

关键词 激光技术; 超辐射光抽运远红外激光器; 缓冲气体; 综合弛豫时间

中图分类号 TN 248.2 **文献标识码** A

Effects of Buffer Gas on Superradiant Optically Pumped Far-infrared Laser

BAO Yan-xiang

(Department of Electronics, Zhongshan University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract A miniature superradiant NH_3 optically pumped far-infrared laser (OPFIRL) with or without buffer gas N_2 was theoretically studied. Base on the mechanism model of buffer gas, synthetical relaxation time was calculated. By solving the semi-classic density matrix equations, spectra and the operating gas pressure of NH_3 superradiant OPFIRL with or without buffer gas N_2 were calculated. It was found that by adding buffer gas, FIR power could be raised, and there existed an optimum ratio of gases mixture and an optimum operating gas pressure which was higher than that of pure NH_3 operating.

Key words laser technique; superradiant OPFIRL; buffer gas; synthetical relaxation time

1 引言

从结构上, 光抽运远红外激光器可分为两大类: 超辐射式光抽运远红外激光器和腔式光抽运远红外激光器。和腔式相比, 超辐射式具有结构简单、谱线较窄、易于小型化和一体化等优点^[1]。

NH_3 是应用最为普遍的远红外激光器的工作气体分子, 它具有以下特点: 1) 具有相当大的永久电偶极矩; 2) 有较大的转动常数; 3) 基态能级的反转分裂波长落在 1 cm 范围内^[2]。大的永久电偶极矩使 NH_3 分子容易发生振动或转动跃迁, 有较强的吸收抽运辐射的能力。但由于远红外激光“瓶颈效

应”的存在, 能量转换效率很低^[3]。为此, 科学家们在激光工作气体中加入缓冲气体, 以提高远红外输出^[3,4]。黎宏剑等构建了缓冲气体作用机理模型, 并对加入缓冲气体的腔式光抽运远红外激光器的频谱特性和工作气压作了计算^[5]。

本文对加入缓冲气体前后的超辐射式光抽运远红外激光器作了研究, 所选的远红外激光器长为 20 cm, 工作气体为 NH_3 , 缓冲气体为 N_2 , 输出谱线为以 $\text{CO}_2-9(R)30$ 线抽运 NH_3 分子的 67.2 μm 远红外激光。本文对综合弛豫时间、频谱特性、最佳混合气体比例、工作气压等参数作了计算, 并作了相应的实验验证。

收稿日期: 2001-10-30; 收到修改稿日期: 2001-12-30

作者简介: 保延翔(1969—), 男, 回族, 中山大学电子与通信工程系工程师, 大学本科, 主要从事亚毫米波激光及自动化研究。E-mail: issbyx@zsu.edu.cn

2 综合弛豫时间

弛豫时间由气体压强、气体温度、分子碰撞截面和分子质量决定。当系统包含两种分子 A 和 B 时，由振动和碰撞引起能量由分子 A 向分子 B 转移的弛豫时间 τ_{ab} 可表示为

$$\frac{1}{\tau_{ab}} = N_b Q_{ab} \sqrt{\frac{8KT}{\pi} \left(\frac{1}{m_a} + \frac{1}{m_b} \right)} \quad (1)$$

式中 N_b 为单位体积内分子 B 的数目，且 $N_b \propto P$ (P 为气体压强)， Q_{ab} 为分子 A 与分子 B 间的碰撞截面， T 为气体温度， m_a, m_b 分别为分子 A 与分子 B 的质量。

工作物质的综合弛豫时间可由下式表示

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{aa}} + \frac{1}{\tau_{ab}} \quad (2)$$

式中 $\frac{1}{\tau_{aa}} = N_a Q_{aa} \sqrt{\frac{16KT}{\pi m_a}}$ ， τ_{aa} 为同种分子间的弛豫时间。

由(2)式看出，加入缓冲气体以前，激光工作物质只包含工作气体，综合弛豫时间只含式中右边第一项($1/\tau_{aa}$)；加入缓冲气体以后，激光工作物质包含两种气体分子，不同种类分子间的弛豫时间 τ_{ab} 必须加以考虑，即(2)式中包含两项弛豫时间，所以总的综合弛豫时间下降了。

由图 1 可见，存在一个最佳综合弛豫时间 τ ，在这一最佳综合弛豫时间内，远红外输出达到最大。 NH_3 分子的弛豫时间为 $\tau_{\text{NH}_3} > 9.09 \times 10^{-7}/P(\text{s})$ ，式中 P 为气体压强，即弛豫时间落在图 1 中峰值的右边。加入适当的缓冲气体可以减小综合弛豫时间(向峰值方向移动)，从而使超辐射远红外激光输出获得增大。

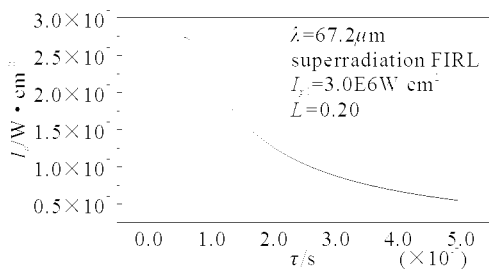


图 1 FIR 输出与综合弛豫时间的关系

Fig. 1 Relative FIR output vs the synthetical relaxation time

3 频谱特性曲线

远红外输出的计算可以通过解密度矩阵方程来

获得^[6]

$$-i\hbar \frac{\partial \rho}{\partial t} = [\rho, H] \quad (3)$$

式中 ρ 为密度矩阵， H 为分子系统的哈密顿量， \hbar 为普朗克常量。

为求出整个激光过程的频谱特性曲线，可以远红外激光信号的中心频率为基点(如定为 +6 GHz)，在一定频偏范围(如 +6 GHz \pm 9 GHz)内逐点扫描计算，频谱特性曲线的纵坐标为激光强度，横坐标为频率，谱线呈多峰现象是由于激光的多纵模结构引起的。

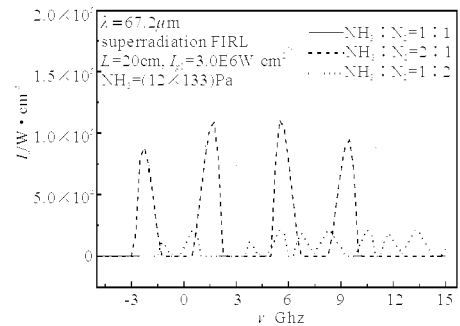


图 2 不同气体混合比例下小型 NH_3 超辐射式光抽运远红外激光输出的频谱特性曲线

Fig. 2 Spectra of NH_3 mini-superradiant OPFIRL with respect to the ratio of gases mixture

由图 2 可见，当气体混合比例为 $\text{NH}_3:\text{N}_2=1:1$ 时，远红外输出比其他混合比例时要大，这意味着存在一个最佳气体混合比例，在此比例下，远红外输出达到最大。对于以 N_2 作为缓冲气体的 NH_3 超辐射式光抽运远红外激光器，最佳气体混合比例为 $\text{NH}_3:\text{N}_2=1:1$ 。加入缓冲气体的超辐射式光抽运远红外激光器存在最佳气体混合比例的原因可解释为：如果加入的缓冲气体太多，则不足以有效降低远红外激光器的瓶颈效应；反之，如果加入的工作气体太少，参与激光过程的有效分子数又太少而不足以产生足够的远红外输出。

由图 3 可见，当气体总压强为 $24 \times 133 \text{ Pa}$ 时，远红外输出要比在其他气体总压强下更大，这意味着对加入缓冲气体的超辐射式光抽运远红外激光器，存在一个最佳的气体总压强，在这一最佳气体总压强下，远红外激光输出达到最大。这一特性和没有加入缓冲气体而以纯工作气体工作时的特性相似。如果气体总压强太低，则单位体积内参与激光过程的有效分子数太少而不能辐射出足够强的远红外激光；如果气体总压强太高，激光器内自吸收作用

和碰撞损耗都将增大,导致远红外输出反而下降。

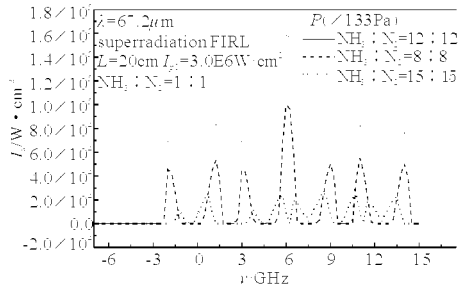


图 3 不同工作气压下小型 NH₃ 超辐射式光抽运远红外激光输出的频谱特性曲线

Fig. 3 Spectra of NH₃ mini-superradiant OPFIRL with respect to the operating gas pressure

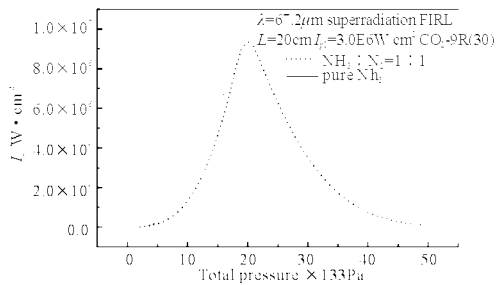


图 4 输出光强与工作气压的理论计算曲线

Fig. 4 Relative FIR output vs the total operating gas pressure (calculated)

4 工作气压

研究表明,最佳工作气压与抽运光强、样品管长、远红外信号波长等参数有关。因此在讨论最佳工作气压时,必须固定其他参数,而使工作气压在一定的范围内变化,具体计算时可取不同的压强值,计算出对应的输出频谱特性,再将所得的频谱分布曲线以频率为变量进行积分,最后可以得到总输出光强的理论计算值,从而得到总输出光强与工作气压的关系曲线,如图 4 所示。由图 4 可见,在加入缓冲气体前(以纯 NH₃ 工作),最佳工作气压为 16×133 Pa,在加入缓冲气体后,最佳工作气压上升至 22×133 Pa,即加入缓冲气体后,最佳工作气压增加了。这是由于缓冲气体的加入减小了光抽运远红外激光的“瓶颈效应”,推迟了抽运饱和的出现,远红外激光输出可以在原来的最佳工作气压下持续增加,在更高的工作气压下达到最大输出。

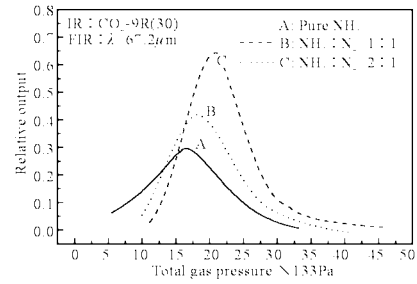


图 5 输出光强与工作气压的实验测量曲线

Fig. 5 Relative FIR output vs the total operating gas pressure (measured)

5 实验结果

图 5 为对比纯 NH₃ 工作条件下,相对加入不同比例的缓冲气体 N₂,测量其输出光强及工作气压的实验结果,可以看出,1) 加入适当比例的缓冲气体,可以提高输出光强,当 NH₃:N₂=1:1 时,远红外输出光强达到最大;2) 加入缓冲气体后,工作气压升高,图中纯 NH₃ 工作时工作气压为 17×133 Pa,当 NH₃:N₂=1:1 时,工作时工作气压升至 22×133 Pa。以上实验结果与理论计算结果吻合得很好。

参 考 文 献

- 1 X. Luo, H. Li. The optimum operation of an unified mini-optically pumped NH₃ submillimeter wave laser [J]. *Int. J. IR&MW*, 1999, **20**(2):203~212
- 2 C. O. Weiss, M. Fourer, C. Gastaud *et al.*. Optically pumped far-infrared ammonia lasers, C-Reviews of Infrared and Millimeter Waves, ed. by K. J. Button *et al.* [M]. NY: Plenum Press, 1984, vol. 2. 277~335
- 3 T. Y. Chang, C. Lin. Effects of buffer gases on an optically pumped CH₃F FIR laser [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(4):362~369
- 4 T. Okada, R. Behn, M. A. Dupertuis *et al.*. Numerical analysis of an optically pumped D₂O far infrared laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(6):2987~2995
- 5 H. Li, X. Luo *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 X. Huang, X. Luo, H. Li *et al.*. Effect of buffer gas on the output of optically pumped NH₃ far-infrared cavity laser [J]. *Int. J. IR&MMW*, 2000, **21**(12):2015~2021