

文章编号: 0258-7025(2010)02-0404-04

多纵模光抽运重水亚毫米波激光的频谱特性

杨 扬 孟 猛 罗锡璋

(中山大学信息科学与技术学院, 广东 广州 510275)

摘要 采用半经典密度矩阵理论计算了单纵模(SLM)和多纵模(MLM)脉冲光抽运重水(D₂O)分子亚毫米波(SMMW)激光三能级系统的抽运信号的吸收系数和亚毫米波激光信号的增益系数,利用迭代法数值计算了亚毫米波激光信号的频谱特性和输出光强,对频谱精细结构和激光过程的规律进行了深入的研究和比较。研究结果表明,在超辐射情况下,多纵模光抽运 D₂O 与单纵模光抽运相比,前者的亚毫米波激光谱线较宽;在腔式的情况下,单纵模和多纵模光抽运 D₂O 的亚毫米波激光谱线都进一步展宽,在频谱曲线上均呈现与多纵模结构对应的多个尖峰。

关键词 激光技术;亚毫米波激光器;多纵模光抽运;重水;频谱特性;多拉曼相互作用

中图分类号 TN248.2⁺2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103702.0404

Spectral Characteristics of Multi-Longitudinal-Mode Optically Pumped D₂O Submillimeter Wave Laser

Yang Yang Meng Meng Luo Xizhang

(School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract Based on the semi-classical density matrix theory, the gain coefficients of infrared (IR) pumping signal and submillimeter wave (SMMW) laser signal for a three-energy-level system in single-longitudinal-mode (SLM) and in multi-longitudinal-mode (MLM) pulse optically pumped D₂O SMMW laser are deduced. The spectral characteristics and output power are calculated by numerical iteration method. The laser processes and the fine structures in spectral characteristics are studied and compared in detail. MLM optically pumped D₂O superradiant laser produces a wider SMMW laser line than SLM pumped laser does. In both SLM and MLM optically pumped D₂O cavity lasers, SMMW laser lines broaden further and narrow peaks will appear in their spectrum. These narrow peaks correspond to the MLM structure of the SMMW laser line. The wide band spectrum and MLM structure characteristics provide a theoretical basis for frequency tunable SMMW laser.

Key words laser technique; submillimeter wave laser; multi-longitudinal-mode optically pumping; D₂O; spectral characteristics; multi-Raman mutual effect

1 引 言

光抽运亚毫米波(SMMW)激光是目前产生相干亚毫米波信号的最重要、最有效的技术之一。重水(D₂O)是光抽运亚毫米波激光的主要工作物质,波长为385 μm的谱线是其特征谱线,已应用于测定等离子体的温度、密度、均匀性等参数,有很好的应用价值^[1]。近年来已有不少文章报道了光抽运 D₂O 分子亚毫米波激光的研究,包括光抽运 D₂O 气体产

生亚毫米波激光的半经典理论分析^[2]、光抽运光强的影响^[3]和紧凑型超辐射 D₂O 亚毫米波激光器的研制及其工作气体最佳压强的研究^[4]等。然而研究工作大多是基于单纵模(SLM)TEA-CO₂激光抽运源进行的^[5]。要获得单纵模运转的 TEA-CO₂激光抽运,其技术复杂、设备庞大、效率低。多纵模(MLM)抽运技术则简单得多,效率也高得多,因而更有价值。本文在半经典密度矩阵理论上,计

收稿日期:2008-12-30;收到修改稿日期:2009-05-11

基金项目:广东省自然科学基金(021757)资助项目。

作者简介:杨 扬(1984—),男,硕士研究生,主要从事亚毫米波技术方面的研究。E-mail: isde06@mail.sysu.edu.cn

导师简介:罗锡璋(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事亚毫米波技术和应用方面的研究。

E-mail: isslxz@mail.sysu.edu.cn(通信联系人)

算和比较了单纵模、双纵模及三纵模光抽运 D_2O 分子亚毫米波的频谱特性和输出功率, 讨论了其成因和规律。研究的结果对丰富亚毫米波激光理论, 促进亚毫米波激光技术的应用有积极的作用。

2 理论模型

2.1 单纵模光抽运 D_2O 分子亚毫米波激光的三能级模型

图 1(a)是在三能级系统近似的条件下, 以单纵模 $CO_2-9R(22)$ 谱线抽运 D_2O 分子系统时的量子跃迁过程, 与 $CO_2-9R(22)$ 谱线 (角频率 $\omega_p = 1079.9136 \text{ cm}^{-1}$) 匹配的 D_2O 分子三个能级分别为^[6,7]

$$\begin{cases} E_1(5_{33}) = 267.58083 \text{ cm}^{-1}, \\ E_2(4_{13}) = 1321.41375 \text{ cm}^{-1}, \\ E_3(4_{22}) = 1347.39375 \text{ cm}^{-1}. \end{cases}$$

抽运吸收过程发生在 $E_1(5_{33}) \rightarrow E_3(4_{22})$, 亚毫米波激光辐射发生在 $E_3(4_{22}) \rightarrow E_2(4_{13})$, 辐射波长为 $385 \mu\text{m}$ 。

2.2 多纵模光抽运 D_2O 分子亚毫米波激光的三能级模型

对于多纵模 $CO_2-9R(22)$ 谱线, 各纵模的角频率分别为 $\omega_{p0}, \omega_{p1}, \dots, \omega_{pn}$, 相邻纵模的间隔为 100 MHz , 单纵模和多纵模抽运下的 D_2O 三能级分子系统中的受激拉曼 (Raman) 过程如图 1(b) 所示^[8,9]。

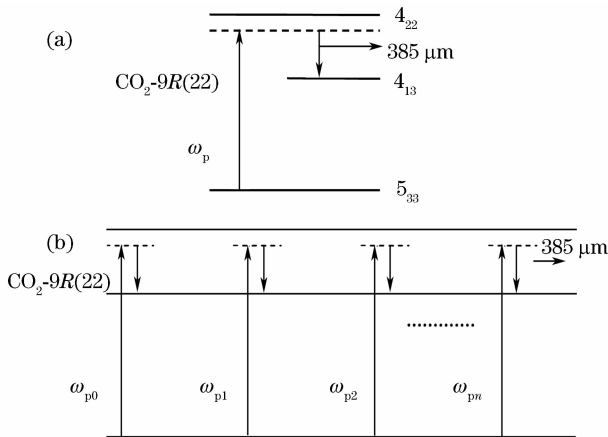


图 1 单纵模(a)和多纵模(b)光抽运 D_2O 分子亚毫米波激光的三能级模型

Fig. 1 Three-energy-level model of SLM (a) and MLM (b) optically pumped D_2O SMMW laser

2.3 半经典密度矩阵方程及求解过程

单纵模和多纵模光抽运 D_2O 分子亚毫米波激光过程可以用半经典密度矩阵方程来描述^[10,11]

$$\begin{cases} i\hbar \frac{\partial \rho_{jk}}{\partial t} = \hbar \omega_{jk} \rho_{jk} + [H', \rho]_{jk} - \frac{i\hbar}{\tau_{jk}} \rho_{jk}, \\ i\hbar \frac{\partial \rho_{jj}}{\partial t} = [H', \rho]_{jj} + \frac{i\hbar}{\tau_{jj}} (\rho_{jj}^e - \rho_{jj}), \\ j, k = 1, 2, \dots, n; j \neq k \end{cases} \quad (1)$$

式中 ρ 为密度矩阵, ρ_{jj}, ρ_{jk} 分别为其对角元素和非对角元素, ρ_{jj}^e 为热平衡状态下的第 j 能级粒子集居度; τ_{jj} 和 τ_{jk} 分别为分子的纵向弛豫时间和横向弛豫时间; H' 为分子系统与激光场相互作用的哈密顿量。在电偶极近似条件下, $H' = -\mu E(t)$ 。

经过繁杂的计算, 可以得到光抽运 D_2O 分子亚毫米波激光信号的增益系数 G_s 和抽运信号的增益系数 $G_{p0}, G_{p1}, \dots, G_{pn}$

$$\begin{cases} G_s = -\frac{2N_v \mu_s^2 T_a}{\epsilon_0 \eta \hbar B_s} \omega_s \text{Im}(P_{32}) - \alpha_s, \\ G_{p0} = -\frac{2N_v \mu_p^2 T_a}{\epsilon_0 \eta \hbar B_{p0}} \omega_p \text{Im}(P_{130}) - \alpha_{p0}, \\ \vdots \\ G_{pn} = -\frac{2N_v \mu_p^2 T_a}{\epsilon_0 \eta \hbar B_{pn-1}} (\omega_p + n\delta) \text{Im}(P_{13n}) - \alpha_{pn}, \end{cases} \quad (2)$$

式中 N_v 为有效分子数密度, B_s 为亚毫米波信号的拉比 (Rabi) 频率与横向弛豫时间的乘积, $B_{p0}, B_{p1}, \dots, B_{pn}$ 为各纵模抽运信号的 Rabi 频率与横向弛豫时间的乘积, T_a 为横向弛豫时间, ϵ_0 为真空介电常数, η 为介质的折射率, c 为光速, \hbar 为普朗克常数, ω_s 为亚毫米波信号的频率, ω_p 为抽运信号的频率, δ 为抽运激光两相邻纵模间的频差, $\alpha_s, \alpha_{p0}, \alpha_{p1}, \dots, \alpha_{pn}$ 为信号的损耗系数, P_{ijk} 为各密度矩阵元素, 皆为时间的缓变函数。

图 1(b) 中的多纵模光抽运亚毫米波激光过程可以简化为多组独立的三能级系统的光抽运激光过程, 而总的增益满足叠加原理^[12,13], 即由 N 组独立的三能级组成的系统的总增益为

$$G = \sum_{i=1}^N G_i, \quad (3)$$

G_i 由第 i 组三能级系统的密度矩阵方程决定。

$G_s, G_{p0}, \dots, G_{pn}$ 及沿激光管各处抽运信号强度和亚毫米波激光信号强度以及输出信号的频谱特性可以根据 (2), (3) 式由数值迭代计算得到^[14]

$$\begin{cases} I_{pn} = I_{pn0} \exp(G_{pn} Z), \\ I_s = I_{s0} \exp(G_s Z). \end{cases} \quad (4)$$

3 计算结果和讨论

3.1 多纵模光抽运超辐射 D_2O 亚毫米波激光频谱特性

单纵模光抽运、双纵模 (DLM) 光抽运、三纵模

(TLM)光抽运这3种情形下以 CO_2 -9R(22)谱线抽运 D_2O 气体分子的超辐射亚毫米波激光输出频谱特性曲线如图2所示。

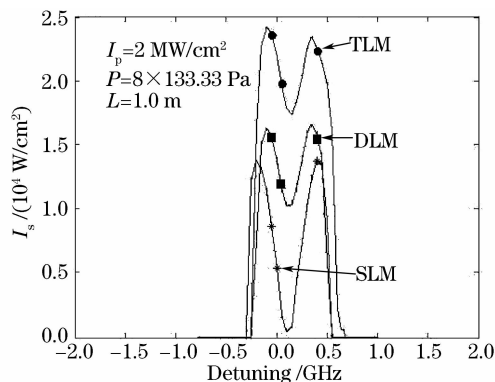


图2 单纵模和多纵模光抽运 D_2O 超辐射亚毫米波激光频谱曲线

Fig. 2 Spectral characteristics of SLM and MLM optically pumped D_2O super-radiant SMMW laser

从图2可以看出,单纵模抽运的亚毫米波输出频谱特性曲线上出现两个相邻很近的波峰,这两个峰实际是对应于 D_2O 分子跃迁的AC-Stark分裂双峰。在抽运激光电场的作用下,AC-Stark效应导致工作气体 D_2O 出现了能级分裂,同时由于抽运频率与能级1,3之间的频率存在频差 $\delta = -320$ MHz,对于大功率脉冲抽运系统而言,会产生受激Raman辐射^[15]。最终输出信号产生了一条激光线和一条Raman线,呈现双峰结构。证实了AC-Stark效应和Raman效应对光抽运亚毫米波频谱特性的影响是不容忽视的^[16,17]。双纵模激光抽运过程实际上涉及了两个受激Raman辐射过程,由于两个纵模的间隔很小(约100 MHz),其各自对应的亚毫米波频谱几乎相同。在每个Raman过程中,AC-Stark效应使亚毫米波频谱产生重叠,这些交叠的频谱分量作为本底信号被进一步放大而显著增大,产生了强烈的相互增强的效应,原先分立的双峰完全连接起来,凹陷变浅变平,形成了连续频带,频谱大大展宽,输出功率(频谱曲线下包围的面积)增加。三纵模激光抽运过程中,多个Raman过程的相互作用更进一步加强,结果输出的频谱更宽,输出功率更大。可以预见,在抽运总功率不变的条件下,随着抽运纵模数的增加,输出的亚毫米波激光频谱更宽,更平缓,功率也更高,频谱的加宽会导致谱线纯度的下降。

3.2 多纵模光抽运腔式亚毫米波激光的频谱特性

图3为单纵模抽运和多(双或三)纵模抽运 D_2O

腔式亚毫米波激光信号的频谱特性曲线,比较超辐射的亚毫米波激光频谱(图2),峰与峰之间的凹陷被填平了,谱线进一步展宽,输出功率提高了,最显著的差别是各曲线都出现了多尖峰结构。

激光谐振腔进一步加强了光抽运过程的多Raman相互增强作用,亚毫米波激光频谱进一步加宽展平,而曲线上的多尖峰结构则对应着多纵模的亚毫米波激光输出。长为 L 的激光谐振腔中(F-P腔),相邻两个纵模的间隔为

$$\Delta\nu = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L}.$$

当腔长 $L = 1$ m时,此 $\Delta\nu$ 值为150 MHz,在图3中的两相邻小峰的间距均约为150 MHz,因而这些小尖峰对应着亚毫米波激光的多纵模结构。

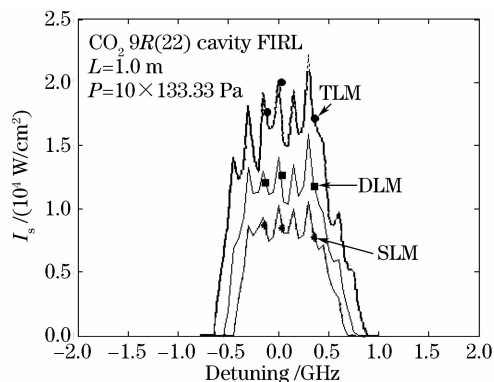


图3 单纵模和多纵模光抽运 D_2O 腔式亚毫米波激光频谱特性比较

Fig. 3 Comparison of spectral characteristics of SLM and MLM optically pumped D_2O cavity SMMW laser

从图3中还可以看出,随着抽运的纵模数量的增加,这些小尖峰数量不变,也即亚毫米波激光的纵模数不变,但每个小峰变尖锐了(幅度增高,半峰全宽不变),这意味着在每个小尖峰的范围,亚毫米波激光的单色性很纯,因而配合其他选择手段(如标准具外腔选模),便可以得到单色性很好、在较宽的范围内频率可调谐的亚毫米波激光输出。

3.3 多纵模光抽运 D_2O 分子亚毫米波激光工作参数的影响

研究发现不同抽运功率、不同激光管长和工作气体压强等参数下亚毫米波激光的频谱特性和输出功率仍保持上述频谱特性规律不变;随着抽运功率的增加,只要增加管长或增加工作气体压强便可以获得相应的最佳抽运状态,输出亚毫米波激光也得到加强;当保持抽运功率不变,最佳工作气压与管长成反比。这些规律与已有报道的单纵模抽运 D_2O 分子亚毫米波激光运转规律相似^[2,3]。

4 结 论

利用半经典密度矩阵理论计算了单纵模和多纵模脉冲光抽运 D_2O 分子亚毫米波激光三能级系统的抽运信号的吸收系数和激光信号的增益系数。数值计算了亚毫米波激光信号的频谱特性。研究结果表明,在超辐射情况下,多纵模光抽运 D_2O 得到的亚毫米波激光谱线较宽;在腔式情况下,频谱曲线呈现出多纵模结构的频谱特性。

参 考 文 献

- Ran Yong, Zhang Ping, Zhang Xun *et al.*. The progress of study in optically pumped submillimeter wave laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(4): 449~453
冉 勇,张 萍,张 讯等. 光泵亚毫米波激光的研究进展[J]. 光电子·激光, 2000, **11**(4):449~453
- He Zhihong, Yao Jianquan, Shi Huafeng *et al.*. Semiclassical theory of optically pumped D_2O gas tera-Hz laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(10):5802~5807
何志红,姚建铨,时华锋等. 光泵重水气体产生 THz 激光的半经典理论分析[J]. 物理学报, 2007, **56**(10):5802~5807
- He Zhihong, Yao Jianquan, Shi Huafeng *et al.*. Effect of pump laser intensity on optically pumped D_2O gas terahertz laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11):6451~6456
何志红,姚建铨,时华锋等. 抽运光强度对光学抽运重水气体产生 THz 激光的影响分析[J]. 物理学报, 2007, **56**(11):6451~6456
- He Zhihong, Yao Jianquan, Ren Xia *et al.*. Experimental and theoretical research on a compact superradiant optically pumped D_2O gas terahertz laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(1):34~37
何志红,姚建铨,任 侠等. 紧凑型超辐射重水气体 THz 激光器的研制[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(1):34~37
- Wang Yuanhu, Qu Yanchen, Zhao Weijiang *et al.*. Compact single longitudinal mode tunable TEA CO_2 laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(Suppl. 1):28~31
王元虎,曲彦臣,赵卫疆等. 小型可调谐单纵模 TEA CO_2 激光器[J]. 光学学报, 2008, **28**(增刊 1):28~31
- G. Mellau, S. N. Mikhailenko, E. N. Starikova *et al.*. Rotational levels of the (000) and (010) states of D_2O from hot emission spectra in the $320\sim 860\text{ cm}^{-1}$ region [J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2004, **224**(1):32~60
- N. Ioli, A. Moretti, D. Pereira *et al.*. Observation and assignment of D_2O FIR laser lines optically pumped by a waveguide CO_2 laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(8):1884~1888
- J. Y. Qin, Y. Ran, X. Z. Luo *et al.*. Spectral characteristics of Raman emissions from miniature pulsed optically pumped far-infrared laser [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 1999, **20**(9):1647~1654
- Xiao Huang, Yanxiang Bao, Xizhang Luo *et al.*. Comparison between single-longitudinal-mode and two-longitudinal-mode pumping cavity OPSMMWL [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 2002, **23**(7):1013~1018
- M. III Sargent, M. O. Scully, W. E. Lamb. *Laser Physics* [M]. Boston: Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1974. 189~191
- Xun Zhang, Xiao Huang, Xizhang Luo *et al.*. Raman effect in two-longitudinal-mode superradiant terahertz laser [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **22**(4):509~519
- X. Luo, X. Zheng, C. Lin. Study of miniature optically pumped NH_3 FIR cavity laser [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 1995, **16**(12):2163~2172
- Qin Jiayin, Luo Xizhang, Zheng Xingshi *et al.*. Study on optically pumped NH_3 FIR laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(3):262~267
秦家银,罗锡璋,郑兴世等. 光泵 NH_3 分子远红外激光研究[J]. 光学学报, 1998, **18**(3):262~267
- 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
- C. H. Townes, A. L. Schlow. *Microwave Spectroscopy* [M]. New York: Dover Publication Inc., 1975. 20
- W. Paul, W. J. Mulligan, R. Erickson. $385\ \mu\text{m}$ D_2O laser linewidth measurements to -60 dB [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**(1):4~7
- C. H. Townes, A. L. Schlow. *Microwave Spectroscopy* [M]. New York: Dover Publication Inc., 1975. 30