

双纵模光泵亚毫米波激光中的能量交换过程^{*}

张 萍, 梁奂晖, 张 迅, 丘茹曼, 罗锡璋

(中山大学电子与通信工程系 // 超快速激光光谱学国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘 要: 采用半经典密度矩阵理论与迭代数值计算模型求解了九能级 NH₃ 分子系统激光介质的增益系数; 研究了双纵模光泵亚毫米波激光器的能量交换过程; 计算并讨论了有关参数如工作气压、腔长等条件对输出光强的影响, 得出了优化规律.

关键词: 亚毫米波激光器; 双纵模泵浦; 能量交换过程

中图分类号: O433.54 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) 06-0011-05

光泵亚毫米波激光器 (OPSMMWL) 是目前亚毫米波段中常用的相干信号源, 传统的方法大都采用单纵模泵浦源的方案, 即用单纵模激光器泵浦分子技术, 产生亚毫米波激光信号. 而单纵模的选模技术相当复杂, 其效率低, 调谐范围窄, 器件庞大, 直接限制了光泵亚毫米波激光器的小型化、大功率输出和大范围的频率调谐. 为此, 不少学者对双纵模 OPSMMWL 进行了研究: 1984 年, Dupertuis 等^[1]首次从理论上研究了多纵模 OPSMMWL 的增益特性; 林贻^[2]等^[2]计算了超辐射双纵模 OPSMMWL 的频谱特性; 罗锡璋等^[3]实验验证了林贻^[2]等人的理论结果; 邹晓蓉等^[4]计算了小型腔式双纵模 OPSMMWL 的频谱特性; 罗锡璋等^[5]对小型腔式双纵模 OPSMMWL 工作参数的优化进行了理论计算. 他们的研究表明, 适当的调节激光器的工作参数, 双纵模 OPSMMWL 可产生单纵模亚毫米波激光输出, 而且较之单纵模 OPSMMWL, 它可获得更大的输出功率.

为了减小亚毫米波激光器的体积, 提高其能量交换的效率, 本文以双纵模 CO₂-9R (16) 光泵 NH₃ 分子 90.4 μm 亚毫米波为研究对象, 研究了泵浦信号与亚毫米波信号之间的能量交换过程, 总结了亚毫米波激光信号在能量交换过程中的优化规律. 这一工作对于深化了解双纵模光泵亚毫米波激光机理, 进一步提高其能量转换效率和输出功率以及对于亚毫米波激光器参数优化的

研究有重要意义.

1 理论模型

1.1 双纵模光泵亚毫米波激光的三能级近似

实际的光泵亚毫米波激光过程为受激 Raman 过程. 图 1 是在三能级系统近似的条件下, 在角频率分别为 ω_{p0} 和 ω_{p1} 两个纵模泵浦时, 系统的量子跃迁过程.

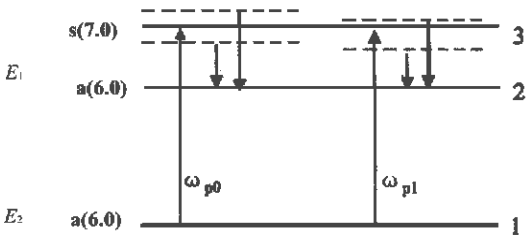


图 1 双纵模泵浦时 NH₃ 分子系统中的量子跃迁过程

Fig. 1 Quantum transitions in NH₃ molecular system by two-mode pumping

上述分子系统的激光过程可用密度矩阵运动方程描述为:

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{\partial \rho_{jk}}{\partial t} &= \hbar \omega_{jk} \rho_{jk} + [H, \rho]_{jk} - \frac{i\hbar}{\tau_{jk}} \rho_{jk} \\ i\hbar \frac{\partial \rho_{ji}}{\partial t} &= [H, \rho]_{ji} - \frac{i\hbar}{\tau_{ji}} (\rho_{ji} - \rho_{ji}^e) \end{aligned} \quad (1)$$

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

其中, ρ 为密度矩阵, ρ_{ji} , ρ_{jk} 分别为其对角元和

^{*} 基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (970139, 001173)
收稿日期: 2001-03-13; 作者简介: 张萍 (1975-), 女, 硕士研究生; 通讯联系人: 罗锡璋.

非对角元; ρ_{jj}^e 为热平衡状态下的 j 能级粒子集居度; τ_{jj} , τ_{jk} 分别是分子纵向弛豫和横向弛豫时间; H' 为分子系统与激光场相互作用的哈密顿量, 在电偶极近似下, $H' = -\mu E(t)$, μ 为分子跃迁偶极矩, $E(t)$ 为高频电磁场. 经过繁复的求解过程, 可得三能级系统亚毫米波信号增益系数 G_s 和泵浦信号的增益系数 G_{p0} , G_{p1} .

1.2 双纵模光泵亚毫米波激光的九能级模型

与 CO₂-9R (16) 谱线匹配的 NH₃ 分子振动跃迁为 a→sR (6, 0), a→sR (6, 1) 和 a→sR (6, 2). 为了准确地描述分子系统的各种跃迁及相互作用, 采用九能级近似描述其激光过程. 运用增益叠加原理^[6], 九能级系统的增益系数等于各组三能级的增益系数之和, 即

$$G = \sum_{i=1}^3 G_i \quad (6)$$

其中, G_i 由第 i 组三能级系统的密度方程矩阵决定.

2 计算结果与讨论

2.1 第一次正向传输时亚毫米波激光器中的能量交换过程

图 2 是双纵模泵浦下, 不改变工作气压和泵浦功率等工作参数, 泵浦信号和亚毫米波激光信号在第一次正向传输过程中在腔中不同位置的能量分布曲线 (图 2a) 与增益系数分布曲线 (图 2b). 为了比较完整的研究信号在腔中的能量交换过程, 激光器的腔长的取值要略长于最佳腔长, 本文中取 0.5 m.

由图 2a 可知, 泵浦激光的两个纵模对应的泵浦光强曲线 I_{p1} , I_{p2} 基本重合, 且 I_{p1} , I_{p2} 在腔中沿 z 方向 (光轴方向) 不断衰减; 而亚毫米波信号光强 I_s 沿 z 方向不断增大, 并在 0.287 m 处达到其峰值, 这表明泵浦激光与亚毫米波激光在进行能量交换. 在 0.287 m 以后, 泵浦光强 I_{p1} , I_{p2} 减小到使腔中余下气体 NH₃ 分子不再被激活, 能量交换停止, 使得亚毫米波信号 I_s 不断减小. 从介质增益系数来看 (图 2b), 泵浦信号两个纵模的增益系数的绝对值 ($|G_{p1}|$, $|G_{p2}|$) 沿 z 方向越来越大, 即 I_{p1} , I_{p2} 的相对衰减率越来越大; 对亚毫米波信号的增益系数 G_s 而言, 起初沿 z 方向逐渐增大, 当达到其最大值后又急剧减小. 这表明在激光器的起始段 (完

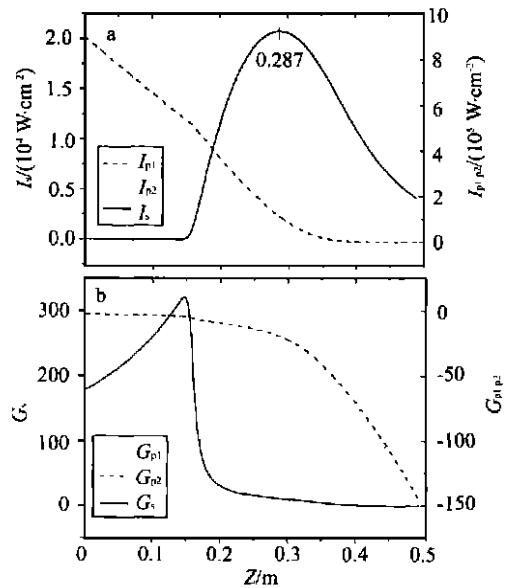


图 2 第一次正向传输过程中泵浦激光和亚毫米波激光在腔中的能量分布

Fig 2 The energy distributions of pump signals and SMMW laser signal in optically pumped super-radiant laser
a 能量分布曲线; b 增益系数分布曲线

全激活区), 亚毫米波信号光强的相对增长率很大. 但由于亚毫米波信号的起始光强很弱 (只有 $1 \times 10^{-13} \text{ W/cm}^2$), 因此图 2a 中 I_s 曲线的起始光强很低. 当 G_s 减小到接近阈值时 (图 2b), I_s 达到最大值 (图 2a), 随后由于弛豫过程与亚毫米波信号的自吸收效应的作用, G_s 继续减小, 最终变为负值 (由于其绝对值很小, 在图上看来好像一直为 0), I_s 将不断减小.

由此可见, 在第一次正向传输时, 亚毫米波激光介质可分为激活区和饱和区. 在激活区, G_s 大于阈值, I_s 得到放大, 泵浦激光两个纵模的能量有效地转换为亚毫米波激光能量, 彼此不存在竞争, 能量的转换过程在这段激光介质内完成. 在饱和区, 亚毫米波激光介质从泵浦激光的两个纵模中得到的能量已不足以弥补损耗的能量, 导致 G_s 等于甚至小于阈值, I_s 达到饱和状态后逐渐减小.

2.2 第一次逆向传输时亚毫米波激光器中的能量交换过程

逆向传输计算中的 z 轴与前述相同, 即计算是从 0.5 ~ 0 m. 且亚毫米波的起始信号是输出耦合器的反射信号. 图 3 是在双纵模泵浦下, 亚毫米波激光信号在腔中第一次逆向传输过程中其

光强 I_s (图 3a) 与增益系数 G_s (图 3b) 的分布情况. 在第一次反射后, 泵浦信号的能量分布与吸收系数分布的情况与第一次正向传输时相同, 其分布规律见图 2.

由图 3a 可见, 逆向传输的亚毫米波激光信号的光强 I_s 在反射后的初始阶段增幅很小, 到 0.4m 以前才开始有显著的增加, 其对应的增益系数 G_s (图 3b) 则在 0.38m 左右的很短的一段距离里, 就经历了一个峰值, 这个峰表明了亚毫米波信号的急剧增幅过程. 此后随着增益系数 G_s 的持续下降亚毫米波信号增大的趋势变缓, 到腔的初始端 (原点), 亚毫米波信号的光强 I_s 达到最大. 参考图 2 可知, 泵浦激光与亚毫米波激光的能量交换基本上是在 0.4m 以前的激光介质内完成的. 因此在第一次逆向传输过程中, 只有到 0.4m 前才有较多的泵浦激光将能量传递给亚毫米波激光, 使得亚毫米波激光信号显著增大.

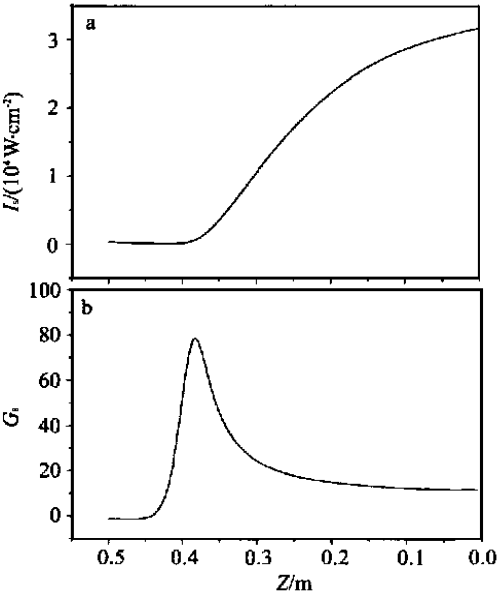


图 3 第一次逆向传输过程中亚毫米波激光在腔中的能量分布
Fig. 3 The energy distribution of SMMW laser in the first backward transmission

对比图 2a 和图 3a 可以看到, 反射回来的亚毫米波激光信号的光强的最大值要比正向传输过程中的亚毫米波激光信号光强的最大值要大得多, 可见亚毫米波激光在腔中的往返放大作用是不可忽视的.

2.3 最佳腔长 L_{opt}

上述的能量交换过程须在腔中往返多次后, 才能最终得到稳定的亚毫米波输出信号. 图 4 是在双纵模泵浦下, 泵浦激光和亚毫米波信号最终沿腔长稳定的能量分布曲线. 从图中可知, 两个纵模的泵浦光强在腔内沿 z 轴方向不断减小, 亚毫米波激光信号的光强从原点处 (腔初始端) 沿 z 轴不断增大到峰值后就不断下降. 比较图 2a 可见, 图 2a 中在腔中 0~0.15m 的一段区域内, 亚毫米波信号光强一直很低, 直到 0.15m 后才开始有明显增加, 并在 0.287m 处达到其峰值 ($20\,770\text{ W/cm}^2$); 而图 4 中亚毫米波信号光强从原点就开始不断增大, 在 0.23m 处达到峰值 ($24\,532\text{ W/cm}^2$). 这是因为图 4 中的亚毫米波激光输出光强是亚毫米波激光在腔中多次往返放大叠加后的结果. 这说明腔式亚毫米波激光器可缩短最佳腔长.

同时, 我们还可以看到, 图 4 中峰值所对应的腔长 (0.23m) 即为此亚毫米波激光器的最佳腔长 L_{opt} . 对于在一定的泵浦功率和工作气压等工作参数下工作的激光器, 在腔长为 L_{opt} 时, 激光器中泵浦激光与亚毫米波激光的能量交换最充分, 亚毫米波激光信号的输出光强为最大; 若腔长小于 L_{opt} , 泵浦激光和亚毫米波激光的能量交换过程尚未充分完成, 从而达不到最佳交换效率; 若腔长大于 L_{opt} , 泵浦激光和亚毫米波激光的能量交换过程早已完成, 此后由于亚毫米波激光的驰豫过程与自吸收效应, 过长的一段工作气体会使亚毫米波信号减小, 也不能达到能量的最佳交换.

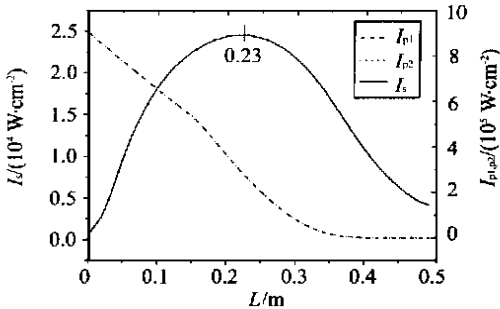


图 4 能量交换与最佳腔长的关系
Fig. 4 Energy exchange and optimum length of cavity

2.4 最佳工作气压 p_{opt}

图 5 是在双纵模泵浦下, 不同腔长的输出光强随工作气压变化的理论曲线. 由图中可以看

到, 在双纵模光泵 NH_3 分子系统中, 一定腔长的激光器存在一个最佳工作气压. 而且, 随着腔长的增大, 最佳工作气压将减小. 从上述的讨论可知, 工作气压越高, 气体分子密度越大, 参与激光过程的分子数也越多, 泵浦激光与亚毫米波激光信号之间的能量交换就越快, 最佳激光腔长也就越短. 需要指出的是, 无需同时考虑最佳腔长 L_{opt} 与最佳工作气压 p_{opt} . 也就是说, 对于给定的工作气压 p , 存在其对应的最佳腔长 L_{opt} ; 而对于给定的腔长, 则存在着它对应的最佳工作气压 p_{opt} .

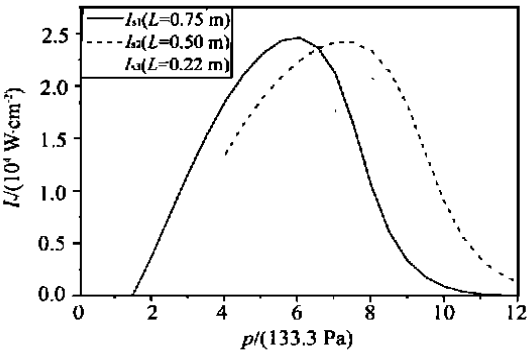


图 5 不同腔长的输出光强与工作气压的关系
Fig 5 The dependence of gas pressure on length SMMW laser cavity

2. 5 泵浦功率对腔长的影响

影响腔式双纵模光泵亚毫米波激光器的能量交换过程的因素有很多, 泵浦功率密度就是其中之一. 因此, 我们也研究了在双纵模泵浦下, 不同泵浦功率的亚毫米波激光的输出光强与腔长的关系曲线, 如图 6 所示.

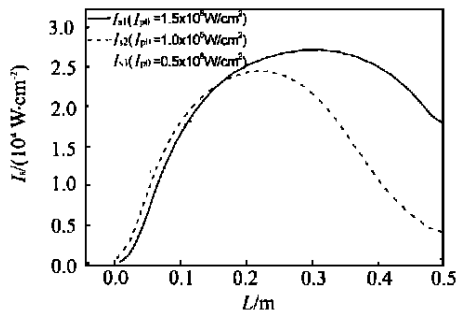


图 6 不同泵浦功率的输出光强与腔长的关系
Fig. 6 The effect of pump power on the optimum length of SMMW laser cavity

在不同的泵浦功率下, 双纵模亚毫米波激光中的能量交换过程与上述的基本规律相似. 由图

中可知, 在工作气压等其他工作参数一定的情况下, 随着泵浦功率的增大 (NH_3 分子增多), 亚毫米波激光器的最佳腔长将增大, 以确保能量交换最充分. 换句话说, 对于给定腔长的亚毫米波激光器, 当泵浦功率增大时, 若使输出光强最大, 最佳工作气压将增大.

3 结束语

本文详细计算了腔式双纵模光泵亚毫米波激光中泵浦信号与亚毫米波信号间的能量交换过程, 总结了亚毫米波信号在能量交换过程中的优化规律. 这对于进一步提高光泵亚毫米波激光器的能量转换效率和输出功率, 以及对于亚毫米波激光器的参数优化和小型化的研究具有重要意义.

参考文献:

[1] DUPERTUIS M A, RAINER R, SALOMAA E. Two-mode optical pumping of a laser[J] . IEEE J, 1984, QE-20: 440.
[2] LIN Y K, QIU B S, ZHOU J J. Theoretical study of multimode optically pumped NH_3 FIR laser[J] . Int J IR&MMW, 1989 10(8): 979.
[3] 罗锡璋, 郑关世, 丘秉生. 多纵模光泵远红外激光的实验研究[J] . 红外研究, 1990, 9(6): 979.
[4] ZOU X R, LUO X Z, QIN J Y. Spectral characteristics of miniature two-longitudinal-mode optically pumped FIR laser[J] . Int J IR&MMW, 1998, 19(11): 1561.
[5] LUO X Z, QIN J Y, ZOU X R. Theoretical study of optimum operation of two-longitudinal-mode optically pumped miniature FIR laser[J] . Int J IR&MMW, 1999, 20(11): 1907.
[6] 林春光. 小型腔式光泵远红外激光器的研究[D] . 广州: 中山大学, 1995.

Energy Exchange Process in Two longitudinal mode
Optically Pumped Terahertz Laser

ZHANG Ping, LIANG Huan hui, ZHANG Xun, QIU Ru man, LUO Xi zhang

(Department of Electronics and Communication Engineering //State Key Laboratory of
Ultrafast Laser Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the semi classical density matrix equations and numerical iteration calculation, the gain coefficient of nine energy level NH₃ molecular system was figured out. Energy exchange process in two longitudinal mode optically pumped submillimeter wave laser was studied in detail. Laser output intensity was calculated and discussed in case of different operating parameters such as operating gas pressure, length of laser cavity. Finally the optimization rules were concluded.

Keywords: submillimeter wave laser (SMMWL); two longitudinal mode optically pumping; energy exchange process; optimum operation

· 简 讯 ·

中山大学获准国家基金项目再创历史新高

2001 年度国家自然科学基金项目评审结果日前已公布, 中山大学 (广州南校区) 获准 59 项, 资助金额 1551.5 万元, 其中面上项目 53 项, 经费 922.5 万元, 在全国资助单位排名榜上排第 14 位; 重点项目 4 项, 经费 509 万元; 杰出青年科学基金 1 项, 经费 80 万元. 另外, 还获得香港青年学者合作基金 (即原杰出青年基金 B 类) 1 项, 经费 40 万元.

2001 年中山大学获准的项目, 无论面上项目, 还是重点项目, 均为历史最好水平. 2001 年面上项目比最高年份 (1998 年) 的 46 项增加 7 项, 经费增加 532.1 万元. 与 2000 年相比 (经费 732 万元), 总资助经费增长 112%.

今年中山大学申报面上项目 217 项 (其中自由申请项目 185 项, 青年基金项目 32 项), 获准 53 项 (其中自由申请项目 42 项, 青年基金项目 11 项), 获准率 24%, 高于全国平均获准率的 18.75%. 获准项目中, 数理科学占 13 项, 化学科学 6 项, 生命科学 16 项, 地球科学 9 项, 工程与材料科学 2 项, 信息科学 4 项, 管理科学 3 项.

(摘自 中山大学《科技信息》第 11 期)