

超小型OPFIRL的理论和实验研究

林贻堃 罗锡璋 庞 晓

(无线电电子学系)

摘 要

在高气压和对泵浦场强及亚毫米波远红外激光场强不作任何限制的条件下,求解了NH₃分子三能级系统的密度矩阵方程。用迭代法计算了5 cm至1.5 cm超短样品管的OPFIRL的输出远红外激光能量密度。实验研制的4支样品管都成功地产生了亚毫米波激光。

关键词 亚毫米波激光,超小型OPFIRL

1 引 言

光泵远红外激光研究成功对亚毫米波远红外激光技术的发展和應用起着极大的推动作用。应用OPFIRL装置,更换不同的工作气体和泵浦光的波长,可以产生从毫米至远红外范围内几千条谱线的激光。然而这些激光都是分立的窄谱线,其频率是不可调的,而且这种激光器体积庞大,管长往往都在150 cm以上。这两个缺点极大地限制了光泵亚毫米波激光器的应用,尤其在航天技术中的应用^[1]。本文在罗锡璋、邹巨佳^[2,3]等人的工作基础上,从理论和实验研究了激光器样品管长小于5 cm条件下的工作状况。与常规的OPFIRL一样,本文只研究超短管长光泵超辐射(ASE)过程亚毫米波激光的产生问题。

2 超小型光泵气体分子亚毫米波激光理论研究

光泵亚毫米波激光过程是泵浦激光、亚毫米波激光与分子系统在一定工作条件下相互相互作用的过程。系统内的变化规律可以用半经典的密度矩阵方程来描述。我们对泵浦场和亚毫米波信号场的强度大小不作任何限制,亚毫米波激光信号在系统内可能是远小于泵浦信号强度,也可能大于或远大于泵浦信号强度^[4]。按这条件求解三能级系统的密度矩阵方程^[4~6],进而可求得受激气体分子系统内各处对亚毫米波信号的增益系数

$$G_s = -\frac{2N_p |\mu_s|^2 \omega_s}{\epsilon_0 \eta C \hbar B_s} I_m(P_{s2}) \quad (1)$$

$$G_p = \frac{2N_p |\mu_p|^2 \omega_p}{\epsilon_0 \eta C \hbar B_p} I_m(P_{13}) \quad (2)$$

本文1989年9月16日收到

其中 $\rho_{32} = P_{32}e^{i\omega_s t}$, $\rho_{13} = P_{13}e^{i\omega_p t}$ 是描述分子系统的密度矩阵的非对角元素, $I_m(P_{ij})$ 是 P_{ij} 的虚部. $I_m(P_{ij})$ 的值与泵浦功率密度、亚毫米波激光功率密度和它们的频率有关. 在(1)和(2)式的基础上再用迭代法运算, 便可以计算出在激光器样品管内各处的泵浦功率密度和亚毫米波信号强度, 最后扣除输出窗口的损耗便可求得亚毫米波激光的输出功率密度.

我们采用 NH_3 分子气体为激光器的工作物质. 理论计算中采用三能级模型. 这模型用作计算光泵亚毫米波激光器在不同的工作参数条件下的亚毫米波信号的输出功率密度是足够精确的. 在计算中, 我们忽略了激光系统工作物质色散效应对激活介质折光系数 $\eta = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$ 的修正^[9]. 这些假设使计算获得简化.

三能级系统的密度矩阵的展开式为

$$\left. \begin{aligned} \rho_{11} &= \rho_{11}^0 - 2iT_1 I_m(P_{13}B_p^*) \\ \rho_{22} &= \rho_{22}^0 - 2iT_2 I_m(P_{32}^* B_s^*) \\ \rho_{33} &= \rho_{33}^0 - 2iT_3 I_m(P_{13}^* B_p + P_{32} B_s) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{12}P_{12} &= T(P_{13}B_s^* - P_{32}B_p) \\ L_{13}P_{13} &= T(r_{13}B_p + P_{12}B_s) \\ L_{32}P_{32} &= T(r_{32}B_s^* - P_{12}B_p^*) \\ L_{12}^* P_{12}^* &= T(P_{13}^* B_s - P_{32}^* B_p^*) \\ L_{13}^* P_{13}^* &= T(r_{13}B_p^* + P_{12}^* B_s^*) \\ L_{32}^* P_{32}^* &= T(r_{32}B_s - P_{12}^* B_p) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 T_1 、 T_2 和 T_3 分别为分子处于能态 1、2 和 3 的寿命, T 为三个能级间的量子跃迁的弛豫时间, 弛豫时间的计算参考文献[7]. 密度矩阵非对角元素

$$\left. \begin{aligned} \rho_{12} &= P_{12} \exp[i(\omega_p - \omega_s)t] \\ \rho_{23} &= P_{23} \exp[i\omega_s t] \\ \rho_{13} &= P_{13} \exp[i\omega_p t] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ω_p 和 ω_s 分别是泵浦激光和亚毫米波激光的频率, P_{ij} 是复数量. $B_p = \mu_p \hat{E}_p / 2\hbar$; $B_s = \mu_s \hat{E}_s / 2\hbar$. B_p 和 B_s 称为 Rabi 频率, μ_p 和 μ_s 是分子在三能级系统中的跃迁电偶极矩, 均为复数量. 为了简化运算而又不致于太大地影响计算精度, 我们假定 B_p 和 B_s 为实数量.

解式(3)、(4)所组成的方程组, 求 $I_m(P_{ij})$ 的值, 再采用迭代运算可得图 1~4 的结果.

从图 1~4 的理论计算曲线可见, 光泵 NH_3 分子超辐射亚毫米波激光器, 当其样品管长大于 5 cm 时, $1\text{MW}/\text{cm}^2$ 泵浦功率密度可获得千瓦级的亚毫米波激光输出. 样品管长小于 5 cm, 亚毫米波激光输出功率就很小了. 4.3 cm 样品管长在 $5\text{MW}/\text{cm}^2$ 泵浦的

激励下只能产生几十瓦级的激光功率，3cm样品管长只能产生毫瓦级的激光功率，1.5cm样品管长只能产生 10^{-8} W/cm²级的亚毫米波激光。以上结果的另一特点是：激光器的样品管长度缩短，激光器的最佳工作气压增加，导致亚毫米波激光输出谱线宽度增加。但计算所得的谱线宽度 $\Delta\nu$ 的值总是比按罗仑谱线的压力加宽公式 $\Delta\nu = 1/\pi T$ 计算的值要小。这可能是系统受激发射过程中，亚毫米波信号在系统内受到多次放大，使激光的谱线宽度变窄之故。

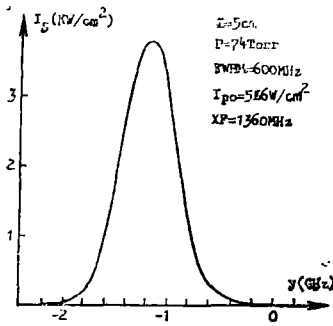


图 1 光泵氨分子亚毫米波激光器的输出特性 (L = 5cm)

Fig.1 The output characteristic of OPFIRL (L = 5cm)

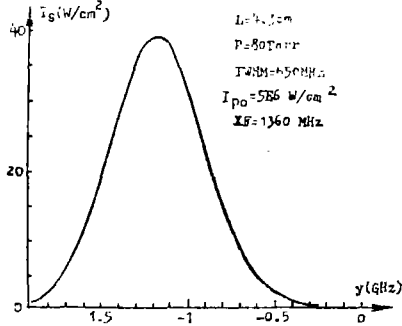


图 2 光泵氨分子亚毫米波激光器的输出特性 (L = 4.3cm)

Fig.2 The output characteristic of OPFIRL (L = 4.3cm)

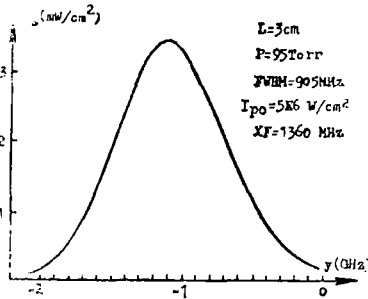


图 3 光泵氨分子亚毫米波激光器的输出特性 (L = 3cm)

Fig.3 The output characteristic of OPFIRL (L = 3cm)

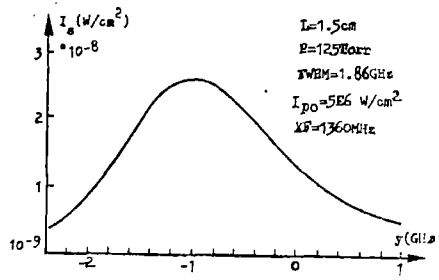


图 4 光泵氨分子亚毫米波激光器的输出特性 (L = 1.5cm)

Fig.4 The output characteristic of OPFIRL (L = 1.5cm)

3 小型光泵NH₃ 分子亚毫米波激光的实验研究

小型光泵NH₃分子亚毫米波激光器的实验装置与一般光泵亚毫米波激光测试系统相同，只是把过去2m长的样品管改用几cm长的样品管代替。采用长度分别为4.5cm、3cm和1.5cm的 3 个样品管。实验系统中的泵浦光源是一个光栅选支的TEA CO₂激光器，其输出脉冲能量为0.9J，脉冲持续时间为100ns，输出谱线是CO₂9R(16)，它与NH₃分子aR(6.0)跃迁频偏为 $4.49 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1} \sim 1346 \text{MHz}$ （我们在理论计算时，泵频偏

定为1360MHz)。泵浦激光经过长焦距镀金凹面镜反射聚焦为约 1cm^2 面积的光斑,入射进样品管内。样品管的入射窗口是NaCl单晶,它对 CO_2 9 R(16)激光的透过率为70%,在广州地区湿度很高,NaCl窗口表面容易受潮,其透过率又减少了80%左右,所以实际入射到样品管的泵浦功率密度约为 $5\text{MW}/\text{cm}^2$ 。通过真空系统,可以改变工作气体压强。小型光泵激光器工作气体压强也有个最佳值。这最佳值与样品管的长度有密切关系。亚毫米波激光的输出功率用热释电探测器进行检测,经放大后由7623A型存储示波器显示。测量结果如表1所示。表1所示的数值均为最佳工作气体压强条件下的亚毫米波信号。泵浦激光能量均控制在 0.9J ,即 NH_3 分子系统接收到的泵浦输入功率密度为 $5\text{MW}/\text{cm}^2$ 。

表1 超小型 OPFIRL 的最佳输出功率的比较

Tab.1 Comparison of optimum output power of miniature OPFIR lasers

样品管长度(cm)	5	4.3	3	1.5	1
泵浦功率密度(MW/cm^2)	10	5	5	5	5
工作气体压强(Torr)	80	70	90	50	-
最佳工作气体压强计算值(Torr)	-	80	95	125	140
样品管材料	玻璃管	铝材	铝材	铝材	-
亚毫米波激光输出功率(mV)	2500	1230	660	101	-
亚毫米波激光输出功率理论值(W/cm^2)	-	38.95	3.44×10^{-3}	2.55×10^{-8}	4.3×10^{-10}

实验用激光器样品管是圆形截面,5cm长的激光器用内径为3cm的硬质玻璃管,1.5cm长的激光器用内径为3cm的铝圆管,这两个小型光泵激光器,亚毫米波激光输出脉冲的波形分别如图5(a)、(b)所示。几种不同长度的小型光泵亚毫米波激光器的输出功率实验结果表明,样品管长度越短,则输出功率越小,这结果与理论计算结果的趋向是一致的。

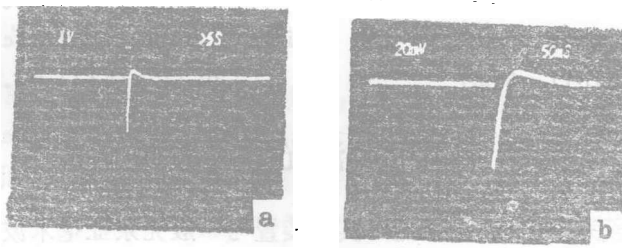


图5 OPFIRL 的输出波形
a. 管长5cm, b. 管长1.5cm

Fig.5 Output wave form of OPFIRL

4 讨论

对样品管长小于5cm的超小型光泵亚毫米波激光器进行的实验研究,都成功地产生了亚毫米波激光。样品管长为4.5cm, 3cm和1.5cm的OPFIRL,其输出以示波器显示的脉冲波形计算,可分别达到1.23V, 0.7V和0.1V。这表明,应用大功率泵浦源,可以实现5cm到1.5cm的“ASE类型”的亚毫米波激光辐射的产生。这里的“ASE类型”实际上是具有横向反馈增强的“ASE”。短样品管的激光器的工作效率比较低。有些实验结果与理论计算尚不能相符。

(1)在样品管长度为4.3cm、3cm和1.5cm的情况下,实验结果都能测到亚毫米波激光输出,这结果与理论计算部分不相符。按理论计算,4.3cm、3cm、1.5cm长样品管的ASE光泵亚毫米波激光只能分别输出 $40\text{W}/\text{cm}^2$ 、 $10^{-3}\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $10^{-8}\text{W}/\text{cm}^2$ 。 $10^{-8}\text{W}/\text{cm}^2$ 的信号强度,采用我们的检测系统是不可能检测到的。据此认为:在超短样品管长条件下,光泵亚毫米波激光器内除ASE贡献外还存在着有待深入研究的横向反馈增强效应^[8]。

(2)从上述初步的研究结果可见,超小型光泵亚毫米波激光器所产生的激光,其谱线宽度有数千兆赫,所以这种激光器经过高Q腔选频后,可以作为准连续可调亚毫米波激光光源。

(3)ASE型超小型光泵激光器比普通光泵气体分子激光器的体积小了一至两个量级,这是优点,但它的工作效率远比普通光泵气体分子激光器低。这问题有待深入研究解决。

(4)超小型光泵气体分子激光器的工作参数优化的理论和实验研究对提高激光器的工作效率是重要的,但激光器小型化以后,其内部的物理过程将更为复杂,常规的ASE过程外的其它过去在长样品条件下认为可以忽视的效应,逐步变成重要。理论工作将更为繁琐。

参 考 文 献

- [1] Frerking M A, *Summary of submillimeter (terahertz) receive technology conference at Lake Arrowhead, Int. Conf. IR-MMW Conference Digest, 1987, 111*
- [2] 邹巨佳等, *中山大学学报(自然科学版)*, 28 (1989), 1, 98
- [3] 罗锡璋等, *Int. J. IR-MMW*, 10 (1989), 2
- [4] 黎耀等, *Int. J. IR-MMW*, 6 (1985), 10, 1075
- [5] 王长辛等, *光学学报*, 7 (1987), 584
- [6] 林貽堃等, *Int. J. IR-MMW*, 3 (1982), 583
- [7] Willenberg G D et al., *IEEE J. Q.E.*, **QE-18** (1982), 2060
- [8] Plettl A, *Infrared Phys.*, 28 (1988), 6, 405
- [9] 林貽堃等, *Int. J. IR-MMW*, 10 (1989), 8

Theoretical and Experimental Studies of Miniature OPFIRL

Lin Yikun Luo Xizhang Pang Xiao*

Abstract

The density matrix equations of three-level NH₃ molecular system were solved under the condition of high operating gas pressure and discarding any limitation on the power densities of IR pumping signal and FIR signal. The power density of FIR laser output for very short OPFIRLs with 5cm---1.5cm sample tubes was calculated numerically by iteration method. Four OPFIRLs with sample tube 5cm, 4.3cm, 3cm and 1.5cm in length respectively were built up and lase successfully. The theoretical results were comformed by the experimental results. The transverse feedback effect which enhances the lasing process of 1.5cm laser was demonstrated.

Keywords FIR laser, miniature OPFIRL

* Department of Radio and Electronics