

脉冲光泵  $\text{NH}_3$  远红外激光的实验研究

丘秉生 杨建勋 罗锡璋 林贻莹

(中山大学无线电电子学系)

**提要:** 实验研究了脉冲 TEA  $\text{CO}_2$  激光泵浦  $\text{NH}_3$  分子系统的六条 FIR 激光谱线。测量了不同的泵浦能量、气体压强及泵浦吸收率对 FIR 激光输出能量的影响。结果表明: 1, 相应于最大 FIR 激光输出的最佳压强随泵浦失谐量的增大而增加; 2, 最佳的 FIR 激光输出不是产生于泵浦吸收率达 100% 的压强, 而是在吸收率约 90% 左右的压强。

Experimental investigation on optically pumped pulsed  $\text{NH}_3$  FIR laser

Qiu Bingsheng, Yang Jianxun, Luo Xizhang, Lin Yikun

(Department of Radio Electronics, Zhongshan University, Guangzhou)

**Abstract:** Six FIR laser lines produced by a pulsed TEA  $\text{CO}_2$  laser pumped  $\text{NH}_3$  system have been studied experimentally. The dependence of FIR laser output energy upon the pumping energy, the pressure of molecular gases and the absorbability to pumping energy have also been measured. It has been shown that, firstly, the optimum pressure corresponding to a maximum FIR laser output increases proportionally to the increment of pumping frequency offset, and secondly, the maximum FIR laser output is observed under the pressure at which the absorbability to pumping energy is just about 90% instead of 100%.

## 一、引言

光泵远红外激光是亚毫米波、远红外波段的一种重要光源, 它提供了波长范围在  $34 \mu\text{m} \sim 2 \text{mm}$  的数千条激光谱线<sup>[1]</sup>。由于远红外(FIR)激光在等离子体诊断、频率基准及高分辨光谱等多方面的应用, 十多年来, 国内外对光泵远红外激光的理论和实验研究

仍在不断深入和发展。对于光泵远红外激光器, 泵浦能量转换为远红外激光能量的效率相当低, 如何提高远红外激光的输出能量, 一直是研究的重要课题之一<sup>[2]</sup>。 $\text{NH}_3$  分子的  $\text{U}_1$  振动吸收带和  $\text{CO}_2$  激光的发射带重合得较好, 光泵  $\text{NH}_3$  分子系统可在 FIR 区获得较丰富的激光谱线<sup>[3]</sup>。因此, 我们选择了  $\text{NH}_3$  气体分子作为工作物质, 对脉冲光泵  $\text{NH}_3$  远

收稿日期: 1986年1月27日。

红外激光的六条谱线, 从实验上研究了不同泵浦能量、不同气体压强及泵浦吸收率对 FIR 激光输出能量的影响。得到的结果为光泵 FIR 激光器的设计提供了实验依据。

## 二、实验装置

实验装置如图 1 所示。用作泵浦光源的激光器是一台紫外预电离式 TEACO<sub>2</sub> 激光器, 主电极放电体积为  $900 \times 38 \times 38 \text{ mm}^3$ 。通过调节作为腔体的金属光栅  $G_1$  (150 线/mm, 刻痕面积  $60 \times 60 \text{ mm}^2$ ) 可在  $9.3 \sim 10.8 \mu\text{m}$  波长范围内选出 60 余条激光谱线, 脉宽约 100 ns, 单脉冲输出能量  $1 \sim 3 \text{ J}$ 。远红外激光器的 NH<sub>3</sub> 气体盒是一条长 1.98 m, 内径为  $\phi 34 \text{ mm}$  的硬质玻璃管,  $W_1$  窗口用 NaCl 晶体、 $W_2$  窗口用 5 mm 厚的聚四氟乙烯密封, 采用无腔共轴泵浦超辐射方式工作。 $M_1$  为镀金凹镜,  $M_2$  为镀金平镜, 调节它们的相对位置, 可使泵浦激光束聚焦在气体盒内的合适位置。由于聚四氟乙烯具有较好的透射 FIR 激光和滤除 MIR 激光的特性, 使光泵 NH<sub>3</sub> 分子激光经  $W_2$  窗口输出的仅是远红外激光的能量。用金属栅网作反射器的 F-P 干涉仪, 可以测量 FIR 激光波长。输出激光能量用 LPE-1 型激光能量计测量。分子气体压强用硅油压力差计测量。

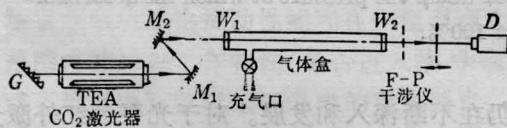


图 1 光泵 NH<sub>3</sub> 远红外激光的实验装置

## 三、实验结果及讨论

我们用六条不同波长的 CO<sub>2</sub> 激光谱线泵浦 NH<sub>3</sub> 分子。在  $67 \sim 300 \mu\text{m}$  波长之间获得了六条 FIR 激光谱线。实验研究了不同泵浦能量、不同的气体压强对 FIR 激光

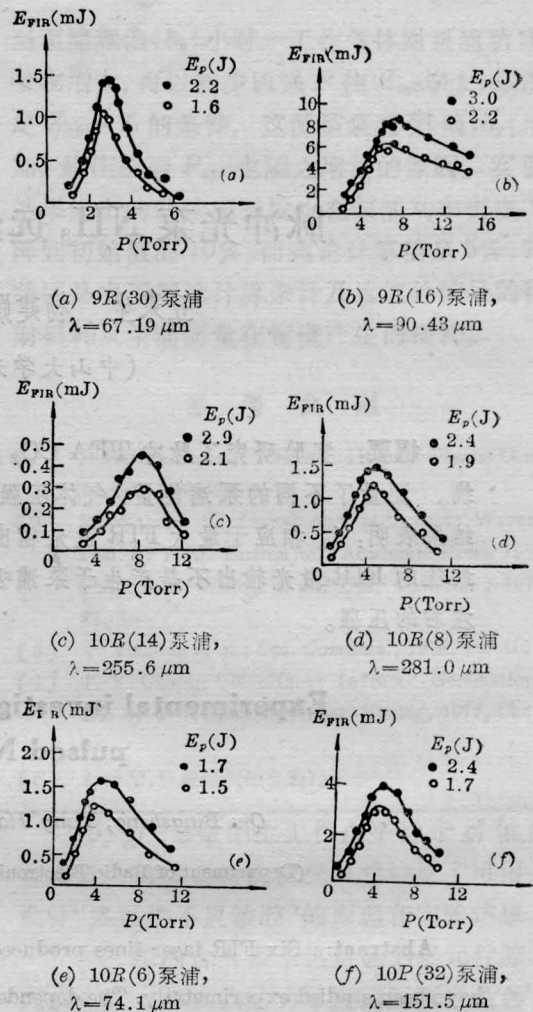


图 2 不同泵浦能量、气体压强对 FIR 激光输出能量的影响

输出能量的影响。实验结果如图 2 曲线所示。

上述六条光泵 NH<sub>3</sub> 的 FIR 激光谱线, 相应的吸收和发射能级跃迁图已由 T. Yoshida 等人给出<sup>[3]</sup>。现将实验结果和相应的能级跃迁列成表 1。

我们用金属感性栅网 F-P 干涉仪测量了 FIR 激光的输出波长; 用逐点调节 F-P 干涉仪栅网的间距, 记录相应的输出能量。得到一组干涉峰, 两相邻峰值的距离即为二分之一波长。其结果之一如图 3 所示。

从图 2 及表 1 给出的实验数据可见: (1)

表 1 光泵远红外激光的实验结果

CO <sub>2</sub> 激光 泵浦跃迁	泵浦能量 (J)	NH <sub>3</sub> 分子吸收 跃迁能级	泵浦频偏 $\delta_p$ (cm <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> 分子发射 跃迁能级	FIR 激光 波长( $\mu$ m)	输出能量 (mJ)
9R(30)	2.2	$G \rightarrow \nu_2, sR(5, 0)$	$6.2 \times 10^{-3}$	$\nu_2, sR(5, 0)$	67.2	1.4
9R(16)	3.0	$G \rightarrow \nu_2, aR(6, 0)$	$-4.53 \times 10^{-2}$	$\nu_2, aR(6, 0)$	90.4	8.4
10R(14)	2.9	$G \rightarrow \nu_2, aR(1, 1)$	$4.81 \times 10^{-2}$	$\nu_2, aR(1, 1)$	255.6	0.5
10R(8)	2.4	$G \rightarrow \nu_2, sQ(2, 2)$	$-3.12 \times 10^{-2}$	$\nu_2, sQ(2, 2)$	281.0	1.6
10R(6)	1.7	$G \rightarrow \nu_2, sQ(5, 4)$	$-1.9 \times 10^{-2}$	$\nu_2, sQ(4, 4)$	74.1	1.6
10R(32)	2.4	$G \rightarrow \nu_2, sQ(5, 3)$	$-3.12 \times 10^{-2}$	$\nu_2, aR(4, 3)$	151.5	4.0

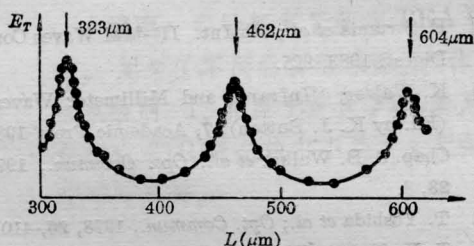


图 3 FIR 激光波长测量

在最佳气体压强下, FIR 激光输出能量随泵浦能量的增加而近似线性增加。例如图 2(a), 9R(30) 线的泵浦能量从 1.6 J 增加到 2.2 J, 相对地增加了 37.5%, 对应的波长为 67.2  $\mu$ m 的激光输出能量从 1.06 mJ 增至 1.45 mJ, 相对地增加 36.8%, 其他激光谱线亦有类似的结果。可见在我们的实验条件下, 光泵激光器未出现饱和现象。(2) 获得最大 FIR 激光输出能量的最佳压强和泵浦频偏  $\delta_p$  有密切关系。一般地当泵浦频偏  $\delta_p$  小时, 相应的最佳压强较低;  $\delta_p$  大, 相应的最佳压强增加。例如, 当用 CO<sub>2</sub> 激光 9R(30) 线泵浦, 输出波长为 67.19  $\mu$ m 的激光时, 泵浦频偏  $\delta_p = 6.2 \times 10^{-3}$  cm<sup>-1</sup>, 相应的最佳压强为 2.8 Torr; 用 10R(8) 泵浦, 输出激光波长为 281.0  $\mu$ m 时,  $\delta_p = -3.12 \times 10^{-2}$  cm<sup>-1</sup>, 相应最佳压强为 4.8 Torr; 用 10R(14) 泵浦。输出激光波长为 255.6  $\mu$ m 时,  $\delta_p = 4.81 \times 10^{-2}$  cm<sup>-1</sup>, 最佳压强为 8.4 Torr。

我们同时进行了泵浦能量的吸收与气体压强关系的实验, 实验是在图 1 的实验装置

中将  $W_2$  窗口用 NaCl 晶体取代聚四氟乙烯后进行的。固定泵浦输入能量, 当气体盒抽真空时, 用激光能量计测量  $W_2$  窗口输出的泵浦激光能量  $I_1$ , 然后, 在填充 NH<sub>3</sub> 气体至不同压强  $P$  后, 测量相应的泵浦能量  $I_2$ , 泵浦吸收率  $\alpha = I_2/I_1$  (%), 易得到图 4 的吸收率与压强的关系曲线。

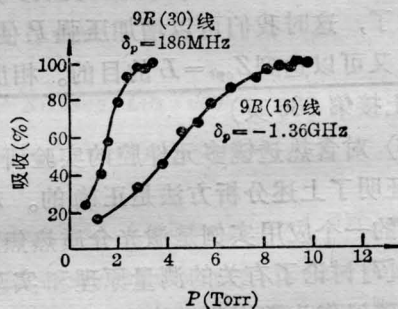


图 4 NH<sub>3</sub> 气体分子对泵浦能量的吸收

比较图 2(a)、(b) 和图 4 的实验曲线可知: 获得 FIR 输出的最佳压强, 并不是泵浦能量被 100% 吸收时的压强值, 而是在约 90% 左右被吸收时的压强值。

以上最佳压强和泵浦频偏的关系以及远红外激光输出的最佳压强和泵浦吸收率的关系, 可由本文部份作者在“光泵远红外激光中的能量交换与激光管的最佳长度”一文<sup>[5]</sup>中所获得的理论结果得到解释。在无腔超辐射方式工作的光泵远红外激光器中, 远红外激光是泵浦激光与远红外信号之间进行能量交换的结果。这种能量交换导致泵浦功率密度沿着激光管的轴向逐渐减少, 远红外激光则

沿着管的轴向逐渐增大。当泵浦功率密度减少到阈值  $P_{th}$  时, 泵浦能量转换为远红外激光能量的过程便停止了。之后, 远红外激光的功率密度由于工作气体的吸收开始下降。理论计算表明, 在理想情况下(无损耗情况下), 泵浦功率密度下降到初始值的 5% 左右就是  $P_{th}$  值。激光管中泵浦功率密度减少到  $P_{th}$  值时的管内位置离输入端的距离, 称为管的最优长度  $Z_{opt}$ 。如果激光管的长度刚好等于  $Z_{opt}$ , 就可获得远红外激光的最大输出。 $Z_{opt}$  的大小主要取决于泵浦功率密度的大小及其在激光管内的衰减情况。当工作气体压强增大时, 泵浦功率密度衰减得快,  $Z_{opt}$  减少; 当  $Z_{opt}$  等于工作气体盒长度  $L$  时, 远红外激光输出最大, 这就是最佳工作压强的实质。如果泵浦频偏  $|\delta_p|$  增大, 则工作气体对泵浦功率的吸收减少,  $Z_{opt}$  便增大了, 这时我们可以增加压强  $P$  使  $Z_{opt}$  减少。又可以达到  $Z_{opt} = L$  的目的。相反地,

(上接第 336 页)

(3) 对含热透镜多元件腔的实验研究结果<sup>[4,6]</sup>证明了上述分析方法是正确的。动态特性图的一个应用实例是激光介质热焦距的测量。[7] 讨论了有关的测量原理和实验结果, 并建议作为常规测量热焦距方法使用。

(4) 在高功率固体激光器的设计中, 模式结构(TEM<sub>00</sub> 模或是多模)、输出功率、远场发散角、抗热扰动性能和在一定泵浦水平范围内的动态工作特性(是否进入临界线上或不稳区内)等都是要考虑的重要因素, 最好能在实验提供必要数据基础上, 用计算机求数值解和曲线组, 以选取满足设计要求的最佳参数。各类腔型的动态工作特性图可为选取腔型、初始工作点位置和动态工作范围等提供必要的参考数据。在设计时, 由腔参数决定工作点在  $g^*$ -参数图上  $D=0$  时的位置和直线斜率(它们与泵浦参数无关), 而激光器的动态工作范围则依赖于光焦度, 因此与泵浦参数有关。

当泵浦频偏  $|\delta_p|$  小时, 工作气体对泵浦功率吸收增大, 可以减少压强  $P$  使  $Z_{opt}$  增大, 以满足  $Z_{opt} = L$  的条件, 这便是泵浦频偏  $|\delta_p|$  增加, 最佳压强  $P_{opt}$  也随之增加的原因。实验结果给出的最佳压强发生在泵浦功率密度下降到初始值的 10%, 而理论计算值是 5%, 其差别是由于理论计算未计及远红外信号的衍射损耗及泵浦能量在管壁产生的损耗。

### 参 考 文 献

- [1] F. Strumia *et al.*; 7th Int. IR-MM Waves Conf. Digest. 1983, 225.
- [2] K. Walzer; "Infrared and Millimeter Waves", (Ed. by K. J. Button), 7, Academic Press 1983, Chap. 3. B. Walker *et al.*; *Opt. Commun.*, 1977, 23, 8.
- [3] T. Yoshida *et al.*; *Opt. Commun.*, 1978, 26, 410.
- [4] T. Y. Chang; "Nonlinear Infrared Generation", Ed. by Y-R Shen. Springer-Verlag, 1977, Chap. 6.
- [5] 林贻堃, 丘秉生; (待发表)。

(5)  $g^*$ -参数图上工作点平行于  $g^*$  轴的运动是一类重要特殊情况。[8] 讨论了可用来设计“多模热不灵敏腔”的原理和实验结果。

(6) 腔内含有多个热透镜的多元件腔的问题实质上可以归结为单透镜问题来处理<sup>[9]</sup>, 故不难将本文有关结果推广于多透镜情况。

对 H. Weber 教授的讨论表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] H. Kogelnik; *BSTJ*, 1965, 44, 455.
- [2] H. Weber; “激光谐振腔”, 华中工学院出版社, 1983, p. 111.
- [3] 金德运; 《中国激光》, 1984, 11, No. 3, 159.
- [4] H. P. Kortz; Dissertation Uni. Kaiserslautern 1980.
- [5] 吕百达, 魏光辉; 《四川大学学报》, 1985, No. 4, 48.
- [6] H. Weber, 吕百达; “Dynamische Eigenschaften Von Linsenresonatoren”, Bericht Uni. Kaiserslautern, 1982.
- [7] 金德运, 茹华一; 《激光与红外》, 1981, No. 3, 37.
- [8] 吕百达, H. Weber; 《光学学报》, 1986, 6, No. 7, 577.
- [9] 金德运; 《四川激光》, 1982 No. 1, 39.