

# 多纵模光泵远红外激光的实验研究\*

罗锡璋 郑兴世 丘秉生 林贻堃

(中山大学电子系, 广东, 广州, 510275)

**摘要**——实验研究了多(双)纵模和单纵模光泵  $\text{NH}_3$  分子系统的远红外激光输出特性, 与理论计算作了比较, 结果表明: 在相同泵浦总功率条件下, 适当控制激光器的工作参数, 两者可产生相同的远红外谱线, 能保持相同的波谱质量, 并有大致相同的输出功率密度.

**关键词**——远红外激光, 多纵模光泵远红外激光.

## 1. 引 言

光泵远红外激光器(OPFIRL)是亚毫米波段内目前重要的辐射源之一. 利用单纵模  $\text{CO}_2$  激光器泵浦分子气体产生远红外激光辐射是常规的方法, 然而要获得单纵模  $\text{CO}_2$  激光的技术困难大、设备复杂而且效率低. 为此, 不少学者进行了多纵模 OPFIRL 的研究, 1984 年, M. A. Dupertuis 等人<sup>[1]</sup>首次从理论上研究了多纵模 OPFIRL 的增益特性; 1989 年, 林贻堃等人<sup>[2]</sup>计算了双纵模 OPFIRL 的输出特性, 指出: 适当控制工作条件, 双纵模 OPFIRL 的输出可以是单线的, 可以提高 OPFIRL 的总效率. 然而这些工作尚未见实验验证的报道. 本文利用可选纵模的 TEA  $\text{CO}_2$  激光器作泵源, 实验研究了多(双)纵模、单纵模 OPFIRL 的输出特性, 验证了林贻堃等人在参考文献[2]中提出的设想.

## 2. 实验装置与实验结果

实验装置如图 1 所示.

中红外泵源是一台可选择纵模的脉冲式反射光栅调谐的 TEA  $\text{CO}_2$  激光器, 增益带宽约为 1 GHz. 在激光腔内增加了一个 Ge 单晶标准具, 它是选模元件, 其厚度为 1.5 cm, 直径为 5.0 cm, 两表面抛光为光学平面, 平行度在  $10''$  以内. 标准具对中红外激光的反射率约为 70%, 自由光谱范围和精细度的计算值分别为 2.5 GHz 和 8.8. 当 Ge 标准具的倾角改变时, 可以从 TEA  $\text{CO}_2$  激光中选出单纵模, 双纵模或三纵模的工作状态. 由光子牵引探测器检测到的 TEA  $\text{CO}_2$  激光器的单纵模和双纵模激光输出波形分别见图 2.

本文 1990 年 3 月 26 日收到, 修改稿 1990 年 7 月 5 日收到.

\* 国家自然科学基金资助项目.

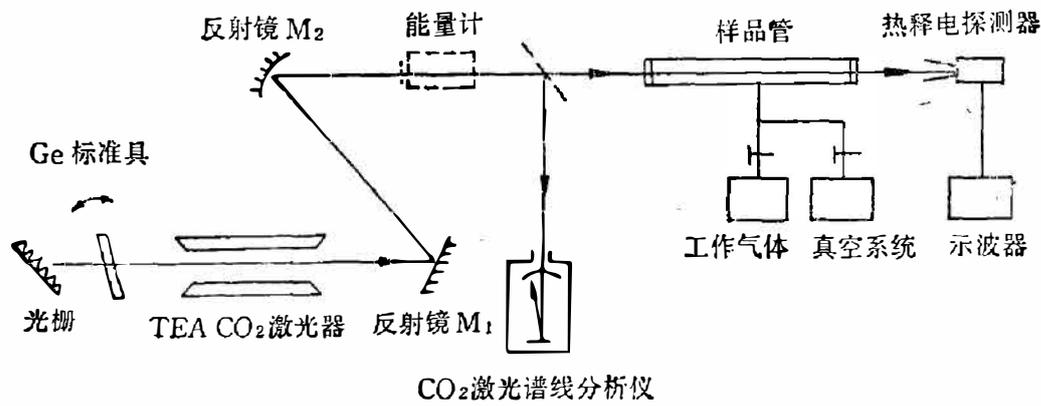
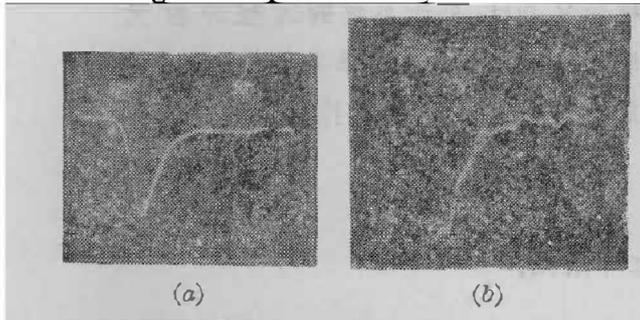


图1 多纵模光泵远红外激光的实验系统

Fig. 1 Experimental system of multi-longitudinal mode optically pumped FIR laser.

图2 TEA CO<sub>2</sub>激光器的输出波形图

(a) 单纵模 (b) 双纵模

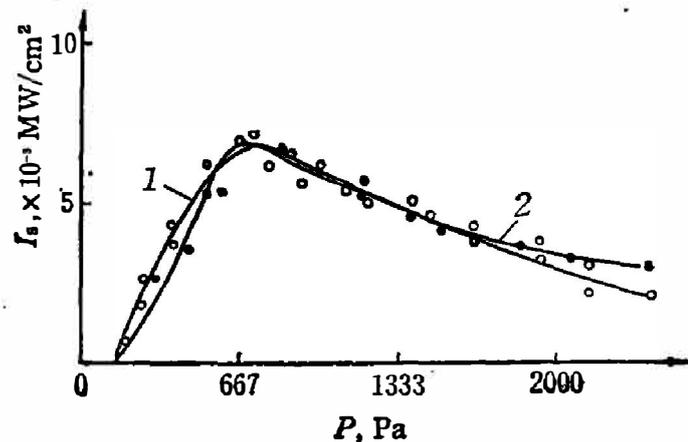
Fig. 2 Output waveform of the TEA CO<sub>2</sub> laser.

TEA CO<sub>2</sub> 激光器经选模后的中红外激光, 经长焦距镀金凹面反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  聚焦于远红外激光样品管内适当的位置, 焦点处光斑面积约为  $1\text{ cm}^2$ 。远红外激光器采用超辐射无腔式结构, 它是一根长  $2\text{ m}$ , 内径为  $3.5\text{ cm}$  的硬质玻璃管(样品管)。输入端的窗口是厚度为  $5\text{ mm}$  的 NaCl 晶片, 它对中红外是高度透明的。输出窗口是厚度为  $5\text{ mm}$  的聚四氟乙烯薄片, 它能干净地滤除中红外

泵浦信号, 同时对远红外信号有良好的透过特性。

OPFIRL 产生的远红外激光输出功率由热释电探测器检测, 放大后由 7623 A 型储存示波器显示。

实验中, 我们利用 TEA CO<sub>2</sub> 的  $9\text{ R}(16)$  激光谱线, 选模后分别得到单纵模或双纵模中红外激光输出, 用它泵浦氨气(NH<sub>3</sub>)产生波长为  $90.4\ \mu\text{m}$  的远红外激光输出。通过主电源电路, 可以控制 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的泵浦输出功率。实验时, 单纵模和双纵模的  $9\text{ R}(16)$  谱线的输出功率密度差不多均为  $2\text{ MW}/\text{cm}^2$ 。测量到的单纵模、双纵模 OPFIRL 的 FIR 的  $I_s$ - $P$  曲线见图 3。图 3 中 1 为单纵模, 2 为双纵模。

图3 单纵模(1)和双纵模(2)光泵 NH<sub>3</sub> 远红外激光实验的  $I_s$ - $P$  曲线Fig. 3 Experimental  $I_s$ - $P$  curves of single-mode and two-mode optically pumped NH<sub>3</sub> FIR lasers.

由图 3 可见, 双纵模光泵远红外激光的输出特性与单纵模光泵远红外激光的输出特性很相似, 在最佳工作气压条件下进行比较, 它们都有最大的输出功率; 在泵浦总功率相等的条件下, 两者的最佳气压接近相等, 约为  $733\text{ Pa}$ , 最大输出功率也接近相等。

### 3. 理论计算与实验结果比较

我们以 TEA  $\text{CO}_2$  的 9R(16) 的单纵模和双纵模激光泵浦  $\text{NH}_3$  分子气体产生  $90.4 \mu\text{m}$  的远红外激光为对象, 进行了输出特性的计算和比较. 计算方法见参考文献[2]. 为与实验结果比较方便, 计算时, 激光器的结构参数和工作条件参数取自实验值, 而光谱参数则引自文献[2]所采用的值.

实验中, 当 TEA  $\text{CO}_2$  激光器单纵模运转时, 9R(16) 谱线的泵浦功率密度控制在  $I_p \approx 2 \text{ MW/cm}^2$ , 双模运转时, 9R(16) 谱线的两个纵模的频率间隔  $\Delta f \approx 100 \text{ MHz}$ , 每个纵模的功率密度近似相等, 约为  $I_{p1} \approx I_{p2} \approx 1 \text{ MW/cm}^2$ . 远红外激光器的样品管长 2 m, 工作气体的最佳压强约为 733 Pa. 产生的远红外激光波长为  $90.4 \mu\text{m}$ . 有关的远红外激光输出特性计算结果见图 4.

在理论计算中, 我们假定三能级系统模型并忽略远红外信号的系统自吸收损耗. 显然, 这与实际情况是不相符的; 另一问题是: 理论计算中,  $-y$  和  $+y$  区内同时出现激光线和喇曼线, 但按参考文献[3]的报道, 9R(16)  $\text{CO}_2$  光泵  $\text{NH}_3$  分子气体只有喇曼线的存在. 三能级模型不能反映三能级以外的  $\text{NH}_3$  分子能级跃迁对激光过程信号的吸收和抑制, 也就是说, 三能级系统的理论结果不能全面反映 OPFIRL 的情况. 然而, 针对我们所研究的问题, 采用三能级系统假设并只取喇曼线这一部分, 对验证理论和实验结果是可行的, 结果仍是准确的.

比较图 4 中的曲线 1、2、3, 可知双纵模和单纵模光泵远红外激光的效果. 这里只画出实验出现的喇曼线作比较.

曲线 1 是双纵模光泵时的输出特性, 两个纵模的泵浦功率密度均为  $1 \text{ MW/cm}^2$ , 总功率密度为  $2 \text{ MW/cm}^2$ , 失谐量分别为  $1.36 \text{ GHz}$  和  $1.26 \text{ GHz}$ . 曲线 2、3 是单纵模泵浦时的输出特性, 曲线 2 的泵浦功率密度为  $2 \text{ MW/cm}^2$ , 失谐量为  $1.36 \text{ GHz}$ ; 曲线 3 的泵浦功率密度为  $1 \text{ MW/cm}^2$ , 失谐量为  $1.36 \text{ GHz}$ . 曲线 1 和曲线 2 相比, 在泵浦总功率相等情况下, 双纵模泵浦的输出功率峰值比单纵模泵浦大  $0.23 \text{ kW/cm}^2$ , 两者的远红外输出谱线形状相同, 只是曲线 2 比曲线 1 的峰值位置紫移了  $50 \text{ MHz}$ . 曲线 3 是让曲线 1 抑制了其中一个纵模, 剩下另一个功率密度为  $1 \text{ MW/cm}^2$  的纵模的条件下计算得到的. 显然, 曲线 3 的峰值功率比双纵模泵浦时(曲线 1)小了三分之一, 而且谱线红移了  $450 \text{ MHz}$ . 这是由于曲线

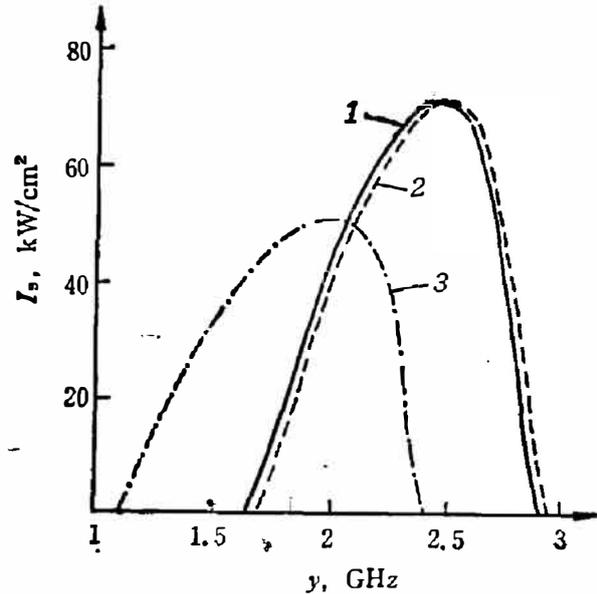


图 4 单纵模和双纵模光泵  $\text{NH}_3$  远红外激光输出特性理论计算曲线

- 1 双纵模泵  $I_{p1,2} = 10^6 \text{ W/cm}^2$
- 2 单纵模泵  $I_p = 2 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$
- 3 单纵模泵  $I_p = 10^6 \text{ W/cm}^2$

Fig. 4 Theoretical curves of the output characteristics of single-mode and two-mode optically pumped  $\text{NH}_3$  FIR lasers.

3 的泵浦总功率少了一半, 为此 AC Stark 效应减弱了, 引起了喇曼谱线的红移。这是与实验结果相符的, 即调节双纵模泵浦总功率与单纵模泵浦总功率相等时, OPFIRL 输出的远红外信号峰值是基本相同的。也就是说, 在适当的工作条件下, 采用双纵模泵浦比起单纵模泵浦, OPFIRL 的效率要高些。这不是指远红外输出功率会特别高, 而是指省去单纵模的选模装置后, 实际上是提高了 OPFIRL 的效率。总的结论是: 一个 OPFIRL, 只要适当选择其工作参数, 多纵模泵浦与单纵模泵浦所得的远红外激光的波谱质量可能是一样的。

当不进行任何纵模选择时, 常规的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器都工作在多纵模状态。纵模的数目可以从几个到数十个, 视 TEA CO<sub>2</sub> 的参数而定。例如, 我们使用的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 它的增益带宽约为 1 GHz, 纵模间隔  $\Delta f \approx 100$  MHz, 可以同时有几个纵模激光输出。虽然目前已有几种较为成熟的单纵模 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 但它们一般采用小功率限模, 然后经过大功率行波放大而得到单纵模激光输出。这样的系统结构复杂、效率低, 因而单纵模 OPFIRL 的实际总效率是低的。我们的研究表明: 双纵模光泵可以产生大致相同的结果。值得指出的是, 两个以上纵模的多纵模 OPFIRL 的计算, 可以沿用双纵模 OPFIRL 的计算方法, 可以得到类似的计算结果。可以预言, 利用结构较简单、功率较大、效率较高的常规多纵模 TEA CO<sub>2</sub> 激光器作泵源, 采用多纵模光泵技术, 对提高远红外激光的输出功率将有积极的作用。

### 参 考 文 献

- [1] Dupertuis M. A. et al., *IEEE J. QE-20* (1984), 440.
- [2] Lin Yikun et al., *Int. J. IR-MM Waves*, **10** (1989), 8.
- [3] Weiss C. O. et al., *Infrared and Millimeter Waves*, **2** (1984), 324.

## EXPERIMENTAL STUDY OF MULTI-MODE OPTICALLY PUMPED FIR LASER\*

LUO XIZHANG ZHENG XINGSHI

QIU BINGSHENG LIN YIKUN

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

### ABSTRACT

The output characteristics of multi-mode and single-mode optically pumped NH<sub>3</sub> FIR lasers have been studied experimentally and compared with the calculated results. It has been shown that a multi-mode optically pumped FIR laser can lase FIR signal of almost the same output power density and spectral quality and the same FIR lines as a single-mode pumped FIR laser does after suitable adjusting of operating parameters of OPFIRL.

\* The project supported by National Natural Science Foundation of China.