

远红外激光中双光子拉曼跃迁的相互增强*

郑兴世 黎耀 林贻堃

(中山大学无线电电子学系, 广州 510275)

摘要 利用F-P干涉仪和迈克尔逊干涉仪对光泵NH₃分子远红外激光的频谱特性进行了研究,证实了在CO₂-9R(16)泵浦NH₃分子时,产生双光子拉曼跃迁辐射;随着NH₃工作压力的增加,双光子辐射相互作用增强,频谱展宽.

关键词 远红外激光,拉曼跃迁辐射,远红外干涉仪

分类号 O432.12

1980年以来,以NH₃分子为工作物质的远红外激光器的研究有许多报导^[1].在实验中,我们发现CO₂-9R(16)泵浦NH₃的远红外激光辐射,波长在90.4 μm附近具有异常高的效率,特别是在小型的高工作气压的光泵远红外激光器中这现象更为显著.并发现在CO₂-9R(16)泵浦NH₃时,同时存在两个辐射频率很接近的拉曼跃迁过程^[2].对于小型远红外光泵激光器来说,由于工作气压较高,谱线的压力增宽导致两个拉曼跃迁过程的频谱出现重叠的部分,并且相互放大,辐射得到增强.这一现象我们称之为拉曼跃迁相互作用增强效应.

本文利用远红外亚毫米波段的F-P干涉仪及迈克尔逊干涉仪对小型光泵NH₃远红外激光器的辐射频谱进行分析研究,实验结果很好地验证了理论分析的结果.

1 拉曼跃迁的互作用

从NH₃分子的能级图(图1)可以看出,由于NH₃分子具有反演振动现象,它的能级具有反演振动的双线特性,呈现两组间隔接近相等的能级,而这两组能级之间的交叉跃迁是禁戒的.在泵浦CO₂-9R(16)的作用下,这两组能级系统将会分别出现两个拉曼跃迁过程,产生 $s \rightarrow aP(7,0)$ 和 $s \rightarrow aP(7,1)$ 的远红外受激发射,辐射波长分别是90.36 μm和90.526 μm.在工作气体压强较低时,这两个跃迁辐射的谱线没有重叠的部分.当工作气体压强较高时,由于谱线的压力加宽,使得这两条谱线出现部分重叠.这结果等效于系统

收稿日期:1992-12-30

* 国家博士点基金资助项目

的远红外本底信号强度增大了,再经过受激分子的放大之后,两条谱线的强度将得到显著的增强(见图 2)。理论计算表明,在最佳工作气压时,两条谱线强度将分别增加约 1.5 倍和 4 倍。在工作气压时,两谱线具有 Lorentz 线型,而当工作气压增加后,叠加的谱线不再是 Lorentz 型,在工作气压开始增加时,谱线的高度与宽度都有明显的增加,呈现双峰,甚至 3 峰,峰间距离约 1.6 GHz。但是随着工作气压继续增加,将出现饱和现象,峰的高度不再增加,而峰间的凹陷部分逐渐消失,随着气压继续升高,由于 NH₃ 分子对远红外信号的自吸收作用增大,使谱线强度反而有所下降。

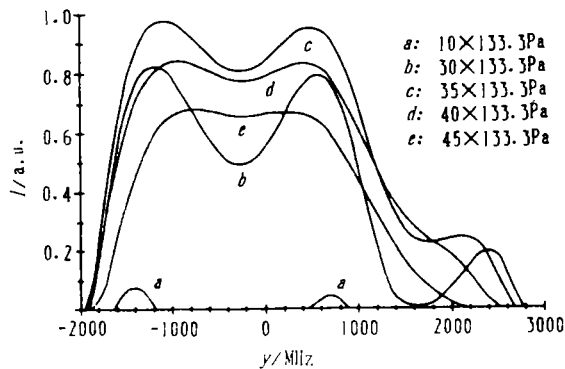
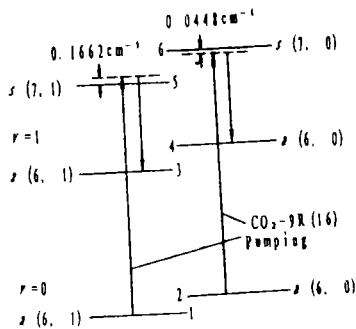


图 1 NH₃ 分子的部份能级图

图 2 工作气压不同时,光泵 NH₃ 远红外激光的频谱特性

Fig. 1 Part of the energy level diagram of NH₃ molecules

Fig. 2 Spectral characteristics of a NH₃-OPFIRL, with different NH₃ gas pressure

2 F-P 干涉仪法

远红外亚毫米波段的 F-P 干涉仪,通常采用一对平行的金属网栅来构成。F-P 干涉仪对单色的信号源的传输特性,即干涉曲线呈现为周期的对称的峰状,可以用 Airy 函数来描述。干涉仪的特性可以由反射精细度 F , 和分辨本领 RP , 即外品质因数 Q , 来描述^[3,4]

$$F = [2 \arcsin(\frac{1-R}{2\sqrt{R}})]^{-1} \approx \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R}$$

$$RP = \frac{\nu}{\Delta\nu} = Q_e = \frac{d}{2\Delta d} = qF,$$

其中, R 是网栅的反射系数, ν 是信号源的频率, $\Delta\nu$ 是干涉仪的频率分辨宽度, d 是两个网栅之间距, 而 Δd 是干涉曲线峰的半高宽度, 即 FWHM 值, 而 $q = 2d/\lambda$, 称为干涉阶数, 在单色信号源的情况下, Δd 反映干涉仪的分辨宽度。对于实际的信号源, 如激光, 都具有一定的线宽, 则 Δd 的大小不仅与干涉仪的分辨宽度有关, 而且还与激光谱线的线宽有关。因此, 干涉峰的宽度与形状, 在一定程度上可以反映出被测信号的辐射频谱。我们的 F-P 干涉仪采用一对反射系数 $R = 0.86$ 的硅-铝网栅^[5], 在干涉仪有最佳的准直性时, 栅距 $d = 2 \text{ mm}$, 工作波长 $\lambda = 90 \mu\text{m}$, 则 $F = 20.8$, $RP = Q_e = 915$, 此时干涉仪的波长分辨宽度 $\Delta\lambda = 0.1 \mu\text{m}$, 或频率分辨宽度 $\Delta\nu = 3.6 \text{ GHz}$ 。用该干涉仪测量一台样品管长度为 10 cm, 内径

为32 mm 玻璃管的小型 NH_3 分子远红外激光器, 得到辐射输出的干涉图. 我们测量了在不同工作气压下的情况. 图3给出工作气压分别是 $10 \times 133.3 \text{ Pa}$ 和 $50 \times 133.3 \text{ Pa}$ 时的干涉曲线. 当工作气压较低时, 输出信号较弱, 干涉曲线也较窄; 随着气压加大, 输出信号增强, 干涉曲线也增宽了. 干涉曲线的形状均略有不对称性, 在靠近峰点处有拐点, 在工作气压较高时则更明显. 反映了该激光谱线本身是一对双线, 由于干涉仪分辨本领的限制, 未能清晰地把两条谱线分辨开来. 我们通过测量40多个干涉峰的位置, 算出该远红外辐射谱线的中心波长为 $90.36 \mu\text{m}$, 与前人的结果相一致.

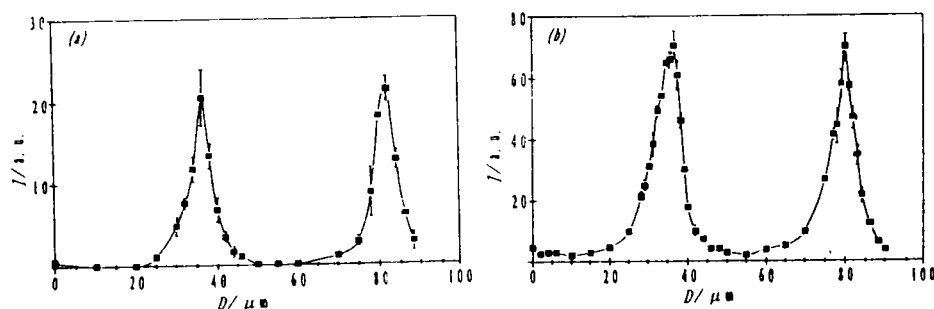


图3 NH_3 分子在 CO_2 -9R(16) 泵浦时, 远红外辐射波束的 F-P 干涉图. NH_3 气压分别是 (a) $50 \times 133.3 \text{ Pa}$ 和 (b) $10 \times 133.3 \text{ Pa}$

Fig. 3 F-P interferogram of a wave beam from a miniature NH_3 -OPFIRL pumped by CO_2 -9R (16), with gas pressure (a) $10 \times 133.3 \text{ Pa}$ 和 (b) $50 \times 133.3 \text{ Pa}$ respectively

3 迈克尔逊干涉仪法

F-P 干涉仪分辨本领的提高受到网栅反射率 R 的限制, 如果采用 R 较高的网栅, 则干涉仪的插入损耗较大, 检测到的信号微弱, 信噪比很小, 因而限制了灵敏度和分辨率的提高. 近年来被广泛应用在付里叶变换光谱仪中的迈克尔逊干涉仪, 克服了分辨率与灵敏度之间的矛盾, 而且它检测的信号可以包含整个频段的信息^[6]. 由迈克尔逊干涉仪的原理可知, 若光源的频谱函数是 $S(\nu)$, 检测器获得的光强可表示为

$$I(y) = A \int_0^\infty S(\nu) [1 + \cos(\frac{2\pi\nu}{C}y)] d\nu$$

y 是两个光路的光程差, A 为与分束器及检测器有关的常数, C 是光速. 如果光源 $S(\nu)$ 是单色光, 则检测到的干涉信号是等幅的余弦波; 如果光源是双线的, 则检测到的是两个余弦振荡的拍频信号. 我们把一台国产 WSM-100 型迈克尔逊干涉仪改装成为一台远红外/亚毫米波的干涉仪. 采用一片厚度为 0.4 mm 的双面抛光的单晶硅片作为分束器. 由于硅片在远红外/亚毫米波段的吸收损耗很低, 而且有平坦的反射-透射特性, 很适宜用作光学窗口、透镜或标准块等. 在这个波段, 硅片的反射系数接近 0.3 , 透射系数接近 0.7 , 因此, 硅片分束器的相对效率较高, 可达 80% . 利用这台干涉仪, 我们测量了同一台小型光泵 NH_3 激光器在相同的泵浦线激励下的辐射输出. 图4示出在不同工作气体压强时的辐射信号的

干涉图.由图可见当工作气压较低时($P=10 \times 133.3 \text{ Pa}$, $20 \times 133.3 \text{ Pa}$),干涉曲线表现明显的双峰,随着工作气压升高,两峰之间的凹陷逐渐变小,当气压较高时($P=50 \times 133.3 \text{ Pa}$),凹陷几乎消失.

由迈克尔逊干涉图可以看到,当 NH_3 气压较低时,辐射波束具有明显的双线频谱的特征.随着气压升高,介于这两条谱线之间的频谱成分逐渐增长,当气压上升到达最佳工作气压(约为 $40 \times 133.3 \text{ Pa}$)以上时,辐射波束已成为一个跨越原来两条谱线的宽频带连续谱.实验结果很好地证实了理论计算的结果.

4 结 论

光泵激光器辐射频谱的研究分析,反映激光辐射的物理过程.虽然 F-P 干涉仪的分辨本领有一定的局限性,但我们可以从干涉曲线的非对称性推断被测信号的频谱特性,而且 F-P 干涉图有较锐的干涉峰,便于波长的精测.迈克尔逊干涉图能够清晰地反映被测辐射源的频谱特性.两种方法共同证实了在 CO_2 -9R(16)光泵 NH_3 分子时,会产生两个独立的拉曼跃迁过程: $s \rightarrow aP(7,0)$ 和 $s \rightarrow aP(7,1)$,这两个光子的跃迁过程存在相互作用增强现象.这种相互作用增强的效应在 NH_3 气压较低时表现不明显,随着气压的增加,相互作用增强,但当气压过大时,出现饱和现象.即有一个最佳的工作气压条件,在此情况下,谱线的强度和频谱带宽都有明显增加.这个效应有利于提高激光器的效率和扩大频率可调谐的范围.

参 考 文 献

- 1 Weiss C O, Fourier M, Gastaud C, et al. Optically Pumped Far-Infrared Ammonia Lasers, in Reviews of Infrared and Millimeter Waves, V. 2, edited by K. J. Button, 1984
- 2 Lin Yikun, Zheng Xingshi. The 17th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Digest 312, Los Angeles, 1992, 12
- 3 林贻堃, 丘秉生, 郑兴世. 亚毫米波法布里-珀罗干涉仪的研制, 中山大学学报(自然科学版), 1981(4): 38~42
- 4 福尔斯 R G. 现代光学导论, 上海: 上海科学技术出版社, 1980
- 5 郑兴世, 黎耀, 林贻堃等. 硅-铝网栅亚毫米波 F-P 干涉仪及其在激光频谱研究中的应用, 红外与毫米波学报, 1993, 12(3): 229~232
- 6 张光昭. 付里叶变换光谱学原理. 广州: 中山大学出版社, 1988

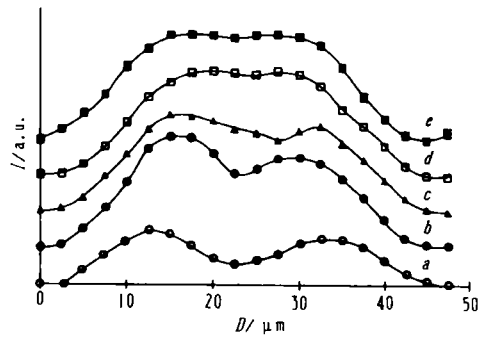


图4 NH_3 分子在 CO_2 -9R(16)泵浦时,辐射波束的迈克尔逊干涉图. NH_3 气压分别为 10, 20, 30, 40, 50($\times 133.3 \text{ Pa}$)

Fig. 4 Michelson interferogram of a wave beam from a miniature NH_3 OPFIRL pumped by CO_2 -9R(16)

Raman Transition Interaction Enhancement of Two Photons in Far-Infrared Laser

Zheng Xingshi^{*} *Li Yao* *Lin Yikun*

Abstract The spectral characteristic of an optically pumped NH_3 molecules FIR laser is studied by a F-P interferometer and a Michelson Interferometer. We verify that when NH_3 molecules are pumped by CO_2 -9R(16) line, a radiation by Raman transitions of two photons is produced. When the pressure of NH_3 gas increasing, the interaction of the Raman transitions increase, then the radiation is enhanced and the radiation spectrum is broadened.

Keywords optically pumped FIR laser. Raman transition. FIR interferogram

^{*} Department of Radio and Electronics, Zhongshan University, Guangzhou 510275