

$O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物激光振荡研究

高惠德 赵砚石 董蕴华 申作春 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150006)

提 要

从理论上估算了 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物激光输出功率, 在实验中以微波 (2.450 GHz) 激励高纯氧产生 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物, 采用平凹稳定谐振腔, 首次在波长 656 nm 处实现了 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的激光振荡, 当充入氧气压强为 133.3 Pa, 微波激励功率为 600 W 时, 激光输出功率可达 100 μ W, 此结果在数量级上与理论估算相同. 另外还测得激光束散角约 37.3 mrad.

关键词 准分子, 二聚物, 激光振荡, 束散角.

1 引 言

关于单态氧分子二聚物—— $[O_2(^1\Delta_g)]_2^{* [1\sim 3]}$, 在理论上通过群论分析, 得知单态氧分子二聚物共有八种可能的几何构型, 利用 Gaussian-80 程序计算了这八种构型的势能曲线, 最后判定单态氧分子二聚物只能以 D_{2h} 群几何构型存在, 其上能级是两个 $O_2(^1\Delta_g)$ 形成的弱束缚态, 其下能级是一个自动解离为两个基态氧分子的排斥态. 因此单态氧分子二聚物具有典型的准分子构型, 很容易实现粒子数反转. 在实验上曾观测到 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的多个荧光谱带, 其峰值波长分别为 703 nm、656 nm、634 nm、486 nm 和 394 nm 等, 其中 656 nm 和 486 nm 两个谱带的荧光特别强. 并利用放大自发辐射法测量了 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的增益系数, 实验结果表明, $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物具有非常明显的增益特性^[9]. 理论与实验都说明, $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物很有可能成为一种新型准分子激光介质. 本文报道首次观测到的 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物激光振荡现象.

2 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物激光振荡的理论分析

在理论上估算 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的激光输出功率. 饱和光强是估算激光输出的重要参数. 根据饱和光强的定义^[4], $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的饱和光强可以表示为

$$I_s = (4\pi^2 h \nu_0^3 \Delta \nu_H / v^2) (\tau' / \tau), \quad (1)$$

式中 τ 、 τ' 分别为 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的寿命和荧光寿命, $\Delta \nu_H = (1/2\pi) [(1/\tau) + (1/\tau_L)]$, τ_L 为碰撞弛豫过程决定的 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的寿命, 且 $1/\tau = 1/\tau' + 1/\tau_L$, 因此可将(1)式改写为

$$I_s = [\{2\pi h \nu_0^3 [(1/\tau) + (1/\tau_L)]\} / v^2] [\tau_L / (\tau_L - \tau)], \quad (2)$$

式中 τ_L 由气压、气体温度以及气体成份三者决定^[5]. 在本文的研究的系统中, 共有 O_2 分子、O 原子和 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物三种成份, 并且 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的粒子数密度和 O 原子的粒子

数密度都远远小于 O_2 分子的粒子数密度, 这样 τ_L 就可以近似表示为由 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物与 O_2 分子碰撞引起的, 于是

$$(1/\tau_L) = NQ \sqrt{(8kT/\pi)} [(1/m_1) + (1/m_2)], \quad (3)$$

式中 N 为 O_2 分子的粒子数密度, Q 为 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物与 O_2 分子的碰撞截面, m_1, m_2 分别为它们的质量. 取氧气压强为 133.3 Pa , $T=500 \text{ K}$, $Q=0.2 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ [6], 由 (3) 式得 $\tau_L=260 \text{ ns}$; 若取 v 等于光速, 峰值波长为 656 nm , $\tau=100 \text{ ns}$ [7], 则将以上数据代入 (2) 式得 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的饱和光强为 $I_s=99.60 \mu\text{W}/\text{mm}^2$.

由于本文研究的是氧气压强较低 ($10 \sim 400 \text{ Pa}$) 情况下 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的激光振荡, 谱线加宽主要表现为多普勒 (Doppler) 加宽. 当振荡模频率等于中心频率时, 可导出 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的激光输出功率为 [8]

$$P = (1/2) AI_s T [(G_m l / 8)^2 - 1], \quad (4)$$

当取 $G_m=1\% \text{ cm}^{-1}$, $T=2\%$, $\delta=0.1$, $A=25\pi \text{ mm}^2$, $l=25 \text{ cm}$ 时, 由 (4) 式估算得 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的激光输出功率约 $410 \mu\text{W}$.

3 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物激光振荡实验

3.1 腔镜效应探讨

图 1 是观测 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物腔镜效应的实验装置, 图中光阑是防止四周环境的杂光进入探头, 并在探头上贴有红色滤光片, 这样当 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物在 656 nm 处实现激光振荡时, 就可以保证探测到的光功率是 656 nm 的. 观测 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的激光振荡时, 分别采用了 656 nm 波长的光透过率为 2% 和 6% 的平面反射腔镜作输出镜.

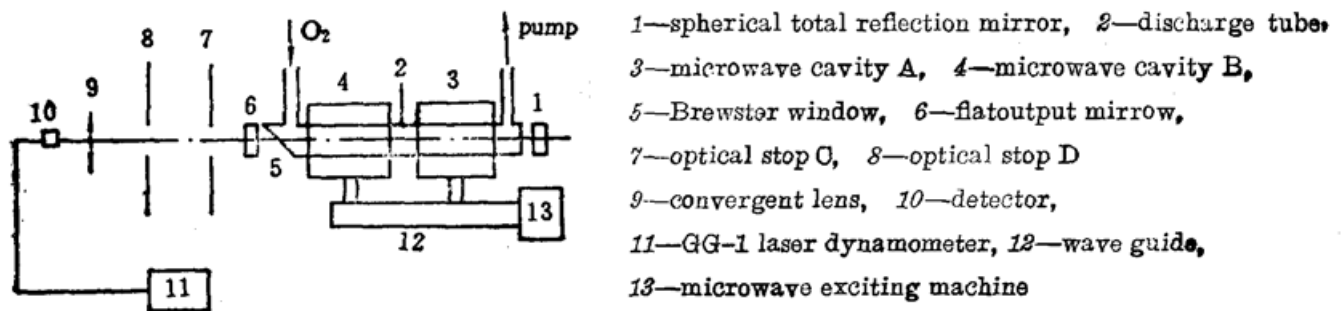


Fig. 1 The experimental set-up of observing the effect of cavity mirror

当实验系统真空度达到 0.1 Pa 时, 充入高纯氧气, 充气压强为 53 Pa , 用功率为 450 W 的微波 (2.450 GHz) 激励产生 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物. 若采用透过率 6% 的反射腔镜, 测得输出光功率只有 $12 \mu\text{W}$, 而采用透过率为 2% 的反射腔镜, 测得输出光功率为 $60 \mu\text{W}$.

另外, 当采用透过率 2% 的反射腔镜作输出镜时, 测量了输出光功率与微波激励功率和氧气压强的关系, 如图 2 所示. 当充入氧气压强为 133 Pa , 微波激励率为 600 W 时, 输出功率可达 $100 \mu\text{W}$. 此结果在数量级上与理论估算相同, 理论估算值稍大, 这是因为 G_m, δ 的数值取自经验估测值, 与本实验情况有一定偏差, A 的数值采用的是靠近输出镜的输出光束的光斑面积, 比实际值较大等原因.

3.2 光束的束散特性测量

为了进一步证明观测到的 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的激光振荡, 测量了光束的束散特性. 采用小孔扫描法测量不同位置的光斑尺寸, 然后计算出光束的束散角. 当存在谐振腔时, 测得输出光束的束散角约 37.3 mrad , 而根据放电管长度及其孔径算出的荧光发散角约 200 mrad . 因而当存在谐振腔时, 光束的发散角被压缩了四倍多.

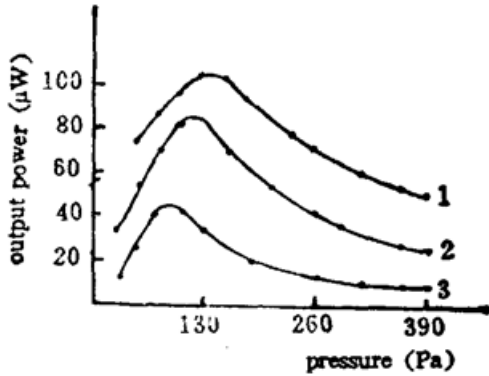


Fig. 2 The curves of output power varying with the pressure of oxygen and the power of microwave, where 1, 2, 3 refer to 600 W, 400 W, 200 W respectively

由上述结果得出, 在相同条件下, 采用透过率 2% 的反射腔镜作输出镜时, 测得输出光功率比采用透过率 6% 的反射腔镜大四倍. 且前一种情况与理论估算较接近, 而后一种情况与理论估算相差太大. 这说明采用透过率 2% 的反射腔镜时, 实现了激光振荡, 而采用透过率 6% 的反射腔镜时由于损耗大于阈值没有形成激光振荡, 测得的光功率是荧光的, 因而较小. 这表明 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的腔镜效应非常明显. 当存在谐振腔时, 光束的束散角被压缩了四倍多, 这就进一步证明实现了 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的激光振荡.

4 结 论

通过对 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物激光振荡的理论分析及腔镜效应和光束的束散特性的实验研究, 证明首次实现了 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的激光振荡, 波长为 656 nm , 输出功率可达 $100 \mu\text{W}$. 此项研究开辟了同核双原子分子二聚物型准分子激光体系研究的新领域, 可能获得高储能、可调谐的新型准分子激光介质. 并在理论上为探讨双原子分子二聚物的机制提供了一定的依据. 今后有待努力提高和改善 $O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物的激光性能.

参 考 文 献

- [1] E. T. Seidl, Theoretical studies of oxygen rings: Cyclotetraoxygen, O_4 . *The Journal of Chemical Physics*, 1988, 88 (11): 7043~7049
- [2] C. A. Long, G. E. Eing, Spectroscopic investigation of van der waals molecules. I. The infrared and visible spectra of $(O_2)_2^*$. *The Journal of Chemical Physics*, 1973, 58 (11): 4824~4834
- [3] P. Borrel, N. H. Rich, The rate constant for the "dimol" transition of singlet oxygen, $O_2(^1\Delta_g)$, and the likely symmetry of the emitting species. *CHEMICAL PHYSICS LETTERS*, 1983, 99 (2): 144~147
- [4] 周炳琨, 高以智, 陈家骅等. 激光原理, 北京: 国防工业出版社, 1987: 174
- [5] 周炳琨, 高以智, 陈家骅等. 激光原理, 北京: 国防工业出版社, 1987: 149
- [6] D. J. Benard, W. E. Medermott, N. R. Pchelkin, An observation concerning the radiative lifetime of the O_2^+ van der waals complex. *CHEMICAL PHYSICS LETTERS*, 1978, 55(3): 552~554
- [7] 周炳琨, 高以智, 陈家骅等. 激光原理, 北京: 国防工业出版社, 1987: 189
- [8] 高惠德, 赵科仁, 赵砚石等. 新型准分子 $-O_2(^1\Delta_g)$ 二聚物增益特性研究. *光学学报*, 1991, 11 (6): 520~523

Research of the Laser oscillation of the dimer of $O_2(^1\Delta_g)$

GAO HUIDE ZHAO YANSHI DONG YUNHUA SHEN ZUOCHUN MA ZUGUANG

(Institute of Opto-Electronic Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

(Received 11 November 1991; revised 6 February 1992)

Abstract

The laser output power of the dimer of $O_2(^1\Delta_g)$ was estimated theoretically. By means of microwave (2.450 GHz) exciting high pure oxygen to generate the dimer of $O_2(^1\Delta_g)$ in experiments, the laser oscillation of the dimer of $O_2(^1\Delta_g)$ was realized at 656 nm for the first time with stable flat-concave resonator. When the pressure of oxygen was 133.3 Pa, the power of microwave was 600 W, the laser power was as high as $100 \mu\text{W}$, this corresponded to theoretical estimation in order of magnitude. In addition, the diverge angle measured was about 37.3 mrad.

Key words excimer, dimer, laser oscillation, diverge angle.