

铍玻璃微球腔模式移动的观察

吕宝龙 王育竹 黎永青

(中国科学院上海精密机械研究所量子光学(联合)开放实验室, 上海 201800)

摘 要 报道铍玻璃微球腔在尺寸发生微小变化时腔模也随之移动; 腔模移动对泵浦耦合产生了重大影响.

关键词 微球腔, 腔内 QED 效应, 尺寸参数.

1 引 言

尺寸在米氏范围内的透明介质微球构成了一种新型的光学腔^[6]. 腔模通常由尺寸参数 $x = 2\pi a/\lambda$ 来描述, 其中 a 为微球半径, λ 为真空中光波长. 在腔模对应的波长处, 腔内光子态密度远大于自由真空中的态密度; 所以与光子态密度相关的自发辐射系数 A 也随之增强. 这种效应称之为腔内量子电动力学效应. 含有染料的液滴微球的荧光谱中, 叠加在染料宽带谱上的尖峰结构就是量子电动力学效应引起的^[2]. 作者也曾报道过这种效应对固态的铍玻璃微球荧光谱的影响^[3,4], 并推导出量子电动力学结构与背景谱的强度比例 r 以及量子电动力学增强倍数 η 的表达式, 实验结果与理论估算值符合的较好.

本文主要报道铍玻璃微球在受热膨胀时腔模的移动现象, 并分析了这种移动对耦合到腔内的泵浦光所产生的影响.

2 实验结果

实验装置与文献[4]相同. 连续氩离子 514.5 nm 激光束经聚焦后直接激发放置在平板玻璃上的铍玻璃微球, 其荧光经收集后由光栅扫描光谱仪记录光谱. 本实验中选择了直径约 85 μm 的铍玻璃微球, 扫描了它在 810 nm 波段的荧光信号. 图 1 给出了不同功率下的光谱. 宽带背景谱上的尖峰结构是由相应波长处自发辐射的量子电动力学增强引起的. 这些量子电动力学结构对应微球腔的模式. 模式的品质因数一般在 1.5×10^3 左右. 微球在 $\lambda = 810$ nm 附近的尺寸参数 $x \approx 330$. 所以, 根据前面给出的估算公式, 量子电动力学结构与下面背景谱的强度比为 $r = 1/8$. 图 1 中(a), (b) 两光谱的量子电动力学结构强度与这个估算值一致; 但是(c)谱中的 QED 结构显然比(a), (b) 中的超出许多($r > 1/5$). 三条光谱的轮廓应当是一样的, 然而实际上泵浦功率在扫描过程中存在 5% 左右的不稳定性使得它们略有差别.

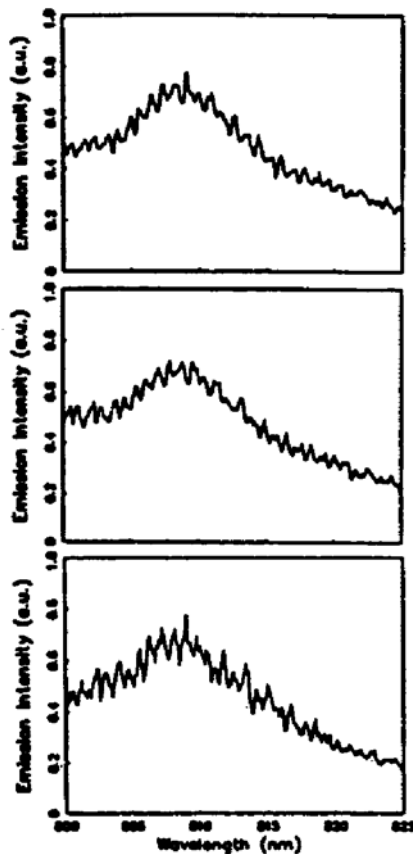


Fig. 1 Fluorescence spectra around 810 nm wavelength for a Nd-glass microspherical cavity (81 μm in diameter). The pumping power are (a) $P = 0.29$ W (b) $P = 0.40$ W and (c) $P = 0.49$ W respectively. QED structures in (c) are higher than that in (a) and (b)

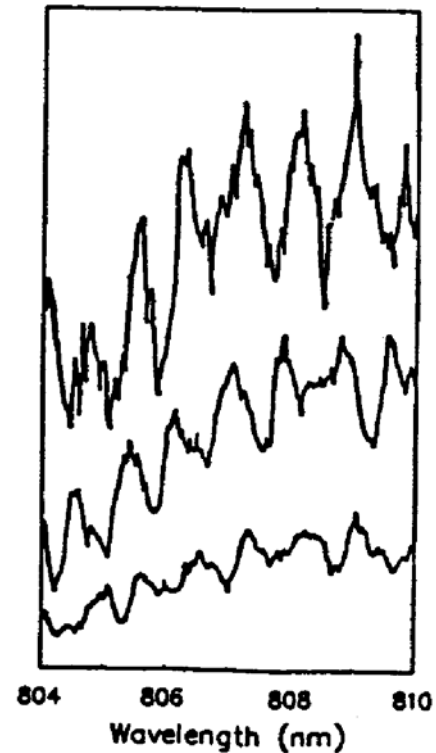


Fig. 2 Magnified portion of QED structures of the same microsphere as in Fig. 1. Lower, Middle and upper curves correspond to (a), (b) and (c) in Fig. 1 respectively; and their peaks shift to longer wavelengths with the increasing pumping power

3 腔模的移动

从图 1 中看, 微球荧光谱在不同泵浦功率下的量子电动力学结构一一对应, 然而结构的波长位置并不吻合. 图 2 是图 1 中部分量子电动力学结构的放大, 它清楚地显示, 当泵浦功率 p 增加时每个结构依次向长波方向移动. 若以 $p = 0.29$ W 时的光谱为基准, 则 $p = 0.40$ W 和 $p = 0.49$ W 时的结构分别移动了大约 0.6 nm 和 0.8 nm. 量子电动力学结构的波长位置反映了腔模位置, 因此这种移动是腔模的移动. 腔模的光谱位置取决于微球腔的光学尺寸(微球半径 a 和折射率 m), 它的移动是微球受热膨胀引起的, 由于微球对泵浦光的热吸收, 而受热后直径和折射率都要发生变化. 由尺寸参数的定义 $x = 2\pi a / \lambda$ 可推出下式:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta t} = \lambda \left[\frac{\Delta a}{a\Delta t} - \frac{1}{x} \frac{\Delta x}{\Delta m} \frac{\Delta m}{\Delta t} \right] \quad (1)$$

上面的 Δt 代表微球的温度变化量, 括号中的第一项实际上就是微球材料的热膨胀系数 α , 而 $\Delta m / \Delta t$ 则是折射率温度系数 β . 为确定 $\Delta x / \Delta m$ 的大小, 可以用 Lorenz-Mie 理论^[5] 计算了折射率在 1.52 附近作微小偏移时腔模位置 x 的变化, 发现对所有模式都有 $\Delta x / x \approx -\Delta m / m$. 因此, 腔模的波长位置随温度的变化关系可表示为

$$\Delta\lambda / \Delta t = \lambda(\alpha + \beta / m) \quad (2)$$

实验中所用的铍玻璃材料, $\alpha = 0.8 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $\beta = 0.167 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$. 可见 $\Delta\lambda / \Delta t > 0$, 即温

度升高时腔模确实向长波方向漂移. 根据(2)式可算出 $P = 0.49 \text{ W}$ 时的微球温度比 $p = 0.29 \text{ W}$ 时要高出约 90°C .

4 腔模移动对泵浦耦合的影响

当泵浦光的波长远离腔模时, 泵浦光与微球腔的耦合可简单地由几何光学来理解. 此时耦合到微球腔内的泵浦光在模体积内外的平均能量密度基本相等. 荧光量子电动力学结构与背景谱的相对强度 r 的表达式就是这种假设下推出的^[4]. 图 1 中 a、b 两谱的量子电动力学结构强度与 r 的估算值基本一致, 更证明了这种近似的合理性. 但是如果入射光的波长与微球腔某个模式的位置重合(输入共振), 情况则大不相同. 腔模光场大部分集中在微球内表面附近, 因此在输入共振条件下腔内泵浦光将分布在这一区域, 致使模体积内的激发钕离子密度明显超过模体积外的值. 量子电动力学结构的强度将会随之增加. 由上面的分析可知, 图 1(c) 中光谱结构相对强度 r 较之(a)、(b)谱中增大的原因是腔模移动导致泵浦光的波长靠近了某个腔模. 当然, 热膨胀引起的偏移量不可能很大, 利用这种方法实现输入共振比较困难. 但是如果保持微球腔的尺寸不变而反过来调节泵浦光的波长则比较可行. 这一方面的实验正在进行中.

总 结 在实验上证实了钕玻璃微球腔在其尺寸变化的腔模随之移动的现象. 这种移动有可能引起输入共振并进而导致荧光谱中量子电动力学结构的增强.

参 考 文 献

- [1] S. C. Hill, R. E. Benner, Morphology-dependent resonances associated with stimulated process in microspheres. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **B3**(11): 1509~1514
- [2] R. E. Benner, P. W. Barber, J. F. Owen *et al.*, Observation of structure resonances in fluorescence spectra from microspheres. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **44**(7): 475~478
- [3] Y. Z. Wang, Y. Q. Li, B. L. Lu, Observation of cavity QED effects in a Nd-glass microspherical cavity. Tenth International Conference on Laser Spectroscopy xx, Paris, France, June, (1991), invited paper, P205~210, Edited by M. Dulcoy, E. Giacobino and G. Camy, Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Farrer Road, Singapore
- [4] 吕宝龙, 王育竹, 黎永青, 利用腔内 QED 效应改变钕玻璃微球荧光谱特性的研究. *光学学报*, 1994, **14**(3): 253~256
- [5] P. R. Conwell, P. W. Barber, C. K. Rushforth, Resonant spectra of dielectric spheres. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1984, **A1**(1): 62~67

Observation of Mode Shift of Nd-Glass Microspherical Cavity

Lu Baolong Wang Yuzhu Li Yongqing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 9 April 1993)

Abstract In this paper, we report the mode shift of Nd-glass microspherical cavity caused by small variations of cavity size. The influence of mode shift on pump coupling is analysed.

Key words microspherical cavity, cavity QED effect, size parameter.