

共上能级三能级二聚物蒸气 系统增益系数测量

吕志伟 王 骥 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150006)

提 要

本文提出了一种能够测量单纯由粒子数反转造成的增益系数的方法, 给出了考虑几何因素及吸收影响之后修正了的实验计算公式, 并对 $\text{Na}_2\text{B}^1\Pi_u - \text{X}^1\Sigma_g^+$ 跃迁增益系数进行了测量。

关键词: 增益系数, 二聚物, 三能级系统。

一、引 言

测量激光介质增益系数的常用方法有腔内损耗法和探束放大法等^[1]。目前应用较多的是顺向光泵浦探束放大法^[2], 这种方法具有应用范围宽和测量精度高等优点, 但它对探束激光器的要求非常苛刻, 对具有较宽光谱区域的激光介质, 必须是非常稳定且能在较宽范围内可调谐的探束光源, 在某些情况下甚至找不到合适的探束激光器。

尤其值得注意的是, 对共上能级三能级二聚物蒸气激光介质系统, 喇曼增益的影响十分显著, 增益具有相对于泵浦光方向不对称的特性, 这使得顺向光泵浦下无论是腔内损耗法还是探束放大法都无法测得单纯由粒子数反转造成的增益。本文提出利用横向光泵浦反射镜法可以避免喇曼增益的影响, 方便地测得单纯由粒子数反转造成的增益系数; 同时给出了考虑几何因素及吸收影响后修正了的实验计算公式, 并对 $\text{Na}_2\text{B}^1\Pi_u - \text{X}^1\Sigma_g^+$ 跃迁增益系数进行了测量。

二、二聚物蒸气系统的增益特性

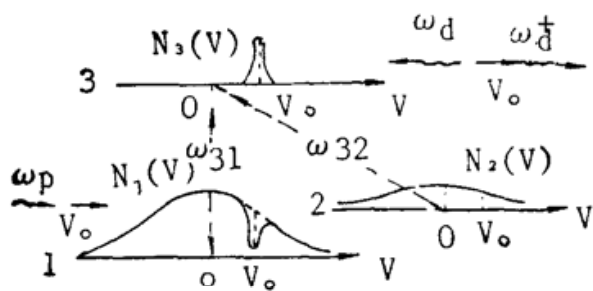


Fig. 1 Excitation and emission scheme

二聚物分子具有十分丰富的振转能级, 通常获得的激光运转都是在三能级系统上实现的。对多普勒展宽的情况, 频率为 $\omega_p = \omega_{31} + k_p v_0$ 的泵浦光把在能级 1 上速度分量为 v_0 的粒子激励到能级 3 上, 形成图 1 所示的粒子数分布。放大过程和激光振荡只能在能级 3 和能级 2 之间以频率 ω_d^\pm 进行:

$$\omega_d^\pm = \omega_{32} + \epsilon k_d v_0 = \omega_{32} + \epsilon (\omega_p - \omega_{31}) (k_d / k_p), \quad (1)$$

式中 $\epsilon = \pm 1$, k_d 和 k_p 分别为发射光与泵浦光波矢的绝对值。在与泵浦光相同方向上 ($\epsilon = +1$), 只有 ω_d^+ 被放大; 而在与泵浦光相反方向上 ($\epsilon = -1$), 只有 ω_d^- 被放大。对三能级系统, 总有双光子条件

$$\omega_{31} - \omega_{32} = \omega_{21} \quad (2)$$

被满足, 这意味着吸收的泵浦光子与发射的激光光子是相联系的, 因而不能用速率方程来描述了, 需要用密度矩阵来描述。通过解密度矩阵的微分方程^[3], 得到具有速度分量为 v 的粒子的小信号增益系数为

$$\alpha_d^v = \sigma_d^v \rho_{22}^v E^v - \sigma_d^v \rho_{11}^v [1 - (A_{32}/\gamma_2)] \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_3} \frac{P}{1+P} F^v - \sigma_d^v \rho_{11}^v \frac{\gamma_1 \gamma_3}{2 \gamma_{13} (\gamma_1 + \gamma_3)} \cdot \frac{P}{1+P} G^v, \quad (3)$$

式中 σ_d^v 为均匀展宽下最大受激发射或吸收截面, P 为泵浦参量 (泵浦强度与饱和泵浦强度之比), γ_i 和 γ_{ij} 为对应能级和它们之间的弛豫速率, E^v , F^v 和 G^v 为与粒子速度、泵浦参量及泵浦频率和二聚物激光频率有关的线型函数。 α_d^v 取负值对应于放大。由 (3) 式可见, 增益

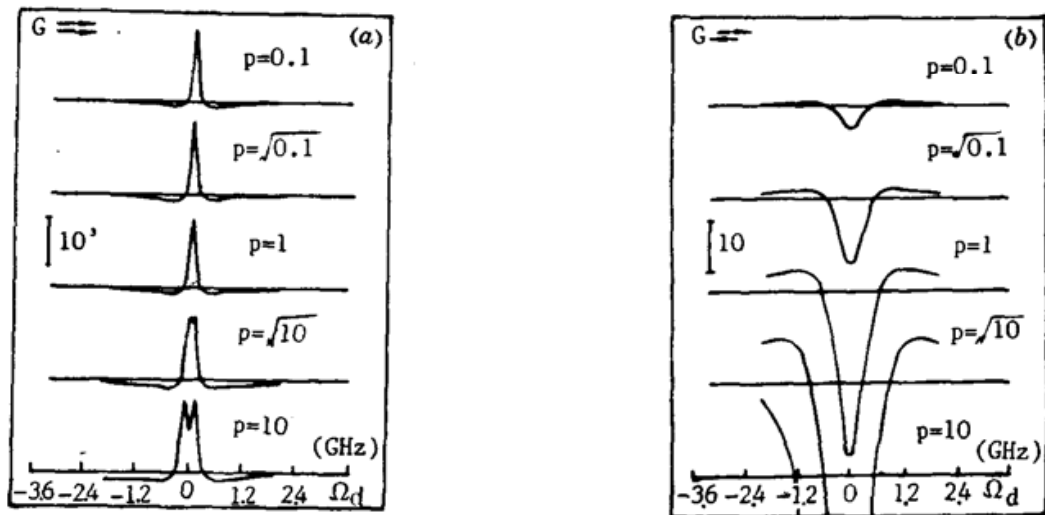


Fig. 2 Lineshape function $G = \int G^v dv$ for different pump parameters P .

(a) forward direction and (b) backward direction (after [3]).

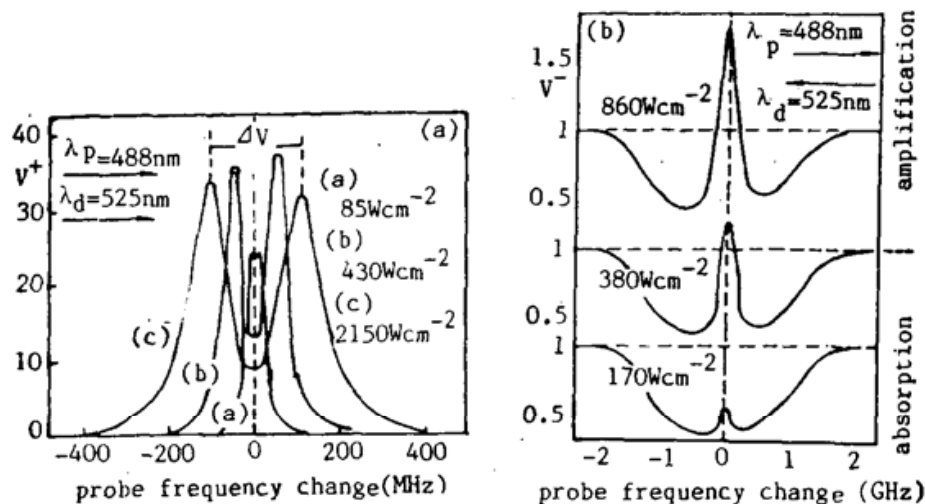


Fig. 3 Gain characteristics of $\text{Na}_2B^1H_u - X^1\Sigma_g^+$ transition with longitudinally optically pumping, (a) forward and (b) backward amplification profiles (after [3])

系数由三部分构成, 第一项正比于激光下能级上具有速度分量为 v 的粒子数密度 ρ_{22}^v , 它代表自吸收的影响。第二项正比于泵浦初始能级上具有速度分量为 v 的粒子数密度 ρ_{11}^v , 当 $\gamma_2 > A_{32}$ 即形成真正的粒子数反转时, 这一项才代表放大。这一部分就是通常的由粒子数反转造成的增益。第三项也正比于 ρ_{11}^v , 但它与粒子数反转与否无关, 可以解释为双光子或喇曼放大的贡献。将 (3) 式对多普勒宽度内所有速度积分就得到总的增益系数 α_d 。借助于数值积分可以得到 α_d 。值得注意的是(3)式中第三项积分后具有与前两项截然不同的结果。在与泵浦光相同的方向上线型函数 $G(\epsilon = +1)$ 比与泵浦光相反方向上的线型函数 $G(\epsilon = -1)$ 大得多, 如图 2 所示。因此在与泵浦光方向相同和相反的方向上, 增益具有明显的不对称性, 与泵浦光相同方向上的增益远大于与泵浦光相反方向上的增益。图 3 给出了对 $\text{Na}_2\text{B}^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$ 跃迁这种增益不对称性的实验测量结果。

三、横向光泵浦反射镜法

横向光泵浦反射镜法测量增益系数的实验系统示意图如图 4 所示, 这是利用激活介质对自发辐射的放大作用来测量增益系数的一种方法。基于自发辐射放大作用的增益系数测量方法, 早期是在研究液体染料特性中采用的^[4~7], 后来也应用于准分子激光系统^[8~10], 它们仅仅是作为没有适合探束光源情况下的替代方法。对于光泵浦的共上能级三能级二聚物蒸气介质, 在泵浦光轴线方向有显著的喇曼增益, 采用横向光泵浦反射镜法可以避免喇曼增益对增益系数测量的影响, 从而测得单纯由粒子数反转造成的增益。

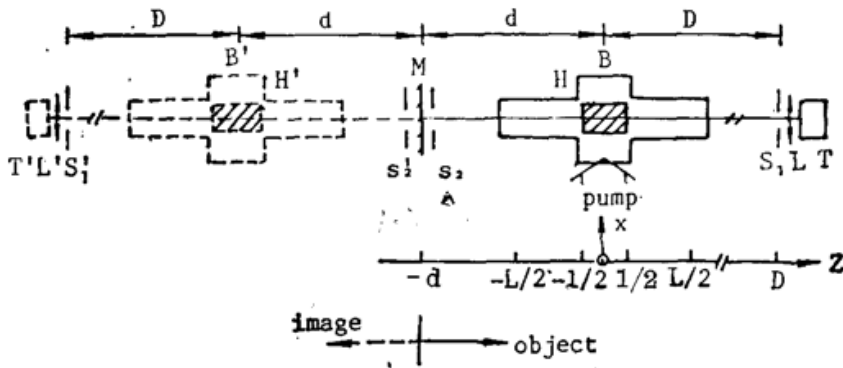


Fig. 4 Scheme of gain coefficient measurement with transversely optically pumping reflection method

对通常在热管炉中产生的金属蒸气介质, 反射镜难以十分靠近介质的激活区, 因而文献 [1] 中给出的增益系数计算公式必须加以修正。图 4 中 H 为十字型热管炉, 产生的蒸气区长度为 L ; B 为激活区, 长度 l 由泵浦光束宽度决定。 T 为探测器及测量系统, L 为会聚透镜, M 为反射率为 r 的平面反射镜, S_1 和 S_2 为通光孔径其半径分别为 R_1 和 R_2 的光阑, 它们分别靠近透镜 L 和反射镜 M 。泵浦光沿 x 轴方向, 测量系统轴线沿 z 轴方向。

为讨论方便, 假设: (1) 激活区为一长方体, 其空间限度为: $-a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b, -(l/2) \leq z \leq (l/2)$; (2) 激活区内单位体积发光强度为 I_0 。此两项假设不影响增益测量结果。去掉反射镜时探测器接收到的光强可表示为

$$I_l = \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-b}^b \int_{-a}^a I_0 dx dy dz \exp\left[g_0\left(\frac{l}{2} - z\right)\right] \exp\left[-\alpha\left(\frac{L}{2} - z\right)\right] \frac{\pi R_1^2}{4\pi [x^2 + y^2 + (D - z)^2]}, \quad (4)$$

式中 g_0 和 α 分别为介质的增益系数和吸收系数。加上反射镜后, 探测器接收到的光强为

$$I_{2l} = I_l + \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-b}^b \int_{-a}^a I_0 \exp\left[g_0\left(\frac{3l}{2} + z\right)\right] \exp\left[-\alpha\left(\frac{3L}{2} + z\right)\right] \frac{\pi R_1^2}{4\pi [x^2 + y^2 + (D + 2d + z)^2]} \cdot dx dy dz, \quad (5)$$

式中第二项是经反射镜反射到探测器中的光强, 它相当于图 4 中激活区 B 发出的光被探测器 T' 所接收到的部分。此项表达式成立的条件为:

(1) 反射镜及光栏 S_2 的孔径足够大, 以保证激活区 B 所发出的光中位于探测器 T' 接收孔径内的部分一定能被反射到探测器中:

$$R_2 \geq R_1 + \frac{D+d}{D+2d} (\sqrt{a^2 + b^2} - R_1). \quad (6)$$

(2) 光栏 S_1 及探测器接收孔径足够小, 以保证激活区 B 所发出的光中被探测器 T' 接收到的部分全部经过激活区 B' :

$$R_1 \leq \min(a, b). \quad (7)$$

设实验系统满足条件

$$D \gg 2a, D \gg 2b, D \gg l. \quad (8)$$

由(4)式和(5)式解得

$$g_0 = \frac{1}{l} \left\{ \ln \left[\frac{(I_{2l}/I_l) - 1}{r} \right] + 2 \ln \left(1 + \frac{2d}{D} \right) + \alpha L \right\}. \quad (9)$$

此式就是利用横向光泵浦反射镜法测量增益系数的计算公式。

横向光泵浦反射镜法测量增益系数有如下一些特点: (1) 可以避免共上能级三能级二聚物蒸气介质中喇曼增益的影响, 测得单纯由粒子数反转造成的增益系数; (2) 横向光泵浦在测量轴线上实现均匀泵浦, 从而可在已知反转粒子数情况下求得跃迁的受激发射截面, 或者可在已知受激发射截面时求得反转粒子数; (3) 对具有较宽光谱范围的介质可方便地一次测得整个谱区各个频率处的增益系数, 将其与吸收系数相比较, 就能了解可能产生激光振荡的光谱区域; (4) 容易准确确定激活区长度(即泵浦光宽度), 从而得到增益系数而不仅仅是单程增益; (5) 实验装置简单, 避免了探束放大法中对探束激光器的苛刻要求, 对难以找到对应探束激光的光谱区显得尤其优越; (6) 对脉冲激励, 适当调整反射镜位置则可解决探测光与泵浦光的同步问题; (7) 由于探测光是反射镜反回的荧光, 无需象探束放大法中那样与激光介质光隔离; (8) 对自发辐射噪声较大的介质更为适宜。

四、 $\text{Na}_2 B^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$ 跃迁增益系数测量

图 5 是测量 $\text{Na}_2 B^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$ 跃迁增益系数的实验装置示意图。用 EMG 201MSO 型 XeCl 准分子激光器泵浦的 FL 2002 E 型染料激光作为泵浦源, 染料为香豆素 102。染料激光经扩束望远镜变成直径为 35 mm 的平行光束, 直接入射到十字型热管炉的矩形窗口 ($l \times 2b = 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$)。光信号接收及处理系统为 OMA-II 光学多道分析仪(光谱分辨率

为 0.5 nm), 其入射狭缝前放置一个孔径为 10 mm 的光阑 S_1 和一个焦距为 50 mm 的柱面会聚透镜 L , 反射镜 M 是直径 33 mm 的平面铝反射镜, 其反射率为 0.91。光阑 S_1 和反射镜 M 到热管炉中心的距离分别为 $D=1540$ mm 和 $d=370$ mm。此实验系统满足条件(6)、(7)和(8)式。

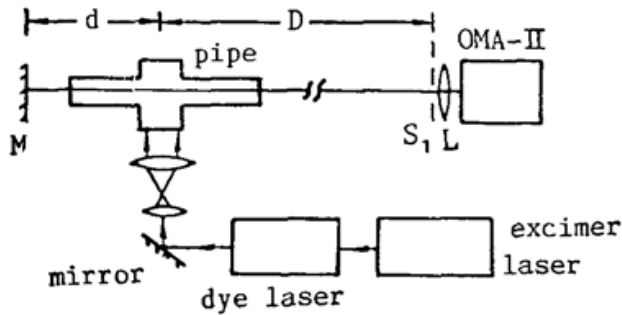


Fig. 5 Experimental setup for the measurement of gain coefficient in $\text{Na}_2B^1\Pi_u-X^1\Sigma_g^+$ transition

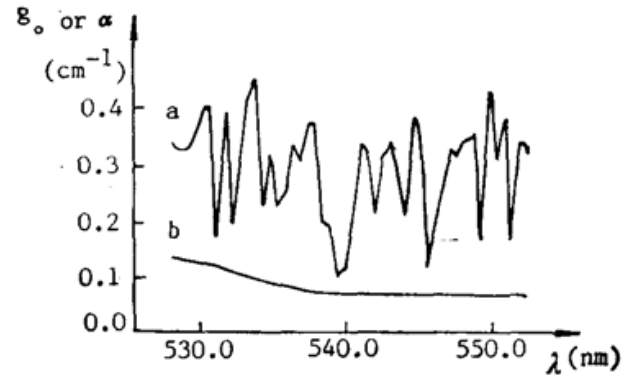


Fig. 6 (a) Gain and (b) absorption coefficients in $\text{Na}_2B^1\Pi_u-X^1\Sigma_g^+$ transition at 640°C temperature, 10 torr argon buffer gas, and 488.00 nm excitation wavelength

实验中热管炉填充 10 torr ($1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$) 氩缓冲气体, 用染料激光 488.00 nm 波长泵浦钠蒸气, 入射到热管炉窗口的泵浦能量密度为 $39.7 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。由 OMA-II 光学多道分析仪分别测得 I_l 和 I_{2l} , 根据(9)式得到 $\text{Na}_2B^1\Pi_u-X^1\Sigma_g^+$ 跃迁的增益系数, 如图 6 所示, 其中曲线 a 是 640°C 时的增益系数, 曲线 b 是吸收系数^[11]。在 530 nm~550 nm 光谱区域内增益系数始终大于吸收系数, 这表明此谱区是可能实现激光振荡的。

五、结 论

对共上能级三能级二聚物蒸气激光介质系统, 喇曼增益的影响十分显著, 利用横向光泵浦反射镜法可以避免其影响, 测得通常意义的单纯由粒子数反转产生的增益系数。同时, 横向光泵浦反射镜法对其它介质系统的增益系数测量同样适用。并具有实验装置简单, 方便快捷等特点。

参 考 文 献

- [1] 马祖光主编;《激光实验方法》, (上海科学技术出版社, 1987年), 163.
- [2] J. T. Bahna *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**, No. 9 (May), 826.
- [3] B. Wellegehausen; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1979, **QE-15**, No. 10 (Oct), 1108.
- [4] A. Dienes *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1973, **QE-9**, 833.
- [5] P. W. Smith *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, **QE-11**, 84.
- [6] C. V. Shank; *Rev. Mod. Phys.*, 1975, **47**, 649.
- [7] G. Marowsky *et al.*; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 1, 138.
- [8] A. W. Johnson *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**, No. 11, 4870.
- [9] W. Ernst *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **QE-16**, No. 9, 945.
- [10] F. K. Tittel *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**, No. 12, 2368.
- [11] 吕志伟; 哈尔滨工业大学研究生论文, 1987年, p. 80.

Measurement of gain coefficient in dimer vapor of three-level system

LU ZHIWEI, WANG QI AND MA ZUGUANG

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

(Received 6 August 1990; revised 5 November 1990)

Abstract

The method of gain coefficient measurement and the experimental calculating formula are given in this paper for dimer vapor of three-level system to measure the gain coefficient resulted only from the population inversion. And the gain coefficient in $\text{Na}_2B^1\Pi_u-X^1\Sigma_g^+$ transition was measured experimentally.

Key words: gain coefficient, dimer, three-level system.

“中国光学文献数据库”通过中国科学院院级鉴定并开始对用户服务

1991年3月2日,中国科学院技术科学局在长春光机所主持召开了“中国光学文献数据库”项目鉴定暨验收会。该项目是国家七·五重点项目——“科学数据库及其信息系统”中专业库之一。由长春光机所负责,联合上海光机所、上海技物所、成都光电所、西安光机所、安徽光机所和南京天文仪器厂共同完成。

鉴定委员会和验收专家组在听取了有关报告,观看了现场系统演示后,经过分析评议,一致认为“中国光学文献数据库”完成了合同要求的各项指标,该库利用中国科学院在光学领域的优势,采取联合方式建成了中国光学和相关领域专业复盖面较全的光学数据库,具有较高权威性和实用性,数据库管理严格,总体质量高,填补了我国这一领域的空白,在国内处于领先水平。

该数据库收录了自1985年以来发表在国内500余种发行的科技期刊、会议录、学位论文、图书以及专利上的中国作者的最新文献记录20017篇,内容包括光学基础理论、光度学、色度学、辐射与发光、几何光学、物理光学、光谱学、激光、非线性光学、信息光学、集成光学、纤维光学、薄膜光学、摄影、光电技术和器件、光学测试材料和工艺、光学仪器和光学应用等。年更新量约4000余篇,全部有文摘,题目中英文对照,用数据库自编的“光学叙词表”标引。通过严格的文献加工以保证质量,并遵循国家有关标准和规范。用CDS/ISIS通用检索软件在AST/286微机上实现建库,可同时对主题词、自由词、作者、作者单位、文献分类、期刊名称等12种途径作检索。

自1990年1月以来“中国光学文献数据库”已为30余个用户试检索,效果甚佳。为进一步开发和利用本数据库,更好为国民经济建设服务,数据库编辑部决定对外提供包括课题论证、查新、新产品开发等在内的全面情报检索服务,欢迎广大用户使用“中国光学文献数据库”。

编辑部地址: 中国科学院长春光机所情报室

邮 编: 130032

联 系 人: 赵桂云

“中国光学文献数据库”编辑部

1991年3月