

若丹明 6G 共振增强苯(C₆H₆)的受激拉曼 散射实验研究*

程娟^{1,2} 贺应红¹ 左浩毅¹ 杨经国^{1,**}

(1 四川大学物理系, 成都 610064)

(2 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要 报道了若丹明 6G 乙醇溶液中苯的受激拉曼散射 Stokes 波共振放大的实验研究. 在特定的染料溶液浓度下, 1 阶、2 阶 Stokes 波得到有效放大, 放大倍数分别为 3.81 和 6.1. 对荧光共振放大 SRS 的物理机制进行了分析讨论.

关键词 若丹明 6G(R6G); 苯(C₆H₆); 受激拉曼散射(SRS); 共振增强

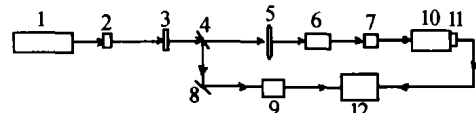
中图分类号 O437.3 **文献标识码** A

0 引言

受激拉曼散射扩大了相干光辐射的物理机制, 丰富了受激发射的波长, 开拓了强光与物质相互作用的新领域, 提供了探索物质结构的新途径, 在激光物理及其应用研究中具有重要意义^[1-3]. 若丹明 6G 或若丹明 B 溶于乙醇溶液后荧光光谱范围很宽, 且荧光增益高, 在可调谐染料激光领域得到广泛应用^[4-7]. 钟先琼等在液态苯中加入 R6G 后得到了苯的 1 阶 Stokes 波的有效放大, 最大增强因子 3.2^[8], 但由于散射池较长(池长 20cm), 受染料自吸收作用影响, 染料浓度不能过高, 且该方法需要荧光介质与 SRS 介质互溶. 程娟等在共线配置条件下实现了分离放置的 R6G 染料中 CS₂ 受激拉曼散射的高效放大^[9]. 但 CS₂ 是一种非线性极化率较大的介质, 它的强烈自聚焦往往使得各阶 Stokes 波难于稳定输出. 苯的受激拉曼散射阈值较 CS₂ 高, 在相互作用长度足够长时, 能够较 CS₂ 更稳定的产生 SRS, 此外苯的喇曼频移 992 cm⁻¹, 在 532 nm 激光泵浦下, 其 1 阶、2 阶 Stokes 波波长分别为 561.6 nm 和 594.7 nm, 处于若丹明 6G 乙醇液的荧光谱峰值波长附近, 当 Stokes 光经过染料池时, Stokes 波和染料荧光的相互作用, 可获得二波近共振耦合, 实现 Stokes 波的共振放大. 本文报道 R6G 乙醇溶液中苯的受激拉曼散射的共振增强研究的实验结果, 在 4 × 10⁻⁵ mol/L 染料浓度下, 1 阶 Stokes 波增益达 3.81; 当染料溶液浓度为 1 × 10⁻³ mol/L 时, 2 阶 Stokes 波增益达最大值为 6.1, 并对 SRS 的荧光共振机制进行了讨论.

1 实验及主要实验结果

实验光路如图 1. 由 Nd:YAG 激光器产生的 1.06 μm 激光经 KDP 晶体倍频, 出射的 532 nm 激光泵浦散射介质 C₆H₆ 产生受激拉曼散射, 从散射池(池长 5cm)中出射的 Stokes 光和剩余的 532 nm 激光进入 R6G 液池(长 1 cm), 在荧光液池中, C₆H₆ 的 1 阶、2 阶 Stokes 波与 R6G 荧光耦合获得有效放大. 出射光谱由光栅多色仪色散, CCD 探测器探测, CCD 输出信号经 A/D 变换后进入计算机, 在专用软件控制下进行光谱的显示、存储和分析. 光电二极管用于系统同步.



- 1. 1.06 μm Nd:YAG laser
- 2. KDP frequency-doubled crystal
- 3. Filter (1.06 μm highly reflective and 532 nm antireflective)
- 4. Beam splitter
- 5. Focusing lens ($f = 100$ mm)
- 6. Raman cell of C₆H₆ ($l = 50$ mm)
- 7. Fluorescence cell ($l = 10$ mm)
- 8. Full reflector
- 9. Photo diode
- 10. Grating spectrograph
- 11. CCD detector
- 12. Microcomputer

图 1 实验装置

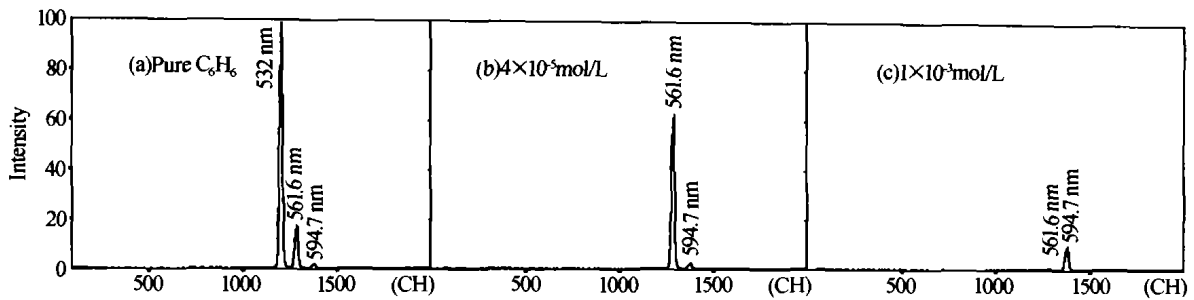
Fig. 1 Experimental setup

用采样平均法(50 次平均)收集光谱. 若丹明 6G 乙醇液浓度分别从 1 × 10⁻⁵ mol/L 增加到 1 × 10⁻² mol/L. 若丹明 6G 乙醇液对 C₆H₆ 的 SRS 谱线增强作用见图 2. 图 2(a) 为纯 C₆H₆ 的 SRS 谱, 图 2(b)、2(c) 分别为 R6G 乙醇液浓度为 4 × 10⁻⁵ mol/L 和 1 × 10⁻³ mol/L 时 C₆H₆ 的 SRS 增强谱. 由图 2 可知, 在纯 C₆H₆ 情形, 泵浦光(532 nm) 相对强度接近 100%, Stokes 波强度则随着阶次的升高而下降, 加上不同浓度的 R6G 染料溶液后, 1 阶(561.6 nm), 2 阶(594.7 nm) Stokes 波都得到了不同程度的增强, 在溶液浓度为 4 × 10⁻⁵ mol/L 时, 第 1 阶 Stokes 线增强最佳, 此时泵浦激光由于染料的吸收作用消失(图 2(b)); 当浓度为 1 × 10⁻³ mol/L 时, 1 阶 Stokes 波几乎耗尽, 2 阶得到充分放大(图 2(c)).

*国家自然科学基金(编号:60078020, 60478044)和国防科
技重点实验室基金资助(编号:00JS75.3.1.JW1906)项目

**Tel:028-85412787 Email: yangjingguo@hotmail.com

收稿日期:2004-02-10

图2 若丹明6G乙醇溶液对C₆H₆的SRS谱线增强作用Fig. 2 Enhancement of SRS of C₆H₆ by using R6G in ethanol

定义C₆H₆的受激拉曼散射Stokes波放大因子为 $a_n = I_{n0} / I_{n00}$ 。其中,下标n表示第n阶Stokes谱线; I_{n0} 为通过荧光介质后C₆H₆第n阶Stokes谱线的强度; I_{n00} 为纯C₆H₆第n阶Stokes谱线强度。不同浓度的染料荧光对C₆H₆的SRS不同阶次Stokes波的放大作用见图3。

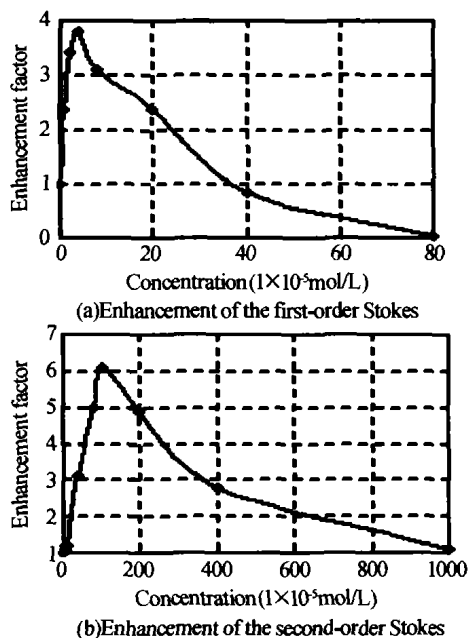


图3 若丹明6G乙醇溶液对苯的SRS各阶Stokes波的增强因子

Fig. 3 Enhancement factor of SRS of C₆H₆ by using R6G in ethanol

图3(a)、3(b)分别表示1阶、2阶Stokes波强度的放大因子随R6G浓度变化关系曲线,图中横坐标表示染料溶液浓度,纵坐标表示Stokes谱线放大因子。

由图3(a)可知,当染料溶液浓度从0增加到 4×10^{-5} mol/L时,C₆H₆的1阶Stokes谱线有明显增强;在 4×10^{-5} mol/L时,第1阶Stokes线强度增长到最大值,是没有R6G时的3.81倍。浓度继续增加,Stokes波的增益因子开始减小,在 8×10^{-4} mol/L时,增益因子仅为0.04,在 1×10^{-3} mol/L时,1阶Stokes波几乎耗尽,2阶得到充分放大。由图3b可知,C₆H₆的2阶Stokes波在染料溶液浓度为 1×10^{-3} mol/L时增益最大(6.1),随后开始下降,在 1×10^{-2} mol/L时几乎没有放大。

2 结论及讨论

实验结果表明,C₆H₆的1阶、2阶Stokes波都得到了明显增强,且增强效果与染料溶液浓度密切相关。随着染料浓度的逐渐增大,C₆H₆的1阶Stokes波相对强度先是逐渐增强,然后开始减弱,直至消失;在染料浓度为 4×10^{-5} mol/L时,1阶Stokes波增益达最大值3.81,而在 1×10^{-3} mol/L时,1阶Stokes波被耗尽;C₆H₆的2阶Stokes波在染料溶液浓度为 1×10^{-3} mol/L时增益最大达6.1倍,随后开始下降,在 1×10^{-2} mol/L时几乎不再被放大。

532 nm泵浦激光激发苯产生SRS后,剩余泵浦光和Stokes波一起进入R6G染料溶液。在泵浦光作用下,染料(R6G)被激发至亚稳能级而成为激活介质,当Stokes信号通过该激活介质时,激发态荧光介质在入射光信号作用下产生受激辐射使入射光得到增强。

若某种拉曼散射液体的某阶Stokes谱线落入某种染料荧光的谱带内,而激发谱线落入该荧光物质的吸收带内,则染料荧光可选择增强相应波长的Stokes谱线。R6G乙醇溶液的荧光谱宽度为550~700 nm,染料浓度在 3×10^{-5} mol/L和 1×10^{-3} mol/L范围内时,染料激光可在波长为558~597 nm范围内调谐,因此苯的1阶、2阶Stokes波(波长分别为561.6 nm和594.7 nm)均处于R6G乙醇液的荧光谱峰附近。图4为不同浓度的R6G乙醇溶液吸收谱,从图中可以看出,532 nm的泵浦光处于R6G乙醇液吸收谱的吸收峰处。当C₆H₆的SRS信号光通过R6G乙醇液时,Stokes波长处的强荧光与自发拉曼光一起作为种子光,在与C₆H₆及激发光的相互作用中迅速增长,染料分子受泵浦光激发形成粒子数反转,则已初步增长的Stokes光反过来诱导处于高能级的染料分子使其产生受激辐射,从而使Stokes光进一步得到放大,结果染料激光与C₆H₆的Stokes光相互促进,形成共振增强。532 nm泵浦光激发 4×10^{-5} mol/L浓度的R6G染料溶液产生的染料激光波长为560.48 nm, 1×10^{-3} mol/L时的波长为575 nm,分别和C₆H₆的1阶、2阶Stokes波接近,此时Stokes波和染料激光产生共振,Stokes波增益最大。

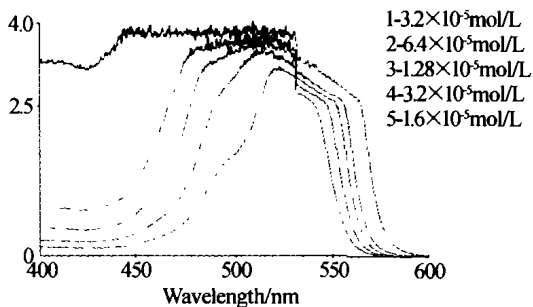


图4 若丹明 6G 乙醇溶液的吸收谱

Fig. 4 Absorption spectra of R6G in ethanol

从图 4 还可看出,若丹明 6G 对于入射泵浦波和 Stokes 波长处的激光均有吸收,且在 C_6H_6 的 1 阶 Stokes 波长处的吸收系数随着染料溶液浓度的增加而迅速增大,在 1.6×10^{-3} mol/L 浓度时吸收系数高达 2.736. 这样,泵浦波本身的降低及 Stokes 波的降低均会使 1 阶 Stokes 波在染料溶液浓度高于 4×10^{-5} mol/L 时大为降低,以致在 1×10^{-3} mol/L 时被耗尽;另外,随着染料浓度的增大,染料分子间的间距变小,相互作用增大,从而使荧光上能级寿命降低,荧光强度减弱,这也将导致 Stokes 光的减弱. 在染料浓度低于 1×10^{-3} mol/L 时,第 2 阶 Stokes 波长处的吸收系数很小, 1.6×10^{-3} mol/L 浓度时为 0.044,高于此浓度时,R6G 对第 2 阶 Stokes 波的吸收将会增强,因此在染料浓度低于 1×10^{-4} mol/L 时,第 2 阶 Stokes 波的变化并不明显,而在 1×10^{-3} mol/L 时增益达最大值 6.1,高于此浓度后,第 2 阶 Stokes 波开始减弱.

SRS 的 Stokes 波频率随散射介质的不同而变化,Stokes 波的脉冲宽度较荧光窄,具有确定波长、很窄线宽、光谱强度高、光束质量好及光束发散度小等特点. 荧光的共振增强明显提高了 SRS 的转换效率,增强了 SRS 作为实用化可调谐激光光源的能力.

参考文献

- 1 刘湘秋,蒲继雄. 利用受激喇曼散射稳定超短光脉冲能量. 光电子·激光,1997,8(4):284~286
Liu X Q, Pu J X. *Optoelectronics · Laser*, 1997, 8(4):284~286
- 2 李宏,杨祥林. 分布式 EDFA 中受激喇曼散射对光子脉冲传输的影响. 光子学报,1997,26(7):613~617
Li H, Yang X L. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(7):613~617
- 3 杜戈果,阮双琛,苏红新,等. 单模石英光纤中受激喇曼散射的研究. 光子学报,2004,33(8):923~926
Du G G, Ruan S C, Su H X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8):923~926
- 4 陈日升,谢全新,张元芫,等. 用 Nd:YAG 激光器泵浦 Rh6G 染料溶液的实验研究. 激光与红外,2000,30(3):151
Chen R S, Xie Q X, Zhang Y R, et al. *Laser and Infrared*, 2000, 30(3):151
- 5 董文庭,顾铮琨,朱从善. 紫外波段有机染料 DMT 掺杂 SiO_2 薄膜的光谱特性. 光子学报,2000,29(4):352~357
Dong W T, Gu Z T, Zhu C S. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(4):352~357
- 6 王菊霞,杨志勇,苗润才. 自锁模钛宝石超短脉冲激光器的新进展. 光子学报,1997,26(8):752~757
Wang J X, Yang Z Y, Miao R C. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(8):752~757
- 7 贺应红,韦德行,程娟,等. 若丹明 6G 乙酸溶液中 566 nm 泵浦的高效可调谐激光输出. 激光杂志,2004,25(22):23
He Yinghong, et al. *Laser Journal*, 2004, 25(22):23
- 8 钟先琼,陈小波,靳丽红,等. 染料荧光增强苯的受激喇曼散射. 光散射学报,2000,11(4):293~296
Zhong X Q, Chen X B, Jin L H, et al. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2000, 11(4):293~296
- 9 程娟,郑玉臣,贺应红,等. R6G 染料荧光对 CS_2 受激喇曼散射的高效放大. 光散射学报,2004,15(3):282~283
Cheng J, Zheng Y C, He Y H, et al. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2004, 15(3):282~283

Enhancement of Stimulated Raman Scattering of Benzene by Using R6G dye Fluorescence

Cheng Juan^{1,2}, He Yinghong¹, Zuo Haoyi¹, Yang Jingguo¹

¹ Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064

² Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900

Received date:2004-02-10

Abstract The resonance amplify of Stokes wave of C_6H_6 is reported by using fluorescence enhancement method. With a specified concentration of R6G, the first- and second- order Stokes lines are increased respectively by 3.81 and 6.1 times relative to that of pure C_6H_6 . The physical mechanism of the resonance enhancement is discussed.

Keywords Rhodamine 6G (R6G); Benzene (C_6H_6); Stimulated Raman Scattering (SRS); Resonant Enhancement



Cheng Juan was born in 1976. She graduated from Sichuan University and had a B. S. degree in 1999, majoring in applied physics. From Jul. 1999 to Sept. 2001, she had been working on the measurement of optics and electronics in Institute of Fluid Physics, CAEP. In Jul. 2004, she had a M. E. degree of Sichuan University and majoring in majoring in light scattering. She has been doing a lot of research work in the field of "stimulated raman scattering". Now, she is working in research center of Laser Fusion, CAEP.