

布里渊增强非简并四波混频^{*}

刘 霞¹⁾ 牛金艳¹⁾ 孙 江²⁾ 米 辛¹⁾ 姜 谦¹⁾ 吴令安¹⁾ 傅盘铭¹⁾

1) 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2) (河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2007 年 12 月 21 日收到, 2008 年 3 月 30 日收到修改稿)

在 CS₂ 介质中观测到由声波引起的布里渊增强非简并四波混频(NFWM)和由分子取向栅产生的瑞利型 NFWM. 研究发现, 分子取向栅与声波之间并不是相互独立的, 声波的存在会破坏瑞利型 NFWM 和布里渊增强 NFWM 极化之间的相位关系.

关键词: 四波混频, 布里渊散射, 瑞利散射

PACC: 4265C, 4265M

1. 引 言

基于共振四波混频的非线性光谱学是研究物质能谱的有效手段, 它利用入射光与物质相互作用引起的能级跃迁使得混频信号产生共振增强, 从而获得物质的能谱. 近年来, 本课题组发展了各种不同类型的共振非简并四波混频(NFWM), 它的主要特点是采用相同的相位匹配就可以研究由不同机制产生的 NFWM. NFWM 的信号增强可来源于原子或分子的能级共振, 例如, 我们曾研究过单光子共振、双光子共振^[1]以及拉曼共振增强^[2]产生的 NFWM. 如果引入极化干涉, 还可以发展成为一种全新的时间领域光谱学方法, 即超快调制光谱学^[1,3]. 最近, 我们在双光子共振 NFWM 中引入强耦合光, 利用其产生的 Autler-Townes(AT)分裂来直接测量两个高激发态间的跃迁矩阵元^[4-6]. Zuo 等^[7]还将此方法推广到多能级系统中, 并实现了全相干的多光子共振多波混频.

NFWM 还可以研究不是由能级共振产生的信号增强. 与能级共振增强 NFWM 不同的是, 这里 NFWM 信号的增强来源于宏观效应. 例如, 在瑞利型 NFWM 中我们用两束不同频率的入射光在介质中感生出运动栅, 然后通过不同时刻建立栅之间的干涉, 得到分子取向的超快弛豫时间^[8]. 本文将研究由声

波引起的布里渊增强 NFWM. 虽然人们曾提出过不同类型的布里渊增强四波混频^[9-12], 但这些方法基本上三束入射光的频率都不相同. 本文提出的布里渊增强 NFWM 只包括两个频率, 而且具有光路简单、相位匹配容易等优点. 更重要的是, 由于在介质中瑞利型 NFWM 和布里渊增强 NFWM 同时产生, 因此可以研究这两种机制之间的相互关系. 我们发现, 分子取向栅与声波之间并不是相互独立的, 声波的存在会破坏瑞利型 NFWM 和布里渊增强 NFWM 极化之间的相位关系.

2. 理 论

NFWM 是一种有三束入射光参与的三阶非线性效应. 如图 1 所示, 光束 1 与光束 2 具有相同的频率 ω_1 并成一小角度 θ , 光束 3 沿与光束 1 相反的方向传播, 其频率为 ω_3 . NFWM 信号(即光束 4)的频率与光束 3 相同, 即为 ω_3 , 它沿与光束 2 几乎相反的方向传播.

考虑三束入射光与 CS₂ 等具有光克尔效应的介质作用. 首先考虑分子取向栅对 NFWM 的贡献. 光束 1 和光束 2 与介质的非线性相互作用会在介质中感生出静态的分子取向栅, 混频信号为光束 3 被静态栅的衍射. 其次是光束 2 和光束 3 干涉会产生以频率 $\Delta = \omega_1 - \omega_3$ 移动的干涉条纹. 如果 $|\Delta| < \Gamma_M$,

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10774185, 10574155, 60578029)和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2006CB921100)资助的课题.

[†] E-mail: pmfu@aphy.iphy.ac.cn

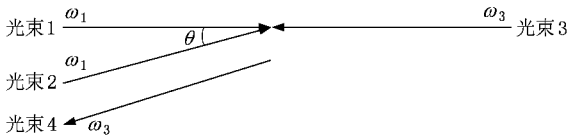


图1 NFWM 原理示意图

则光束 2 和光束 3 会在介质中感生出以频率 Δ 运动的运动栅, 光束 1 被此运动栅衍射而产生混频信号. 这里 Γ_M 为分子取向的弛豫速率. 由这两种机制产生的非线性极化强度为^[8]

$$P_M = \chi_M \left(1 + \frac{\Gamma_M}{\Gamma_M - i\Delta} \right) E_1 E_2^* E_3. \quad (1)$$

这里 χ_M 为极化率, $E_j = \epsilon_j e^{[k_j \cdot r - \omega_j t]}$ 为光束 j 的电场.

下面再考虑声波对 NFWM 的影响. 当光束 2 和光束 3 的干涉条纹的移动速度与声速匹配时会在介质中感生出声波, 光束 1 被声波衍射从而产生混频信号, 这就是布里渊增强 NFWM. 设介质密度变化 $\tilde{\rho} = \rho e^{-iq \cdot r}$, 则从声波方程出发可以得到在光束 2 和光束 3 作用下 ρ 满足下列方程^[10]:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \Gamma_B \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nu_B^2 \rho = \frac{q^2 \gamma}{8\pi} \epsilon_2^* \epsilon_3 e^{i\Delta t}. \quad (2)$$

这里 $q = k_2 - k_3$, Γ_B 和 ν_B 分别为布里渊线宽和频率, γ 为电致常数. 求解 (2) 式, 得到

$$\rho = \frac{\gamma q^2}{8\pi} \epsilon_2^* \epsilon_3 \frac{1}{\nu_B^2 - \Delta^2 + i\Delta\Gamma_B} e^{i\Delta t}. \quad (3)$$

对应的 NFWM 非线性极化强度为

$$P_B = \frac{\gamma}{4\pi\rho_0} \tilde{\rho} E_1 = \chi_B \frac{\Gamma_B^2}{\nu_B^2 - \Delta^2 + i\Delta\Gamma_B} E_1 E_2^* E_3. \quad (4)$$

这里 ρ_0 为介质的平均密度,

$$\chi_B = \frac{\gamma^2 q^2}{32\pi^2 \Gamma_B^2 \rho_0}.$$

(4) 式表明布里渊增强的共振条件为 $\Delta = \pm \nu_B$.

由 (1) 和 (4) 式得到对应于 NFWM 的总极化强度为

$$P_T = \chi_M \left(1 + \frac{\Gamma_M}{\Gamma_M - i\Delta} + \eta \frac{\Gamma_B^2}{\nu_B^2 - \Delta^2 + i\Delta\Gamma_B} \right) E_1 E_2^* E_3. \quad (5)$$

这里

$$\eta = \chi_B / \chi_M.$$

信号强度正比于 $|P_T|^2$.

3. 实验及结果

实验装置如图 2 所示. Quanta-Ray 型 Nd:YAG 激光器的二次谐波(532 nm)抽运两台染料激光器. 第一台染料激光器的波长为 586.86 nm, 它经过分束器 BS1 分为光束 1 和光束 2. 光束 1 与光束 2 分别经过延时器、全反镜 M_1 和全反镜 M_2 、分束器 BS2 后以一小角度(约 1.3°)在样品中相交. 光束 3 来源于第二台染料激光器, 它经过全反镜 M_3 和 M_4 后沿着与光束 1 相反的方向进入样品, 其波长可通过由计算机控制的步进马达来扫描. 具有频率 ω_3 的四波混频信号光是与入射光相同方向的线偏振光, 它沿与光束 2 几乎相反的方向传播, 通过 BS2 及全反镜 M_5 后被光电二极管 PD 探测, 然后引入信号平均器进行数据平均, 探测器前加了偏振片 P . 两台染料激光器的线宽均为 0.007 nm, 脉冲宽度为 5 ns, 出射激光分别通过格兰棱镜 GP1 和 GP2, 三束入射光具有相同的偏振. 我们所用的样品是 CS_2 , 装于一个厚度为 10 mm 的样品池中.

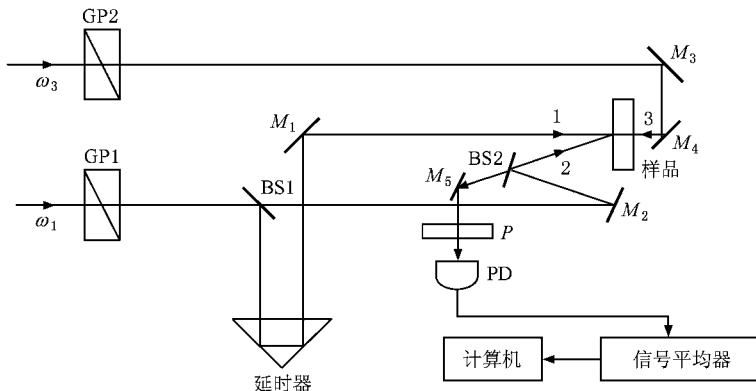


图2 实验装置示意图

图 3 给出了 NFWM 信号强度随 Δ 变化的实验结果.从图 3 可以看出,NFWM 频谱明显由两部分组成,其中宽带线型来源于瑞利型 NFWM 的贡献,而在 $\Delta \approx 0 \text{ cm}^{-1}$ 附近的两条共振线来源于布里渊增强 NFWM.首先,我们用(5)式对实验结果进行拟合,图 3(a)的实线为拟合曲线,采用的拟合参数为 $\eta = 6.5$, $\chi_M = 0.3$, $\Gamma_M = 1.5 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$, $\Gamma_B = 0.3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, $\nu_B = 0.9 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$.与实验结果比较,理论曲线中布里渊增强的两个共振峰旁存在凹陷,它来源于瑞利型 NFWM 和布里渊增强 NFWM 之间的相消干涉,而我们的实验表明并不存在这种干涉.为了解释

实验结果,我们假设瑞利型 NFWM 和布里渊增强 NFWM 的非线性极化之间的相位是混乱的,因此总信号强度可写为

$$I \propto \left| 1 + \frac{\Gamma_M}{\Gamma_M - i\Delta} \right|^2 + \left| \eta \frac{\Gamma_B^2}{\nu_B^2 - \Delta^2 + i\Delta\Gamma_B} \right|^2. \quad (6)$$

图 3(b)中的实线为用(6)式拟合的结果,采用的拟合参数为 $\eta = 3.5$, $\chi_M = 0.3$, $\Gamma_M = 1.5 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$, $\Gamma_B = 0.66 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, $\nu_B = 0.9 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$.理论与实验结果符合很好,它表明由于声波的存在会破坏瑞利型 NFWM 和布里渊增强 NFWM 极化之间的相位关系.

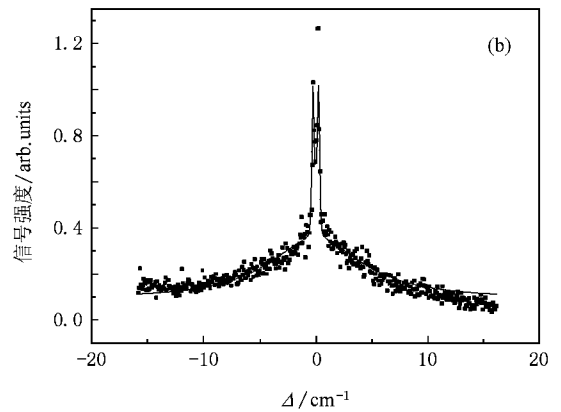
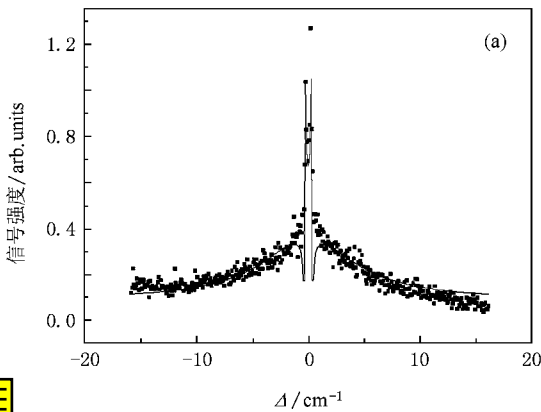


图 3 CS_2 中的 NFWM 频谱 数据点为实验值,曲线为拟合值.(a)由(5)式拟合,(b)由(6)式拟合

4. 结 论

本文研究由声波引起的布里渊增强 NFWM.由于在介质中瑞利型 NFWM 和布里渊增强 NFWM 同时产生,因此可以研究这两种机制之间的相互关系.实验

发现,分子取向栅与声波之间并不是相互独立的,声波的存在会破坏瑞利型 NFWM 和布里渊增强 NFWM 极化之间的相位关系.另外,我们可以将过去研究 NFWM 时发展的一些特殊方法应用于布里渊增强 NFWM 中.例如,用极化干涉对信号进行相敏测量^[13],用光延时方法消除由吸收产生的热背底^[14].

- [1] Fu P M, Mi X, Yu Z H, Jiang Q, Zhang Y B, Li X F 1995 *Phys. Rev. A* **52** 4867
- [2] Yu Z H, Min X, Jiang Q, Li X F, Fu P M 1997 *Phys. Rev. A* **55** 2334
- [3] Fu P M, Yu Z H, Mi X, Li X F, Jiang Q 1994 *Phys. Rev. A* **50** 698
- [4] Sun J, Zuo Z C, Mi X, Yu Z H, Jiang Q, Wang Y B, Wu L A, Fu P M 2004 *Phys. Rev. A* **70** 053820
- [5] Zuo Z C, Sun J, Liu X, Wu L A, Fu P M 2007 *Phys. Rev. A* **75** 023805
- [6] Zuo Z C, Sun J, Liu X, Mi X, Yu Z H, Jiang Q, Wu L A, Fu P M 2007 *Chin. Phys.* **16** 1042
- [7] Zuo Z C, Sun J, Liu X, Jiang Q, Fu G S, Wu L A, Fu P M 2006

Phys. Rev. Lett. **97** 193904

- [8] Fu P M, Jiang Q, Mi X, Yu Z H 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 113902
- [9] Skeldon M D, Narum P, Boyd R W 1987 *Opt. Lett.* **12** 343
- [10] Narum P, Gaeta A L, Skeldon M D, Boyd R W 1988 *J. Opt. Soc. Am. B* **5** 623
- [11] Scott A M, Hazell M S 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **22** 1248
- [12] Gaeta A L, Boyd R W, Ackerhalt J R, Milonni P W 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2432
- [13] Mi X, Yu Z H, Jiang Q, Wang Y B, Wang L J, Fu P M, 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1543
- [14] Sun J, Jiang Q, Yu Z H, Min X, Fu P M 2003 *Opt. Commun.* **223** 187

Brillouin-enhanced nondegenerate four-wave mixing^{*}

Liu Xia¹⁾ Niu Jin-Yan¹⁾ Sun Jiang²⁾ Mi Xin¹⁾ Jiang Qian¹⁾ Wu Ling-An¹⁾ Fu Pan-Ming^{1)†}

¹ *Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

² *College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China*

(Received 21 December 2007 ; revised manuscript received 30 March 2008)

Abstract

We have observed Brillouin-enhanced nondegenerate four-wave mixing (NFWM) induced by an acoustic wave and Rayleigh-type NFWM induced by molecular reorientation in CS₂. It was found that the acoustic wave and the molecular reorientation grating are not mutually independent. The existence of the acoustic wave destroys the phase coherence between the polarizations of the Rayleigh-type NFWM and the Brillouin-enhanced NFWM.

Keywords : four-wave mixing , Brillouin scattering , Rayleigh scattering

PACC : 4265C , 4265M

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10774185 , 10574155 , 60578029) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB921100).

[†] E-mail : pnmfu@aphy. iphy. ac. cn