

激光感生双光栅中频谱分辨率的研究*

姜 谦 俞祖和 米 辛 傅盘铭

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘 要 研究了用于测量两束光频差的时间延迟激光感生双光栅的频谱分辨率, 确定了当泵浦光具有高斯线型时四波混频信号的产生条件, 此条件通过在可调谐的窄带激光和宽带激光间的拍频实验得到证实。

关键词 激光感生光栅, 时间延迟, 四波混频。

1 引 言

时间延迟四波混频(FWM)在过去曾被广泛的研究过, 近来作者使用由热效应引起的时间延迟激光感生双光栅(TDLIDG)方法测量了两束光的频差^[1, 2], 测量精度取决于激光的线宽。时间延迟激光感生双光栅还与能精确测量原子能级分裂的相位共轭超快调制光谱学有关^[3]。从实用角度看, 作为一种测量频差的方法了解这种新技术的频谱分辨率是很重要的。这里确定了当泵浦光的线型是高斯型时产生四波混频信号调制的条件, 此条件通过在可调谐的窄带激光和宽带激光间的拍频实验得到证实。

2 理 论

时间延迟激光感生双光栅的原理描述如下: 考虑激光感生光栅的实验, 如果泵浦光(光束 1 和光束 2)包括两个不同的频率分量 ω_1 和 ω_2 , 则 ω_1 和 ω_2 将各自在介质中感生出热栅 G_1 和 G_2 , 四波混频信号是频率为 ω_3 的探测光被热栅衍射的结果。这里光束 1 和 2 之间具有一很小的角度, 而光束 3 和 4 几乎沿光束 1 和 2 的反向前进。通过研究四波混频信号强度随 1, 2 两束光间相对延迟 τ 的关系, 由于热栅 G_1 和 G_2 间的空间干涉, 当延迟 τ 改变时四波混频信号强度以 $2\pi|\omega_1 - \omega_2|^{-1}$ 的周期被调制, 因此这种方法可用于测量两束光的频差。

考虑用时间延迟激光感生双光栅方法做频差测量时的频谱分辨率, 首先, 由于激光相位的随机起伏, 混频信号调制的幅度随延时 $|\tau|$ 的增加而减小^[2]。设 τ_c 是调制幅度的衰变时间数。则最大时间延迟等于 $2\tau_c$ 。对高斯线型来说, 混频信号强度随 τ 的关系为^[4]:

$$I(\tau) \propto \exp \left[- (1/2) (\alpha_1 \tau / \sqrt{\ln 2})^2 \right] + \gamma^2 \exp \left[- (1/2) (\alpha_2 \tau / \sqrt{\ln 2})^2 \right] + 2\gamma \exp \left[- (\alpha_1 \tau / 2 \sqrt{\ln 2})^2 \right] \exp \left[- (\alpha_2 \tau / 2 \sqrt{\ln 2})^2 \right] \cos (\omega_c \tau + \phi), \quad (1)$$

* 国家自然科学基金, 攀登计划和中国科学院院长基金资助项目。

收稿日期: 1994 年 10 月 17 日

式中 $\omega_4 = \omega_1 - \omega_2$; $\alpha_i = \delta\omega_i/2$, $\delta\omega_i$ 是频率为 ω_i 的激光线宽。 γ 与两频率分量 ω_1 和 ω_2 的光强比有关, 而 ϕ 为一相位因子。由(1)式得到调制振幅的衰变时间常数:

$$\tau_d = 4 \sqrt{\ln 2} [(\delta\omega_1)^2 + (\delta\omega_2)^2]^{-1/2} \quad (2)$$

为了观察到拍频, 必须在时间延迟范围内看到混频信号强度随时延变化而产生的调制。通过数值计算可以得到产生拍频的条件是最大时间延迟 $2\tau_d$ 约大于一个半调制周期, 即 $3\pi/\omega_4$ 。因此产生混频信号调制的条件为:

$$|\omega_1 - \omega_2| \geq 3\pi/8 \sqrt{\ln 2} [(\delta\omega_1)^2 + (\delta\omega_2)^2]^{1/2} \quad (3)$$

3 实验装置和结果

实验装置如图 1 所示。样品是恶嗪染料的乙醇溶液(2×10^{-4} mole)。一台 YAG 激光器的二次谐波用来泵浦两台染料激光器 DL_1 和 DL_2 以产生 ω_1 和 ω_2 的激光。第一台是若丹明 640 激光器。为获得宽带激光, 使用一端为全反射镜而另一端为 8% 反射率输出镜的激光腔形式。输出中心频率为 607 nm, 线宽为 4.3 nm。第二台是线宽 0.01 nm 的可调谐窄带染料激光器。两束光都具有 5 ns 的脉宽。通过格兰棱镜 GP_1 和 GP_2 使光场为垂直偏振, 分束片 BS_1 的作用是获得包含 ω_1 和 ω_2 频率分量的泵浦光(光束 1 和光束 2)。束 1 和束 2 以 1.5° 的小角度入射, 其相对延迟 τ 通过由步进马达控制的光延时器(ODL)来改变。实验时可使 DL_1 和 DL_2 的输出能量尽可能低($50 \mu\text{J}$)以使其产生的热栅不致于饱和。泵浦光的光斑直径约为 1 mm。探测光(光束 3)来源于 YAG 激光器的二次谐波。它沿光束 1 的反向前进。光束 3 在样品上的光斑直径小于 0.1 mm。四波混频信号(光束 4)沿光束 2 的相反方向前进。这里探测光与信号光均为水平偏振。混频信号经光电二极管接收后送到信号平均器进行平均, 再送入微机进行数据处理。微机同时用来控制步进马达以改变光束 1, 2 间的相对延迟。

实验测量混频信号强度与泵光相对延迟 τ 的关系。图 2 和图 3 是当 $\lambda_2 - \lambda_1$ 分别为 15 nm

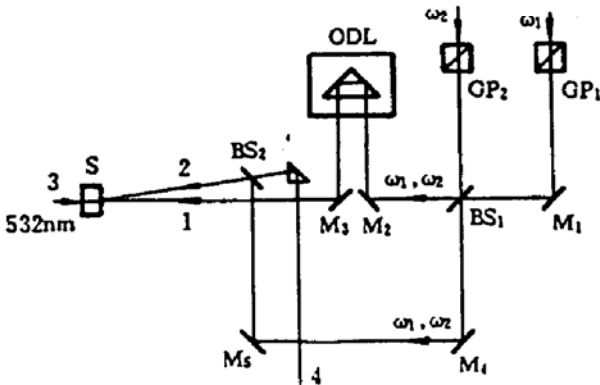


Fig.1 Experimental setup. BS's, beam splitter; M's, Mirrors; GP's, Glan prisms; ODL, optical delay line; S, sample

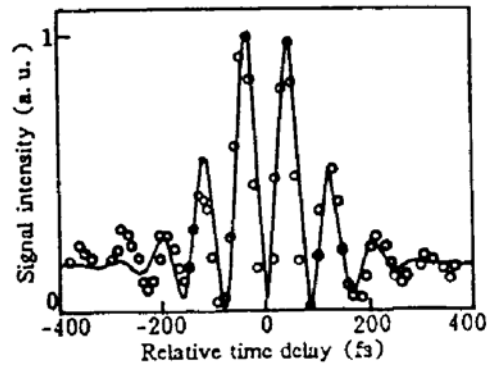


Fig. 2 FWM signal intensity versus relative time delay for $\lambda_2 - \lambda_1 = 15$ nm. The solid curves are the theoretical curves with parameters: $a_1 = 1.1 \times 10^{13} \text{ sec}^{-1}$, $a_2 = 2.8 \times 10^{10} \text{ sec}^{-1}$, $\omega_4 = 7.57 \times 10^{13} \text{ sec}^{-1}$, $\gamma = 0.67$, $\phi = 162^\circ$

和 6.9 nm 时的结果。用(1)式来拟合数据。采用参数为 $a_1 = 1.1 \times 10^{13} \text{ sec}^{-1}$, $a_2 = 2.8 \times 10^{10} \text{ sec}^{-1}$, 而对图 2 为 $\omega_4 = 7.57 \times 10^{13} \text{ sec}^{-1}$, $\gamma = 0.67$, $\phi = 162^\circ$ 。对图 3 $\omega_4 = 3.40 \times 10^{13} \text{ sec}^{-1}$, $\gamma = 0.32$, $\phi = 137^\circ$ 。图 2 及 3 的实线为理论曲线。图 3 中能看到清楚的调制信号, ω_4 与公式

(3) 中 $(3\pi/8 \sqrt{\ln 2})[(\delta\omega_1)^2 + (\delta\omega_2)^2]^{1/2}$ ($\approx 3.2 \times 10^{13} \text{sec}^{-1}$) 值接近, 这里必须指出, 在实际的实验条件下频谱分辨率也会受相位因子 ϕ 的影响。假设泵浦光具有高斯线型。采用下列参数: $a_2/a_1 = 1$, $\gamma = 1$, $\omega_4/a_1 = 3\pi/\sqrt{8 \ln 2}$ (对应于 $2\tau_4 = 3\pi/\omega_4$) 计算四波混频信号强度随 $a_1\tau$ 的关系。图 4 为计算结果。图中的实线和点线分别对应于 $\phi = 0$ 和 $\phi = \pi$ 的情形。如果考虑到实

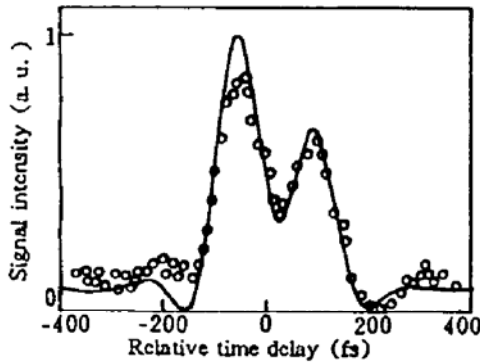


Fig. 3 FWM signal intensity versus relative time delay for $\lambda_2 - \lambda_1 = 6.9 \text{ nm}$. The solid curves are the theoretical curves with parameters: $a_1 = 1.1 \times 10^{13} \text{sec}^{-1}$, $a_2 = 2.8 \times 10^{10} \text{sec}^{-1}$, $\omega_4 = 3.40 \times 10^{13} \text{sec}^{-1}$, $\gamma = 0.32$, $\phi = 137^\circ$

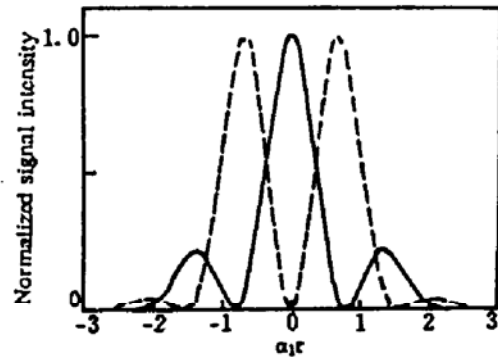


Fig. 4 Theoretical curves of the normalized FWM signal intensity versus $a_1\tau$. Parameters: $a_2/a_1 = 1$, $\gamma = 1$, $\omega_4/a_1 = 3\pi/\sqrt{8 \ln 2}$ and $\phi = 0$ (solid curve), π (dashed curve)

验中存在噪声, 当 $\phi = \pi$ 时时间延迟激光感生双光栅可得到更好的结果。如文献[2]所证实的, 如果 ω_1 及 ω_2 分量的光分别为垂直及水平偏振。可以置一光楔的 C 轴沿水平取向的巴俾涅-索累补偿器于光路中。通过改变补偿器的有效厚度, 相位因子 ϕ 可连续改变。

参 考 文 献

- [1] X. Mi, Q. Jiang, Z. Yu *et al.*, Observation of the beat between two independent light sources by a method of time-delayed laser-induced double gratings. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(19): 1526~1528
- [2] X. Mi, Z. Yu, Q. Jiang *et al.*, Time-delayed laser-induced double gratings. *J. Opt. Soc. Am(B)*, 1993, **B10**(4): 725~732
- [3] P. Fu, Z. Yu, X. Mi *et al.*, Doppler-free ultrafast modulation spectroscopy with phase-conjugation geometry. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **A50**(1): 698~708
- [4] Yu Zuhe, Jiang Qian, Mi Xin *et al.*, Observation of beating between broadband lights. *Chin. Phys. Lett.*, 1995, **12**(3): 164~166

Spectral Resolution of Time-Delayed Laser-Induced Double Gratings

Jiang Qian Yu Zuhe Mi Xin Fu Panming

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Received 17 October 1994)

Abstract We have studied the spectral resolution of the time-delayed laser-induced double gratings used for measuring the frequency difference between two lights. The condition for the occurrence of the FWM signal modulation is established when the pump beams have Gaussian lineshape, which has been verified experimentally through the study of beating between a tunable narrow-band laser beam and a broadband laser beam.

Key words laser-induced grating, time-delay, four-wave mixing.